B1-5/DTS/05

I ponteggi metallici di facciata utilizzati nei cantieri temporanei o mobili.
Le nuove norme di prodotto: aspetti tecnici e legislativi

Relazione finale

Autori: N. Baldassino, R. Zandonini

Affiliazione: Università degli Studi di Trento
Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale

Ricerca finanziata da:

Dipartimento Tecnologie di Sicurezza

10/02/2009

INDICE

1. IL PROGETTO DI RICERCA **1**

1.1 La progettazione dei ponteggi: criteri operativi e aspetti critici **1**

1.2 I contenuti del lavoro **2**

2. LA CARATTERIZZAZIONE DEL SISTEMA DI CONTROVENTO DI FACCIATA **4**

2.1 L'attrezzatura di prova **4**

2.2 Il sistema di misura **5**

2.3 La campagna di indagine sperimentale **8**

2.4 Le modalità di prova **8**

2.5 Le prove effettuate e le modalità di collasso **9**

2.6 I risultati sperimentali **14**

2.7 Il modello della risposta **18**

2.7.1 Il modello della risposta secondo il documento UNI EN 12811-3:2005 [7] 19

2.7.1.1 Determinazione della resistenza caratteristica (R_k) e della resistenza di progetto (R_d) *19*

2.7.1.2 Determinazione dello scorrimento e della rigidezza *21*

2.7.1.3 I risultati delle elaborazioni *23*

2.7.1.4 Determinazione della legge globale spostamento-azione assiale *25*

2.7.1.5 La legge globale spostamento-azione assiale *28*

2.8 Considerazioni finali **31**

3. LE ANALISI NUMERICHE **32**

3.1 I casi considerati **32**

3.2 I modelli di calcolo **37**

3.2.1 Le caratteristiche generali del modello 3D 37

3.2.2 Le caratteristiche generali del modello 2D 43

3.3 Le analisi numeriche 3D e 2D **45**

3.3.1 I risultati delle analisi 3D 48

3.3.2 I risultati delle analisi 2D 57

3.3.3 Confronti tra i risultati delle analisi 3D-2D 58

3.4 Considerazioni finali **60**

4. LE ANALISI DI SENSITIVITA' **61**

4.1 L'influenza delle imperfezioni alla base **61**

4.2 L'influenza della rigidezza del sistema di impalcato **66**

4.3 L'influenza dello scorrimento iniziale del sistema di impalcato **67**

4.4 Considerazioni finali **68**

5. L'INFLUENZA DEL DIAGONALE DI FACCIATA **70**

5.1 Il modello di calcolo **70**

5.2 Le analisi numeriche **70**

5.3 Considerazioni finali **71**

6. IL MODELLO 2D DI FACCIATA **78**

6.1 Il modello 2D di facciata secondo la norma UNI EN 12810-2:2004 [4] **78**

6.2 La proposta alternativa per il modello 2D di facciata **84**

6.3 Considerazioni finali **87**

7. LA PROCEDURA AUTOMATIZZATA PER LA GESTIONE DEI DATI **88**

7.1 La procedura automatizzata per le analisi 3D **88**

7.1.1 Descrizione della procedura automatizzata 91

7.1.1.1 Definizione della mesh del telaio e della facciata *91*
7.1.1.2 Tipologie di elementi finiti utilizzati e loro caratteristiche *93*
7.1.1.3 Definizione delle proprietà delle sezioni e dei materiali *95*
7.1.1.4 Condizioni di vincolo tra gli elementi *95*
7.1.1.5 Condizioni di vincolo esterne *96*
7.1.1.6 Imperfezioni *96*
7.1.1.7 Condizioni di carico e tipologie di analisi *97*
7.1.1.8 Generazione del file di input *98*
7.1.1.9 Output dati *98*
7.2 La procedura automatizzata per le analisi 2D **99**
7.3 Confronti fra i risultati di SAP e di ANSYS **99**
7.3.1 Condizioni di carico 99
7.3.2 Confronto fra i risultati di SAP e di ANSYS per le analisi 3D 99
7.3.3 Confronto fra i risultati di SAP e di ANSYS per le analisi 2D nel piano di stilata 103
7.4 Considerazioni finali **104**

8. CONCLUSIONI **106**
8.1 Riepilogo dei principali risultati **106**
8.2 Sviluppi futuri **107**

RINGRAZIAMENTI **107**

BIBLIOGRAFIA **107**

1. IL PROGETTO DI RICERCA

1.1 La progettazione dei ponteggi: criteri operativi e aspetti critici

Il comportamento strutturale dei ponteggi, che possono essere riguardati come strutture reticolari in acciaio, è influenzato da fattori quali i fuori piombo, i giochi tra gli elementi nel piano della facciata e nel piano orizzontale, i giochi alla base, la cui entità risulta accentuata rispetto alle tradizionali strutture intelaiate [1], [2]. La variabilità di questi parametri, le difficoltà della loro rappresentazione nell'ambito dei modelli di calcolo e l'importanza che essi rivestono ai fini del comportamento strutturale, ha indotto all'utilizzo di un metodo di calcolo "misto" basato su criteri di estrema semplicità che, accanto alle classiche verifiche strutturali, prevede il controllo sperimentale del risultato.

A fronte di approcci progettuali differenziati tra i diversi paesi e in ottemperanza alle direttive europee di armonizzazione di prodotto, il CEN ha sviluppato una serie di norme specifiche per le attrezzature provvisionali. Il lavoro del comitato tecnico CEN TC53 "Attrezzature di lavoro provvisionali", ed in particolare del Working Group 2, ha portato alla pubblicazione di normative inerenti la progettazione strutturale dei ponteggi di facciata [3], [4], [5], [6], [7]. Così come accade nella pratica corrente, l'approccio progettuale proposto è ancora basato su una procedura di "tipo misto" coinvolgendo la sperimentazione a supporto della fase di analisi numerica. Benchè in linea generale la filosofia progettuale non appaia mutata, l'analisi dei nuovi documenti normativi mostra come sia i contenuti ed i fini della fase sperimentale, che conserva ancora un ruolo centrale, sia i criteri operativi relativi allo sviluppo delle analisi numeriche appaiono profondamente ridefiniti. Le prove sperimentali riguardano i componenti strutturali fondamentali del ponteggio quali le tavole di impalcato, i diagonali di facciata e di piano, i giunti corrente-montante. Il loro obiettivo è la caratterizzazione meccanica dei componenti ai fini della definizione di modelli di calcolo, la cui validità è da ultimo garantita mediante prove full-scale del ponteggio. Le analisi numeriche possono essere effettuate su modelli di calcolo tridimensionali (3D) riferiti all'intera struttura o su modelli bidimensionali semplificati 2D riferiti al piano di stilata (piano ortogonale all'opera servita) ed al piano di facciata (piano parallelo all'opera servita). Sono previste inoltre due metodologie di calcolo, l'una di estrema generalità basata sull'utilizzo di analisi del secondo ordine, e quindi caratterizzata da maggiori oneri computazionali, l'altra semplificata, basata su analisi del primo ordine con valutazione approssimata degli effetti del secondo ordine secondo il metodo dell'amplificazione dei momenti. Mentre il metodo di analisi del secondo ordine può essere utilizzato con riferimento a qualsiasi tipologia di ponteggio, l'utilizzo del metodo semplificato è proposto limitatamente al caso di ponteggi a telai prefabbricati per i quali il rapporto tra il carico di progetto (N_{Ed}) e il carico critico (N_{cr}) risulta inferiore a 0,5 ($N_{Ed}/N_{cr}<0,5$). L'estensione del campo di applicabilità di questo metodo rispetto a quanto raccomandato dall'Eurocodice 3 [8] apparirebbe giustificata dalla particolare configurazione dei sistemi di vincoli dei ponteggi prefabbricati. Studi recenti effettuati su alcune tipologie di ponteggio commercializzate sul mercato europeo, hanno permesso di evidenziare come l'utilizzo del metodo dell'amplificazione dei momenti, laddove applicabile, non sempre conduce ad una distribuzione delle azioni interne a favore di sicurezza [9], [10], [11]. I dubbi e le perplessità relativi all'affidabilità dei metodi di analisi del primo ordine, sui quali tra l'altro è basata attualmente la progettazione dei ponteggi in Italia, privilegia quindi il ricorso a procedure di calcolo basate su metodi di analisi del secondo ordine.

La progettazione dei ponteggi secondo la filosofia CEN si fonda sullo sviluppo di modelli di analisi in grado di rappresentare in modo accurato i fenomeni chiave dai quali dipende la risposta strutturale del sistema. Come precedentemente accennato, sono suggeriti modelli di analisi 3D estesi all'intera struttura e sottomodelli di analisi 2D relativi al piano di stilata ed al piano di facciata, che consentono un considerevole risparmio dal punto di vista computazionale. L'affidabilità dei modelli 2D è legata alla loro capacità di riprodurre in modo accurato e realistico meccanismi di funzionamento tipicamente 3D legati all'interazione tra facciata interna ed esterna, tra stilate successive e all'effetto dei vincoli all'opera servita. Recenti studi [11] hanno permesso di osservare come i sottomodelli di analisi 2D relativi al piano di stilata proposti dai documenti CEN siano in grado di stimare in modo accurato il carico di collasso del ponteggio (qualora esso si verifichi nel piano di stilata) e conseguentemente permettano la verifica di resistenza e di stabilità dei principali elementi strutturali. Non altrettanto invece può dirsi per i sottomodelli 2D del piano di facciata per i quali alcuni dubbi permangono per quanto riguarda la capacità di stima del carico di collasso del ponteggio, se legato a meccanismi di facciata, e le modalità di utilizzo dei risultati ai fini del dimensionamento degli elementi strutturali

Le brevi osservazioni sopra riportate evidenziano alcuni degli aspetti che richiedono un necessario approfondimento in vista dell'utilizzo della procedura progettuale CEN che e' destinata a modificare radicalmente l'assetto progettuale attualmente utilizzato in Italia. Chiara definizione del modello di calcolo (2D o 3D), delle sue caratteristiche geometriche e meccaniche, delle sue peculiarità e dei suoi limiti di applicazione sono requisiti essenziali per lo sviluppo di analisi numeriche in grado di guidare alla progettazione affidabile del sistema. In tal ambito non meno importante è la conoscenza approfondita dei metodi di analisi e delle loro limitazioni. L'insieme di questi fattori ha un logico risvolto sulle modalità di gestione dei dati di output, dai quali dipende la progettazione/verifica degli elementi strutturali del ponteggio.

I recenti progressi nel settore dell'informatica, hanno messo a disposizione degli ingegneri professionisti strumenti e codici di calcolo che consentono, con relativa facilità, l'esecuzione di analisi raffinate. Ciò ha comportato lo sviluppo di approcci progettuali più articolati che meglio permettono di considerare nell'analisi di progetto i principali parametri che influenzano la risposta dei sistemi. Grado di complessità del modello e metodo di analisi devono comunque essere commisurate al problema analizzato. Va poi osservato come gli strumenti informatici attualmente a disposizione consentono una gestione relativamente semplice dei risultati di analisi anche complesse. Questo aspetto può essere affrontato ed attuato in modo differenziato che può spaziare dalla semplice possibilità di esportare i risultati sotto forma di file testo e/o di foglio elettronico, alla possibilità di effettuare la verifica/progetto delle sezioni critiche attraverso routine di calcolo che possono vedere implementate le prescrizioni normative più recenti. La relativa semplicità con la quale può essere gestita la fase di output non trova un analogo riscontro nella gestione della fase di input dati. La complessa risposta dei sistemi strutturali si traduce infatti in modelli di calcolo articolati e onerosi dal punto di vista organizzativo. Per superare le difficoltà che la gestione dei modelli di calcolo comporta, il progettista, in assenza di puntuali prescrizioni normative, è spesso indotto ad assunzioni ed approssimazioni che possono semplificare in modo anche drastico il problema, limitando di fatto la significatività delle analisi.

1.2 I contenuti del lavoro

La ricerca si propone di fornire un contributo ad alcune delle problematiche tipiche della progettazione dei sistemi di ponteggio, delineate al paragrafo precedente.

Lo studio ha considerato tre tipologie di ponteggio a telai prefabbricati, con telaio aperto a portale, di produzione italiana. Commercialmente i ponteggi sono denominati:

- ponteggio Carpedil tipo A31/2500 con telaio a spinotti;
- ponteggio Carpedil tipo A33/2500 con telaio a boccole;
- ponteggio Dalmine "REALPONT EU 92", Tipo "Portale 105 a boccole" con tavole metalliche PD-FAP.

Per brevità in questo documento i ponteggi sono convenzionalmente denominati Cs, Cb e D, rispettivamente.

La ricerca si sviluppa attraverso una fase sperimentale ed una fase numerica.

La fase sperimentale, che ha affrontato il problema della risposta dei diagonali di facciata, è stata sviluppata nel rispetto delle prescrizioni delle norme UNI EN 12810-2:2004 [5] e UNI EN 12811-3:2005 [7]. L'obiettivo dello studio è la definizione di una legge semplificata spostamento-azione assiale associata ai diagonali, visti come parte integrante del sistema di facciata. In questo modo si è inteso superare le limitazioni che la schematizzazione di asta incernierata ai montanti, adottata usualmente per la modellazione dei diagonali di facciata, comporta. Con questo obiettivo è stata condotta una campagna sperimentale che ha interessato tutte e tre le tipologie di ponteggio Cs, Cb e D. Alle modalità di attuazione della campagna sperimentale, ai risultati delle prove ed alla loro elaborazione è dedicato il capitolo 2 del presente lavoro.

La parte numerica si è occupata invece dello studio della risposta dei sistemi intelaiati attraverso lo sviluppo di analisi numeriche condotte mediante i codici calcolo Ansys [12] e PEP micro [13]. La fase preliminare dello studio, che ha riguardato il sistema 3D nella sua globalità e la risposta 2D nel piano di stilata, ha richiesto la messa a punto dei modelli di analisi e la loro validazione (Cap. 3). In via semplificata ed in accordo alla usuale pratica, per queste prime analisi e nell'ambito dei modelli 3D, i diagonali di facciata sono stati schematizzati come semplici elementi biella incernierati ai montanti.

Sui modelli di calcolo così individuati sono state condotte delle successive analisi con l'obiettivo di investigare la sensibilità dei ponteggi al variare di parametri quali le imperfezioni alla base indotte dalla diversa estensione della basetta, la risposta delle tavole di impalcato e il "verso" delle imperfezioni degli elementi (local bow imperfection) (Cap. 4).

I modelli di calcolo 3D sono stati quindi complicati attraverso l'introduzione della legge spostamento-azione assiale dei diagonali determinata per via sperimentale. In questo modo è stato possibile analizzare l'influenza delle imperfezione del piano di facciata sulla risposta globale dei sistemi (Cap. 5).

Un'ulteriore tematica analizzata nell'ambito di questo lavoro riguarda la risposta del modello 2D di facciata. Lo studio si è attuato in una prima fase attraverso l'applicazione del modello, così come proposto dalla normativa, ai ponteggi Cs, Cb e D. Le analisi, che hanno evidenziato le difficoltà operative conseguenti all'utilizzo del modello in ambito progettuale, sono state svolte al variare della risposta del sistema di impalcato e per due diversi sistemi di imperfezioni. Per superare queste limitazioni è stato messo a punto un nuovo modello di calcolo, anch'esso basato sui criteri di condensazione dei telai, che si è dimostrato in grado di predire in modo accurato la risposta dei sistemi nel piano di facciata. I risultati dello studio sono raccolti nel capitolo 6.

Il capitolo 7 del lavoro si propone invece di dare una risposta alle difficoltà progettuali conseguenti alla gestione dei modelli di calcolo. Sulla scorta dell'esperienza maturata durante il lavoro svolto e sulla base dei risultati delle analisi numeriche (Cap. 3-6), è stata sviluppata una procedura automatizzata che ha il compito di facilitare la gestione dei dati necessari alla 'costruzione' di un modello di calcolo visto come strumento per l'analisi agli elementi finiti di ponteggi a telai prefabbricati. La gestione permette la raccolta ordinata dei

parametri necessari alla scrittura del codice di input nel linguaggio di macroprocedura caratteristico del programma ad elementi finiti. Data la vastità di programmi di calcolo disponibili in ambito strutturale si è fatto riferimento a due codici di calcolo agli elementi finiti caratterizzati da diverse peculiarità e ambito di applicazione: ANSYS ver 11.0 [12] e SAP 2000N ver. 8.2.6 [14]. Lo studio si è attuato mediante lo sviluppo delle procedure automatizzate per i modelli 3D sia in ambito ANSYS sia in SAP. Per quanto riguarda invece i sottomodelli 2D, si è fatto esplicito riferimento al sottomodello di stilata per il quale è stata sviluppata la procedura automatizzata per il solo programma SAP. Le incertezze circa l'utilizzo del modello 2D di facciata hanno indotto a tralasciare lo sviluppo di una analoga procedura automatizzata di gestione dei dati.

2. LA CARATTERIZZAZIONE DEL SISTEMA DI CONTROVENTO DI FACCIATA

Nell'ambito del progetto di ricerca è stata sviluppata una campagna prove finalizzata alla caratterizzazione dei diagonali di facciata. L'obiettivo è la determinazione di una legge semplificata spostamento/azione assiale che riproduca il comportamento dei diagonali considerati come parte integrante della facciata.

Tradizionalmente per i diagonali di facciata è ipotizzato un funzionamento a biella. Nell'ambito di un modello di calcolo questi vengono modellati come aste semplicemente incernierate ai montanti trascurando fattori importanti primi fra tutti l'eccentricità dei diagonali rispetto al piano di facciata ed i giochi in corrispondenza del sistema di aggancio al montante. Con l'obiettivo di superare questi limiti é stata sviluppata la campagna di prove sperimentali di seguito descritta. La legge spostamento-azione assiale determinata sperimentalmente ha il compito di caratterizzare un elemento "spring" equivalente al diagonale di facciata.

La campagna sperimentale, che ha interessato tre tipologie di ponteggio di produzione italiana, ha richiesto una fase preliminare dedicata alla progettazione e alla messa a punto dell'attrezzatura di prova in accordo agli schemi presentati dalla norma UNI EN 12810-2:2004 [4]. Successivamente sono state effettuate 36 prove, dodici per ogni tipolgia di ponteggio. I risultati ottenuti sono stati quindi elaborati in accordo alle prescrizioni del documento UNI EN 12811-3:2005 [7] pervenendo alla definizione di leggi semplificate spostamento-azione assiale. Nei successivi paragrafi sono illustrate e commentate le fasi salienti della sperimentazione. Sono inoltre descritte le procedure adottate per l'elaborazione dei dati e sono sintetizzati i principali risultati.

2.1 L'attrezzatura di prova

Il dispositivo di prova si è ispirato agli schemi proposti dal documento UNI EN 12810-2:2003 [4] (Fig. 2.1). Poiché le tipologie di ponteggio analizzate nell'ambito di questo lavoro (§ 3-6) sono caratterizzate dalla presenza di diagonali disposti sulla facciata esterna, le prove si sono svolte secondo quanto previsto dallo schema illustrato in figura 2.1a.

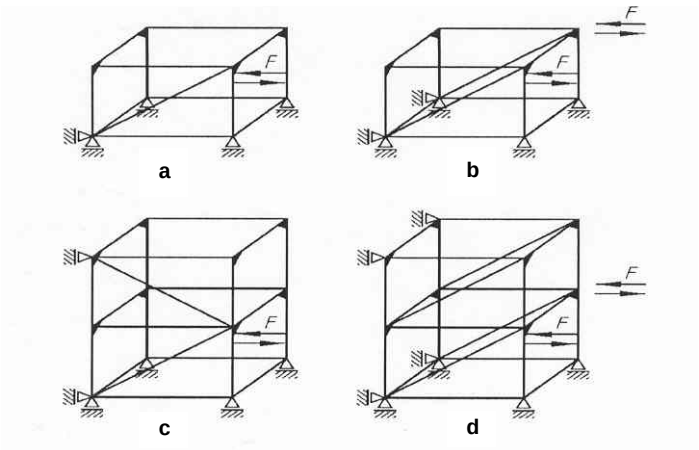


Figura 2.1 – Schemi di prova per diagonali di facciata secondo UNI EN 12810-2:2003 [4]

Le prove hanno riguardato un sistema modulare composto da due telai prefabbricati completi, ciascuno dei quali è sovrapposto ad un mezzo telaio. Mezzi telai e telai sovrapposti sono fra loro collegati ad una distanza pari alla distanza tra due stilate successive mediante correnti di facciata. Questi collegano i mezzi telai nella parte inferiore del campione e i telai nella loro parte superiore. Su una facciata il collegamento tra telai opposti è garantito attraverso il diagonale di facciata (Fig. 2.2). Il campione così formato è collocato all'interno del dispositivo di prova.

Il dispositivo di prova si compone di due piani di scorrimento ancorati a terra, uno dei quali realizzato in modo tale da essere parte integrante di un telaio chiuso (Fig. 2.3). Il campione é posizionato rispetto al dispositivo di prova in modo che i telai siano disposti ortogonalmente rispetto al telaio di contrasto e che il piano che contiene il diagonale si trovi all'interno del telaio chiuso (Fig.2.4).

Il campione è vincolato al dispositivo di prova mediante carrelli posti agli estremi inferiori dei montanti dei telai in modo che questi possano scorrere lungo i piani di scorrimento. Il nodo inferiore del campione, in corrispondenza al quale si realizza il collegamento tra diagonale di facciata e montante è vincolato al telaio di contrasto in modo da riprodurre le condizioni di cerniera ideale (Fig. 2.4).

Il carico è applicato in corrispondenza del nodo superiore del campione, dove il diagonale è collegato al montante (Fig. 2.4).

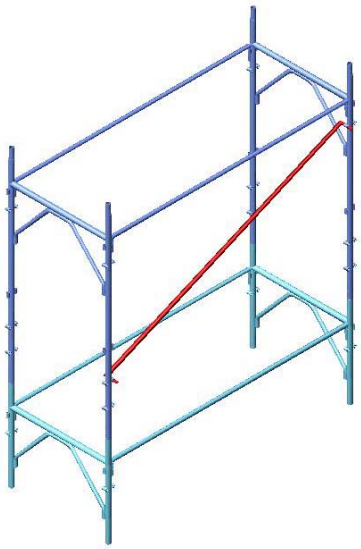


Figura 2.2 – Configurazione del campione analizzato

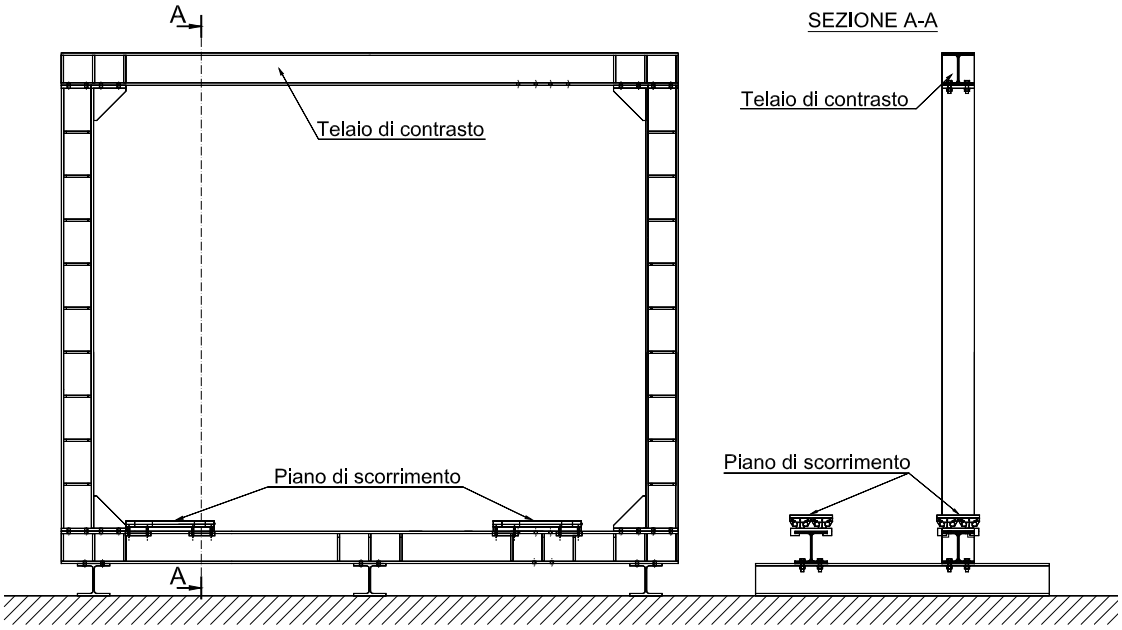


Figura 2.3 – Dispositivo di prova

Una panoramica generale del sistema di prova è presentata nelle figure 2.5 e 2.6, mentre nella figura 2.7 è mostrato il dettaglio del carrello che vincola l'estremo inferiore dei montanti ai piani di scorrimento. In figura 2.8 è invece mostrato il dettaglio della zona di applicazione del carico.

2.2 Il sistema di misura

Gli schemi di prova previsti dalla normativa UNI EN 12810-2:2004 [4] non forniscono indicazioni specifiche riguardo alle grandezze oggetto di misura. Le scelte operate al riguardo sono state guidate dalle finalità delle prove che, come precedentemente detto, si propongono di definire una legge semplificata spostamento-azione assiale associata al diagonale di facciata.

Gli strumenti di misura sono stati applicati solamente sul fronte del ponteggio che ospita il diagonale di facciata. Il sistema di misura presentato in figura 2.9 si compone di:

- tre celle di carico disposte in modo da rilevare il carico applicato dal martinetto (cella 1 di Fig. 2.9), e le reazioni orizzontali e verticali della cerniera che vincola al telaio di contrasto il sistema modulare (celle 2 e 3 in Fig. 2.9);

- due inclinometri disposti lungo il diagonale, con l'obiettivo di determinare la sua rotazione in corso prova. Questi sono stati disposti al centro del diagonale (inclinometro 1 in Fig. 2.9) e a 265 mm dall'estremo superiore del diagonale (inclinometro 2 in Fig. 2.9);
- trasduttori di spostamento (Tr 01-08 in Fig. 2.9) per la misura delle componenti orizzontali di spostamento disposti in modo da analizzare le deformazioni dei componenti principali del campione. In particolare, i trasduttori Tr01 e Tr08 misurano lo spostamento del nodo al quale il carico è applicato e la traslazione orizzontale dell'estremo inferiore del montante lato carico applicato.

Le principali caratteristiche della strumentazione utilizzata sono riportate in tabella 2.1.

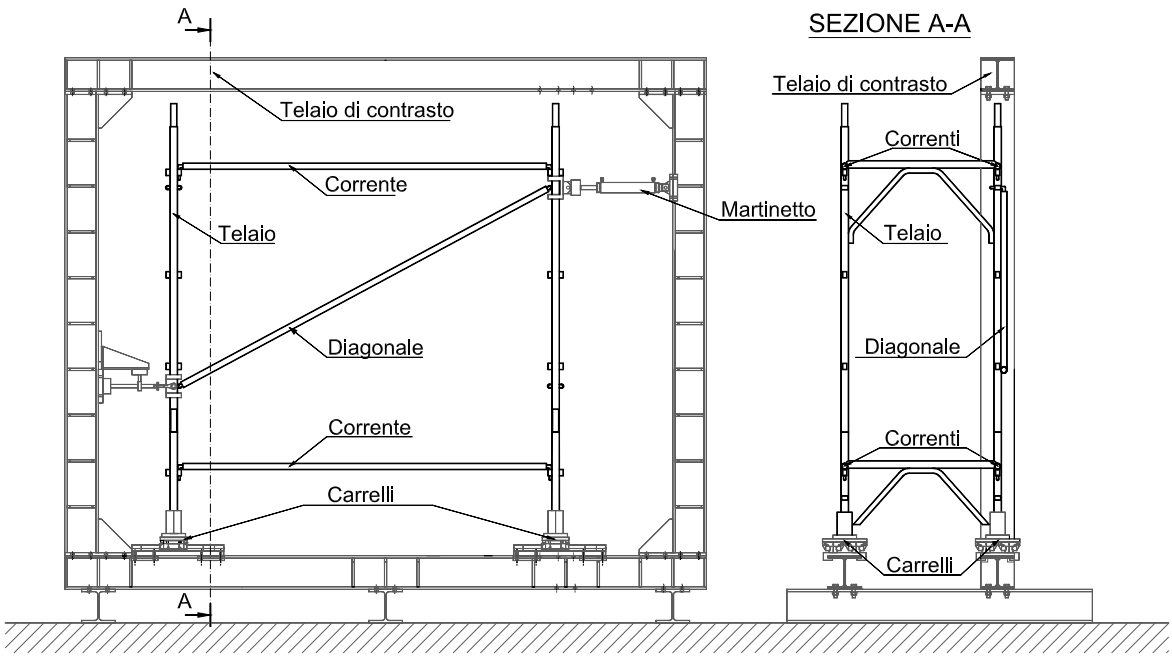


Figura 2.4 – Dispositivo di prova

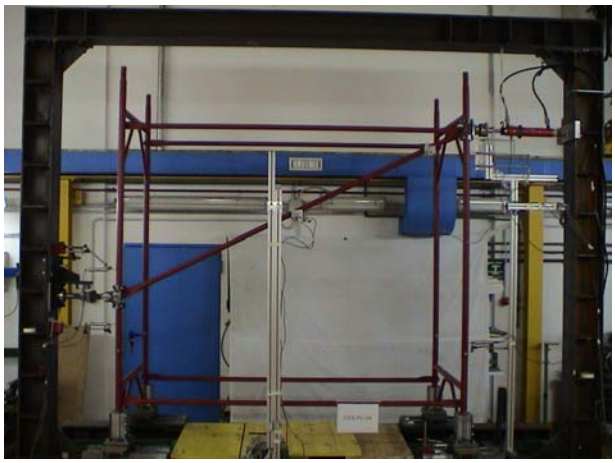


Figura 2.5 – Configurazione di prova: vista frontale

Figura 2.6 – Configurazione di prova: vista laterale

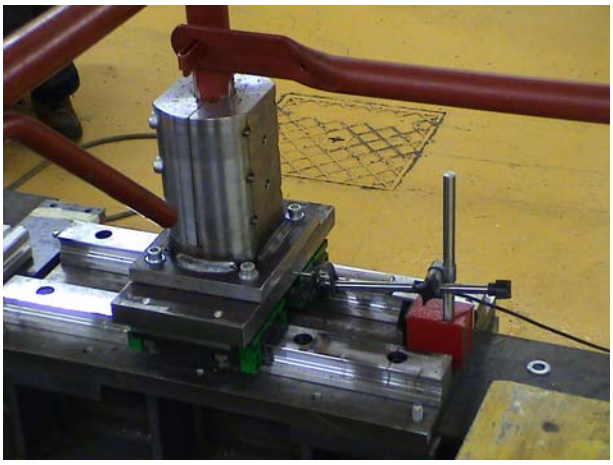


Figura 2.7 – Dettaglio del vincolo di base dei montanti

Figura 2.8 – Dettaglio del punto di applicazione del carico

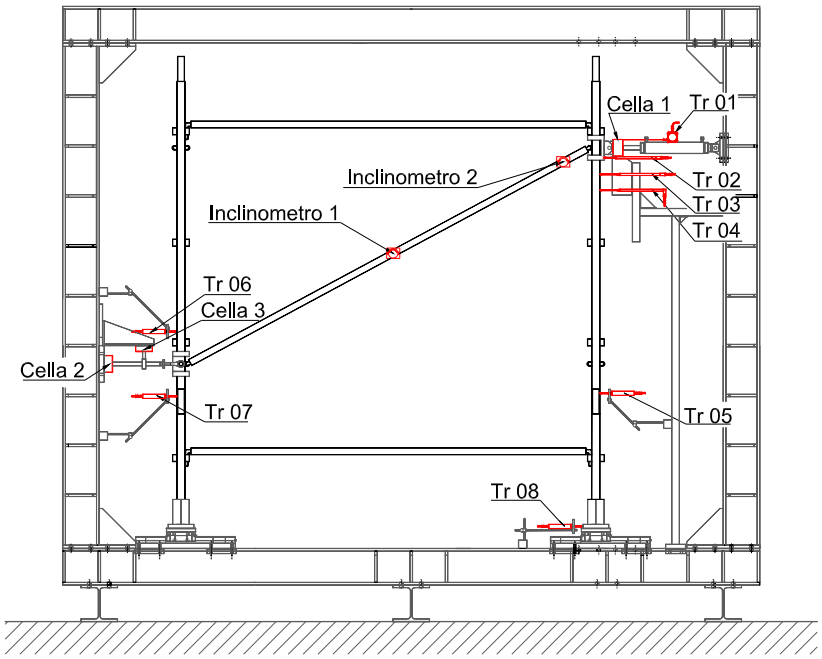


Figura 2.9 – Configurazione strumentale

Tabella 2.1 – Caratteristiche degli strumenti di misura utilizzati

Strumento	Costruttore	Modello	Portata	Classe/incertezza
Martinetto	FTP	DE10/250	100 kN	-
Cella di carico 1	AEP	TC4	25 kN	0,5
Cella di carico 2 – cella di cario 3	Ind.Age	CVC	50 kN	1
Inclinometro 1 - Inclinometro 2	Schaevitz	AccuStar	± 10 deg	0,1 deg
Tr01	Microepsilon		250 mm	Classe 0,5
Tr02	HBM	WA50	50 mm	Classe 0,1
Tr03-Tr04	HBM	WA100	100 mm	Classe 0,1
Tr05-Tr06-Tr07-Tr08	AEP	LDT	50 mm	Classe 0,1

Le prove sono state effettuate in controllo di carico. In corso prova le misure dei carichi e degli spostamenti sono stati registrati automaticamente mediante un sistema di acquisizione dati HBM mod. Spider8 con software Catman32. La frequenza di campionamento è stata di 2Hz. Le figure 2.10-2.13 mostrano alcuni dettagli della strumentazione di misura.

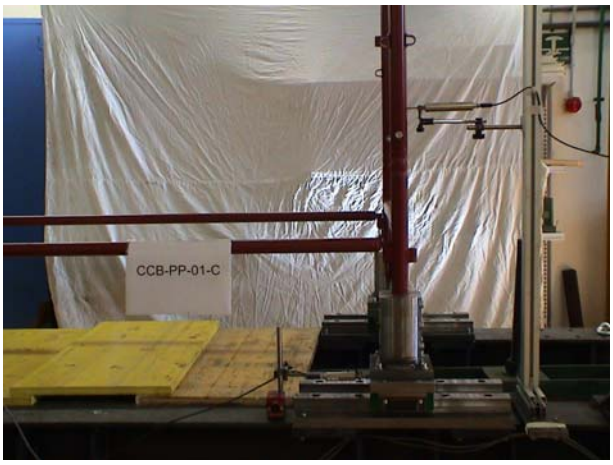


Figura 2.10 – Dettaglio degli strumenti alla base del montante caricato

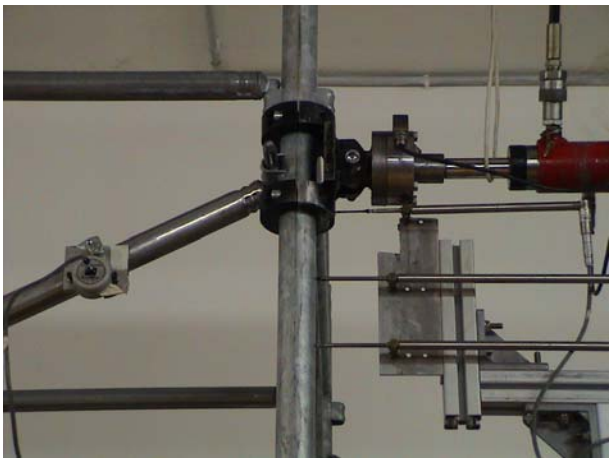


Figura 2.11 – Dettaglio della strumentazione nella zona di applicazione del carico

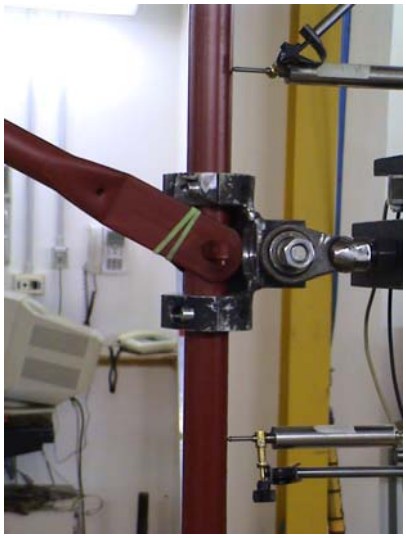


Figura 2.12 – Dettagli dei trasduttori Tr06 e Tr07 (rif. Fig. 2.9)

Figura 2.13 – Strumentazione adottata per il montante direttamente caricato

2.3 La campagna di indagine sperimentale

La campagna di indagine sperimentale ha riguardato tre tipologie di ponteggio a telaio aperto identificate convenzionalmente con le lettere Cs, Cb e D. I sistemi sono caratterizzati da un interasse tra le stilate di 2,5 m e larghezza della stilata pari a 1,05 m (per il ponteggio D la dimensione della stilata è di 1,048 m). I ponteggi si distinguono per il sistema di collegamento tra gli elementi: il ponteggio Cs é del tipo a spinotti mentre i ponteggi Cb e D sono del tipo a boccole. Il ponteggio Cs si differenzia rispetto ai ponteggi Cb e D anche per la diversa posizione dei correnti rispetto al diagonale di facciata (Fig. 2.14). Maggiori dettagli riguardo alle principali caratteristiche geometriche dei ponteggi analizzati, con particolare riferimento ai componenti che definiscono il “campione in prova” ovvero i telai, i diagonali ed i correnti sono presentati nell’Allegato 1.

Le prove sono state effettuate collegando mezzi telai e telai per mezzo di perni filettati (Fig. 2.15) e non per mezzo delle usuali spine a verme. Questo accorgimento ha permesso di limitare i giochi tra telai sovrapposti. Questa scelta é giustificata dalla osservazione che, in sede di analisi, nell’ambito del modello di calcolo, i giochi tra telai sovrapposti sono oggetto di una specifica modellazione. Si é quindi scelto di impedire i giochi localizzati affinché questi non interferiscono sulla risposta del diagonale di facciata.

2.4 Le modalità di prova

Per ogni tipologia di ponteggio sono state effettuate in tutto 12 prove. Le prime sei prove hanno permesso di determinare il valore caratteristico (R_k) ed il valore di progetto (R_d) dell’azione assiale agente sul diagonale. Sulla base di questi valori sono state effettuate le successive sei prove in campo ciclico, utilizzate per la determinazione della legge spostamento-azione assiale del diagonale.

Le prove preliminari sono state effettuate in trazione ed in compressione. In particolare tre prove si sono svolte sollecitando il diagonale in trazione e le tre rimanenti sollecitando il diagonale in compressione. Le prove hanno previsto cicli di carico e scarico di ampiezza crescente fino alla crisi del sistema. Questa procedura non è stata seguita durante la prima prova preliminare in trazione del ponteggio D (campione MM-PP-01T) dove invece si è raggiunto il collasso senza cicli intermedi. La differente procedura è dovuta al fatto che la prova MM-PP-01T è stata la prima effettuata, sulla base della quale è stata messa a punto la sperimentazione.

I risultati delle prove preliminari sono stati elaborati in accordo alle prescrizioni della normativa UNI EN 12811-3:2005 [7] separatamente per quanto riguarda la compressione e la trazione. Questo ha permesso di determinare i valori caratteristici (R_k^+, R_K^-) e di progetto (R_d^+, R_d^-) dei carichi distinti per compressione e trazione.

Le prove cicliche, in accordo alle prescrizioni normative, sono state effettuate secondo il seguente schema:

- tre cicli completi nell'intervallo di carico R_d^+- R_d^-;
- tre cicli completi nell'intervallo di carico R_k^+- R_k^-;
- successivo carico del campione fino al raggiungimento del collasso.

Per uniformare la procedura sperimentale, tutte le prove hanno avuto inizio applicando un carico di compressione (carico convenzionalmente assunto positivo). Delle sei prove cicliche, in tre prove il collasso finale è stato raggiunto in compressione mentre nelle rimanenti tre in trazione.

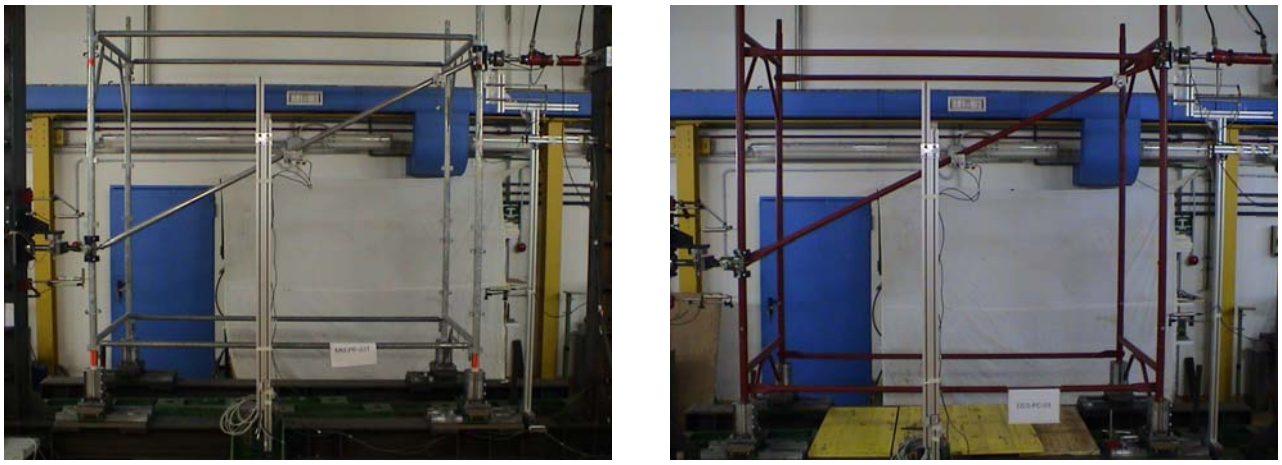


Figura 2.14 – Configurazione di facciata per i ponteggi D (a sinistra) e Cs (a destra)

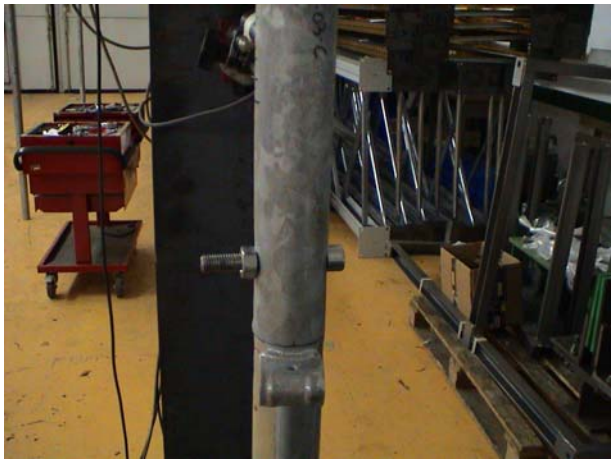


Figura 2.15 – Dettaglio del collegamento tra il telaio superiore e il mezzo telaio di base

2.5 Le prove effettuate e le modalità di collasso

La campagna sperimentale è consistita in un totale di 36 prove. L'elenco completo delle prove effettuate e della denominazione dei campioni, distinti per tipologia di ponteggio, sono elencate nella tabella 2.2.

Le modalità di collasso osservate possono essere così riassunte:

- <u>ponteggio Cs:</u> in tutte le prove, in prossimità del collasso, si è osservata una rilevante deformazione dei perni che realizzano il collegamento tra montante e diagonale (Fig. 2.16 e 2.17). Questo effetto è

apparso più rilevante nelle prove di trazione ed è stato di entità tale da determinare il raggiungimento delle condizioni ultime. In talune prove, si è osservata la crisi della saldatura di collegamento tra perno e montante (Fig. 2.18). Nelle prove a collasso in compressione, accanto alla deformazione del perno, si è verificato lo sbandamento dei diagonali fuori dal piano, effetto accentuato della particolare geometria delle parti terminali del diagonale (Fig. 2.19-2.21);

- ponteggio Cb: in tutte le prove, in prossimità del collasso, si è osservata una rilevante deformazione della pipetta del diagonale (Fig. 2.22-2.25). Nelle prove di trazione il collasso è stato determinato dalla crisi della saldatura della boccola (Fig. 2.26 e 2.27) e in taluni casi dall'eccessiva deformazione della pipetta che ha determinato un suo slittamento repentino dalla boccola (Fig. 2.24). Nelle prove in compressione, accanto alla deformazione della pipetta (Fig. 2.22, 2.23 e 2.28), si è verifica la instabilizzazione del diagonale (Fig. 2.29-2.31);
- ponteggio D: in tutte le prove, in prossimità del collasso, si è osservata una deformazione della pipetta del diagonale (Fig. 2.32 e 2.33). Nelle prove di trazione, il collasso è stato determinato dalla crisi della saldatura della boccola (Fig. 2.34 e 2.35) accompagnato in taluni casi dallo slittamento della pipetta rispetto alla boccola (Fig. 2.32). Nelle prove di trazione, a fine prova si è osservato un gioco tra pipetta e diagonale in corrispondenza della zona della pressatura. Nelle prove in compressione la deformazione della pipetta è stata limitata (Fig. 2.33), ed il collasso si è verificato a causa dell'instabilizzazione del diagonale (Fig. 2.36-2.37).

Tabella 2.2 – Riepilogo delle prove effettuate

Ponteggio	Prove preliminari		Prove cicliche	
	Compressione	Trazione	Collasso in compressione	Collasso in trazione
Cs	CCB-PP-01C	CCB-PP-04T	CCB-PC-01	CCB-PC-04
	CCB-PP-02C	CCB-PP-05T	CCB-PC-02	CCB-PC-05
	CCB-PP-03C	CCB-PP-03T	CCB-PC-03	CCB-PC-06
Cb	CCB-PP-01C	CCB-PP-04T	CCB-PC-01	CCB-PC-04
	CCB-PP-02C	CCB-PP-05T	CCB-PC-02	CCB-PC-05
	CCB-PP-03C	CCB-PP-03T	CCB-PC-03	CCB-PC-06
D	MM-PP-02C	MM-PP-01T	MM-PC-01	MM-PC-04
	MM-PP-03C	MM-PP-02T	MM-PC-02	MM-PC-05
	MM-PP-04C	MM-PP-03T	MM-PC-03	MM-PC-06

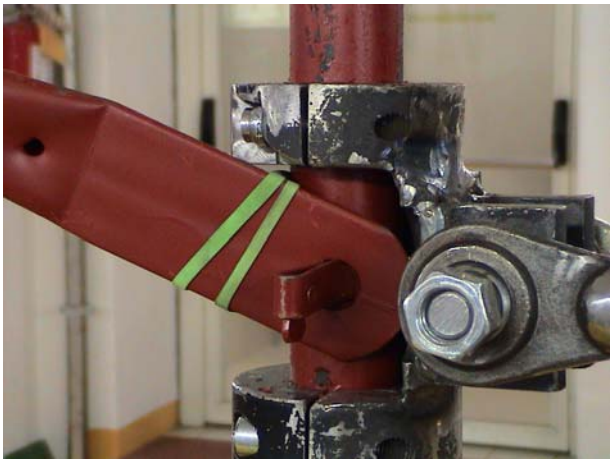


Figura 2.16 – Ponteggio Cs: dettaglio delle deformazioni del perno

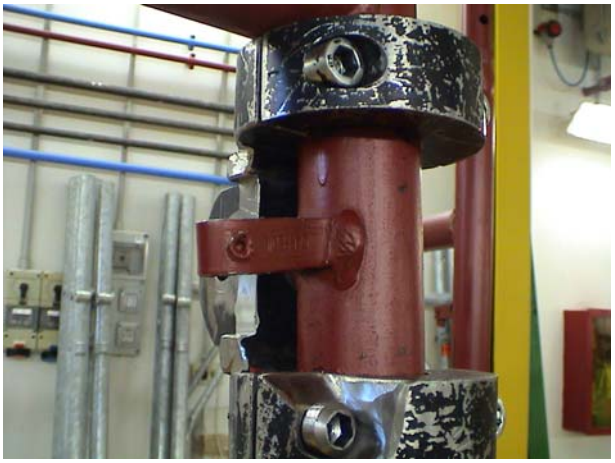


Figura 2.17 – Ponteggio Cs: dettaglio delle deformazioni del perno

Figura 2.18 – Ponteggio Cs: crisi della saldatura tra perno e montante

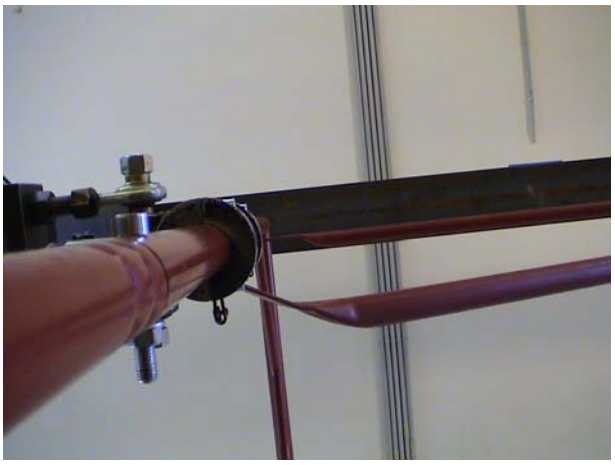


Figura 2.19 – Ponteggio Cs: deformazione della parte terminale del diagonale

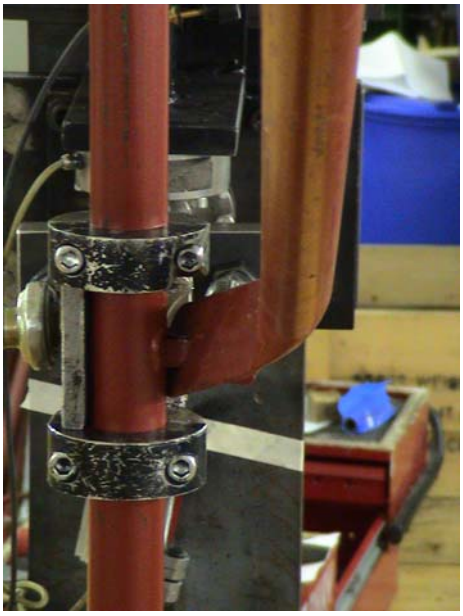


Figura 2.20 – Ponteggio Cs: deformazione del diagonale

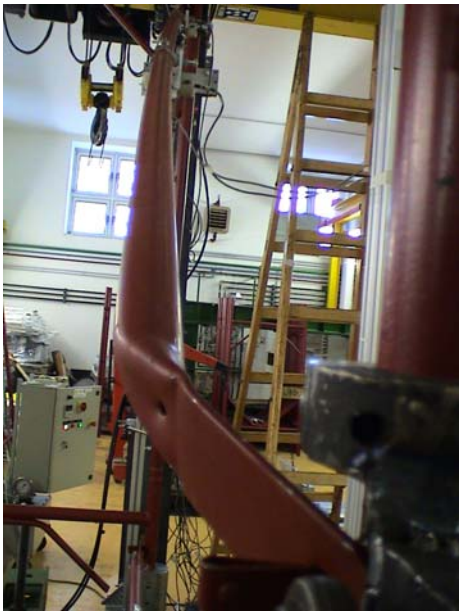


Figura 2.21 – Ponteggio Cs: deformazione del diagonale

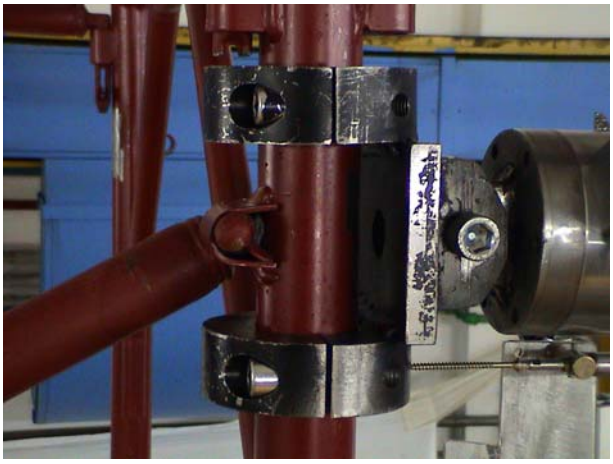


Figura 2.22 – Ponteggio Cb: deformazione della pipetta in prove a collasso in compressione

Figura 2.23 – Ponteggio Cb: dettaglio della pipetta in prove a collasso in compressione

Figura 2.24 – Ponteggio Cb: deformazione della pipetta in prove a collasso in trazione

Figura 2.25 – Ponteggio Cb: dettaglio della pipetta in prove a collasso in trazione

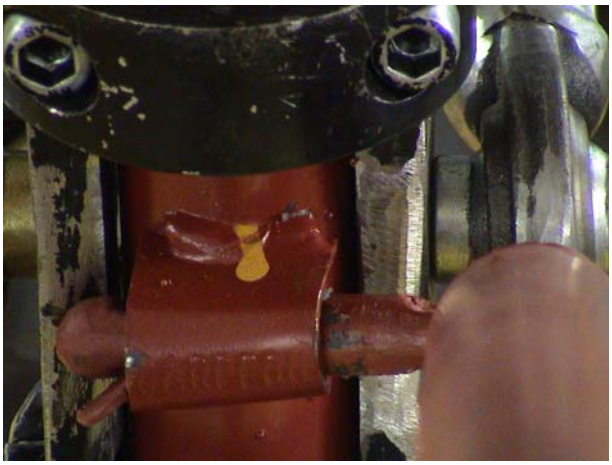


Figura 2.26 – Ponteggio Cb: crisi della saldatura della boccola

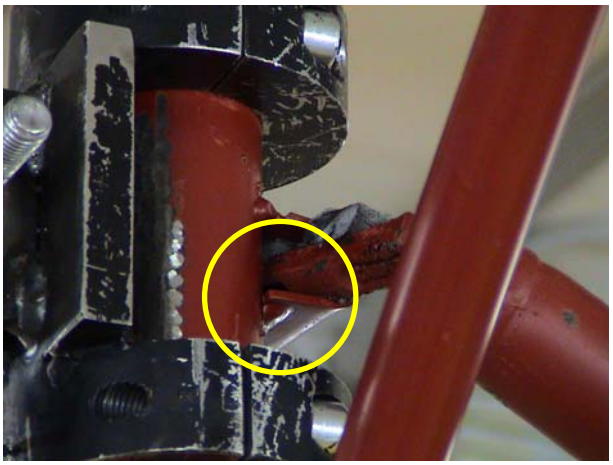


Figura 2.27 – Ponteggio Cb: crisi della saldatura della boccola

Figura 2.28 – Ponteggio Cb: deformazione della pipetta in prove in compressione

Figura 2.29 – Ponteggio Cb: crisi del diagonale in prove a collasso in compressione

Figura 2.30 – Ponteggio Cb: crisi del diagonale in prove a collasso in compressione

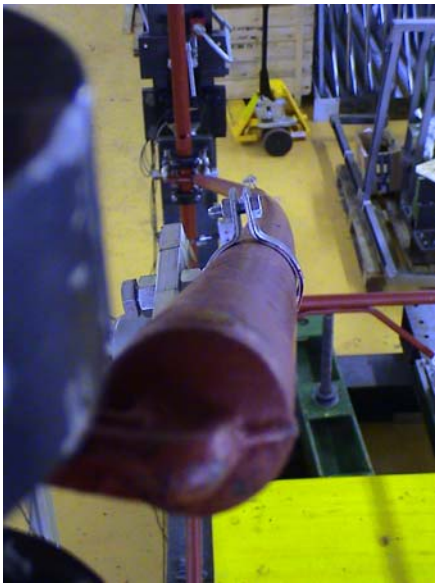


Figura 2.31 – Ponteggio Cb: crisi del diagonale in prove a collasso in compressione

Figura 2.32 – Ponteggio D: deformazione della pipetta in prove in trazione

Figura 2.33 – Ponteggio D: deformazione della pipetta in prove a collasso in compressione

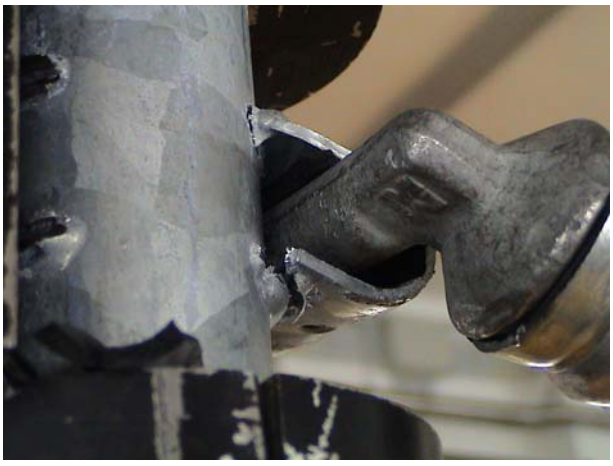


Figura 2.34 – Ponteggio D: crisi della saldatura della boccola

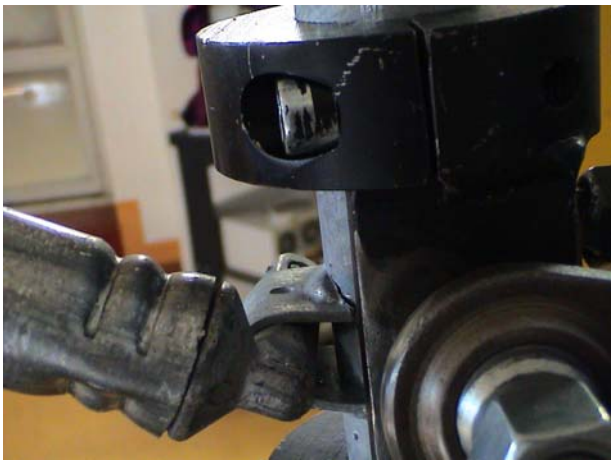


Figura 2.35 – Ponteggio D: crisi della saldatura della boccola

Figura 2.36 – Ponteggio D: crisi del diagonale in prove a collasso in compressione

Figura 2.37 – Ponteggio D: crisi del diagonale in prove a collasso in compressione

Quale commento generale alle prove è possibile osservare che, per tutte le tipologie di ponteggio considerate, il sistema modulare si è mostrato molto sensibile ai carichi applicati. I rilevanti giochi tra gli elementi si sono tradotti in scorrimenti ed aggiustamenti iniziali di rilevante entità.

Nei ponteggi a boccole (ponteggi Cb e D), si è osservato che nelle fasi iniziali di prova e all'atto dell'inversione del carico, i giochi tra boccola e pipetta e l'eccentricità del diagonale rispetto alla boccola, determinavano un'improvvisa rotazione del diagonale. La misura degli inclinometri posti lungo il diagonale è risultata molto influenzata da questo fenomeno che ha determinato letture falsate. Al fine di limitare questo effetto, preliminarmente alle prove, tra pipette e boccole è stato inserito un sottile strato di gommapiuma (Fig. 2.38) con azione "frizionante". Nel ponteggio Cs a spinotti invece, per evitare l'improvvisa rotazione del diagonale sono stati utilizzati dei ritegni formati da semplici elastici disposti tra montante e diagonale (Fig. 2.39).

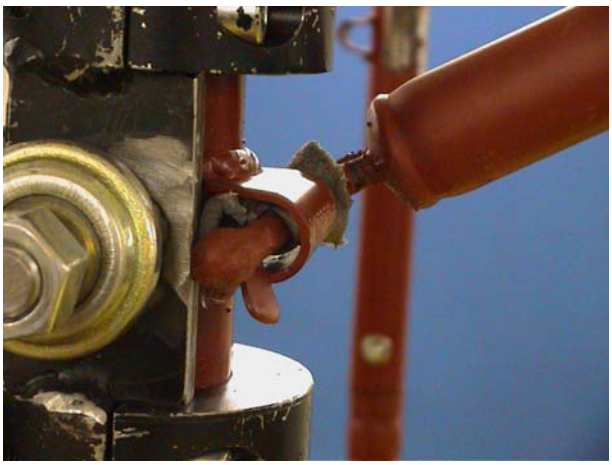


Figura 2.38 – Ponteggio Cb: dettaglio interfaccia boccola-pipetta

Figura 2.39 – Ponteggio Cs: dettaglio interfaccia diagonale-montante

2.6 I risultati sperimentali

Le figure 2.40-2.44 illustrano dei tipici risultati sperimentali. In particolare le figure 2.40-2.41 mostrano le risposte di due prove preliminari relative al ponteggio Cb. La figura 2.40 si riferisce ad una prova in

compressione (spostamenti e carico positivi), mentre la figura 2.41 riguarda una prova in trazione (spostamenti e carico negativi). Le figure 2.42-2.44 si riferiscono alle prove cicliche, per i ponteggi Cs, Cb e D, rispettivamente.

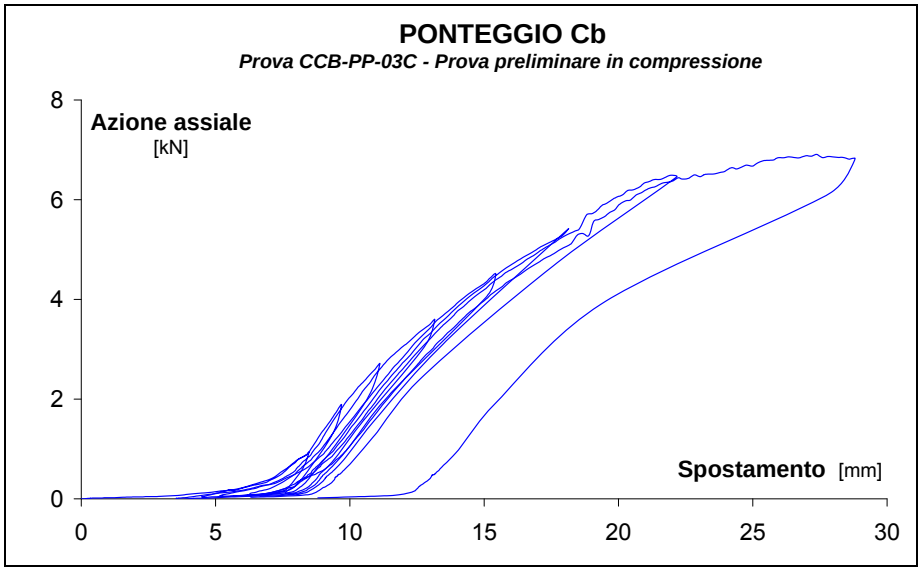


Figura 2.40 – Ponteggio Cb: prova preliminare in compressione

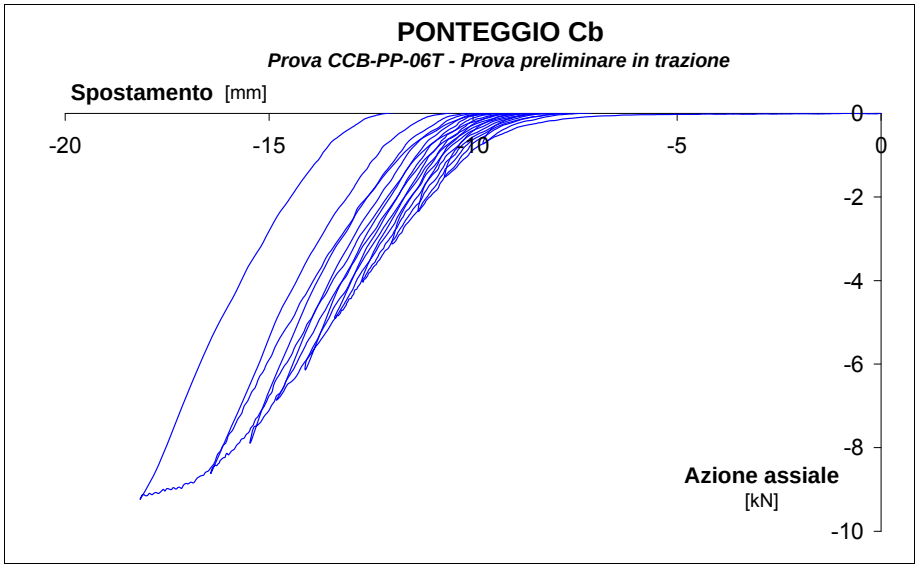


Figura 2.41 – Ponteggio Cb: prova preliminare in trazione

L'azione assiale agente sul diagonale (N) è stata determinata decomponendo le reazioni orizzontale (F_H) e verticale (F_V) rilevate in corrispondenza della cerniera che vincola il nodo inferiore di collegamento tra diagonale e montante (celle di carico 2 e 3 di figura 2.9). Con riferimento alla figura 2.45, l'azione assiale N agente sul diagonale è stata calcolata come:

$$N = F_H \cdot \cos\alpha' - F_v \cdot \mathrm{sen}\alpha' \qquad [2.1]$$

dove

F_H componente orizzontale della reazione;
F_V componente verticale della reazione;
α' angolo di inclinazione del diagonale rispetto all'orizzontale.

L'equazione [2.1] ipotizza che le azioni trasmesse dal montante al nodo siano trascurabili rispetto all'azione assiale trasferita dal diagonale. Le modalità di prova e i risultati di analisi numeriche agli elementi finiti svolte su modelli semplificati hanno fatto ritenere accettabile questa scelta. Questo modo di procedere permette di stimare anche l'azione tagliante agente sul diagonale. Di questa non si è tenuto conto in sede di elaborazione dati.

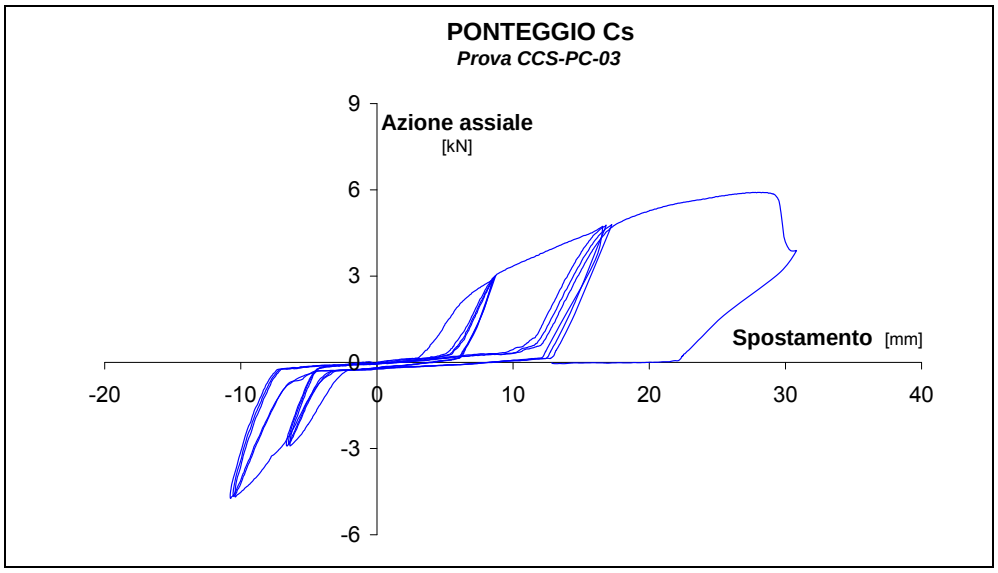


Figura 2.42 – Ponteggio Cs: riposta sperimentale relativa al campione CCS-PC-03

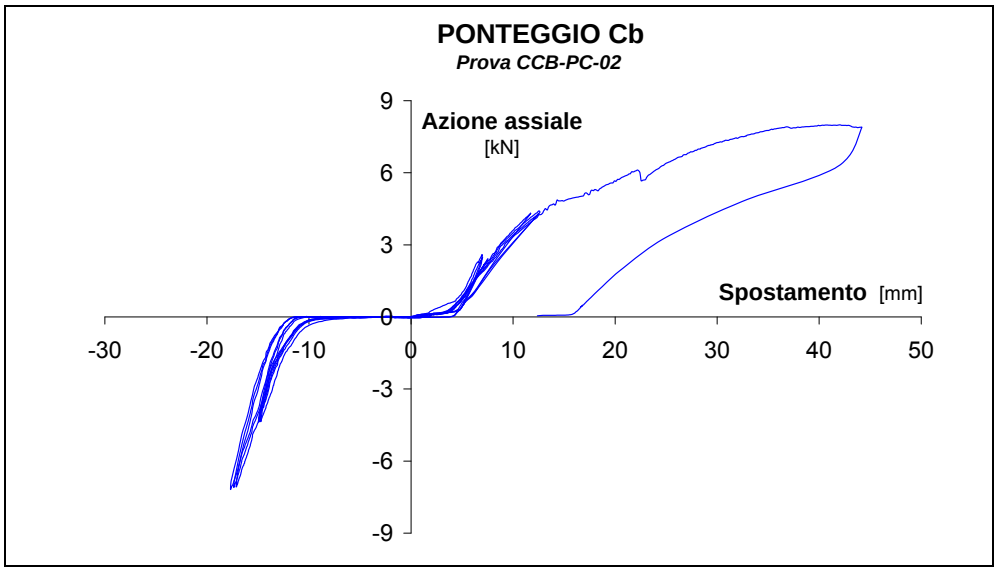


Figura 2.43 – Ponteggio Cb: riposta sperimentale relativa al campione CCB-PC-02

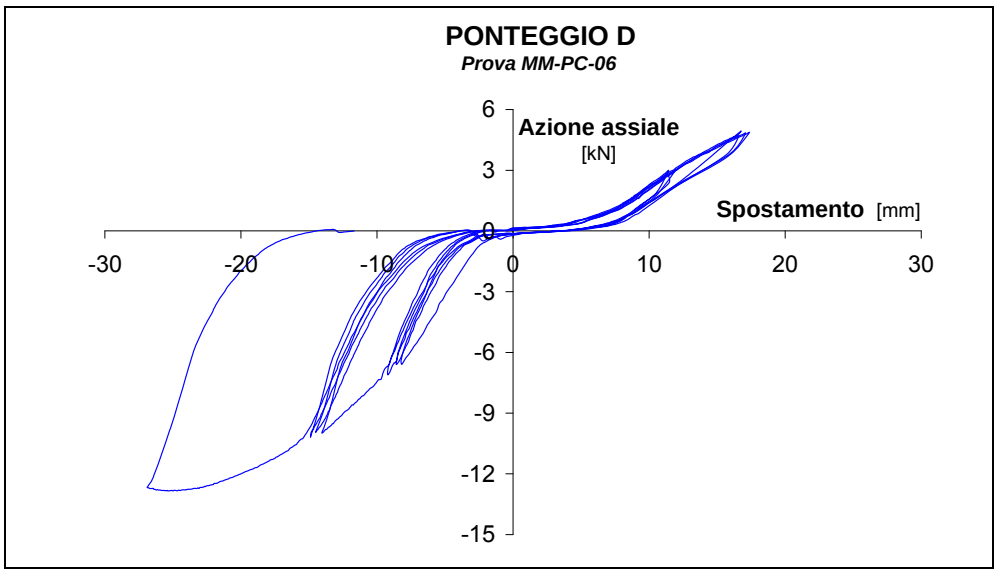


Figura 2.44 – Ponteggio D: riposta sperimentale relativa al campione CCS-PC-03

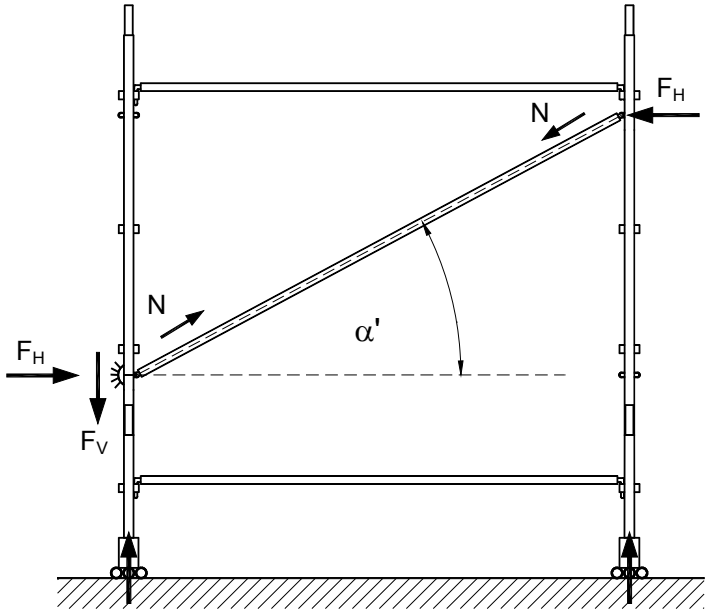


Figura 2.45 – Determinazione dell'azione assiale agente sul diagonale

Il criterio utilizzato per la determinazione della "deformazione assiale" intesa come allungamento/accorciamento del diagonale (spostamento nelle figure 2.40-2.44) è basato sull'ipotesi di piccoli spostamenti, di piccole deformazioni e sull'assunzione che l'estremo inferiore del diagonale, posto in corrispondenza della cerniera, sia un punto fisso. Si consideri la figura 2.46 relativa ad una prova in compressione. Si supponga che il diagonale occupi, nella condizione iniziale, la posizione OA inclinata di α rispetto all'orizzontale. Si supponga che seguito dell'azione esterna F_H il diagonale ruoti di un angolo (α'- α) attorno al punto O. Se il diagonale non subisse deformazioni, il suo estremo superiore A andrebbe ad occupare la posizione B. Viceversa, a causa della deformazione assiale l'estremo superiore del diagonale va ad occupare la posizione C. L'accorciamento del montante è quantificabile nella distanza CB. Questa può essere determinata mediante la relazione

$$\overline{CB} = \frac{\overline{CB'}}{\cos\alpha'} = \frac{s - w}{\cos\alpha'} = \frac{s - \overline{OB} * (\cos\alpha - \cos\alpha')}{\cos\alpha'} \qquad [2.2]$$

con

s spostamento del punto di applicazione della forza rilevato sperimentalmente;
OB lunghezza del diagonale indeformato;
α angolo di inclinazione del diagonale rispetto all'orizzontale nelle condizioni iniziali;
α' angolo di inclinazione del diagonale rispetto all'orizzontale associato al carico esterno applicato F_H.

In sede di elaborazioni dati il valore di α è stato assunto pari a quelli nominale derivato da semplici considerazioni geometriche sulla facciata indeformata. In particolare si è assunto:

- ponteggio Cs α =26,38 deg
- ponteggio Cb α =28,17 deg
- ponteggio D α =27 deg

Il valore di α' invece è stato determinato sommando al valore di α la variazione angolare (Δα) rilevata in corso prova dall'inclinometro posto sul diagonale. Ai fini della elaborazione dei risultati sono state considerate le letture strumentali dell'inclinometro posto in corrispondenza dell'estremo superiore del diagonale (inclinometro 2 in figura 2.9). Le letture dell'inclinometro posto al centro del diagonale (inclinometro 1 di figura 2.9) non sono state giudicate affidabili perché, specie nelle prove di compressione, influenzate da componenti parassite dovute alle deformazioni fuori piano del diagonale.

Dall'analisi dei risultati sperimentali si è osservato che:

- nelle fasi iniziali della prova, all'atto dell'inversione di segno del carico (nelle prove cicliche nel passaggio tra carichi positivi e carichi negativi) nonché all'atto dell'inversione del carico (fase discendente del carico successiva al raggiungimento del massimo carico nelle prove cicliche) i bruschi movimenti del diagonale determinati dall'attivazione dei giochi diagonale-boccola, diagonale-spinotto o dal rilascio dell'energia elastica accumulata dal sistema, influenzano in modo rilevante la risposta degli inclinometri. Si sono

osservate infatti delle variazioni anomale nelle letture strumentali che, seppur di piccola entità, influenzano in modo marcato la relazione [2.2].

- le variazioni angolari $\Delta\alpha$ sono piccole (valori nell'ordine di 0,5 deg) e quindi tali da non incidere in modo rilevate sui risultati dell'espressione [2.2].

Sulla base di queste osservazioni si è semplificata l'equazione [2.2] come:

$$\overline{CB} = \frac{s}{\cos \alpha'} \qquad [2.3]$$

Le relazioni [2.1] e [2.3] sono state utilizzate per l'elaborazione dei risultati sperimentali sia delle prove preliminari sia delle prove cicliche. I valori caratteristici (R_k) e di progetto (R_d) dei carichi e le leggi semplificate deformazione-azione assiale del diagonale sono state determinate sulla base delle curve spostamento-azione assiale determinate secondo le relazioni [2.1] e [2.3].

I risultati di tutte le prove in termini di curve spostamento-azione assiale sono raccolti negli Allegati 2 e 3.

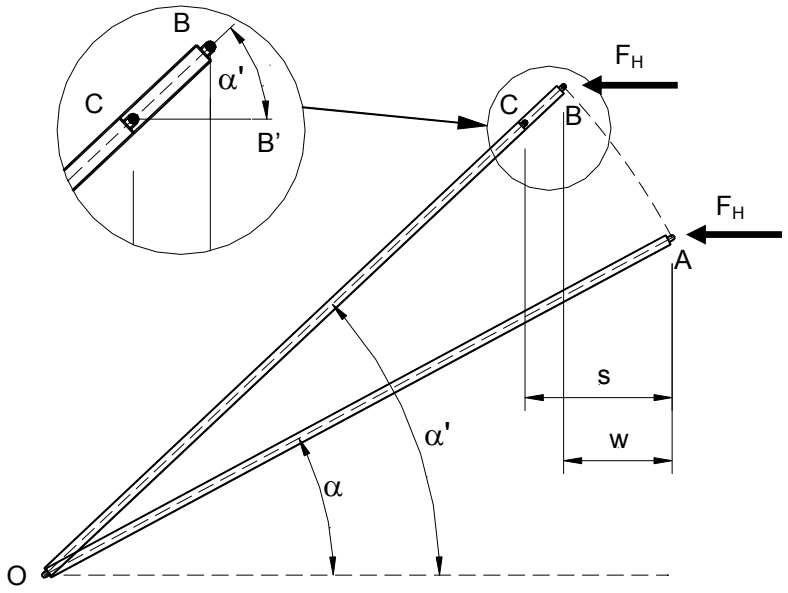


Figura 2.46 – Determinazione della deformazione assiale del diagonale

L'analisi dei risultati sperimentali presentati in questo paragrafo e negli Allegati 2 e 3 ha permesso di rilevare che:

- per ogni livello di carico i cicli risultano generalmente poco dispersi;
- all'aumentare del livello di carico corrisponde un rilevante incremento dello stato di degrado del sistema;
- le risposte sperimentali sono caratterizzate da comportamento non simmetrico in trazione e in compressione a seguito delle diversa rigidezza del sistema;
- l'asimmetria di comportamento può essere rilevata sia per quanto riguarda lo scorrimento iniziale sia per quanto riguarda le successive fasi di carico e di scarico;
- l'asimmetria dello scorrimento è dovuta alle variabilità del centraggio e ai giochi tra diagonali e sistema di connessione al montante (boccola o spinotto);
- il confronto tra le risposte di prove associate alla medesima tipologia di ponteggio, rivela comportamenti differenziati principalmente sul fronte degli scorrimenti.

2.7 Il modello della risposta

L'elaborazione dei risultati sperimentali è stata effettuata in accordo alla procedura operativa prevista dal documento UNI EN 12811-3:2005 [7] per le prove cicliche su componenti di ponteggio. L'obiettivo delle elaborazioni numeriche consiste nella definizione di una legge semplificata spostamento-azione assiale del diagonale facilmente implementabile in codici di calcolo e quindi di facile utilizzo ai fini delle analisi numeriche.

La procedura operativa del documento UNI EN 12811-3:2005 [7] si propone di rispondere a questa necessità attraverso l'individuazione di una legge multilineare, in generale non simmetrica a trazione e compressione caratterizzata da:

- scorrimento iniziale;
- leggi lineari, a seguire la fase di scorrimento, differenziate negli intervalli di carico 0-R_d e R_d-R_k.

Per raggiungere questo obiettivo, la procedura della normativa [7] si articola in tre fasi distinte, ciascuna delle quali caratterizzata da una discreta laboriosità dal punto di vista computazionale. La sua concreta applicazione a casi reali evidenzia una difficoltà applicativa dovuta anche ad una non completa chiarezza del testo normativo, che talvolta si presta ad interpretazioni non sempre univoche. Per maggiore chiarezza, si è quindi ritenuto opportuno riassumere la procedura di elaborazioni utilizzata nell'ambito di questo lavoro.

2.7.1 Il modello della risposta secondo il documento UNI EN 12811-3:2005 [7]

La procedura si compone delle seguenti fasi:

- determinazione della resistenza caratteristica (R_k) e della resistenza di progetto (R_d) attraverso la elaborazione dei risultati delle prove preliminari;
- determinazione dello scorrimento e delle rigidezze per ciascuna delle prove cicliche effettuate;
- determinazione della legge globale spostamento-azione assiale mediante elaborazione dei risultati ottenuti alla fase precedente.

Ciascuna delle fasi è sintetizzata brevemente in quanto segue.

2.7.1.1 Determinazione della resistenza caratteristica (R_k) e della resistenza di progetto (R_d)

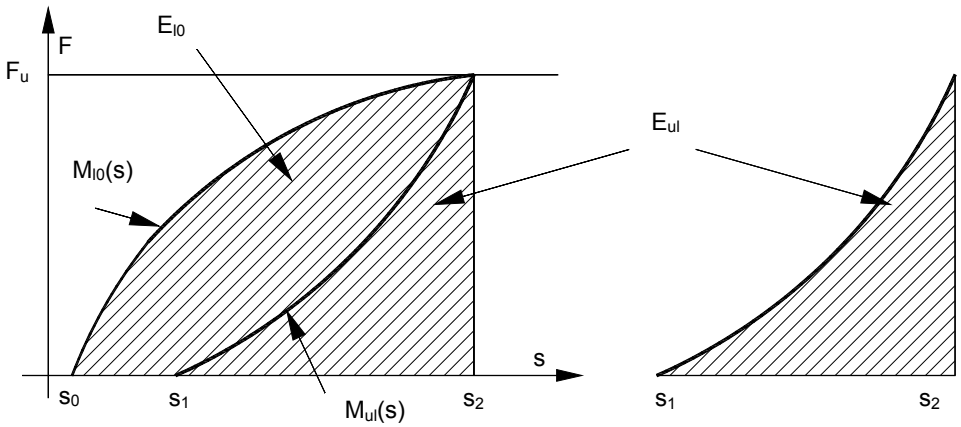
L'obiettivo è stato raggiunto elaborando i risultati delle prove preliminari. In quanto segue è riassunta in modo schematico la procedura adottata.

Per ciascuna prova la procedura operativa ha previsto:

a. determinazione della curva interpolante la fase di carico. Poiché ciascuna prova ha previsto l'esecuzione di una serie cicli di carico e scarico fino al raggiungimento del collasso, è stata dapprima costruita la curva di carico globale che racchiude le curve dei vari cicli. E' stata quindi determinata la funzione interpolante la curva di carico globale;

b. determinazione della funzione interpolante la fase di scarico. Le particolari modalità di collasso dei campioni (instabilità, crisi delle saldature, stati deformativi eccessivi a carico della pipetta) hanno consentito sempre di registrare la fase di scarico al raggiungimento delle condizioni ultime facilitando l'elaborazione dei dati;

c. determinazione delle energie associate alla fase di carico (E_{l0}) e alla fase di scarico (E_{lu}) (Fig. 2.47);



$E_{l0} = \int_{s_0}^{s_2} M_{l0}(s)ds$	energia associata alla fase di carico	$E_{ul} = \int_{s_1}^{s_2} M_{ul}(s)ds$	energia restituita durante la fase di scarico
M_{l0} (s)	curva di inviluppo della fase di carico	M_{ul} (s)	curva di inviluppo della fase di scarico associata alla crisi del componente
F_u	carico di collasso del componente		

Figura 2.47 – Determinazione delle energie E_{l0} e E_{ul}

d. determinazione del coefficiente q_e, rapporto tra le energie E_{l0} e E_{ul} :

$$q_e = \frac{E_{lo}}{E_{ul}} \qquad [2.4]$$

e. determinazione della resistenza ultima corretta $r^c_{u,i}$ attraverso la modifica della resistenza ultima $r^a_{u,i}$. Le correzioni sono state effettuate considerando le variazioni delle dimensioni effettive del campione

rispetto a quelle nominali ($r^{a}_{u,i} \rightarrow r^{b}_{u,i}$) (effetto geometrico) e delle proprietà del materiale in relazione al tipo di collasso subito dall'elemento ($r^{b}_{u,i} \rightarrow r^{c}_{u,i}$) (effetto materiale). In sede di elaborazione dati non si sono apportate variazioni a seguito dell'effetto geometrico ($r^{b}_{u,i} = r^{a}_{u,i}$). Non si sono apportate variazioni neppure a seguito dell'effetto materiale ($r^{c}_{u,i} = r^{b}_{u,i}$). Nelle prove con collasso in compressione l'elevata snellezza del diagonale e nelle prove in trazione la crisi delle saldature piuttosto che l'eccessiva deformazione degli elementi non hanno richiesto l'applicazione di alcuna variazione dovute all'effetto materiale.

I risultati delle singole prove sono stati elaborati collegialmente secondo la seguente procedura:

f. determinazione del valor medio $\bar{q}_e$ dei coefficienti q_e associati alle singole prove;

g. determinazione del coefficiente γ_{R2}:

$$1{,}25 \geq \gamma_{R2} = -0{,}025 \cdot \bar{q}_e + 1{,}275 \geq 1{,}00 \qquad [2.5]$$

h. determinazione della resistenza caratteristica di base $R_{k,b}$ (valore caratteristico di base della resistenza valutato come quantile 5% associato ad un livello di confidenza del 75% ottenuto ipotizzando una distribuzione log-normale) secondo la seguente procedura:

$$R_{k,b} = e^{y_5} \qquad [2.6]$$

con:

$$y_5 = \bar{y} - k_{s,k} \cdot s_y \qquad [2.7]$$

dove

$$\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i \qquad [2.8]$$

$$s_y^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2 \qquad [2.9]$$

$$y_i = \ln(r^{c}_{u,i}) \qquad [2.10]$$

dove:

$r^{c}_{u,i}$ resistenza ultima corretta associata all'i-esima prova (punto e dell'elenco);

$k_{s,k}$ coefficiente dipendente dalla numerosità del campione (n) e dalla distribuzione statistica (prospetto 4 della norma UNI EN 12811-3:2005 [7]). Nel caso specifico per n=3 $k_{s,k}$ = 3,15;

i. determinazione della resistenza caratteristica nominale ($R_{k,nom}$):

$$R_{k,nom} = \frac{R_{k,b}}{\gamma_{R2}} \qquad [2.11]$$

j. determinazione della resistenza di progetto (R_d):

$$R_d = \frac{R_{k,nom}}{\gamma_M \cdot \gamma_F} \qquad [2.12]$$

con γ_M = 1,1; γ_F = 1,5.

La procedura descritta è stata applicata separatamente alle prove svolte in compressione e in trazione. L'elaborazione dei dati è stata svolta utilizzando i codici di calcolo Mathematica 6 [15] e Microsoft© Excel [16].Si è sono così determinati i valori della resistenza caratteristica ($R_{k,nom}$ di seguito per brevità indicato come R_k) e della resistenza di progetto (R_d) distinti per la trazione (R_k^- , R_d^-) e la compressione (R_k^+ , R_d^+). Risultati delle elaborazioni sono raccolti in tabella 2.3. I dettagli delle elaborazioni sono raccolti nell'Allegato 2.

Tabella 2.3 – Resistenze caratteristiche e di progetto

Ponteggio	Resistenza caratteristica (R_k) (kN)		Resistenza di progetto (R_d) (kN)	
	R_k^+	R_k^-	R_d^+	R_d^-
Cs	4,716	4,489	2,858	2,721
Cb	4,212	6,916	2,553	4,192
D	4,725	12,220*	2,864	7,406**

* il valore è stato ridotto del 10 % ed assunto pari a 11 kN

** il valore è stato ridotto del 10% ed assunto pari a 6,7 kN

Per il ponteggio D, i valori della resistenza caratteristica e di progetto in trazione indicati in tabella 2.3 sono stati abbattuti forfetariamente del 10%. Questa scelta è frutto dell'osservazione dei risultati sperimentali che hanno evidenziato un comportamento non lineare dei campioni per valori molto inferiori rispetto al carico di collasso. Un più attento controllo durante l'ultima prova preliminare in trazione ha evidenziato come, accanto alla deformazione della pipetta, si verificasse anche una cricca sulla saldatura della boccola al montante, che era causa dell'attivazione del comportamento non lineare del sistema. La presenza della crisi della saldatura era stata osservata anche nelle due precedenti prove ma solamente durante l'esame visivo successivo allo svolgimento della prova. Ritenendo la risposta dei campioni sufficientemente ripetitiva, cautelativamente si è deciso di limitare le resistenze caratteristiche e di progetto. I valori "aggiornati" sono stati assunti pari a 11,000 kN e 6,700 kN, per le resistenze caratteristiche e di progetto in trazione, rispettivamente. La scelta è stata poi avvalorata dai risultati delle prove cicliche con collasso in trazione, che hanno evidenziato un valor medio del carico ultimo pari 13,9 kN inferiore rispetto al valor medio registrato durante le prove preliminari pari a 17,5 kN.
I risultati delle prove preliminari hanno permesso di definire il piano prove per le successive prove cicliche. Queste sono state effettuate svolgendo:

- tre cicli completi di carico nell'intervallo R_d^+ - R_d^-;
- tre cicli completi di carico nell'intervallo R_k^+, R_k^-;
- ciclo di carico conclusivo fino al collasso del campione.

2.7.1.2 Determinazione dello scorrimento e della rigidezza

La procedura utilizzata, basata sulla normativa UNI EN 12811-3:2005 [7], può essere sintetizzata nei punti di seguito elencati.

Per ciascuna prova, per ciascuna direzione di carico (compressione, trazione) e per ciascuno dei tre cicli compiuti nell'intervallo R_d^+, R_d^- si è proceduto con la:

a. determinazione delle funzione interpolante la fase di carico (curva 1 in Fig. 2.48);
b. determinazione della funzione interpolante la fase di scarico (curva 2 in Fig. 2.48);
c. determinazione del contributo d_0 allo scorrimento (Fig. 2.48) valutato come ascissa del punto di intersezione della curva interpolante la fase di carico e l'asse delle ascisse (distanza AB in Fig. 2.48);
d. determinazione di un secondo contributo allo scorrimento Δd_0, calcolato considerando il punto medio (punto C in figura 2.48) dell'intervallo compreso tra i punti di intersezione con l'asse delle ascisse della curva di carico (punto B in Fig. 2.48) e della curva di scarico (punto D in Fig. 2.48);
e. determinazione dello scorrimento totale d_{tot} somma dei contributi d_0 e Δd_0 ($d_{tot} = d_0 + \Delta d_0$);
f. determinazione della rigidezza (k_{Rd}) ottenuta come pendenza della retta tracciata tra la resistenza di progetto R_d e il punto sull'asse delle ascisse di coordinate (d_{tot}, 0) (pendenza della retta CE in figura 2.48).

Per ciascuna prova, per ciascuna direzione di carico (compressione, trazione) e per ciascuno dei tre cicli compiuti nell'intervallo R_k^+, R_k^- si è proceduto con la:

g. determinazione del carico massimo R_k;
h. determinazione dello spostamento s_{Rk} associato al carico R_k.

Per ciascuna direzione di carico:

i. determinazione dello scorrimento medio $\overline{d_{tot}}$ come media aritmetica degli scorrimenti d_{tot} associati ai tre cicli di carico:

$$\overline{d_{tot}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} d_{tot} \qquad [2.13]$$

j. determinazione della pendenza media $\overline{k_{Rd}}$ nell'intervallo di carico 0-R_d come media aritmetica delle rigidezze k_{Rd} associate ai tre cicli di carico:

$$\overline{k_{Rd}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} k_{Rd} \qquad [2.14]$$

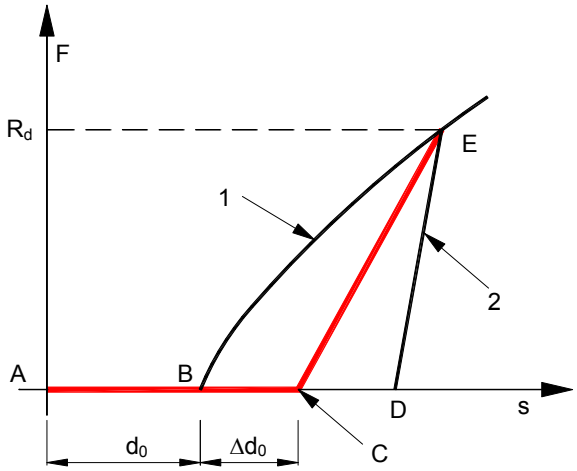


Figura 2.48 – Determinazione dello scorrimento d_{tot} e della rigidezza k_{Rd}

k. determinazione del valor medio della resistenza caratteristica $\overline{R_d}$ come media aritmetica dei carichi massimi R_d associati ai tre cicli di carico compiuti nell'intervallo R_d^+- R_d^-:

$$\overline{R_d} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} R_d \qquad [2.15]$$

l. determinazione del valor medio della resistenza caratteristica $\overline{R_k}$ come media aritmetica dei carichi massimi R_k associati ai tre cicli di carico compiuti nell'intervallo R_k^+- R_k^-:

$$\overline{R_k} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} R_k \qquad [2.16]$$

m. determinazione dello spostamento medio $\overline{s_{Rk}}$ come media aritmetica degli spostamenti associati ai carichi massimi R_k relativi ai tre cicli di carico compiuti nell'intervallo R_k^+- R_k^- :

$$\overline{s_{Rk}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} s_{Rk} \qquad [2.17]$$

Applicando la procedura descritta nei punti a-m ai carichi positivi (compressione) e a quelli negativi (trazione) si è ottenuta la legge spostamento–azione assiale associata alla singola prova.
In sintesi il comportamento del componente è individuato mediante una spezzata, in generale non simmetrica per carichi positivi e negativi. Considerato il ramo della spezzata associato ad una direzione di carico, la legge semplificata si compone di un tratto iniziale orizzontale di ampiezza $\overline{d_{tot}}$ ($\overline{d_{tot}^+}$; $\overline{d_{tot}^-}$ per i carichi positivi ed i carichi negativi, rispettivamente) e da due successivi tratti lineari associati agli intervalli di carico 0-$\overline{R_d}$ ($\overline{R_d^+}$ e $\overline{R_d^-}$ per i carichi positivi e di carichi negativi, rispettivamente) e $\overline{R_d}$ - $\overline{R_k}$ La pendenza del tratto lineare nell'intervallo 0-$\overline{R_d}$ è pari a $\overline{k_{Rd}}$ ($\overline{k_{Rd}^+}$ e $\overline{k_{Rd}^-}$ per i carichi postivi e negativi, rispettivamente) mentre lo spostamento associato al carico massimo $\overline{R_k}$ ($\overline{R_k^+}$ e $\overline{R_k^-}$ per i carichi positivi e di carichi negativi, rispettivamente) è assunto pari a $\overline{s_{Rk}}$ ($\overline{s_{Rk}^+}$ e $\overline{s_{Rk}^-}$ per i carichi positivi e di carichi negativi, rispettivamente) (Fig. 2.49).

La procedura descritta è stata estesa a tutte le prove effettuate per la medesima tipologia di ponteggio. Si sono ottenute leggi distinte pari al numero di campioni analizzati, caratterizzate ovviamente da una naturale dispersione.

2.7.1.3 I risultati delle elaborazioni

La procedura di elaborazione dati descritta al paragrafo precedente è stata applicata a tutte le prove cicliche elencate in tabella 2.2. A tal fine sono stati utilizzati i codici di calcolo Mathematica 6 [15] ed Microsoft© Excel [16]. I risultati finali delle elaborazioni sono raccolti nella tabella 2.4 in termini di scorrimento totale e di equazioni delle rette che descrivono il comportamento sperimentale negli intervalli 0-R_d e R_d-R_k. I risultati sono distinti per i carichi di compressione (carichi positivi) e di trazione (carichi negativi). Il confronto tra curve sperimentali e pertinenti leggi semplificate, relative a tre prove dei ponteggi Cs, Cb e D, è mostrato nelle figure 2.50-2.52. I dettagli delle elaborazioni dei dati ed i confronti tra i risultati sperimentali e le leggi semplificate sono raccolti nell'Allegato 3.

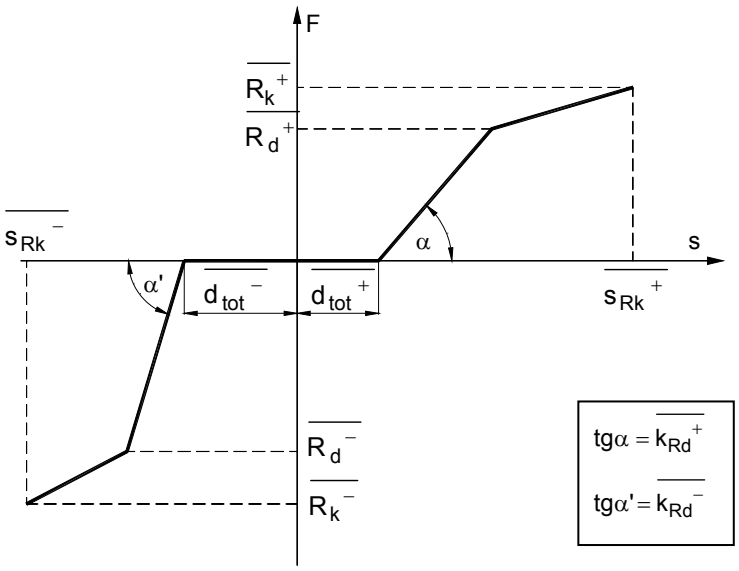


Figura 2.49 – Legge semplificata spostamento-azione assiale

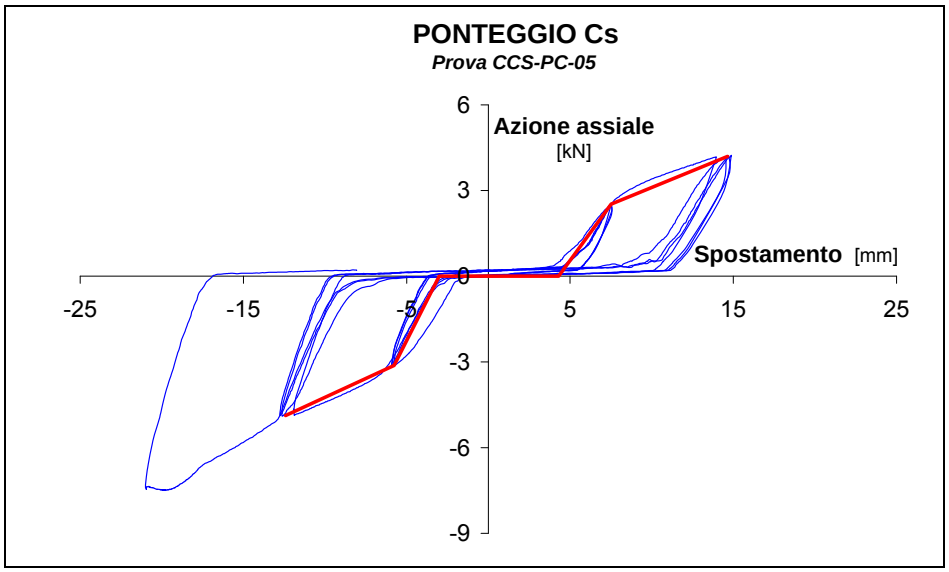


Figura 2.50 – Ponteggio Cs: confronto curva sperimentale - legge semplificata

Tabella 2.4 – Relazioni spostamento-azione assiale per diagonali di facciata

Ponteggio	Prova	Compressione (carichi positivi)			Trazione (carichi negativi)		
		Scorrimento	Legge spostamento-azione assiale nell'intervallo		Scorrimento	Legge spostamento-azione assiale nell'intervallo	
		d_{tot} [mm]	0-R_d	R_d-R_k	d_{tot} [mm]	0-R_d	R_d-R_k
Cs	CCS-PC-01	7,245	y=0,917x-6,645	y=0,239x+0,475	-1,318	y=0,922x+1,214	y=0,440x-0,938
	CCS-PC-02	4,990	y=0,793x-3,958	y=0,162x+1,522	-3,057	y=0,800x+2,445	y=0,349x-0,629
	CCS-PC-03	4,815	y=0,817x-3,934	y=0,215x+1,137	-3,097	y=0,884x+2,736	y=0,428x-0,168
	CCS-PC-04	7,431	y=0,792x-5,887	y=0,198x+0,620	-2,927	y=0,871x+2,549	y=0,291x-1,078
	CCS-PC-05	4,308	y=0,786x-3,384	y=0,234x+0,764	-3,003	y=1,132x+3,399	y=0,263x-1,610
	CCS-PC-06	2,849	y=0,852x-2,427	y=0,176x+1,953	-4,449	y=0,852x+3,791	y=0,348x+0,005
Cb	CCB-PC-01	3,087	y=0,574x-1,773	y=0,312x+0,242	-10,559	y=1,025x+10,822	y=1,320x+15,044
	CCB-PC-02	2,961	y=0,610x-1,805	y=0,354x-0,002	-10,352	y=0,981x+10,153	y=1,061x+11,335
	CCB-PC-03	2,040	y=0,552x-1,125	y=0,372x+0,099	-11,662	y=0,959x+11,190	y=0,991x+11,683
	CCB-PC-04	3,010	y=0,771x-2,320	y=0,348x+0,379	-8,998	y=0,799x+7,185	y=0,901x+8,640
	CCB-PC-05	3,620	y=0,536x-1,940	y=0,368x-0,500	-9,685	y=1,260x+12,203	y=1,109x+10,278
	CCB-PC-06	3,434	y=0,813x-2,790	y=0,415x+0,027	-8,562	y=0,723x+6,187	y=1,272x+13,986
D	MM-PC-01	10,642	y=0,451x-4,795	y=0,353x-3,200	-1,755	y=1,114x+1,955	y=0,429x-3,375
	MM-PC-02	2,187	y=0,565x-1,237	y=0,277x+0,837	-9,370	y=1,002x+9,388	y=0,599x+2,875
	MM-PC-03	3,322	y=0,516x-1,713	y=0,245x+0,797	-8,289	y=0,828x+6,863	y=0,319x-1,451
	MM-PC-04	4,811	y=0,565x-2,716	y=0,229x+0,624	-6,467	y=0,861x+5,568	y=0,427x-0,584
	MM-PC-05	6,904	y=0,634x-4,379	y=0,366x-1,298	-1,913	y=1,121x+2,144	y=0,689x-1,249
	MM-PC-06	4,382	y=0,405x-1,776	y=0,354x-1,183	-2,571	y=1,129x+2,901	y=0,552x-2,032

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

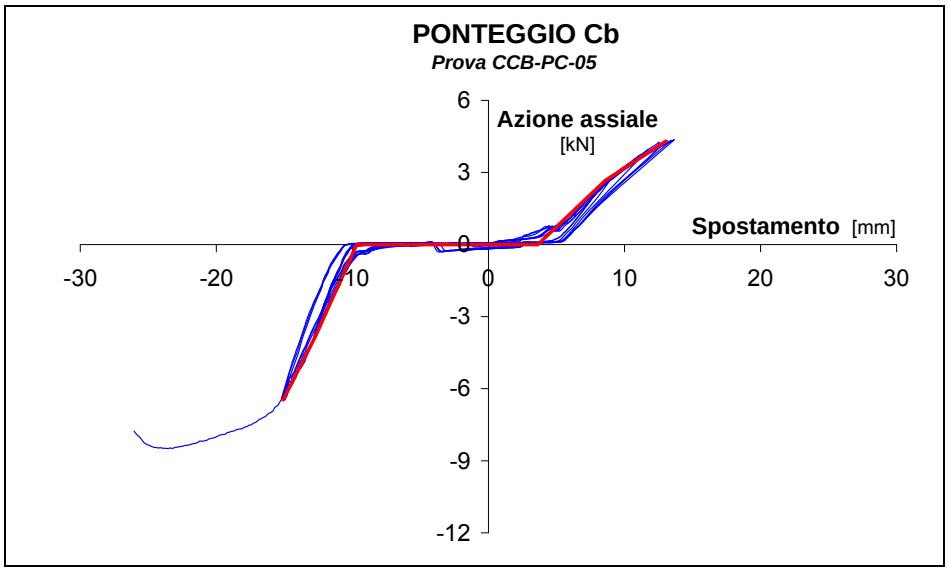


Figura 2.51 – Ponteggio Cb: confronto curva sperimentale - legge semplificata

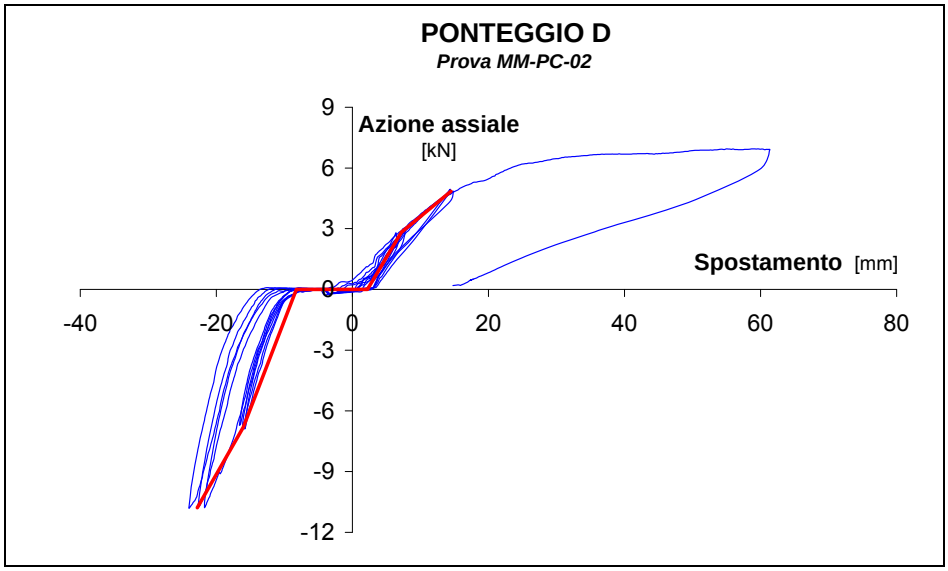


Figura 2.52 – Ponteggio D: confronto curva sperimentale - legge semplificata

2.7.1.4 Determinazione della legge globale spostamento-azione assiale

La necessità di pervenire ad una legge globale rappresentativa del comportamento delle singole prove sperimentali, ha richiesto una successiva elaborazione dei risultati presentati nella tabella 2.4.

Indicando con n il numero delle prove effettuate per l'assegnata tipologia di ponteggio, al termine della fase di elaborazione descritta nel paragrafo 2.7.1.2, si dispone di:

- 2n valori di scorrimento (n valori associati ai carichi positivi e n valori associati ai carichi negativi);
- 2n valori di rigidezza corrispondenti all'intervallo di carico 0-R_d (n valori associati ai carichi positivi e n valori associati ai carichi negativi);
- 2n valori di resistenza media di progetto $\overline{R_d}$ (n valori associati ai carichi positivi e n valori associati ai carichi negativi);
- 2n valori di resistenza media caratteristica $\overline{R_k}$ (n valori associati ai carichi positivi e n valori associati ai carichi negativi);
- 2n valori di spostamento medio $\overline{s_{Rk}}$ associati alla resistenza media caratteristica $\overline{R_k}$ (n valori associati ai carichi positivi e n valori associati ai carichi negativi).

L'elaborazione dei risultati si è attuata secondo il seguente schema:

a. determinazione dello scorrimento medio $\overline{\overline{d_{tot}}}$, associato ai carichi positivi ($\overline{\overline{d_{tot}^{+}}}$) ed ai carichi negativi ($\overline{\overline{d_{tot}^{-}}}$) valutato come media aritmetica degli scorrimenti $\overline{d_{tot}}$ associati alle n prove effettuate;

$$\overline{\overline{d_{tot}^{+}}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\overline{d_{tot}^{+}} \qquad [2.18]$$

$$\overline{\overline{d_{tot}^{-}}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\overline{d_{tot}^{-}} \qquad [2.19]$$

b. determinazione delle rigidezze medie $\overline{\overline{k_{Rd}}}$ associate ai carichi postivi $\overline{\overline{k_{Rd}^{+}}}$ ($\bar{c}_{pp}$ secondo la UNI EN 12811-3:2005 [7]) e ai carichi negativi $\overline{\overline{k_{Rd}^{-}}}$ ($\bar{c}_{mm}$ secondo la UNI EN 12811-3:2005 [7]) come:

$$\overline{\overline{k_{Rd}^{+}}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^{i=n}\frac{1}{\overline{\overline{k_{Rd}^{+}}}}} \qquad [2.20]$$

$$\overline{\overline{k_{Rd}^{-}}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^{i=n}\frac{1}{\overline{\overline{k_{Rd}^{-}}}}} \qquad [2.21]$$

dove:

$\overline{\overline{k_{Rd}^{+}}}$ rigidezza media per carichi positivi;

$\overline{k_{Rd}^{+}}$ rigidezza per carichi positivi associata i-esima prova;

$\overline{\overline{k_{Rd}^{-}}}$ rigidezza media per carichi negativi;

$\overline{k_{Rd}^{-}}$ rigidezza per carichi negativi associata i-esima prova;

n numero di prove effettuate.

c. verifica dell'utilizzabilità della medesima rigidezza per carichi postivi e carichi negativi attuata attraverso la seguente verifica:

$$\frac{\left|\left|\overline{\overline{k_{Rd}^{+}}}\right| - \left|\overline{\overline{k_{Rd}^{-}}}\right|\right|}{\left|\left|\overline{\overline{k_{Rd}^{+}}}\right| + \left|\overline{\overline{k_{Rd}^{-}}}\right|\right|} x100 < 10 \qquad [2.22]$$

Se la verifica è positivamente soddisfatta è possibile utilizzare un unico valore di rigidezza per carichi positivi e negativi pari al valor medio delle rigidezze medie (media tra $\overline{\overline{k_{Rd}^{+}}}$ e $\overline{\overline{k_{Rd}^{-}}}$);

d. determinazione del valor medio della resistenza di progetto $\overline{\overline{R_d}}$ distinta per carichi postivi $\overline{\overline{R_d^{+}}}$ e carichi negativi $\overline{\overline{R_d^{-}}}$ come:

$$\overline{\overline{R_d^{+}}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^{i=n}\frac{1}{\overline{\overline{R_d^{+}}}}} \qquad [2.23]$$

$$\overline{\overline{R_d^{-}}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^{i=n}\frac{1}{\overline{\overline{R_d^{-}}}}} \qquad [2.24]$$

dove:

$\overline{\overline{R_d^+}}$ resistenza media di progetto per carichi positivi;

$\overline{R_d^+}$ resistenza media di progetto per carichi positivi associata i-esima prova;

$\overline{\overline{R_d^-}}$ resistenza media di progetto per carichi negativi;

$\overline{R_d^-}$ resistenza media di progetto per carichi negativi associata i-esima prova;

n numero di prove effettuate.

e. determinazione del valor medio della resistenza di caratteristica $\overline{\overline{R_k}}$ distinta per carichi postivi $\overline{\overline{R_k^+}}$ e carichi negativi $\overline{\overline{R_k^-}}$ come:

$$\overline{\overline{R_k^+}} = \frac{\overline{R_k^+}}{n} \qquad [2.25]$$

$$\overline{\overline{R_k^-}} = \frac{\overline{R_k^-}}{n} \qquad [2.26]$$

dove:

$\overline{\overline{R_k^+}}$ resistenza media caratteristica per carichi positivi;

$\overline{R_k^+}$ resistenza media caratteristica per carichi positivi associata i-esima prova;

$\overline{\overline{R_k^-}}$ resistenza media caratteristica per carichi negativi;

$\overline{R_k^-}$ resistenza media caratteristica per carichi negativi associata i-esima prova;

n numero di prove effettuate.

f. determinazione dello spostamento medio $\overline{\overline{s_{Rk}}}$ associato ai carichi positivi ($\overline{\overline{s_{Rk}^+}}$) e ai carichi negativi ($\overline{\overline{s_{Rk}^-}}$) come:

$$\overline{\overline{s_{Rk}^+}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{\overline{\overline{s_{Rk}^+}}}} \qquad [2.27]$$

$$\overline{\overline{s_{Rk}^-}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{\overline{\overline{s_{Rk}^-}}}} \qquad [2.28]$$

dove:

$\overline{\overline{s_{Rk}^+}}$ spostamento medio per carichi positivi;

$\overline{s_{Rk}^+}$ spostamento per carichi positivi associato i-esima prova;

$\overline{\overline{s_{Rk}^-}}$ spostamento medio per carichi negativi;

$\overline{s_{Rk}^-}$ spostamento per carichi negativi associato i-esima prova;

n numero di prove effettuate.

La legge media spostamento-azione assiale associata al diagonale del ponteggio considerato è caratterizzata dagli scorrimenti medi associati ai carichi positivi e negativi $\overline{\overline{d_{tot}^+}}$ $\overline{\overline{d_{tot}^-}}$, dalle rigidezze medie $\overline{\overline{k_{Rd}^+}}$ $\overline{\overline{k_{Rd}^-}}$ associate agli intervalli di carico $0\text{-}\overline{\overline{R_d^+}}$ e $0\text{-}\overline{\overline{R_d^-}}$ e dalle resistenze caratteristiche $\overline{\overline{R_k^+}}$ e $\overline{\overline{R_k^-}}$ alle quali sono associati gli spostamenti medi $\overline{\overline{s_{Rk}^+}}$ e $\overline{\overline{s_{Rk}^-}}$, rispettivamente.

2.7.1.5 La legge globale spostamento – azione assiale

L'elaborazione dei risultati in accordo alla procedura illustrata al paragrafo precedente conduce ai risultati raggruppati nella Tabella 2.5.

I dettagli delle elaborazione sono riportati nell'Allegato 3.

Tabella 2.5 - Leggi spostamento - azione assiale per diagonali di facciata

Ponteggio	Carichi positivi					Carichi negativi				
	d_{tot}^{+} [mm]	k_{Rd}^{+} [kN/mm]	R_d^{+} [kN]	s_{Rk}^{+} [mm]	R_k^{+} [kN]	d_{tot}^{-} [mm]	k_{Rd}^{-} [kN]	R_d^{-} [kN/mm]	s_{Rk}^{-} [kN]	R_k^{-} [mm]
Cs	5,273	0,824	2,876	17,397	4,640	-2,975	0,899	-2,908	-11,257	-4,709
Cb	3,025	0,626	2,665	12,036	4,398	-9,970	0,928	-4,051	-17,016	-7,058
D	5,375	0,511	2,870	17,174	4,771	-5,061	0,993	-6,707	-18,678	-10,601

Per il significato dei simboli della tabella 2.5 si rimanda al precedente paragrafo. Le relazioni spostamento-azione assiale associate ai risultati di tabella 2.5 sono riportate in tabella 2.6.

Tabella 2.6 - Risposte medie per diagonali di facciata

Ponteggio					
Cs		Cb		D	
Spostamento [mm]	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Carico [kN]
-11,399	-4,709	-17,016	-7,058	-18,678	-10,601
-6,350	-2,908	-14,336	-4,051	-11,816	-6,707
-2,975	0,000	-9,970	0,000	-5,061	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5,273	0,000	3,025	0,000	5,375	0,000
8,612	2,876	7,284	2,665	10,992	2,870
17,244	4,640	12,036	4,398	17,174	4,771

Le figure 2.53-2.55 presentano il confronto tra le leggi semplificate spostamento-azione assiale associate alle prove cicliche e la corrispondente risposta media (linea ingrossata di colore rosso), per i ponteggi Cs, Cb e D rispettivamente.

Nelle figure 2.56-2.58 si riportano i confronti tra le curve sperimentali e la corrispondente legge spostamento-azione assiale "globale" di tre prove riguardanti i ponteggi Cs, Cb e D, rispettivamente.

I confronti fra tutte le risposte sperimentali e le corrispondenti leggi spostamento-azione assiale "globale" sono riportate nell'Allegato 3.

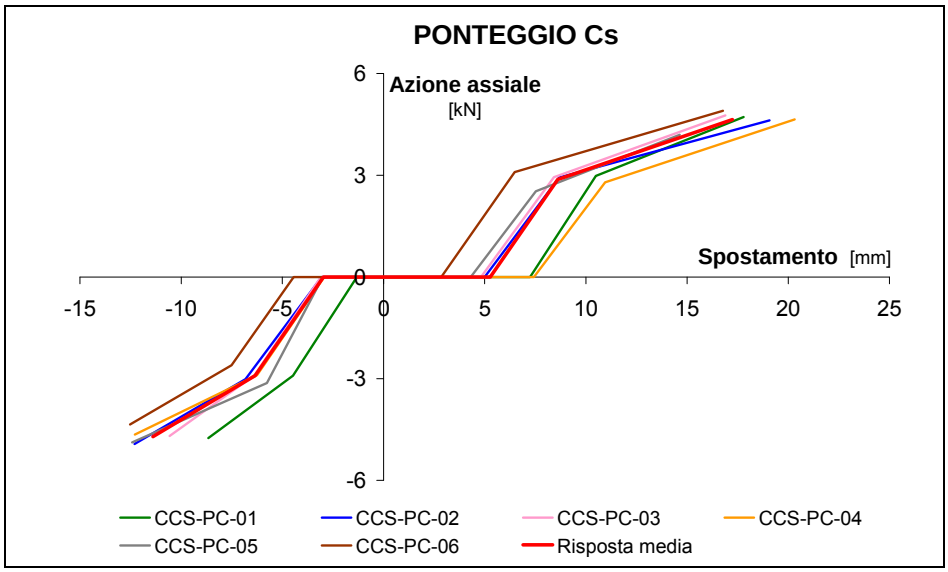


Figura 2.53 – Ponteggio Cs: confronto leggi semplificate-legge semplificata globale

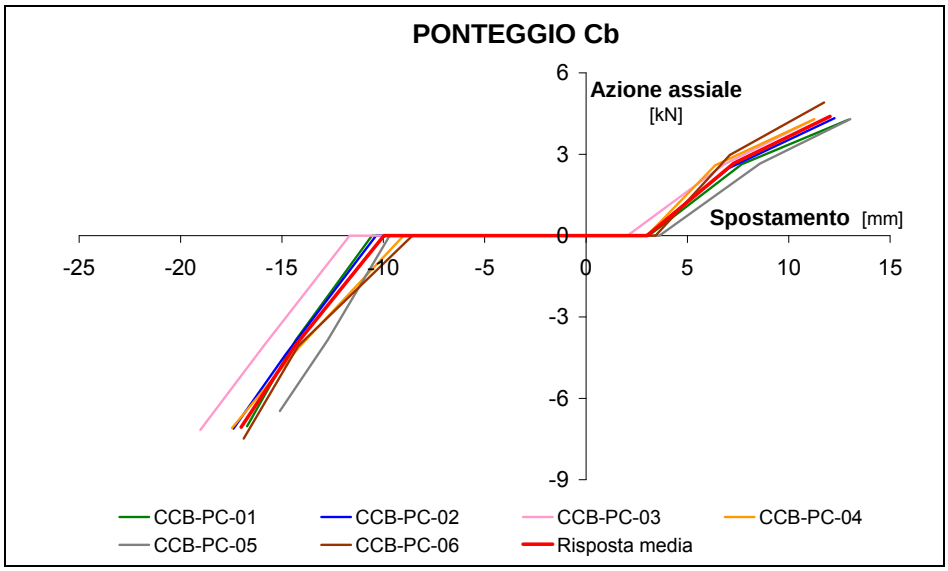


Figura 2.54 – Ponteggio Cb: confronto leggi semplificate-legge semplificata globale

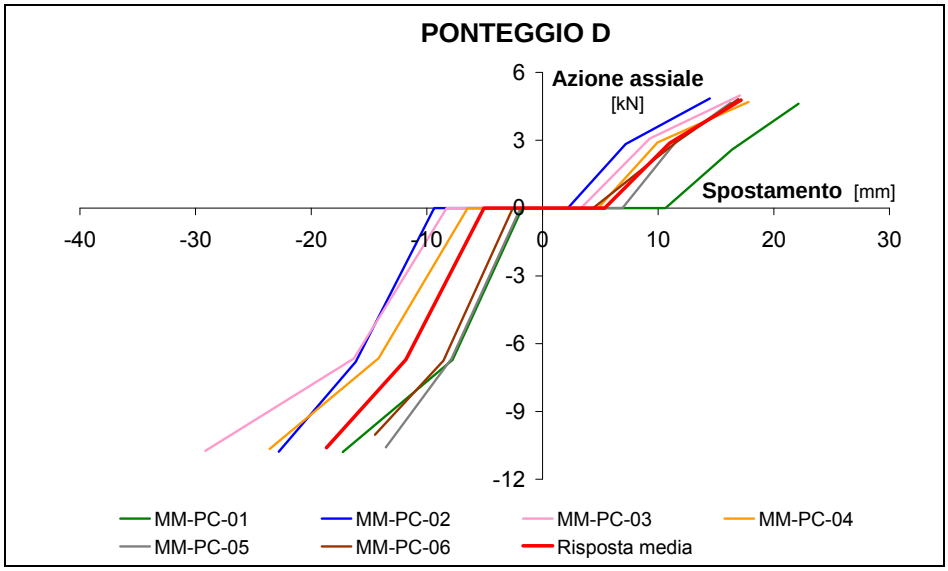


Figura 2.55 – Ponteggio D: confronto leggi semplificate-legge semplificata globale

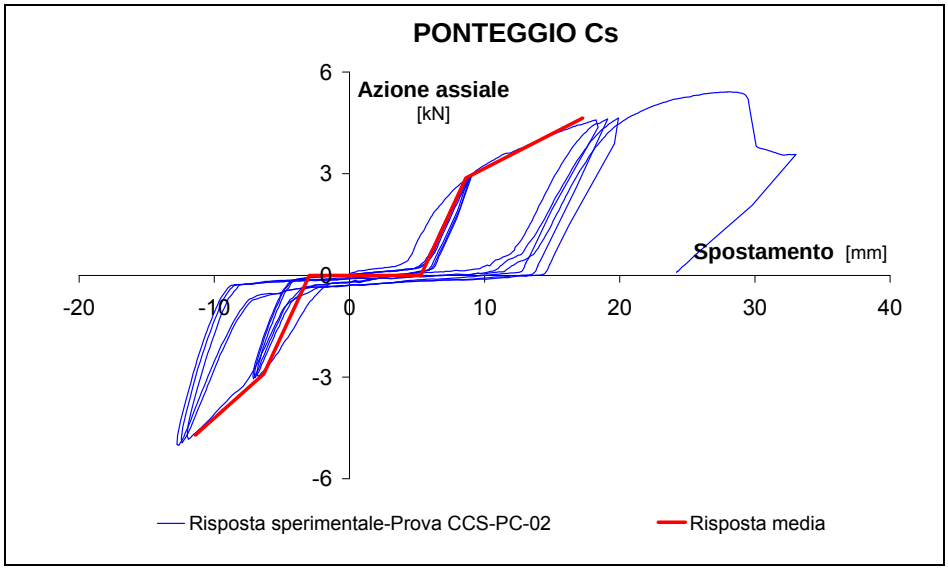


Figura 2.56 – Ponteggio Cs: confronto curva sperimentale–legge semplificata globale

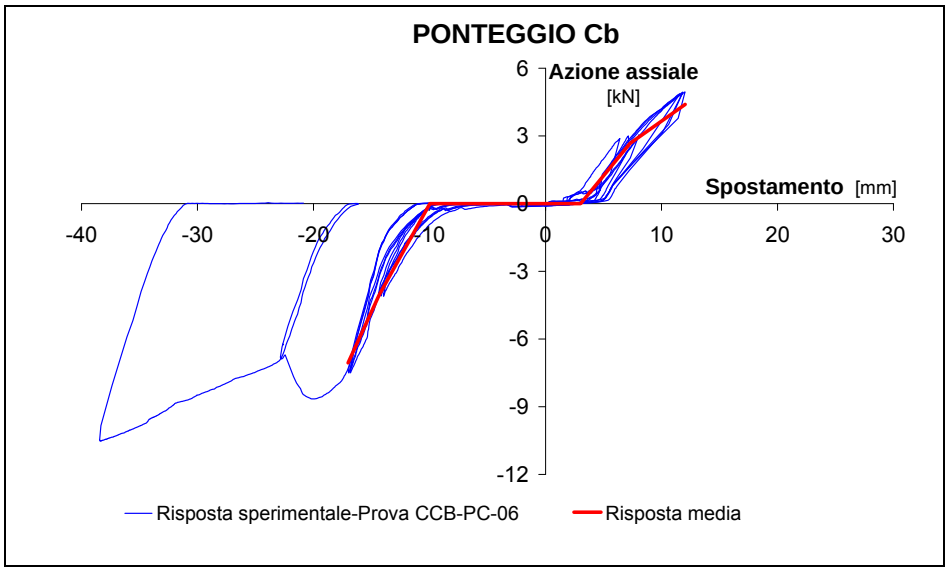


Figura 2.57 –Ponteggio Cb: confronto curva sperimentale–legge semplificata globale

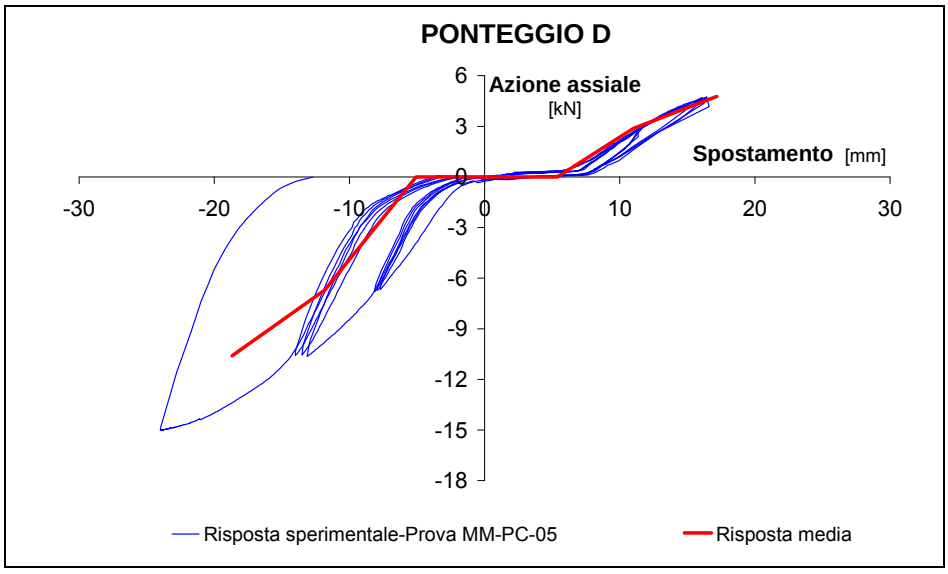


Figura 2.58 – Ponteggio D: confronto curva sperimentale–legge semplificata globale

I risultati delle tabelle 2.5-2.6 e le figure 2.53-2.55 mostrano chiaramente l'asimmetria di comportamento in trazione e in compressione dei sistemi di facciata, in termini sia di rigidezze sia di scorrimenti iniziali. Il confronto tra le leggi spostamento-azione assiale relative alla medesima tipologia di ponteggio (Fig. 2.53-2.55) analizzate separatamente in compressione (carichi positivi) ed in trazione (carichi negativi) mostrano come le risposte si differenziano soprattutto per gli scorrimenti iniziali, mentre le rigidezze sono, in media, simili tra loro. La conseguenza dell'asimmetria degli scorrimenti, si ripercuote sulle leggi medie globali spostamento-azione assiale che, essendo caratterizzate da uno scorrimento pari alla media tra gli scorrimenti rilevati in tutte le singole prove, possono discostarsi anche in modo marcato rispetto alle corrispondenti leggi sperimentali (Fig. 2.58).

E' interessante inoltre osservare che gli scorrimenti totali associati alle singole prove, intesi come somma degli scorrimenti in trazione ed in compressione, siano molto prossimi tra loro. Questo trova conferma dall'osservazione che gli scorrimenti iniziali sono diretta conseguenza del gioco tra gli elementi e che, per la particolare tipologia di sistemi provati e di modalità di prova, nella loro globalità questi possono essere ritenuti pressoché uniformi in prove successive.

In considerazione che gli scorrimenti dipendono dal posizionamento del diagonale rispetto alla boccola o al perno, si è ritenuto opportuno per una migliore rappresentazione della risposta del diagonale, centrare le risposte medie rispetto all'origine degli assi. Le leggi spostamento-azione assiale ottenute sono indicate in tabella 2.7. Il confronto tra le risposte dei diagonali è presentato in figura 2.59.

Tabella 2.7 - Risposte medie per diagonali di facciata

Ponteggio					
Cs		Cb		D	
Spostamento [mm]	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Carico [kN]
-12,548	-4,709	-13,544	-7,058	-18,835	-10,601
-7,499	-2,908	-10,864	-4,051	-11,966	-6,707
-4,124	0,000	-6,497	0,000	-5,218	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4,124	0,000	6,497	0,000	5,218	0,000
7,463	2,876	10,756	2,665	10,835	2,870
16,095	4,640	15,508	4,398	17,017	4,771

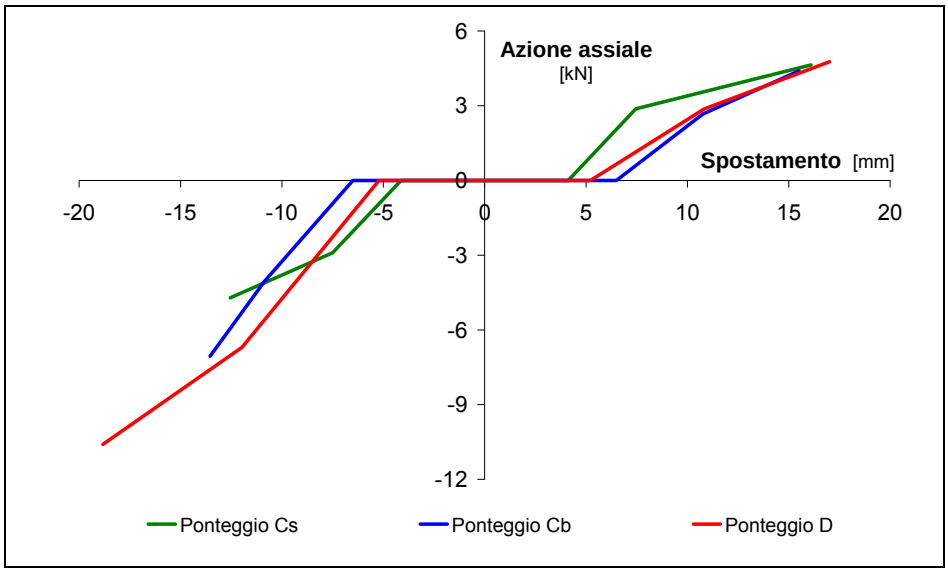


Figura 2.59 – Confronto tra le risposte dei diagonali di facciata

2.8 Considerazioni finali

Quale commento finale alla fase sperimentale appare importante sottolineare le difficoltà interpretative ed applicative della normativa. Questo riguarda sia l'aspetto sperimentale sia la procedura di analisi dei risultati di prova.

Dal punto di vista sperimentale si osserva che la normativa non è esaustiva né per quanto riguarda lo schema di prova e né per quanto riguarda le modalità di svolgimento della prova. Questi invece sono aspetti chiave, soprattutto nell'ambito di una progettazione che, nello spirito della norma UNI EN 12810-2:2004 [4], è basata sulle analisi numeriche sviluppate su modelli di calcolo affidabili, per la cui definizione la sperimentazione assume un ruolo chiave.

La procedura di elaborazione dei dati così come descritta dalla normativa presenta alcuni punti non chiari e, per certi aspetti contraddittori, non facilitando l'operatore nella fase di analisi dei risultati. A ciò si aggiunge il fatto che la procedura è laboriosa e caratterizzata da un onere computazionale non trascurabile. Se accanto a ciò si considera la dispersione dei risultati sperimentali, si osserva come sia difficile immaginare lo sviluppo di una procedura automatizzata di gestione dei dati di supporto all'operatore.

3. LE ANALISI NUMERICHE

In questo capitolo sono presentati i risultati di alcune analisi numeriche svolte sulle tre configurazioni di ponteggio considerate in questo studio. L'obiettivo di questa parte del lavoro è quello validare l'affidabilità e l'operatività dei modelli di calcolo messi a punto e, nel contempo, di acquisire informazioni sulla sensibilità dei sistemi considerati al variare della risposta dei sistemi di impalcato.

I modelli di calcolo sono stati messi a punto nel rispetto delle prescrizioni delle normative UNI EN 12810-2:2004 [4] e riguardano il sistema 3D nel suo complesso ed il telaio di stilata. Non è trattato il caso del modello 2D di facciata, al quale è stato riservato un capitolo a parte (Cap. 6).

Le analisi numeriche, elastiche del secondo ordine, sono state svolte mediante i programmi di calcolo ANSYS [12] e PEP micro [13], quest'ultimo utilizzato limitatamente alle analisi 2D di stilata.

In questo capitolo, dopo una descrizione sintetica dei ponteggi analizzati, limitata a quanto necessario alla fase di modellazione, sono descritti ed analizzati i modelli di calcolo 3D e 2D messi a punto. Successivamente sono presentati e confrontati i risultati delle analisi 3D e 2D svolte al variare delle caratteristiche dei sistemi di impalcato. I risultati hanno dato lo spunto per successive analisi parametriche alle quali è dedicato il capitolo 4.

3.1 I casi considerati

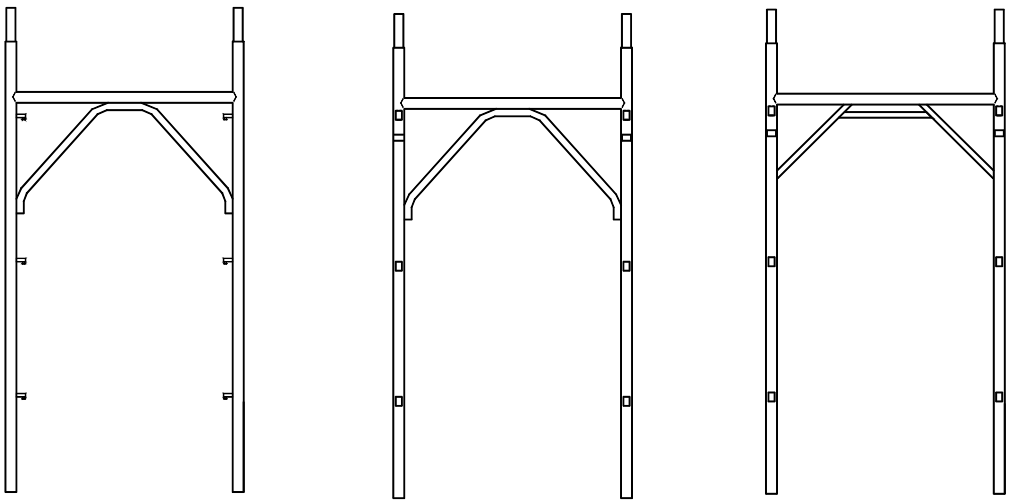
Lo studio ha riguardato tre tipologie di ponteggio a telai prefabbricati, con telaio aperto a portale, di produzione italiana, denominate Cs, Cb e D (§1.2).

Lo studio ha considerato un'unica configurazione comune a tutti e tre i ponteggi, caratterizzata da cinque campate, da dodici livelli, da tavole di impalcato disposte ad ogni livello e dall'assenza di mensole. I dati salienti della configurazione considerata sono riassunti in tabella 3.1, con riferimento ai tre tipi di ponteggio analizzati. Le dimensioni sono riferite alla linea d'asse degli elementi.

Tabella 3.1 - Caratteristiche della configurazione di studio

		Ponteggio		
		Cs	Cb	D
n. campate		5	5	5
n. impalcati		12	12	12
Larghezza stilata	mm	1050	1050	1048
Altezza interpiano	mm	2000	2000	2000
Lunghezza campata	mm	2500	2500	2500

Le figure 3.1-3.4 descrivono in modo schematico le tipologie analizzate. Nel dettaglio, la figura 3.1 si riferisce alle geometrie dei telai, mentre le figure 3.2, 3.3 e 3.4 descrivono il sistema di controventamento di facciata. Al riguardo va precisato che le configurazioni analizzate presentano i controventi di facciata sulla sola facciata esterna.



Ponteggio Cs
- telaio a spinotti -

Ponteggio Cb
- telaio a boccole -

Ponteggio D
- telaio a boccole -

Figura 3.1 - Geometrie dei telai

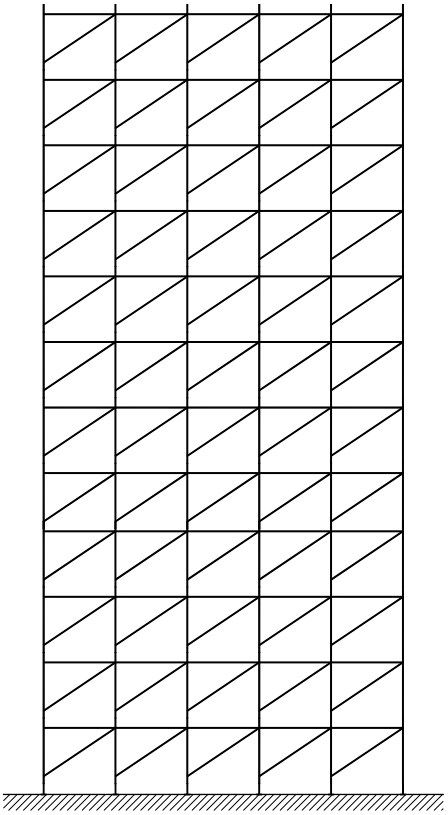


Figura 3.2 - Ponteggio Cs: sistema di controventamento nel piano di facciata

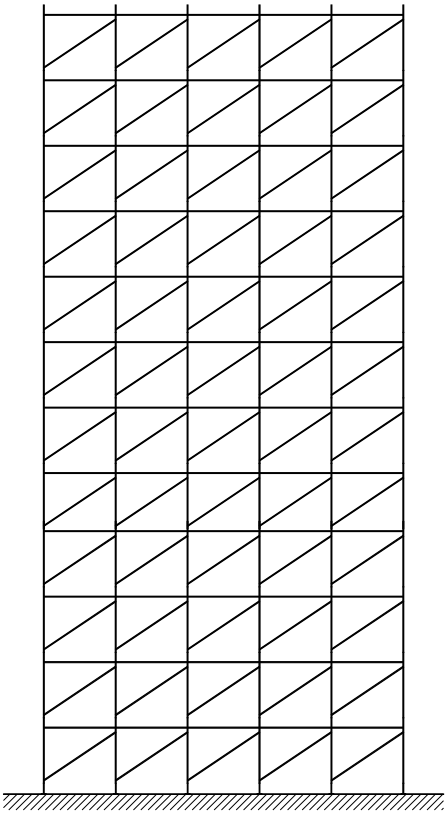


Figura 3.3 - Ponteggio Cb: sistema di controventamento nel piano di facciata

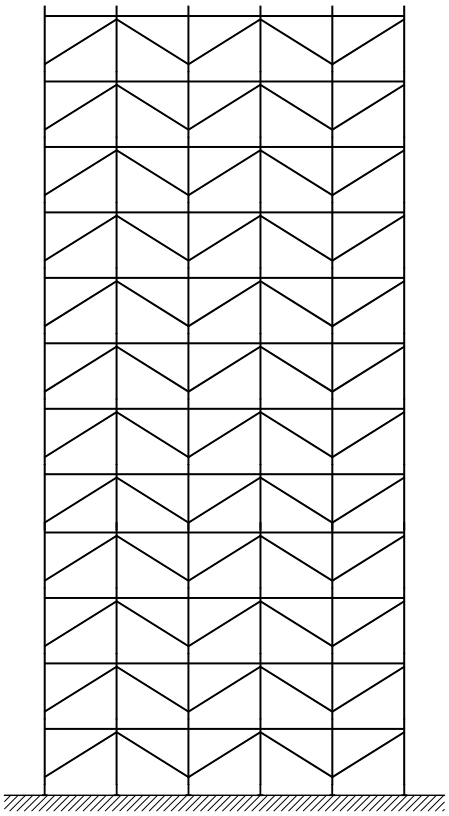


Figura 3.4 - Ponteggio D: sistema di controventamento nel piano di facciata

I ponteggi considerati si distinguono principalmente per la diversa disposizione dei controventi di facciata e per la risposta dei sistemi di piano. Differenze minori si riscontrano invece nella geometria del telaio e della basetta. Si osserva inoltre che i ponteggi Cb e D sono del tipo a boccole mentre il ponteggio Cs è del tipo a spinotti. Nei sistemi a boccole si riscontra una eccentricità tra montanti e diagonali di facciata invece assente nel caso dei sistemi a spinotti. I ponteggi Cs e Cb, che sono caratterizzati da un sistema di controventamento di facciata simile e dalle medesime tavole di impalcato, sono stati selezionati con l'obiettivo di analizzare l'influenza dell'eccentricità tra montanti e diagonali di facciata sulla risposta del sistema.

Le caratteristiche dimensionali (valori nominali) dei principali elementi dei ponteggi sono raccolte nelle tabelle 3.2 e 3.3. Una più dettagliata descrizione delle geometrie è reperibile nell'Allegato 1.

Tabella 3.2 - Caratteristiche dei ponteggi Cs e Cb

Telaio			Elementi di facciata	
Montante	Traverso	Irrigidimenti	Correnti	Diagonali
ϕ^* = 48,3 mm t* = 2,9 mm	ϕ^* = 48,3 mm t* = 2,9 mm	ϕ^* = 26,9 mm t* = 2,3 mm	ϕ^* = 40,0 mm t* = 2,0 mm	ϕ^* = 40,0 mm t* = 2,0 mm

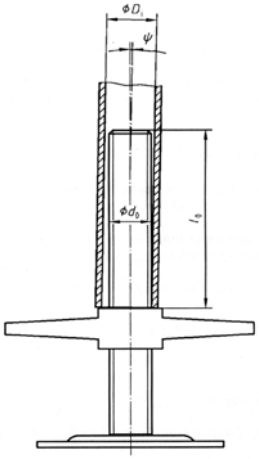
*ϕ, t diametro e spessore dei tubi

Tabella 3.3 - Caratteristiche dei ponteggio D

Telaio			Elementi di facciata	
Montante	Traverso	Irrigidimenti	Correnti	Diagonali
ϕ^* = 48,3 mm t* = 2,9 mm	ϕ^* = 48,3 mm t* = 2,9 mm	ϕ^* = 26,9 mm t* = 2,0 mm	ϕ^* = 40,0 mm t* = 2,0 mm	ϕ^* = 40,0 mm t* = 2,0 mm

*ϕ e t diametro e spessore dei tubi

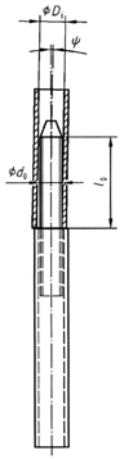
La geometria del vincolo di base e della "giunzione" tra telai successivi giocano un ruolo fondamentale ai fini della risposta del ponteggio. I giochi montante-basetta e tra i telai sovrapposti determinano infatti delle imperfezioni locali rappresentate, in sede progettuale, come distorsioni angolari equivalenti. Nel caso in cui non siano disponibili dati sperimentali al riguardo, la norma UNI EN 12811-1:2004 [5] prevede la loro valutazione attraverso formule semplificate basate sulle proprietà geometriche nominali dei ponteggi. La figura 3.5 illustra le relazioni proposte dalla normativa.



a)

$$\phi = \text{arctg}\frac{(D_i - d_o)}{l_o}$$

- φ distorsione angolare
- D_i diametro nominale interno del montante tubolare
- d_0 diametro nominale esterno della basetta regolabile
- l_0 lunghezza nominale di sovrapposizione



b)

$$\phi = \text{arctg}\frac{(D_i - d_o)}{l_o}$$

- φ distorsione angolare
- D_i diametro nominale interno del montante tubolare
- d_0 diametro nominale esterno dello spinotto
- l_0 lunghezza nominale di sovrapposizione

Figura 3.5 - Imperfezioni imperfezione alla base (a) e tra i telai (b) secondo UNI EN 12811-1:2004 [5]

Per le casistiche considerate, l'applicazione delle relazioni di figura 3.5, si traduce nelle imperfezioni angolari indicate nelle tabelle 3.4 e 3.5. In particolare, la tabella 3.4 che riguarda le imperfezioni alla base, è riferita al caso di basetta completamente estesa, così come previsto dalla norma UNI EN 12811-1:2004 [5].

Tabella 3.4: Imperfezioni angolari alla base

Ponteggio tipo	D_i [mm]	d_0 [mm]	L_0 [mm]	tan φ
Cs	42,5	38,0	170,0	0,0264
Cb	42,5	38,0	170,0	0,0264
D	42,5	38,0	75,0	0,0600

Tabella 3.5: Imperfezioni angolari tra telai

Ponteggio tipo	D_i [mm]	d_0 [mm]	l_0 [mm]	tan φ
Cs	42,5	38,0	100,0	0,0250
Cb	42,5	38,0	150,0	0,0166
D	42,5	38,0	100,0	0,0250

In accordo alla norma UNI EN 12810-2:2004 [4], l'effetto di controventamento offerto dalle tavole di impalcato può essere considerato in modo semplificato attraverso l'introduzione di vincoli elastici, che ne riproducono la risposta nel piano parallelo e nel piano ortogonale all'opera servita. Questo approccio consente un notevole risparmio dal punto di vista computazionale: nei modelli 3D evita il ricorso a modellazioni più complesse che possono prevedere l'utilizzo di elementi finiti 2D tipo "shell" o di sistemi di aste equivalenti agli elementi di piano. Ulteriormente nei modelli 2D i vincoli elastici permettono di tener conto dell'interazione tra i telai successivi e tra i due piani del ponteggio paralleli all'opera servita.

Secondo quanto previsto dalla normativa, la caratterizzazione dei vincoli elastici, e quindi delle tavole di impalcato, deve avere luogo per via sperimentale. Nell'ambito del progetto di ricerca ISPEL B4/2000 [11] ha avuto luogo una campagna sperimentale che ha interessato i sistemi di piano dei ponteggi C e D. In questo lavoro, si è quindi fatto riferimento ai risultati della sperimentazione già svolta. I dati considerati sono riassunti nelle figure 3.6-3.9 in termini di leggi semplificate carico-spostamento. In dettaglio, le figure 3.6 e 3.7 si riferiscono ai ponteggi C, mentre le figure 3.8 e 3.9 riguardano il ponteggio tipo D. Si osserva come le relazioni carico-spostamento non siano simmetriche per carichi positivi e carichi negativi, e siano caratterizzate da un marcato scorrimento iniziale (gap) che simula i giochi tra le tavole ed i telai. Il comportamento successivo allo scorrimento inziale è descritto mediante due spezzate che riproducono la risposta dell'impalcato negli intervalli di carico 0-R_d e R_d-R_k rispettivamente, con R_d e R_k resistenza di progetto e caratteristica del sistema di impalcato.

In considerazione della convenzionalità del concetto di carico positivo e negativo, se riferito alle tavole di impalcato pensate come parte integrante di una struttura, si è ritenuto opportuno elaborare i risultati sperimentali (Fig. 3.6-3.9) in modo da ottenere delle relazioni carico-spostamento simmetriche. A tal fine è stato assunto come parametro di riferimento la pendenza del tratto di spezzata compreso nell'intervallo di carico 0-R_d (k_{Rd}). In particolare:

- nei casi in cui la pendenza k_{Rd} è comune per carichi positivi e negativi, la legge carico-spostamento è stata così caratterizzata: uno scorrimento iniziale di valore pari al massimo registrato in corso prova, un tratto rettilineo a pendenza k_{Rd} nell'intervallo 0-R_d ed un successivo tratto rettilineo con pendenza pari alla minima registrata nell'intervallo di carico R_d-R_k (k_{Rk});
- nei casi in cui la pendenza k_{Rd} non è uguale per carichi positivi e negativi, la legge carico-spostamento è stata definita con l'obiettivo di massimizzare gli effetti del secondo ordine durante la fase di normale utilizzo del ponteggio (intervallo di carico 0-R_d). A tal fine si è assunto il ramo di spezzata caratterizzato dalla minore pendenza nell'intervallo di carico 0-R_d.

Le relazioni ottenute sono state utilizzate sia per carichi positivi che per quelli negativi (Fig. 3.10-3.13).

Spostamento [mm]	Carico [kN]
-70,91	-1,21
-52,10	-0,74
-36,59	0,00
0,00	0,00
29,72	0,00
45,23	0,74
70,91	1,21

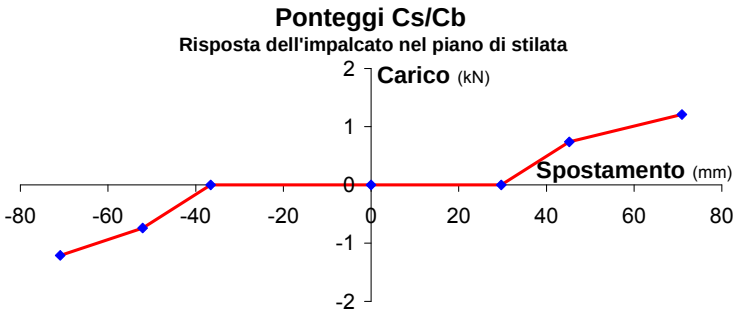


Figura 3.6 - Ponteggi C: risposta delle tavole di impalcato nel piano di stilata

Spostamento [mm]	Carico [kN]
-35,1	-6,55
-28,15	-3,97
-17,92	0,00
0	0,00
10,31	0,00
25,51	3,97
35,1	6,55

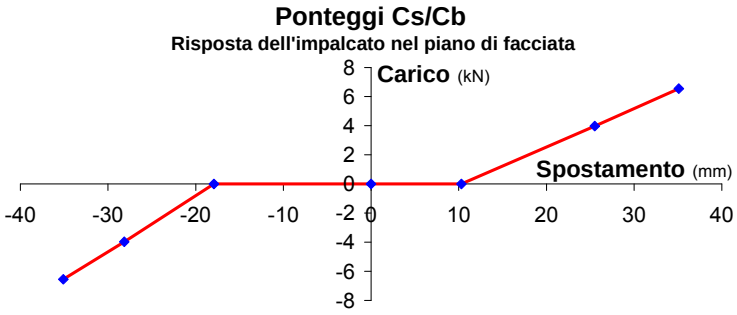


Figura 3.7 - Ponteggi C: risposta delle tavole di impalcato nel piano di facciata

Spostamento [mm]	Carico [kN]
-48,84	-1,43
-34,51	-0,87
-22,64	0,00
0	0,00
15,98	0,00
31,97	0,87
48,84	1,43

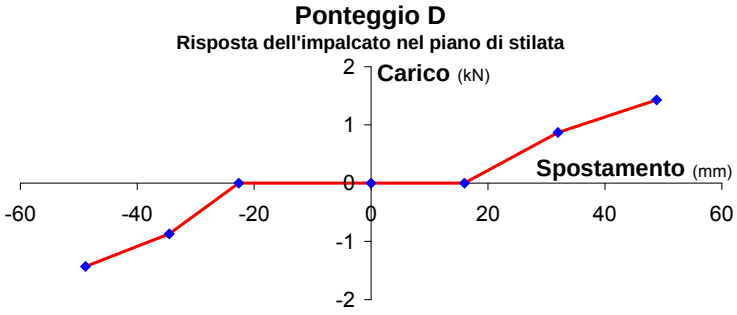


Figura 3.8 - Ponteggio D: risposta delle tavole di impalcato nel piano di stilata

Spostamento [mm]	Carico [kN]
-32,05	-3,95
-23,46	-2,39
-12,12	0
0	0
3,95	0
10,39	2,39
15,96	3,95

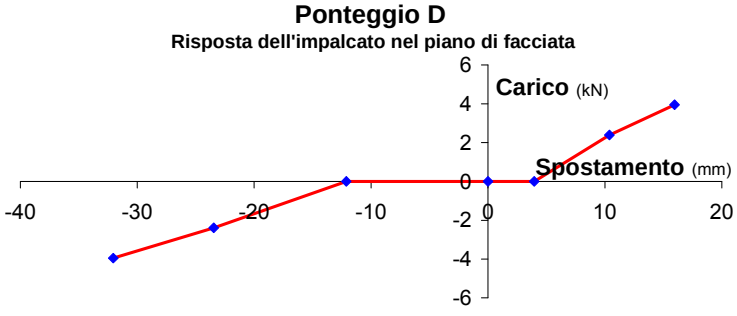


Figura 3.9 - Ponteggio D: risposta delle tavole di impalcato nel piano di facciata

Spostamento [mm]	Carico [kN]
-70,91	-1,21
-52,10	-0,74
-36,59	0
0,00	0
36,59	0
52,10	0,74
70,91	1,21

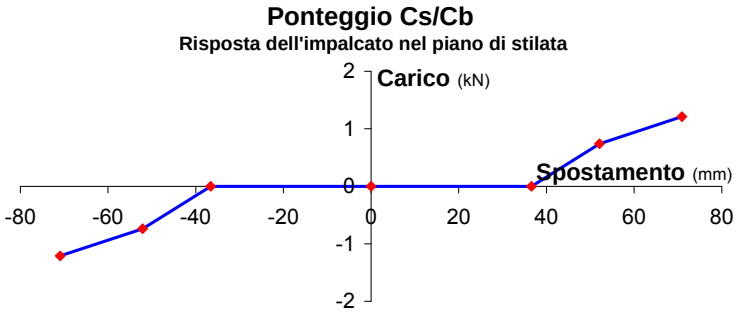


Figura 3.10 - Ponteggi C: risposta semplificata delle tavole di impalcato nel piano di stilata

Spostamento [mm]	Carico [kN]
-35,10	-6,55
-25,51	-3,97
-10,31	0
0,00	0
10,31	0
25,51	3,97
35,10	6,55

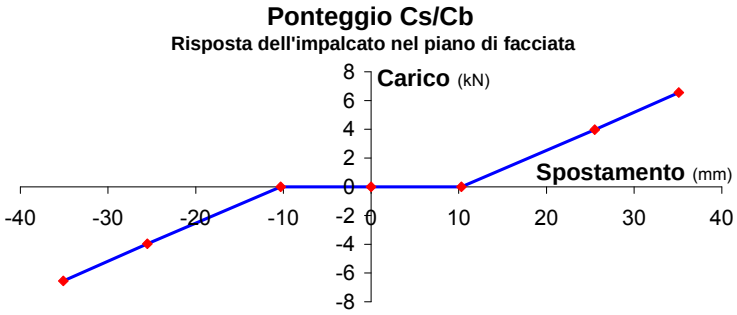


Figura 3.11 - Ponteggi C: risposta semplificata delle tavole di impalcato nel piano di facciata

Spostamento [mm]	Carico [kN]
-48,84	-1,43
-31,97	-0,87
-15,98	0
0,00	0
15,98	0
31,97	0,87
48,84	1,43

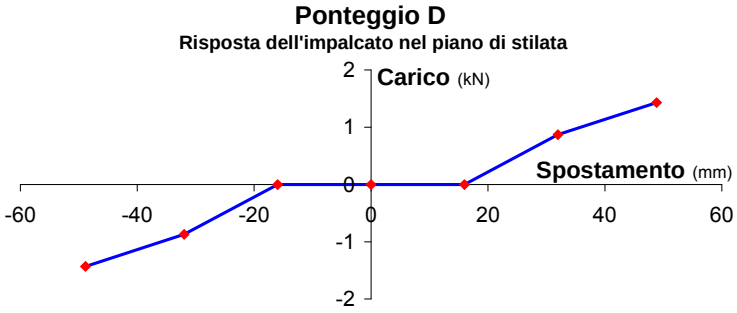


Figura 3.12 - Ponteggio D: risposta semplificata delle tavole di impalcato nel piano di stilata

Spostamento [mm]	Carico [kN]
-32,05	-3,95
-23,46	-2,39
12,12	0
0,00	0
12,12	0
23,46	2,39
32,05	3,95

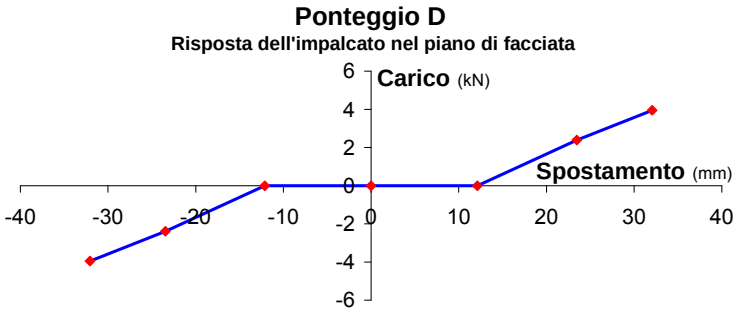


Figura 3.13 - Ponteggio D: risposta semplificata delle tavole di impalcato nel piano di facciata

Per tutti i ponteggi considerati è previsto l'utilizzo di un acciaio S235 JR. In sede di analisi, laddove necessario, sono state considerate le proprietà meccaniche minime previste per questo tipo di acciaio: si è assunta una tensione caratteristica di snervamento pari a 235 MPa ed un modulo di elasticità di 206000 MPa.

3.2 I modelli di calcolo

3.2.1 Le caratteristiche generali del modello 3D

Per le analisi è stato utilizzato il programma ANSYS ver. 11.0 [12]. Il programma, utilizzato principalmente per scopi di ricerca, permette di svolgere analisi del primo e del secondo ordine, in campo lineare e non lineare di strutture comunque complesse.

Per la modellazione dei ponteggi sono stati utilizzati elementi finiti a sviluppo lineare ed in particolare l'elemento PIPE16 in grado di operare nel campo dei grandi spostamenti e delle grandi rotazioni.
Gli elementi elastici equivalenti alle tavole di impalcato sono stati modellati mediante elementi COMBIN39 o COMBIN14 in relazione al tipo di legge carico-spostamento ad essi associata. L'elemento COMBIN39 permette infatti di riprodurre leggi non lineari caratterizzate anche dalla presenza di gap iniziali, mentre l'elemento COMBIN14 riproduce il solo comportamento lineare indefinitamente elastico.
La necessità di garantire l'accuratezza dei risultati e nel contempo di ridurre l'onere computazionale ha richiesto l'esecuzione di analisi preliminari di sensitività della risposta del sistema al variare della discretizzazione utilizzata. E' stata così individuata una mesh "ottimale", che prevede la discretizzazione dei:

- montanti con sette elementi finiti;
- traversi del telaio con quattro elementi finiti;
- irrigidimenti inclinati del telaio con due elementi finiti;
- irrigidimento orizzontale, ove presente, con un elemento finito;
- diagonali di facciata con cinque elementi finiti;
- correnti di facciata con cinque elementi finiti.

Per quanto riguarda i vincoli tra gli elementi contigui sono state fatte le seguenti ipotesi:

- montanti: elementi continui dotati di imperfezioni localizzate in presenza degli spinotti di collegamento tra i telai successivi;
- traversi dei telai: considerati continui con i montanti e gli irrigidimenti del telaio;
- irrigidimenti dei telai: considerati continui con i montanti e i traversi;
- correnti: vincolati ai montanti nel piano orizzontale mediante cerniere e nel piano verticale in modo da garantire la continuità strutturale;
- diagonali di facciata: vincolati ai montanti mediante cerniere ad asse orizzontale. Le cerniere sono state realizzate mediante accoppiamento dei gradi di libertà traslazionali e rotazionali escluso il grado di libertà pertinente alla rotazione libera.

Il modello ha tenuto conto anche delle eventuali eccentricità del sistema di connessione dei diagonali di facciata rispetto all'asse dei montanti. Per il ponteggio Cs, caratterizzato da un sistema di connessione a spinotti, non è stata considerata alcuna eccentricità. Per le rimanenti due tipologie di ponteggio, ponteggi Cb e D, dotati da un sistema di connessione a boccole, si è assunta una eccentricità nominale pari 36 mm.
Per quanto riguarda i vincoli rispetto all'esterno si è assunto:

- vincoli alla base: cerniere ideali;
- vincoli all'opera servita: elementi di lunghezza pari a 200mm con caratteristiche geometriche e meccaniche uguali al montante, caratterizzati da vincolo di continuità rispetto al montante del ponteggio e da un vincolo a traslazione verticale verso l'opera servita;
- tavole di impalcato: simulate mediante vincoli elastici disposti nelle due direzioni principali del ponteggio (piano di stilata e piano di facciata).

Nelle figure 3.14, 3.15 e 3.16 sono illustrate le geometrie dei ponteggi rappresentate a linea d'asse degli elementi.
La disposizione del sistema di controventamento di facciata e dei vincoli all'opera servita permette di distinguere due tipologie di telai di stilata, convenzionalmente indicate nel seguito come Stilata A e Stilata tipo B, rappresentative dell'intero ponteggio (Fig. 3.17).
Le imperfezioni del sistema sono state imposte lungo le due direzioni principali del ponteggio. In particolare sono state considerate:

- nel piano di stilata:
  - l'imperfezione alla base (Tab. 3.4);
  - le imperfezioni tra telai successivi (Tab. 3.5),
  - le imperfezioni degli elementi, applicate ai soli montanti. In accordo alla norma UNI EN 1993-1-1:2005 [8] queste sono state assunte con un andamento parabolico di massima ampiezza pari a $e_{0,d}$ = L/600, con L lunghezza dell'elemento .
- nel piano di facciata:
  - l'imperfezione alla base (Tab 3.4);
  - l'imperfezione globale del telaio definita come fuori piombo iniziale caratterizzato da un'inclinazione pari alla metà del valore dell'imperfezioni tra telai successivi (Tab. 3.5). Rapportando le imperfezioni globali all'altezza del ponteggio, nei ponteggi Cs e D è stato applicato un fuori piombo pari a h/80 mentre nel ponteggio Cb pari a h/120. Si osserva che, se confrontati con le prescrizioni dell'Eurocodice 3 [8] per le strutture in acciaio, questi valori sono particolarmente penalizzanti. Alcune analisi di sensitività svolte sulle configurazioni analizzate, hanno comunque evidenziato una limitata influenza di questo parametro sulla risposta dei sistemi;

- le imperfezioni degli elementi, applicate ai soli montanti, valutate secondo quanto indicato al punto precedente.

Per massimizzare gli effetti legati alle imperfezioni, queste sono state applicate considerando la combinazione più sfavorevole ai fini della risposta del sistema. Analisi preliminari hanno permesso di individuare come più problematica la condizione indicata nella figura 3.18 con riferimento alla stilate tipo del ponteggio (Stilata A e Stilata B).

La condizione di carico utilizzata in sede di analisi, prevede l'applicazione di carichi concentrati alla sommità di ciascun montante. Per tenere conto degli effetti di bordo, ai montanti delle stilate di estremità è stato applicato un carico ridotto pari al 68% rispetto a quello applicato ai montanti centrali (figura 3.19).

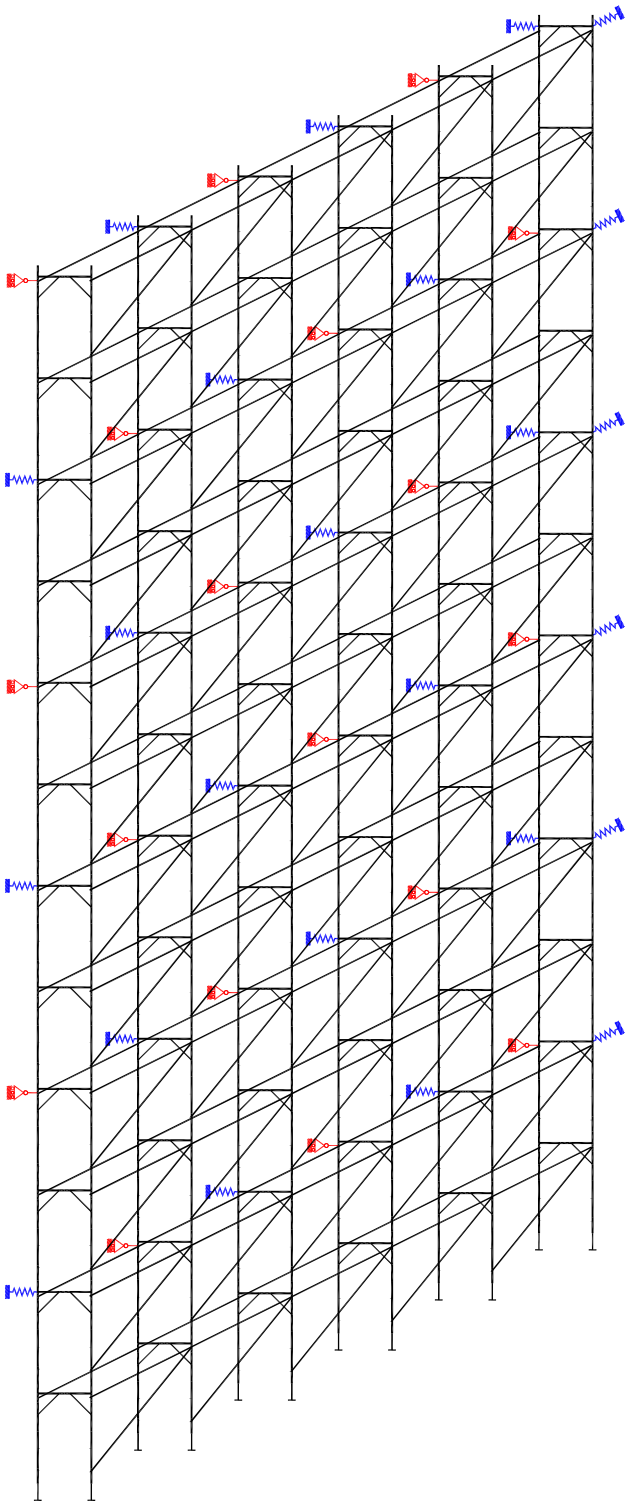


Figura 3.14 – Ponteggio Cs: sistema di controvento nel piano di facciata e disposizione dei vincoli all'opera servita

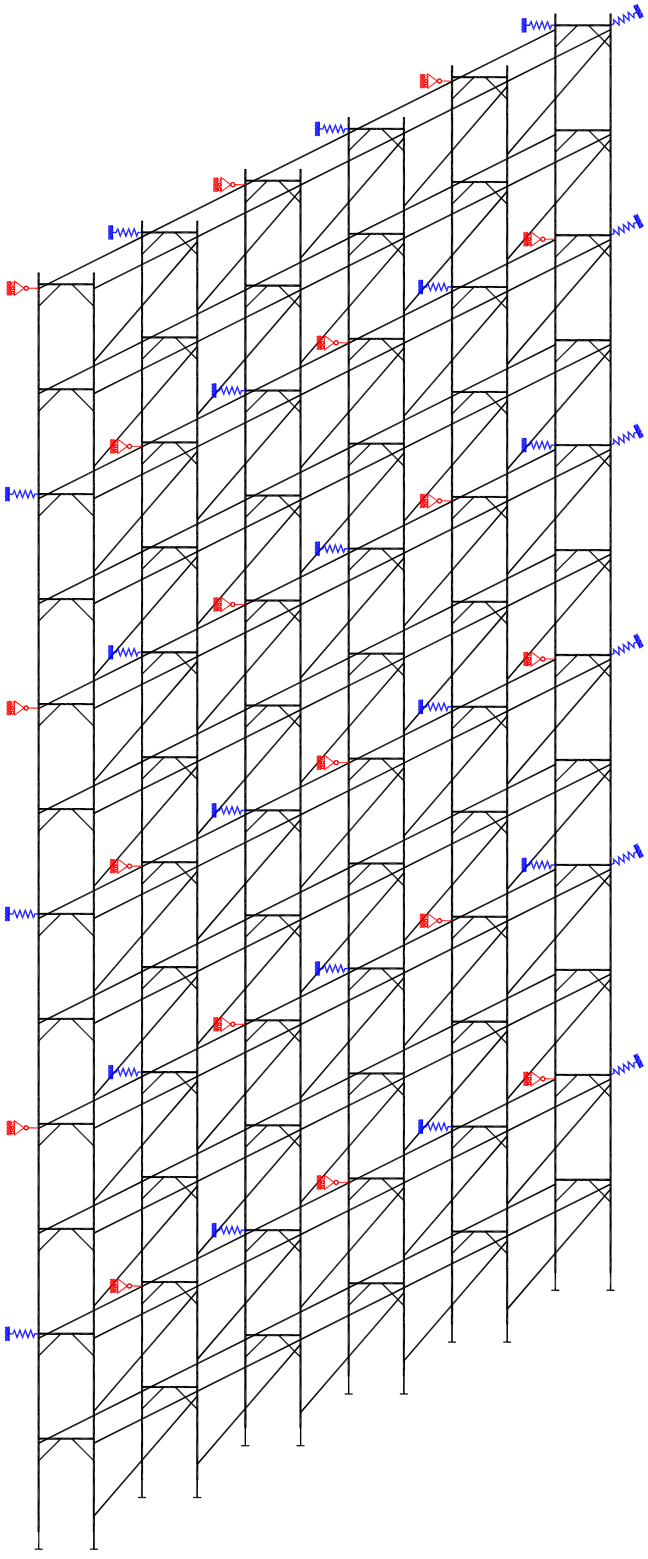


Figura 3.15 – Ponteggio Cb: sistema di controvento nel piano di facciata e disposizione dei vincoli all'opera servita

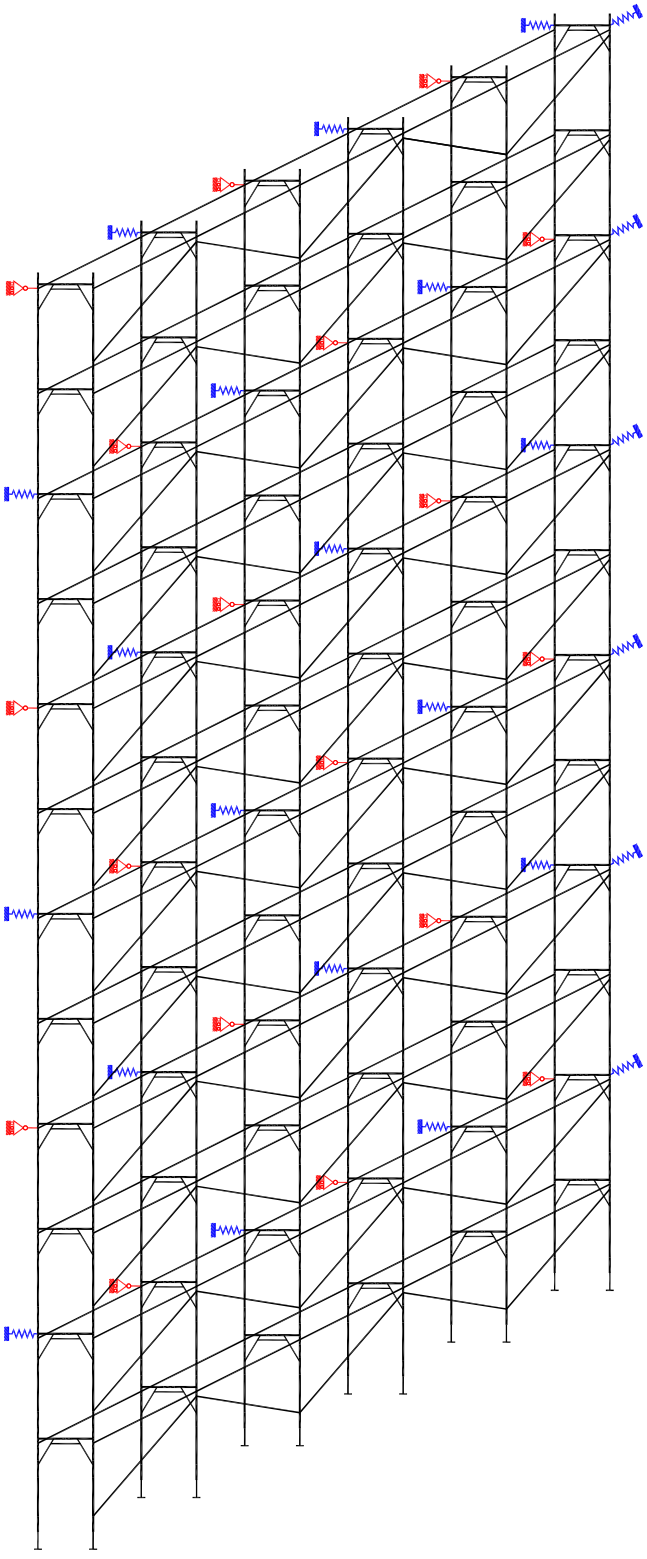


Figura 3.16 – Ponteggio D: sistema di controvento nel piano di facciata e disposizione dei vincoli all'opera servita

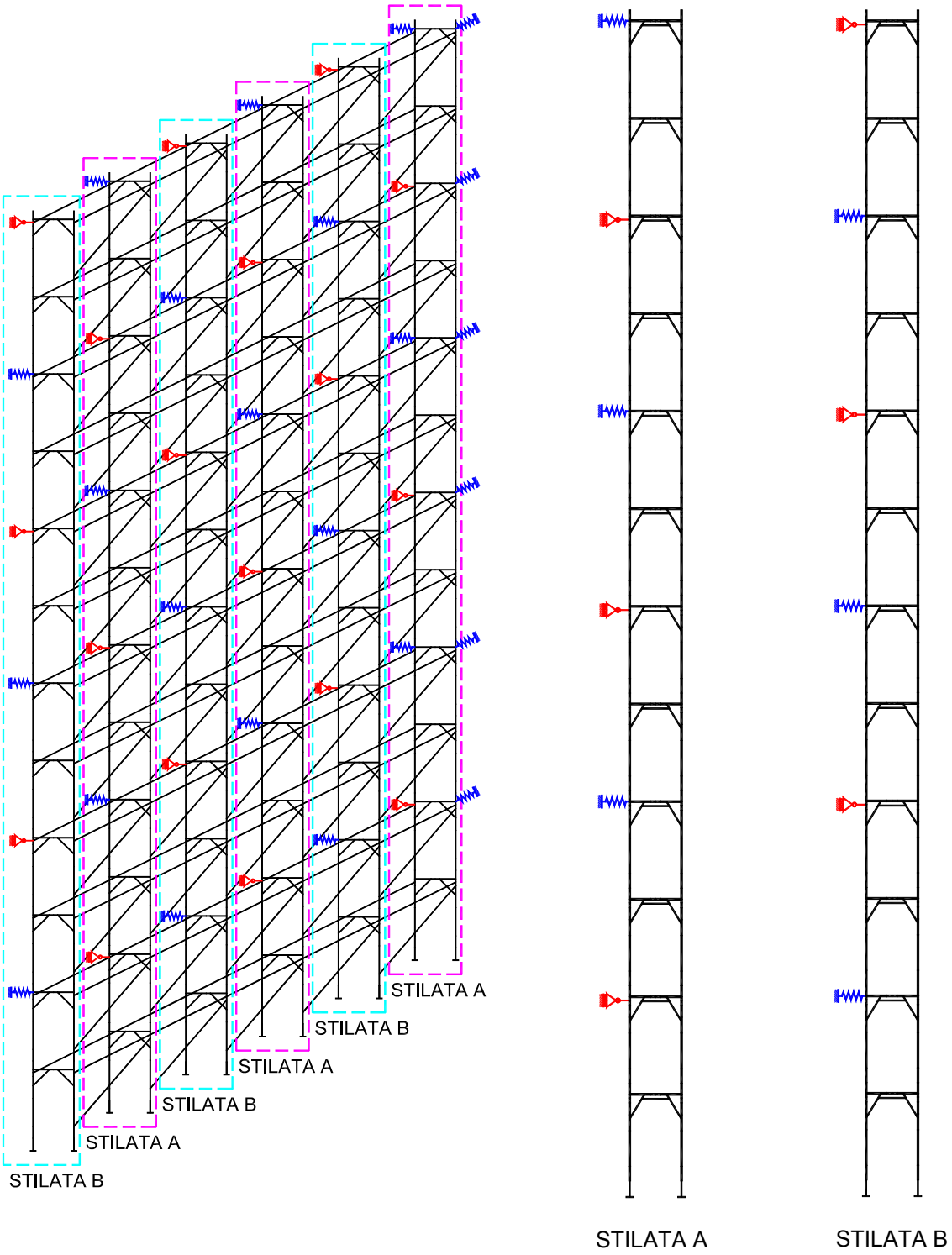


Figura 3.17 – Definizione della stilate A e B

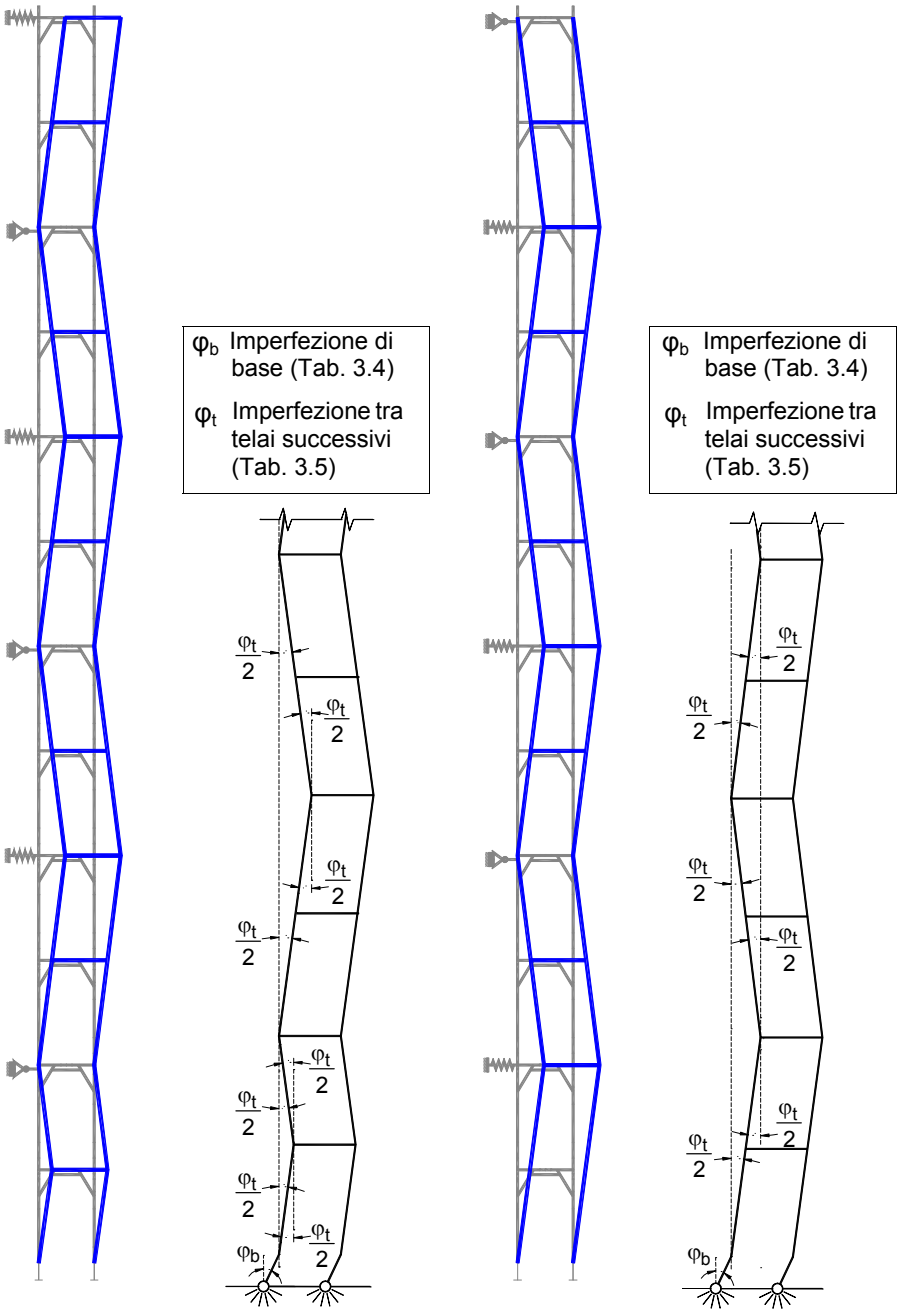


Figura 3.18 – Distribuzione delle imperfezioni nel piano distilata

3.2.2 Le caratteristiche generali del modello 2D

Le analisi hanno riguardato ambedue le stilate principali del sistema intelaiato, ovvero la Stilata tipo A e la Stilata tipo B (Fig. 3.17). Le analisi sono state svolte utilizzando due programmi di calcolo: ANSYS ver 11.0 [12] e PEP micro [13]. Quest'ultimo è un programma dedicato alle analisi delle sole strutture 2D intelaiate che possono essere caratterizzate da vincoli interni ed esterni di tipo semirigido. A differenza di ANSYS, PEP presenta una notevole semplicità operativa e l'approccio all'utente è molto elementare. La scelta di affiancare ad ANSYS questo secondo programma è nata dalla volontà di verificare concretamente l'utilizzabilità di strumenti di calcolo anche semplificati ai fini progettuali. Le analisi svolte hanno permesso di accertare l'efficacia del PEP, sia con riferimento alle analisi del secondo ordine, sia per quanto riguarda il metodo dell'amplificazione dei momenti. Il confronto tra risultati PEP ed ANSYS ha messo in luce differenze in termini di capacità portante dei sistemi dell'ordine massimo del 3%.

I modelli PEP ed ANSYS sono stati realizzati seguendo i medesimi criteri, ed utilizzando gli elementi finiti previsti dalle rispettive librerie. Per quanto riguarda PEP si sono utilizzati elementi BEAM per tutti gli elementi

tubolari ed elementi spring per quanto riguarda i vincoli elastici. Per quanto riguarda ANSYS la tipologia di elementi finiti coincide con quanto previsto per i modelli 3D (§ 3.2.1)

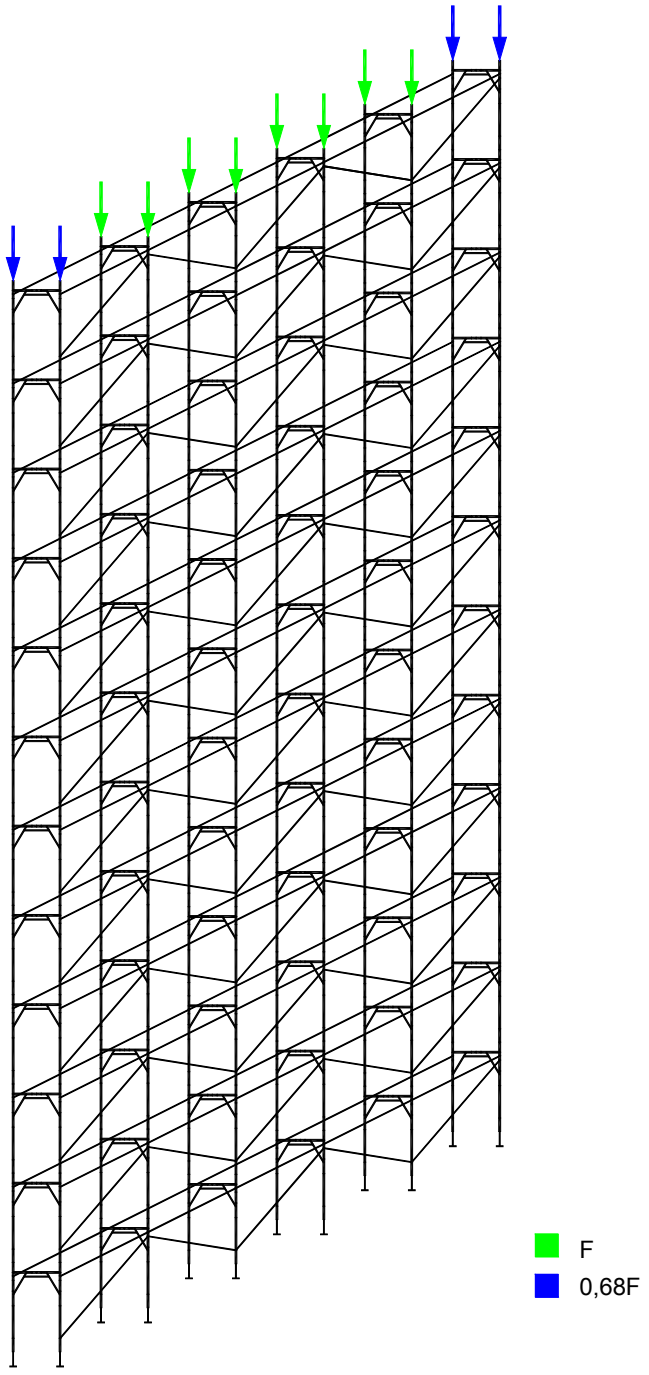


Figura 3.19 – Condizione di carico per analisi 3D

La mesh del telaio è comune ai modelli PEP e ANSYS e coincide con la mesh utilizzata per le analisi 3D. Ipotesi analoghe al modello 3D sono state fatte anche per quanto riguarda i vincoli reciproci tra elementi componenti il modello.
Il sistema di vincoli rispetto all'esterno si compone di:

- cerniere alla base dei montanti;
- carrelli con piano di scorrimento verticale che simulano i vincoli all'opera servita;
- vincoli elastici per simulare il contributo offerto dalle tavole di impalcato in direzione perpendicolare all'opera servita (Fig. 3.10 e 3.12).

Ai fini delle analisi si è adottato il seguente sistema di imperfezioni:

- imperfezioni alla base secondo quanto previsto in tabella 3.4;

- imperfezioni del telaio (Tab. 3.5) combinate secondo quanto indicato in figura 3.18
- le imperfezioni degli elementi, applicate ai soli montanti, valutate in accordo alla norma UNI EN 1993-1-1 [8] ed assunte pari a L/600 con L lunghezza dell'elemento.

La condizione di carico adottata in sede di analisi prevede l'applicazione di carichi concentrati applicati all'estremità superiore dei montanti (figura 3.20).

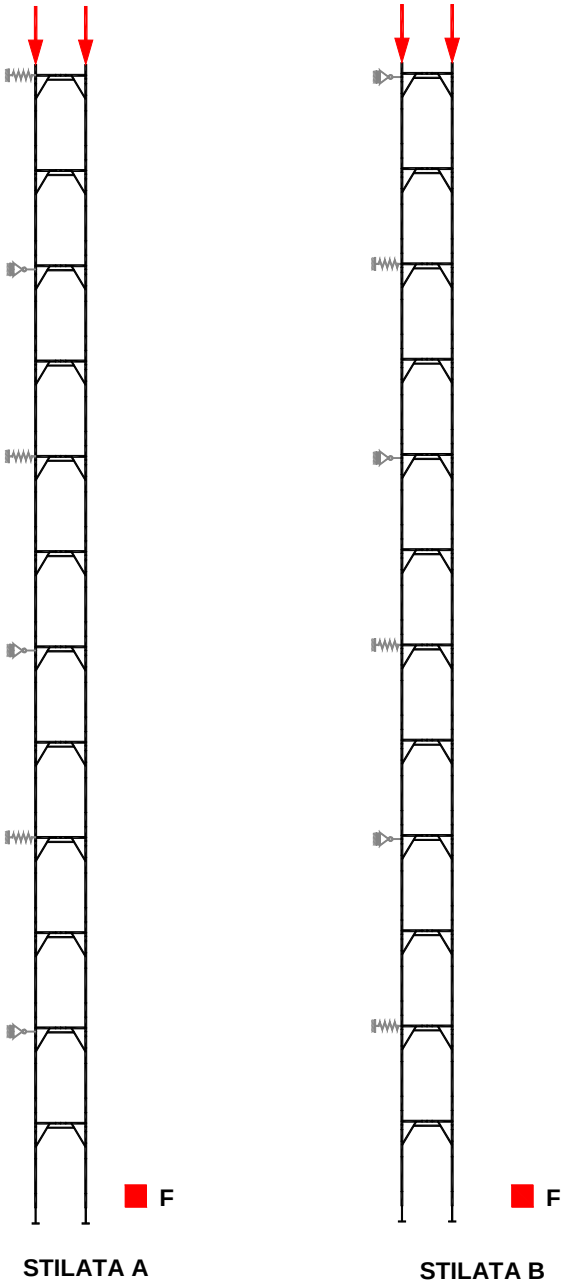


Figura 3.20 – Condizione di carico per analisi 2D nel piano di stilata

In quanto segue, per chiarezza espositiva e per coerenza con i risultati delle analisi 3D, sono riportati i risultati delle analisi svolte con ANSYS.

3.3 Le analisi numeriche 3D e 2D

La risposta dei sistemi intelaiati è stata analizzata attraverso analisi elastiche del secondo ordine. Ciò ha permesso di analizzare la sensibilità dei sistemi agli effetti del secondo ordine che, per queste tipologie di strutture, caratterizzate da una notevole snellezza degli elementi, hanno una influenza notevole sulla risposta finale. Osservando poi che la crisi di questi sistemi è principalmente dovuta a fenomeni di instabilità globale elastica, ai fini del presente studio si è ritenuto sufficientemente significativo effettuare le analisi in

campo elastico. Per i modelli semplificati 2D di stilata sono state effettuate, oltre che analisi elastiche del secondo ordine, anche analisi di buckling.

Lo studio si è proposto di analizzare la risposta del sistema intelaiato al variare del grado di vincolo offerto dal sistema di piano. A tal fine sono state sviluppate analisi numeriche 3D e 2D relative al piano di stilata variando le ipotesi sui vincoli elastici equivalenti alle tavole di impalcato. Sono stati considerati quattro casi:

- i vincoli elastici della facciata e della stilata rispettano le leggi carico-spostamento indicate nelle figure 3.10-3.13 ($d_0 \neq 0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper) (caso 1);
- i vincoli elastici sono descritti con leggi carico-spostamento analoghe a quelle presentate nelle figure 3.10-3.13 modificate assumendo uno scorrimento iniziale nullo ($d_0=0$) (Fig. 3.21-3.24) ($d_0=0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper) (caso 2);
- i vincoli elastici in facciata e nella stilata hanno scorrimento iniziale nullo ($d_0=0$) e sono descritti da una legge elastica lineare simmetrica a trazione e compressione caratterizzata da una pendenza pari a quella associata alle tavole di impalcato nell'intervallo di carico 0-R_d (Fig. 3.25-3.28) ($d_0=0$; k_{Rd}=sper; $k_{Rk}=k_{Rk}$) (caso 3);
- i vincoli elastici hanno rigidezza nulla sia nel piano di stilata sia nel piano di facciata. L'obiettivo è quello di simulare la risposta del sistema in presenza di un trascurabile effetto irrigidente delle tavole di impalcato ($d_0=0$; $k_{Rd}=0$; $k_{Rk}=0$) (caso 4).

Spostamento [mm]	Carico [kN]
-34,32	-1,21
-15,51	-0,74
0,00	0,00
15,51	0,74
34,32	1,21

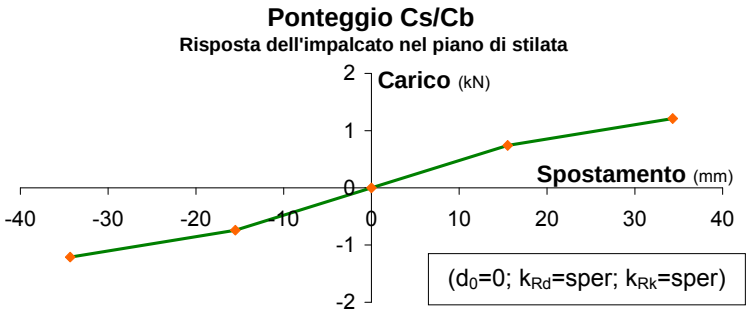


Figura 3.21- Ponteggi C: risposta semplificata delle tavole di impalcato nel piano di stilata (Caso 2)

Spostamento [mm]	Carico [kN]
-24,79	-6,55
-15,20	-3,97
0,00	0,00
15,20	3,97
24,79	6,55

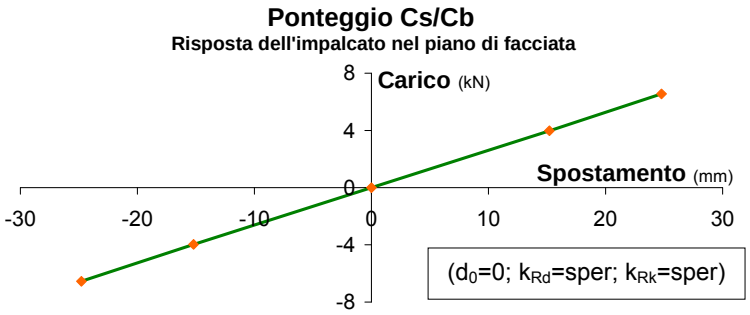


Figura 3.22 - Ponteggi C: risposta semplificata delle tavole di impalcato nel piano di facciata (Caso 2)

Spostamento [mm]	Carico [kN]
-32,86	-1,43
-15,99	-0,87
0,00	0,00
15,99	0,87
32,86	1,43

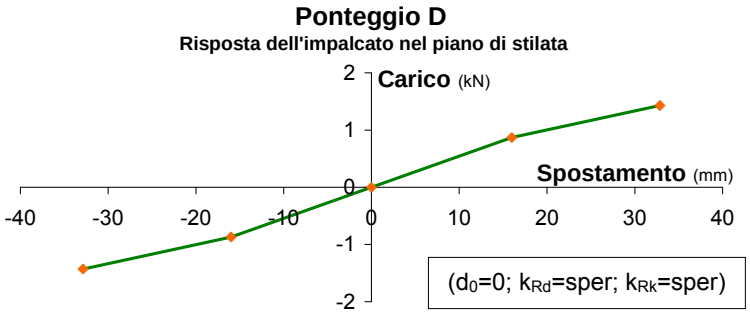


Figura 3.23- Ponteggio D: risposta semplificata delle tavole di impalcato nel piano di stilata (Caso 2)

Spostamento [mm]	Carico [kN]
-19,93	-3,95
-11,34	-2,39
0,00	0,00
11,34	2,39
19,93	3,95

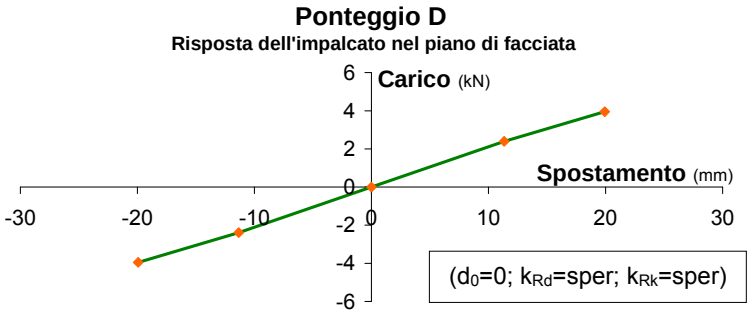


Figura 3.24 - Ponteggio D: risposta semplificata delle tavole di impalcato nel piano di facciata (Caso 2)

Spostamento [mm]	Carico [kN]
-25,37	-1,21
-15,51	-0,74
0,00	0,00
15,51	0,74
25,37	1,21

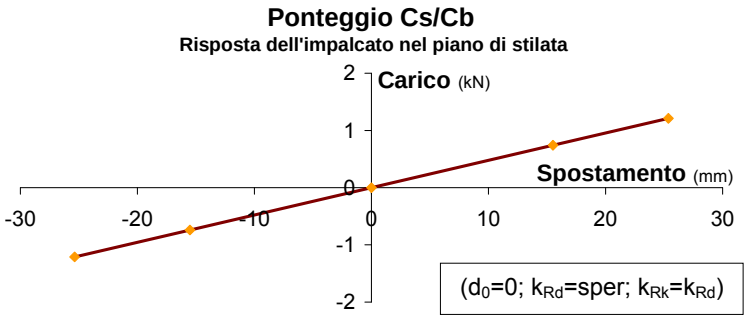


Figura 3.25 - Ponteggi C: risposta semplificata delle tavole di impalcato nel piano di stilata (Caso 3)

Spostamento [mm]	Carico [kN]
-25,08	-6,55
-15,20	-3,97
0,00	0,00
15,20	3,97
25,08	6,55

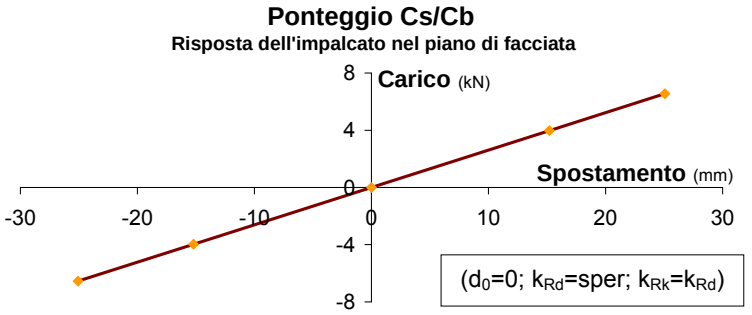


Figura 3.26 - Ponteggi C: risposta semplificata delle tavole di impalcato nel piano di facciata (Caso 3)

Spostamento [mm]	Carico [kN]
-26,29	-1,43
-15,99	-0,87
0,00	0,00
15,99	0,87
26,29	1,43

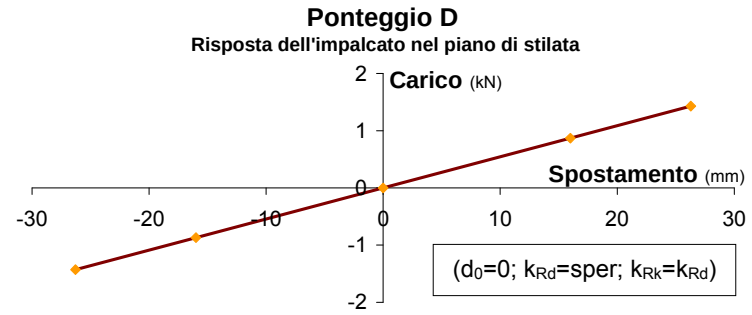


Figura 3.27.- Ponteggio D: risposta semplificata delle tavole di impalcato nel piano di stilata (Caso 3)

Per brevità e per una più chiara presentazione e discussione dei risultati, le casistiche analizzate saranno identificate mediante le sigle convenzionali indicate tra parentesi ai punti precedenti.

E' importante precisare che ai fini delle analisi elastiche le leggi carico-spostamento associate agli impalcati (Fig. 3.10-3.13, Fig. 3.21-3.28) sono state fittiziamente estese oltre i limiti di spostamento registrati durante le prove, conservando la pendenza del tratto compreso tra R_d-R_k. Questa ipotesi è giustificata dalla natura delle analisi del secondo ordine il cui obiettivo è quello di valutare la sensibilità del sistema degli effetti del secondo ordine piuttosto che operare delle verifiche di resistenza o di deformabilità.

La verifica della compatibilità tra carichi esterni applicati e stato deformativo delle tavole di impalcato è significativa se affrontata con riferimento ai carichi di progetto (condizioni di servizio e di fuori servizio).

Spostamento [mm]	Carico [kN]
-18,75	-3,95
-11,34	-2,39
0,00	0,00
11,34	2,39
18,75	3,95

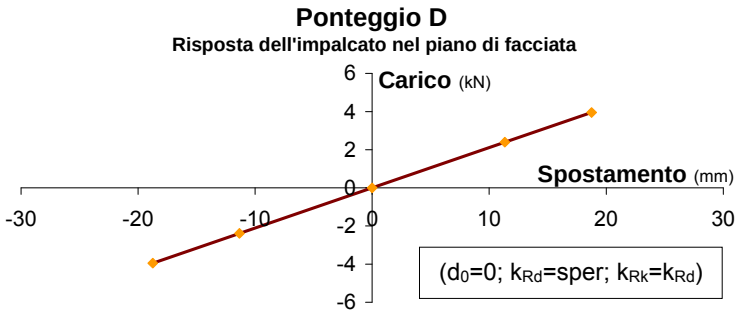


Figura 3.28 - Ponteggio D: risposta semplificata delle tavole di impalcato nel piano di facciata (Caso 3)

3.3.1 I risultati delle analisi 3D

I risultati delle analisi al variare del grado di vincolo offerto dall'impalcato sono riassunti in tabella 3.6 in termini di carico ultimo del secondo ordine (N_{EII}). Per facilitare il confronto dei risultati, nell'ultima colonna della tabella sono indicate per ogni ponteggio le variazioni percentuali rispetto al caso con vincoli elastici caratterizzati per via sperimentale (Fig. 3.10-3.13).

Tabella 3.6 – Risultati delle analisi 3D

Ponteggio	Caso di studio	Caratteristiche dei vincoli elastici	N_{EII} [kN]	$\frac{(N_{EII} - N_{EII,d_0 \neq 0, k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper})}{N_{EII,d_0 \neq 0, k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper}} * 100$
Cs	1	$d_0 \neq 0$ k_{Rd}=sper k_{Rk}=sper	425,395	-
	2	d_0=0 k_{Rd}=sper k_{Rk}=sper	425,951	0,13
	3	d_0=0 k_{Rd}=sper k_{Rk}=k_{Rd}	436,118	2,52
	4	d_0=0 k_{Rd}=0r k_{Rk}=0	414,988	-2,45
Cb	1	$d_0 \neq 0$ k_{Rd}=sper k_{Rk}=sper	434,817	-
	2	d_0=0 k_{Rd}=sper k_{Rk}=sper	439,648	1,11
	3	d_0=0 k_{Rd}=sper k_{Rk}=k_{Rd}	444,149	2,15
	4	d_0=0 k_{Rd}=0r k_{Rk}=0	427,400	-1,71
D	1	$d_0 \neq 0$ k_{Rd}=sper k_{Rk}=sper	435,896	-
	2	d_0=0 k_{Rd}=sper k_{Rk}=sper	438,967	0,70
	3	d_0=0 k_{Rd}=sper k_{Rk}=k_{Rd}	446,562	2,45
	4	d_0=0 k_{Rd}=0r k_{Rk}=0	405,593	-6,95

Con riferimento alle condizioni ultime del sistema, si osserva che:

- le risposte dei tre ponteggi sono molto simili tra loro. Si nota una buona corrispondenza tra le risposte dei ponteggi a boccole Cb e D, mentre si registra una riduzione seppur limitata della capacità portante per il ponteggio a spinotti Cs. Questo comportamento è imputabile al diverso sistema di connessione montanti-diagonali di facciata, al diverso sistema di controventamento nel piano di facciata (Fig. 3.2-3.4) e alla diversa entità delle imperfezioni tra telai sovrapposti (Tab. 3.5);
- la presenza di un sistema di controvento di piano determina un generale incremento della capacità portante, incremento che raggiunge il 7% circa nel caso dei ponteggi tipo D (confronto caso 1 – caso 4);
- lo scorrimento iniziale non ha un effetto determinante sulla capacità portante del sistema (confronto caso 1 - caso 2);
- la risposta dei sistemi sembra influenzata in modo più sensibile dalla perdita di rigidezza del sistema di impalcato che si registra per carichi successivi al carico di progetto (R_d) (confronto caso 2 - caso 3).

Il diverso effetto della risposta del sistema di impalcato è apprezzabile attraverso l'analisi delle deformate a collasso. Le figure 3.29-3.34 propongono il confronto delle deformate 3D associate ai casi 1 ($d_0 \neq 0$ k_{Rd}=sper k_{Rk}=sper) e 4 (d_0=0 k_{Rd}=0r k_{Rk}=0), per le tre tipologie di ponteggio analizzate. In particolare le figure 3.29-3.31-3.33 si riferiscono al caso 1 mentre le rimanenti al caso 3. Per meglio cogliere l'effetto dell'impalcato, la figura 3.35 mostra le deformate del ponteggio D, viste dal lato della stilata per le quattro condizioni di vincolo considerate in sede di analisi. Le deformate sono state tracciate in scala di colori con l'obiettivo di apprezzare in modo chiaro lo stato deformativo. Questo deve essere valutato dal punto di vista qualitativo e non quantitativo. Nelle strutture, per le quali il raggiungimento delle condizioni ultime è dovuto a fenomeni di instabilità elastica, lo stato deformativo a collasso, determinato sulla base di analisi numeriche, è significativo per quanto riguarda le modalità di collasso. Al raggiungimento delle condizioni ultime si perviene infatti attraverso un processo iterativo protratto fino alla convergenza, caratterizzato in condizioni prossime al collasso da rilevanti incrementi di spostamento associati a piccoli incrementi di carico. Le deformate che ne conseguono hanno quindi importanza solamente dal punto di vista qualitativo.

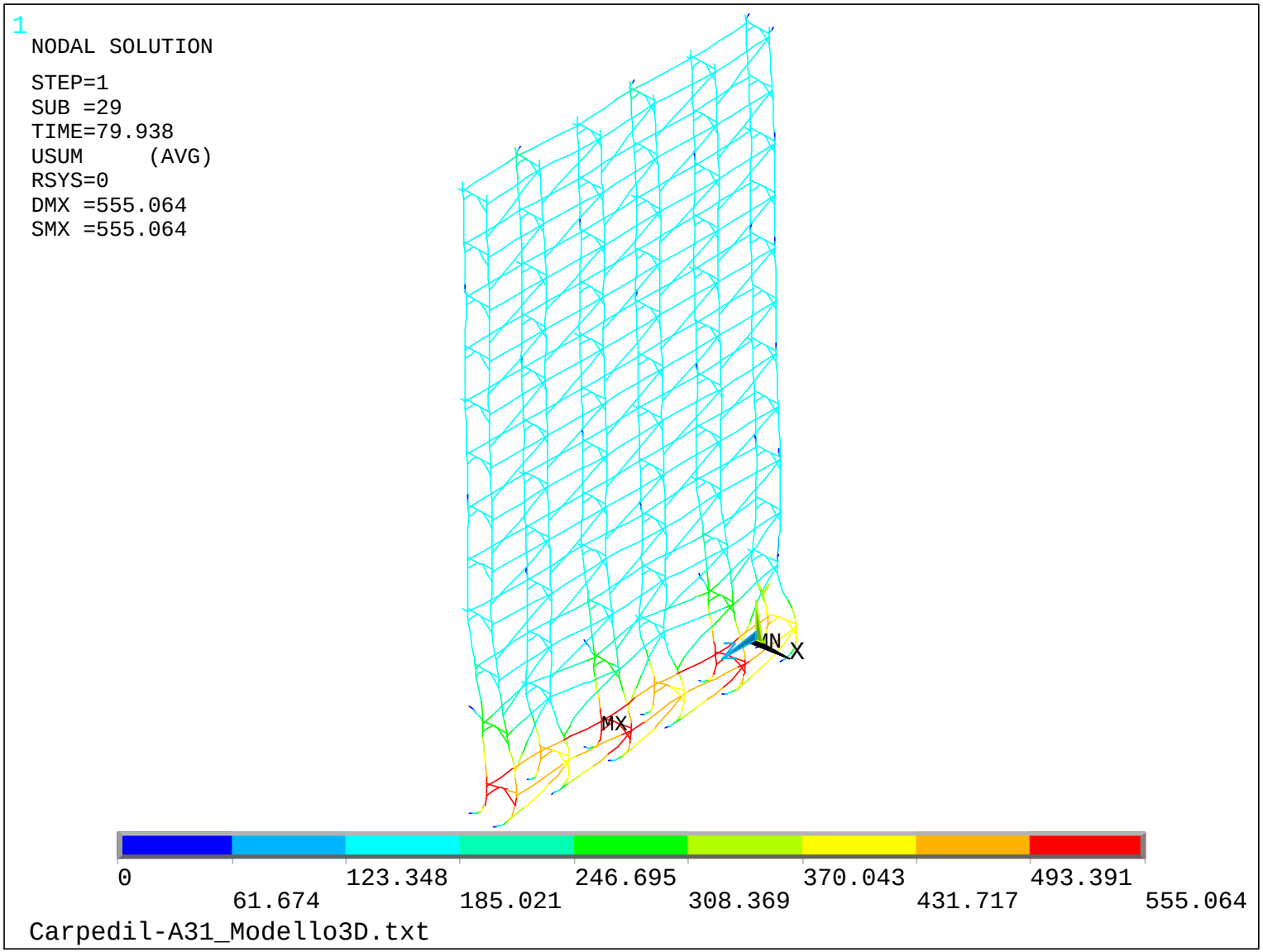


Figura 3.29 – Ponteggio Cs: deformata a collasso per le condizioni di vincolo di piano ($d_0 \neq 0$ k_{Rd}=sper k_{Rk}=sper)

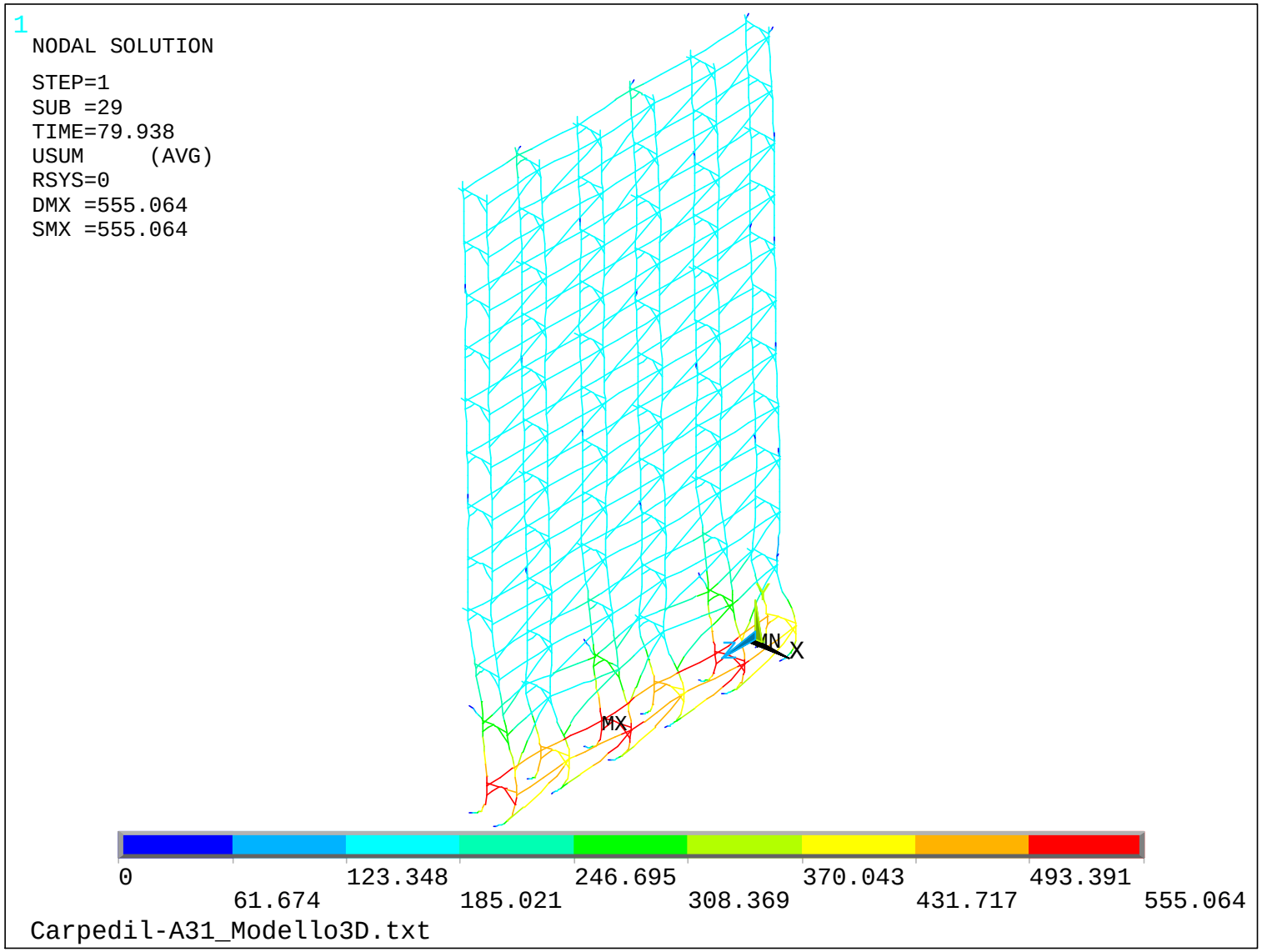


Figura 3.30– Ponteggio Cs: deformata a collasso per le condizioni di vincolo di piano (d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0)

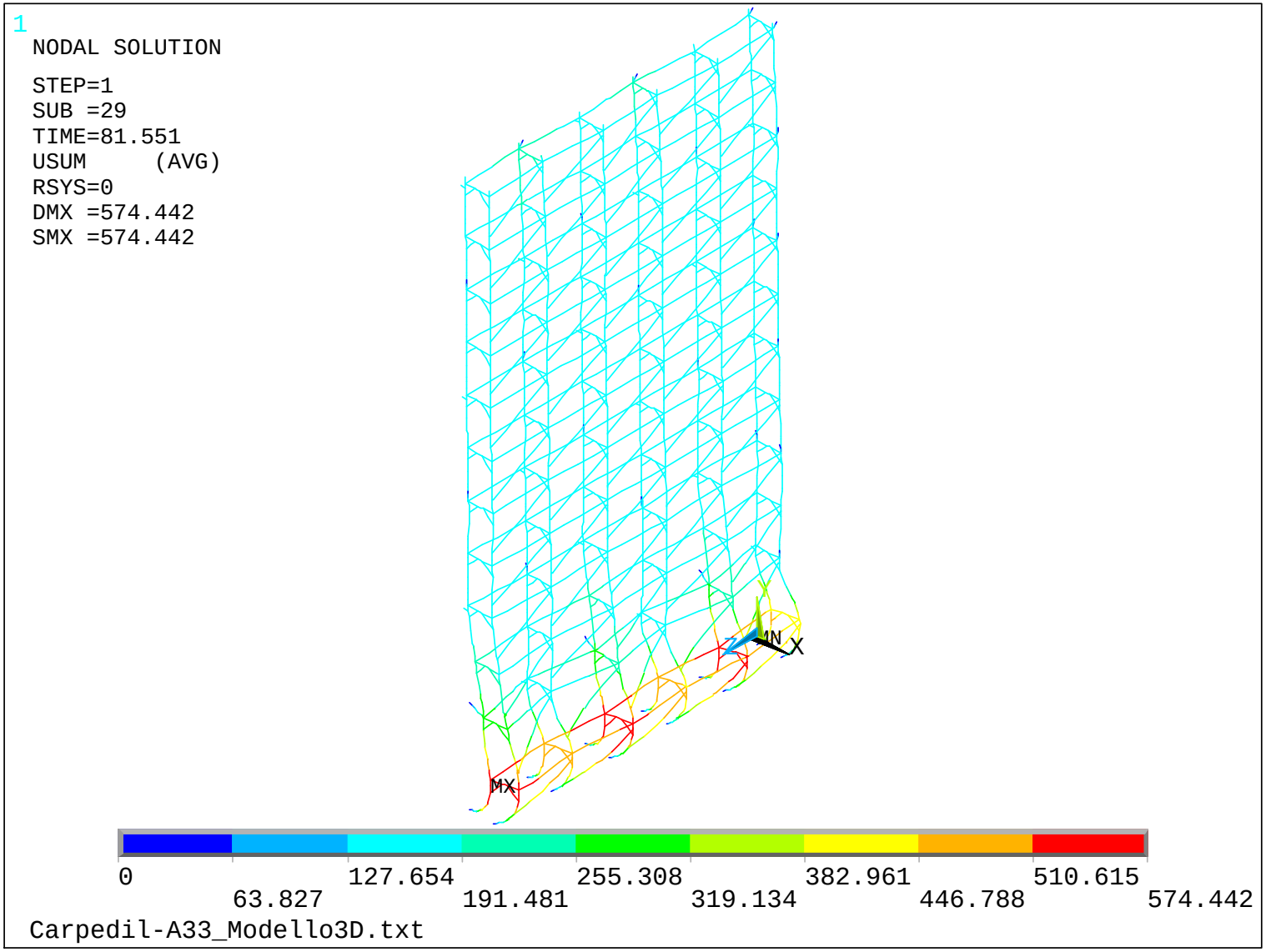


Figura 3.31 – Ponteggio Cb: deformata a collasso per le condizioni di vincolo di piano ($d_0 \neq 0$ k_{Rd}=sper k_{Rk}=sper)

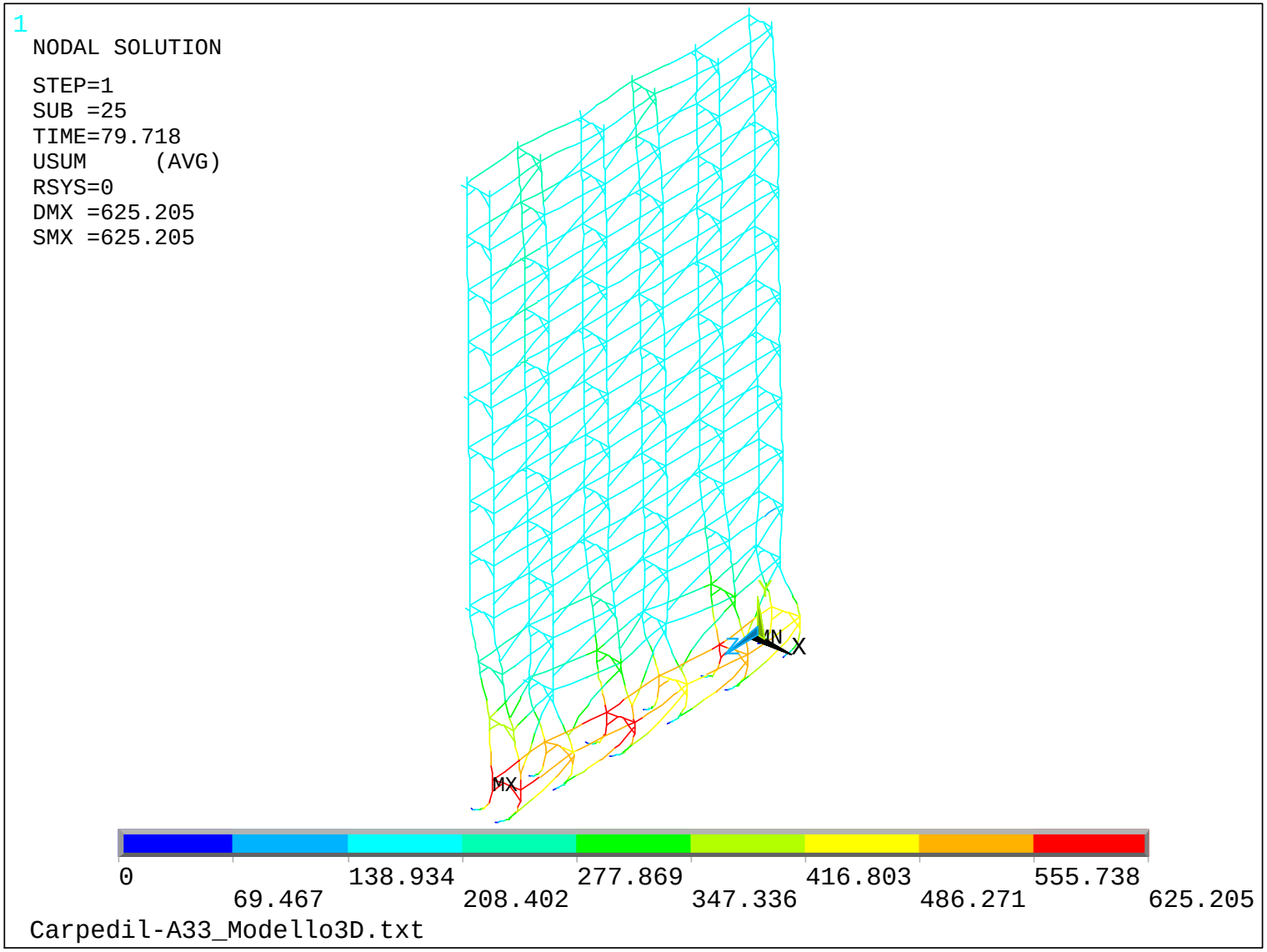


Figura 3.32 – Ponteggio Cb: deformata a collasso per le condizioni di vincolo di piano (d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0)

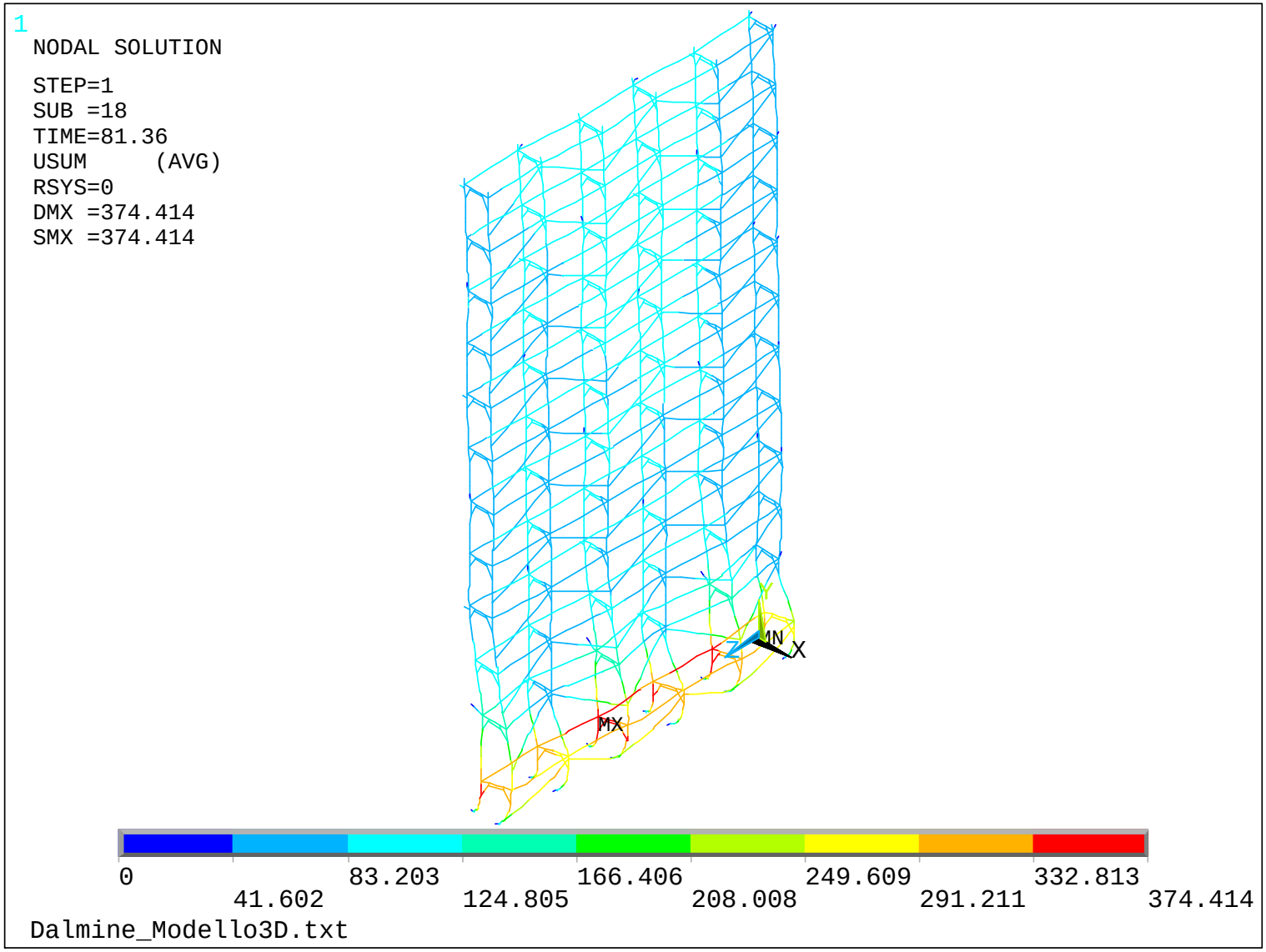


Figura 3.33 – Ponteggio D: deformata a collasso per le condizioni di vincolo di piano ($d_0 \neq 0$ k_{Rd}=sper k_{Rk}=sper)

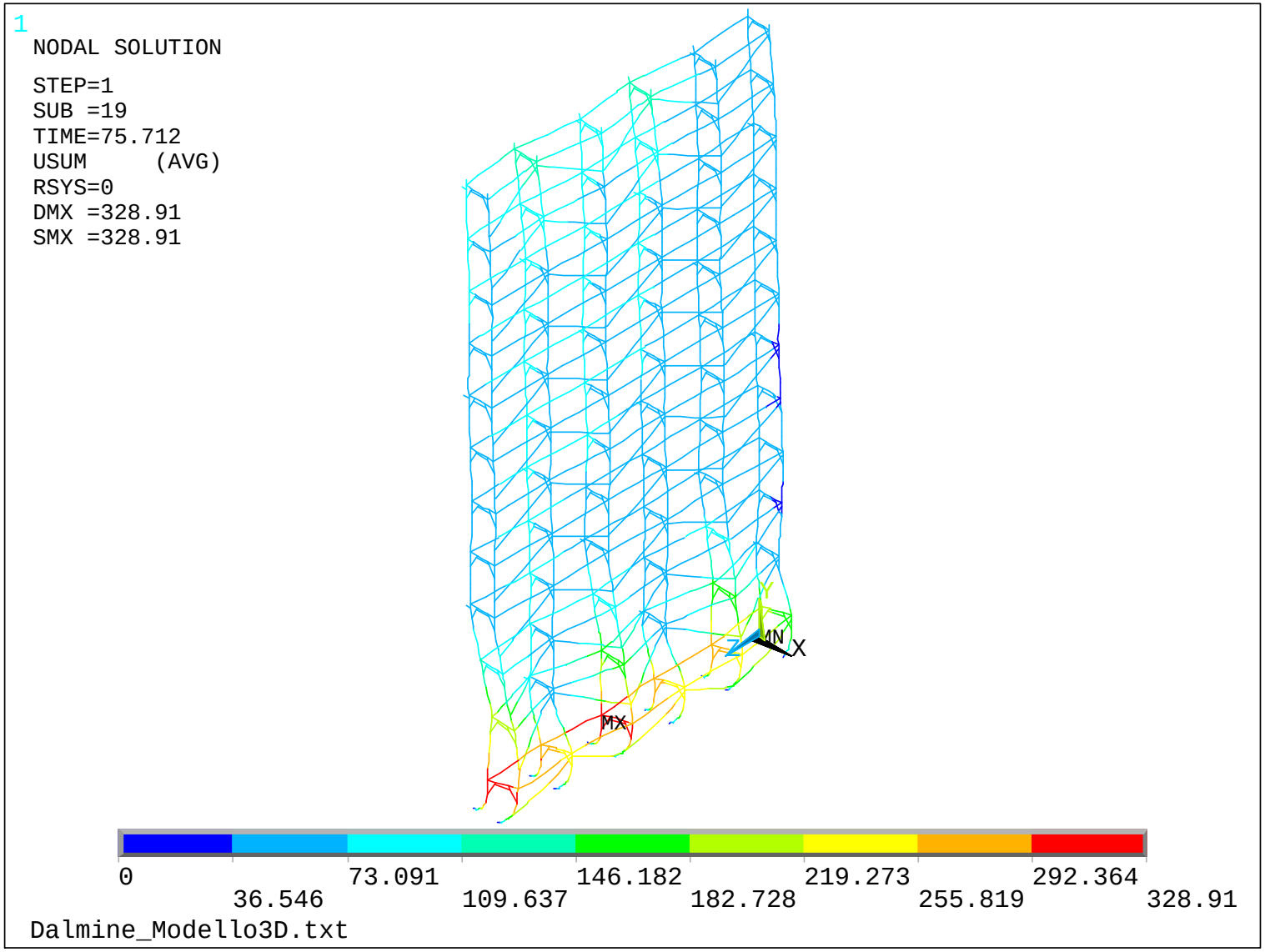


Figura 3.34 – Ponteggio D: deformata a collasso per le condizioni di vincolo di piano (d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0)

L'analisi delle deformate mostra che:

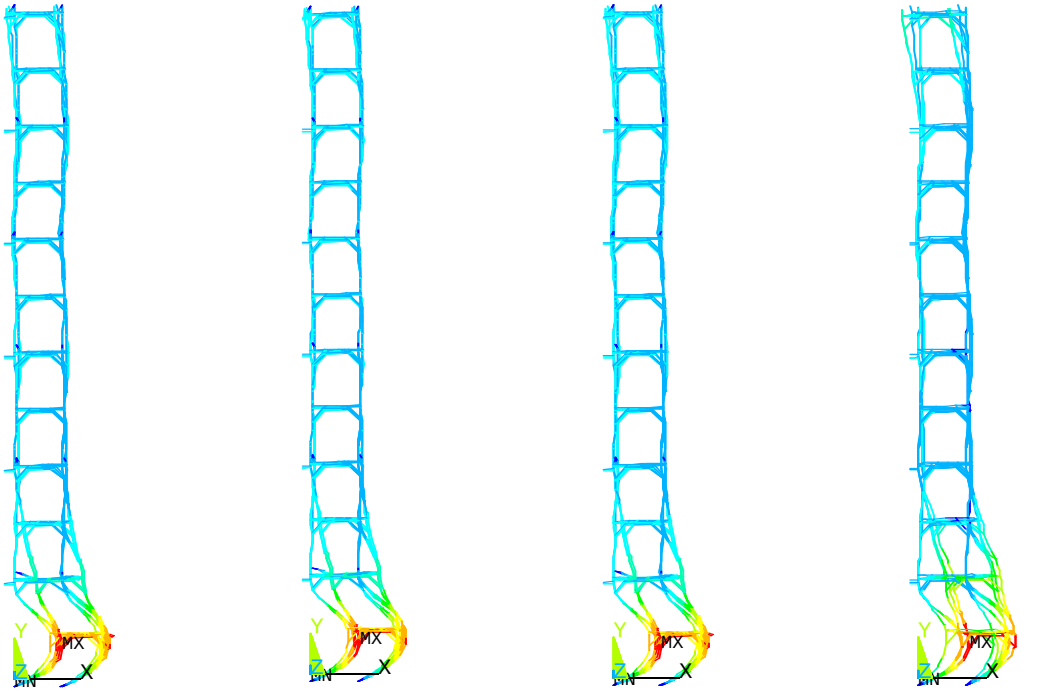
- per tutte le tipologie considerate il collasso si verifica nella parte inferiore del ponteggio, a carico dei montanti maggiormente sollecitati assialmente e per i quali gli effetti del secondo ordine sono più importanti;
- la diversa distribuzione dei vincoli sulle stilate di tipo A e di tipo B e quindi il loro diverso impegno ai fini della resistenza globale del sistema, si traduce in uno stato deformativo più accentuato a carico delle stilate tipo A;
- il collasso per i ponteggi tipo Cs e Cb attiva un meccanismo di stilata, mentre per il ponteggio tipo D si sviluppa un meccanismo di collasso di tipo misto, che interessa sia la stilata sia la facciata;
- l'assenza dei vincoli elastici (d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0), si traduce per tutti i ponteggi in un meccanismo di collasso di tipo misto.

Maggiori informazioni riguardanti lo stato deformativo dei sistemi 3D possono essere reperite nell'allegato 4, che raccoglie le deformate delle stilate dei ponteggi per le quattro condizioni di vincolo considerate.
Per valutare la ridistribuzione degli sforzi tra le stilate e permettere il confronto tra analisi 3D e 2D, i risultati sono stati analizzati in termini di reazioni vincolari alla base di ciascuna stilata. I risultati, presentati nelle tabelle 3.7-3.9, evidenziano come:

- la distribuzione dei vincoli determina carichi sempre maggiori sulle stilate tipo A rispetto a quelle tipo B;
- il maggior grado di vincolo sulla facciata interna del ponteggio, si traduce in un maggior carico sui montanti interni rispetto a quelli esterni;
- la presenza dei sistemi di controvento di piano migliori l'effetto di ridistribuzione dei carichi tra le diverse stilate.

Tabella 3.7 – Ponteggio Cs: distribuzione delle reazioni vincolari

Ponteggio Cs					
Caso di studio	Caratteristiche dei vincoli elastici	Stilata n.	Reazione [kN]		
			Montante interno	Montante esterno	Stilata
1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper	1 Tipo A	40,492	38,300	78,792
		2 Tipo B	35,988	26,468	62,456
		3 Tipo A	42,389	37,184	79,573
		4 Tipo B	36,570	28,943	65,513
		5 Tipo A	41,602	37,900	79,502
		6 Tipo B	33,717	25,842	59,559
		Totale facciata	230,758	194,637	-
		Totale ponteggio		425,395	
2	d_0=0; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper	1 Tipo A	39,320	38,832	78,152
		2 Tipo B	37,284	26,277	63,561
		3 Tipo A	42,276	36,097	78,373
		4 Tipo B	37,751	28,522	66,273
		5 Tipo A	41,636	36,928	78,564
		6 Tipo B	34,572	26,456	61,028
		Totale facciata	232,839	193,112	-
		Totale ponteggio		425,951	
3	d_0=0; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=k_{Rd}	1 Tipo A	39,263	39,626	78,889
		2 Tipo B	38,049	28,780	66,829
		3 Tipo A	41,781	37,059	78,840
		4 Tipo B	38,170	30,231	68,401
		5 Tipo A	41,067	37,637	78,704
		6 Tipo B	35,485	28,970	64,455
		Totale facciata	233,815	202,303	-
		Totale ponteggio		436,118	
4	d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0	1 Tipo A	41,668	36,605	78,273
		2 Tipo B	33,198	23,095	56,293
		3 Tipo A	43,321	38,168	81,489
		4 Tipo B	35,018	28,700	63,718
		5 Tipo A	41,705	39,113	80,818
		6 Tipo B	30,726	23,671	54,397
		Totale facciata	225,636	189,352	-
		Totale ponteggio		414,988	



$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper d_0=0; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper d_0=0; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=k_{Rd} d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0

Figura 3.35 – Ponteggio D: deformate a collasso viste dal lato della stilata

Tabella 3.8 – Ponteggio Cb: distribuzione delle reazioni vincolari

Ponteggio Cb					
Caso di studio	Caratteristiche dei vincoli elastici	Stilata n.	Reazione [kN]		
			Montante interno	Montante esterno	Stilata
1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper	1 Tipo A	42,122	37,415	79,537
		2 Tipo B	39,261	26,497	65,758
		3 Tipo A	44,471	36,649	81,120
		4 Tipo B	38,819	27,329	66,148
		5 Tipo A	44,154	37,484	81,638
		6 Tipo B	36,497	24,119	60,616
		Totale facciata	245,324	189,493	-
		Totale ponteggio		434,817	
2	d_0=0; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper	1 Tipo A	42,338	37,855	80,193
		2 Tipo B	39,708	27,084	66,792
		3 Tipo A	44,516	37,127	81,643
		4 Tipo B	39,291	27,784	67,075
		5 Tipo A	44,288	37,913	82,201
		6 Tipo B	37,102	24,642	61,744
		Totale facciata	247,243	192,405	-
		Totale ponteggio		439,648	
3	d_0=0; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=k_{Rd}	1 Tipo A	41,292	38,563	79,855
		2 Tipo B	40,670	28,043	68,713
		3 Tipo A	43,750	36,613	80,363
		4 Tipo B	40,338	28,659	68,997
		5 Tipo A	43,636	37,073	80,709
		6 Tipo B	38,402	27,11	65,512
		Totale facciata	248,088	196,061	-
		Totale ponteggio		444,149	
4	d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0	1 Tipo A	42,923	36,377	79,300
		2 Tipo B	38,285	24,885	63,170
		3 Tipo A	45,783	36,508	82,291
		4 Tipo B	37,893	26,41	64,303
		5 Tipo A	45,149	37,956	83,105
		6 Tipo B	34,170	21,061	55,231
		Totale facciata	244,203	183,197	-
		Totale ponteggio		427,400	

Tabella 3.9 – Ponteggio D: distribuzione delle reazioni vincolari

Ponteggio D					
Caso di studio	Caratteristiche dei vincoli elastici	Stilata n.	Reazione [kN]		
			Montante interno	Montante esterno	Stilata
1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper	1 Tipo A	34,724	43,623	78,347
		2 Tipo B	39,243	29,043	68,286
		3 Tipo A	38,445	41,796	80,241
		4 Tipo B	39,145	29,423	68,568
		5 Tipo A	37,063	41,156	78,219
		6 Tipo B	32,745	29,490	62,235
		Totale facciata	221,365	214,531	-
		Totale ponteggio		435,896	
2	d_0=0; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper	1 Tipo A	35,110	43,943	79,053
		2 Tipo B	39,500	29,760	69,260
		3 Tipo A	38,216	42,151	80,367
		4 Tipo B	39,316	30,061	69,377
		5 Tipo A	36,794	41,493	78,287
		6 Tipo B	32,957	29,666	62,623
		Totale facciata	221,893	217,074	-
		Totale ponteggio		438,967	
3	d_0=0; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=k_{Rd}	1 Tipo A	35,055	44,398	79,453
		2 Tipo B	40,353	31,119	71,472
		3 Tipo A	37,246	43,105	80,351
		4 Tipo B	40,021	31,387	71,408
		5 Tipo A	35,486	42,753	78,239
		6 Tipo B	33,917	31,722	65,639
		Totale facciata	222,078	224,484	-
		Totale ponteggio		446,562	
4	d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0	1 Tipo A	33,074	40,800	73,874
		2 Tipo B	36,534	24,111	60,645
		3 Tipo A	40,984	37,150	78,134
		4 Tipo B	37,096	25,014	62,110
		5 Tipo A	40,588	36,842	77,430
		6 Tipo B	30,101	23,299	53,400
		Totale facciata	218,377	187,216	-
		Totale ponteggio		405,593	

3.3.2 I risultati delle analisi 2D

La tabella 3.10 riassume sinteticamente i risultati delle analisi di buckling e del secondo ordine elastiche (N_{EII}), riguardanti entrambe le stilate tipo del ponteggio (stilate A e B). Si osserva:

- il buon accordo tra i risultati delle analisi di buckling e delle analisi elastiche del secondo ordine. Questo può essere osservato non solo per quanto riguarda i carichi, ma anche per quanto riguarda le deformate raccolte nell'Allegato 5;
- nelle stilate A e B la diversa distribuzione dei vincoli lungo l'altezza determina risposte marcatamente differenziate sia in termini di carico di collasso (N_{EII}), sia di carico critico (N_{cr});
- la risposta della stilata A è influenzata in modo poco rilevante dalla presenza, ed in generale dalle prestazioni del sistema di impalcato. L'analisi delle deformate raccolte nell'Allegato 5 mostra chiaramente come per la stilata A la parte interessata dal collasso è quella compresa tra il vincolo all'opera servita posto a quota 4.0m ed il terreno. I vincoli equivalenti alle tavole di impalcato disposti a quote superiori ai 4.0m non sono in grado di offrire un apporto significativo allo sbandamento del montante e quindi alla capacità portante della struttura;
- la stilata B, per la quale il primo vincolo rispetto a terra è di tipo elastico (quota 4.0 m), risente in modo marcato della presenza del sistema di impalcato. Si nota infatti come il suo contributo alla capacità portante vari tra un minimo del 13% per il ponteggio Cs ed un massimo di 17,5% per il ponteggio D;
- nelle stilate tipo B la presenza di uno scorrimento iniziale sembra non influenzare in modo rilevante la risposta dei sistemi. Il massimo incremento in termini di capacità portante è del 5% per il ponteggio tipo Cb. Più importante è invece il contributo dovuto alla rigidezza del sistema di impalcato: nei ponteggi C (Cs e Cb) l'incremento è quantificabile in circa il 10% mentre si riduce al 5% per il ponteggio tipo D;
- le imperfezioni tra telai sovrapposti, che distingue i ponteggi Cb dai Cs non sembra in grado di influenzare in modo significativo la capacità portante del sistema;
- la risposta dei ponteggi D sembra essere maggiormente influenzata dalla presenza del sistema di impalcato.

Tabella 3.10 – Risultati della analisi 2D

Ponteggio	Stilata	Caso di studio	Caratteristiche dei vincoli elastici	N_{cr} [kN]	N_{EII} [kN]	N_{EII}/N_{cr}	$\frac{N_{EII}}{N_{EII,d_0\neq0,k_{Rd}=sper;k_{Rk}=sper}}$
Cs	A	1	$d_0\neq0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper	-	74,014	-	-
		2	d_0=0; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper	-	74,205	-	1,003
		3	d_0=0; k_{Rd}=sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	81,666	74,385	0,911	1,005
		4	d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0	81,724	72,859	0,892	0,984
	B	1	$d_0\neq0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper	-	57,180	-	-
		2	d_0=0; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper	-	58,900	-	1,030
		3	d_0=0; k_{Rd}=sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	70,700	62,868	0,889	1,099
		4	d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0	57,460	49,772	0,866	0,870
Cb	A	1	$d_0\neq0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper	-	74,430	-	-
		2	d_0=0; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper	-	75,125	-	1,009
		3	d_0=0; k_{Rd}=sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	81,628	74,852	0,917	1,006
		4	d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0	81,536	74,326	0,912	0,999
	B	1	$d_0\neq0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper	-	57,632	-	-
		2	d_0=0; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper	-	60,455	-	1,049
		3	d_0=0; k_{Rd}=sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	70,540	63,785	0,904	1,107
		4	d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0	57,624	50,704	0,880	0,880
D	A	1	$d_0\neq0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper		78,938	-	-
		2	d_0=0; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper		78,174	-	0,990
		3	d_0=0; k_{Rd}=sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	84,200	79,068	0,939	1,002
		4	d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0	84,100	76,313	0,907	0,967
	B	1	$d_0\neq0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper		61,475	-	-
		2	d_0=0; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper		61,148	-	0,995
		3	d_0=0; k_{Rd}=sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	73,080	64,381	0,881	1,047
		4	d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0	58,870	50,732	0,862	0,825

3.3.3 Confronto tra i risultati delle analisi 3D-2D

Un modo semplice ed efficace per effettuare il confronto tra risultati delle analisi numeriche è quello di raffrontare i carichi di collasso delle stilate A e B frutto delle analisi 2D (Tab. 3.10) con i valori delle reazioni alla base delle stilate determinate attraverso le analisi 3D (Tab. 3.7-3.9). I risultati di questo confronto sono riassunti in modo esplicito nelle tabelle 3.11-3.13.

Tabella 3.11 – Ponteggio Cs: distribuzione delle reazioni vincolari

Ponteggio Cs					
Caso di studio	Caratteristiche dei vincoli elastici	Stilata n.	Reazione [kN]		
			Modello 3D	Modello 2D	Modello2D/Modello 3D
1	$d_0\neq0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper	1 Tipo A	78,792	74,014	0,939
		2 Tipo B	62,456	57,180	0,916
		3 Tipo A	79,573	74,014	0,930
		4 Tipo B	65,513	57,180	0,873
		5 Tipo A	79,502	74,014	0,931
		6 Tipo B	59,559	57,180	0,960
2	d_0=0; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper	1 Tipo A	78,152	74,205	0,949
		2 Tipo B	63,561	58,900	0,927
		3 Tipo A	78,373	74,205	0,947
		4 Tipo B	66,273	58,900	0,889
		5 Tipo A	78,564	74,205	0,945
		6 Tipo B	61,028	58,900	0,965
3	d_0=0; k_{Rd}=sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	1 Tipo A	78,889	74,385	0,943
		2 Tipo B	66,829	62,868	0,941
		3 Tipo A	78,840	74,385	0,943
		4 Tipo B	68,401	62,868	0,919
		5 Tipo A	78,704	74,385	0,945
		6 Tipo B	64,455	62,868	0,975
4	d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0	1 Tipo A	78,273	72,859	0,931
		2 Tipo B	56,293	49,772	0,884
		3 Tipo A	81,489	72,859	0,894
		4 Tipo B	63,718	49,772	0,781
		5 Tipo A	80,818	72,859	0,902
		6 Tipo B	54,397	49,772	0,915

Tabella 3.12 – Ponteggio Cb: distribuzione delle reazioni vincolari

Ponteggio Cs					
Caso di studio	Caratteristiche dei vincoli elastici	Stilata n.	Reazione [kN]		
			Modello 3D	Modello 2D	Modello2D/Modello 3D
1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper	1 Tipo A	79,537	74,430	0,936
		2 Tipo B	65,758	57,632	0,876
		3 Tipo A	81,120	74,430	0,918
		4 Tipo B	66,148	57,632	0,871
		5 Tipo A	81,638	74,430	0,912
		6 Tipo B	60,616	57,632	0,951
2	d_0=0; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper	1 Tipo A	80,193	75,125	0,937
		2 Tipo B	66,792	60,455	0,905
		3 Tipo A	81,643	75,125	0,920
		4 Tipo B	67,075	60,455	0,901
		5 Tipo A	82,201	75,125	0,914
		6 Tipo B	61,744	60,455	0,979
3	d_0=0; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=k_{Rd}	1 Tipo A	79,855	74,852	0,937
		2 Tipo B	68,713	63,785	0,928
		3 Tipo A	80,363	74,852	0,931
		4 Tipo B	68,997	63,785	0,924
		5 Tipo A	80,709	74,852	0,927
		6 Tipo B	65,512	63,785	0,974
4	d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0	1 Tipo A	79,300	74,326	0,937
		2 Tipo B	63,170	50,704	0,803
		3 Tipo A	82,291	74,326	0,903
		4 Tipo B	64,303	50,704	0,789
		5 Tipo A	83,105	74,326	0,894
		6 Tipo B	55,231	50,704	0,918

Tabella 3.13 – Ponteggio D: distribuzione delle reazioni vincolari

Ponteggio D					
Caso di studio	Caratteristiche dei vincoli elastici	Stilata n.	Reazione [kN]		
			Modello 3D	Modello 2D	Modello2D/Modello 3D
1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper	1 Tipo A	78,347	78,938	1,008
		2 Tipo B	68,286	61,475	0,900
		3 Tipo A	80,241	78,938	0,984
		4 Tipo B	68,568	61,475	0,897
		5 Tipo A	78,219	78,938	1,009
		6 Tipo B	62,235	61,475	0,988
2	d_0=0; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper	1 Tipo A	79,053	78,174	0,989
		2 Tipo B	69,260	61,148	0,883
		3 Tipo A	80,367	78,174	0,973
		4 Tipo B	69,377	61,148	0,881
		5 Tipo A	78,287	78,174	0,999
		6 Tipo B	62,623	61,148	0,976
3	d_0=0; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=k_{Rd}	1 Tipo A	79,453	79,068	0,995
		2 Tipo B	71,472	64,381	0,901
		3 Tipo A	80,351	79,068	0,984
		4 Tipo B	71,408	64,381	0,902
		5 Tipo A	78,239	79,068	1,011
		6 Tipo B	65,639	64,381	0,981
4	d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0	1 Tipo A	73,874	84,100	0,878
		2 Tipo B	60,645	58,870	1,030
		3 Tipo A	78,134	84,100	0,929
		4 Tipo B	62,110	58,870	1,055
		5 Tipo A	77,430	84,100	0,921
		6 Tipo B	53,400	58,870	0,907

Per una più chiara analisi dei risultati è importante ricordare che per tener conto degli effetti di bordo, le analisi 3D sono state svolte applicando sui montanti delle stilate esterne un carico pari al 68% rispetto a quello applicato sui montanti delle stilate interne (Fig. 3.19). Questa scelta può giustificare eventuali anomalie che il confronto potrebbe metter in luce relativamente alle stilate più esterne.
I risultati mostrano che l'utilizzo del modello 2D di stilata determina una generale sottostima delle reazioni vincolari e quindi dell'azione assiale a carico dei montanti elementi che, in fase progettuale, sono quelli

maggiormente sollecitati. L'analisi dei risultati rivela poi che la massima sottostima si verifica per le stilate B ed in genere per il caso di studio 4 (d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0) che considera l'assenza o, in modo più realistico, un trascurabile contributo delle tavole di impalcato. Solamente per la stilata A del ponteggio D si osserva una trascurabile sovrastima che, al massimo, e' del 1%.
Nonostante le differenze rilevate in termini di reazioni vincolari, i risultati in generale possono essere considerati soddisfacenti. Considerata la semplicità del modello 2D, si può dire che in linea generale, questo è in grado di cogliere in modo sufficientemente accurato la risposta di un sistema 3D, che vede l'attivazione di meccanismi di resistenza molto più complessi ed in generale non riconducibili al solo piano di stilata.

3.4 Considerazioni finali

In questo capitolo sono presentati i risultati di una serie di analisi numeriche svolte su tre tipologie di ponteggio a telai prefabbricati di produzione italiana. L'obiettivo di queste analisi è quello di fornire un inquadramento generale sul comportamento dei ponteggi e nel contempo, di validare i modelli di calcolo messi a punto relativi alla struttura nel suo complesso (modello 3D) e al telaio di stilata (modello 2D).

Lo studio si è sviluppato attraverso l'analisi della risposta dei modelli 3D e 2D di stilata al variare delle caratteristiche del sistema di impalcato. Questi sono stati modellati mediante vincoli elastici equivalenti. Nei modelli 3D è considerato il contributo degli impalcati sia nel piano parallelo sia nel piano perpendicolare all'opera servita mentre nei modelli 2D è considerato il solo contributo nel piano perpendicolare all'opera servita. Le analisi elastiche e del secondo ordine sono state svolte considerando quattro possibili leggi associate agli impalcati.

I risultati delle analisi 3D e 2D hanno permesso di osservare che:

- le risposte dei tre ponteggi analizzate nella loro globalità (analisi 3D) sono molto simili tra loro nonostante le diverse risposte dei sistemi di piano e la diversa disposizione dei sistemi di controventamento di facciata;
- la presenza di un sistema di controvento di piano determina un generale incremento della capacità portante;
- lo scorrimento iniziale del sistema di impalcato non ha un effetto determinante sulla capacità portante;
- la diversa distribuzione dei vincoli lungo l'altezza delle due stilate tipo (stilata A e stilata B) attribuisce loro una diversa sensibilità alla presenza, ed in generale alla risposta, dei sistemi di impalcato;
- una generale e modesta sottostima del carico ultimo dei modelli 2D rispetto ai modelli 3D giustificata dai diversi meccanismi di trasferimento dei carichi messi in atto dai due modelli.

Sulla scorta dei risultati si è ritenuto opportuno svolgere delle successive analisi di sensitività con l'obiettivo di analizzare la risposta del sistema al variare delle imperfezioni alla base e della rigidezza del sistema di impalcato.

4. LE ANALISI DI SENSITIVITA'

La risposta dei sistemi di ponteggi è influenzata da diversi fattori tra i quali i più importanti sono i giochi fra gli elementi, le imperfezioni locali alla base e tra i telai sovrapposti, le imperfezioni globali del telaio e degli elementi, la risposta dei sistemi di piano. I risultati delle analisi preliminari hanno messo in luce la necessità di meglio approfondire la sensibilità dei sistemi al variare delle imperfezioni alla base e al variare della rigidezza dei sistemi di impalcato. Questo capitolo è dedicato all'approfondimento di queste tematiche.

4.1 L'influenza delle imperfezioni alla base

Come descritto al paragrafo 3.1 l'imperfezione angolare φ connessa al vincolo di base, nel caso in cui non siano disponibili risultati sperimentali, può essere determinata, secondo quanto previsto dalla normativa UNI EN 12811-1:2004 [5], attraverso semplici considerazioni di carattere geometrico. Nota la geometria del montante e della basetta e la lunghezza di sovrapposizione, l'imperfezione angolare (φ) può essere determinata come:

$$\varphi = \text{arctg}\left(\frac{D_i - d_0}{l_0}\right) \qquad [4.1]$$

dove:
D_i diametro nominale interno del montante tubolare;
d_0 diametro nominale esterno della basetta regolabile;
l_0 lunghezza nominale di sovrapposizione.

L'equazione [4.1] definisce una relazione di inversa proporzionalità tra l'imperfezione angolare (φ) e la lunghezza di sovrapposizione l_0 (Fig. 4.1). Ai fini delle analisi numeriche, in ambito normativo è prescritto l'utilizzo della condizione più sfavorevole che corrisponde alla minima lunghezza di sovrapposizione, ovvero alla condizione di basetta completamente estesa.

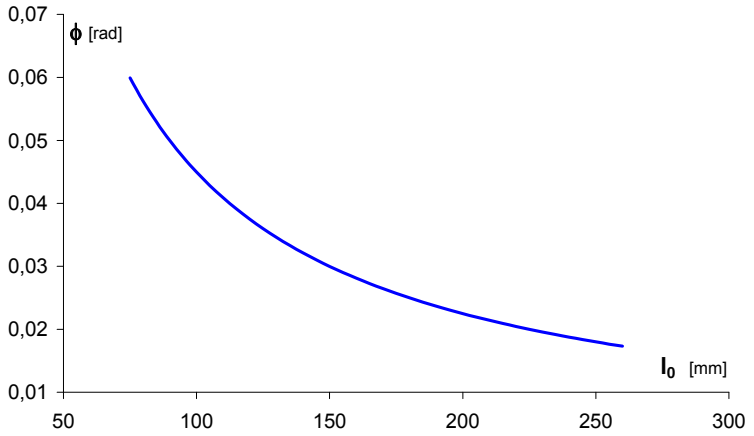


Figura 4.1 – Imperfezione φ al variare della lunghezza di sovrapposizione l_0

L'imperfezione alla base (φ) si traduce in un fuori piombo iniziale del telaio che si combina alle imperfezioni tra i telai sovrapposti e alle imperfezioni degli elementi. L'approccio progettuale utilizzato prevede di massimizzare gli effetti del secondo ordine considerando la combinazione più sfavorevole delle imperfezioni.

Per individuare quale tra le possibili sia la combinazione più gravosa, sono state svolte delle analisi preliminari con l'obiettivo di individuare:

- la distribuzione più sfavorevole delle imperfezioni tra i telai. I risultati hanno permesso di individuare nelle distribuzioni indicate nella figura 3.18 la condizione più onerosa dal punto di vista strutturale. Non si è ritenuto opportuno svolgere analisi al variare della loro entità poiché si tratta di una quantità legata alle caratteristiche dimensionali dei tubi e degli spinotti che si ritiene possano essere considerate costanti;
- il verso più sfavorevole di applicazione delle imperfezioni locali dell'elemento (local bow imperfection). In particolare si è voluto indagare l'influenza che l'utilizzo di una deformata locale applicata con verso concorde alla deformata critica abbia sulla capacità portante ultima del sistema. Le analisi hanno

permesso di osservare variazioni del carico di collasso del tutto trascurabili, e comunque mai superiori allo 0,4%

In aggiunta a quanto descritto, con l'obiettivo di investigare l'influenza delle imperfezioni alla base sulla risposta dei sistemi, sono state svolte delle analisi di sensitività considerando tre diverse condizioni:

- basetta completamente estesa a cui corrisponde la lunghezza di sovrapposizione l_0 minima;
- basetta con estensione minima a cui corrisponde la lunghezza di sovrapposizione l_0 massima;
- basetta con estensione intermedia a cui corrisponde una lunghezza di sovrapposizione l_0 compresa tra le due valutate precedentemente.

Le tre diverse estensioni della basetta considerate in sede di analisi ed il corrispondente valore dell'imperfezione angolare alla base sono riassunte nelle tabelle 4.1 e 4.2 rispettivamente per i ponteggi tipo Cs-Cb e D.

Tabella 4.1 – Ponteggio Cs-Cb*:* Imperfezioni angolari alla base

Condizione Basetta	D_i [mm]	d_0 [mm]	l_0 [mm]	tan φ
Completamente estesa	42,5	38,0	170,0	0,0264
Con estensione media	42,5	38,0	290,0	0,0155
Con estensione minima	42,5	38,0	400,0	0,0112

Tabella 4.2 – Ponteggio D*:* Imperfezioni angolari alla base

Condizione Basetta	D_i [mm]	d_0 [mm]	l_0 [mm]	tan φ
Completamente estesa	42,5	38,0	75,0	0,0600
Con estensione media	42,5	38,0	170,0	0,0264
Con estensione minima	42,5	38,0	260,0	0,0173

Le analisi, che hanno interessato tutte e tre le tipologie di ponteggio, hanno considerato accanto alla variazione dell'imperfezione alla base, due diverse leggi carico-spostamento associate alle tavole di impalcato. Nel dettaglio si è fatto riferimento alle due condizioni estreme tra quelle considerate durante le analisi preliminari:

- vincoli elastici di piano descritti mediante le leggi di derivazioni sperimentale (Fig. 3.10-3.13) ($d_0 \neq 0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper)
- assenza del sistema di piano (d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0).

Le analisi elastiche del secondo ordine sono state svolte sia per il modello 3D sia per il modello 2D di stilata. Le condizioni di carico adottate coincidono con quelle utilizzate per le analisi preliminari (Fig. 3.19-3.20).

I risultati in termini di carico ultimo sono riportati nelle tabelle 4.3 e 4.4 rispettivamente per le analisi 3D e 2D di stilata. I risultati sono fra loro confrontati assumendo come riferimento il valore del carico di collasso relativo alla situazione di basetta completamente estesa.

Tabella 4.3 – Analisi 3D: influenza delle imperfezioni alla base

Ponteggio	Caratteristiche dei vincoli elastici	N_{EII} [kN]		
		Basetta estensione massima	Basetta estensione intermedia	Basetta estensione minima
Cs	($d_0 \neq 0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper)	425,395	449,417 (5,35%*)	465,215 (8,56%*)
	(d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0)	414,988	425,052 (2,37%*)	439,086 (5,49%*)
Cb	($d_0 \neq 0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper)	434,817	456,164 (4,68%*)	477,422 (8,92%*)
	(d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0)	427,400	447,666 (4,57%*)	463,438 (7,78%*)
D	($d_0 \neq 0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper)	435,896	452,739 (3,72%*)	490,912 (11,21%*)
	(d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0)	405,593	459,968 (11,82%*)	462,372 (12,28%*)

* variazione percentuale rispetto al caso di basetta completamente estesa

I risultati delle analisi 3D (Tab. 4.3, Fig. 4.2-4.4), mostrano come le imperfezioni alla base abbiano un'influenza rilevante sulla risposta globale del sistema, che si accentua nel caso in cui si consideri la

presenza di un sistema di impalcato in grado di sviluppare una adeguata azione controventante. Questo effetto è particolarmente marcato nel ponteggio D (Fig. 4.4): l'ipotesi di estensione minima della basetta determina un incremento della capacità portante dell'ordine del 11-12%. L'incremento si riduce a circa il 9% nel caso dei ponteggi Cs e Cb. Per una maggiore chiarezza dei risultati è importante osservare che le basette dei ponteggi Cs-Cb e D hanno caratteristiche dimensionali diverse e quindi le imperfezioni alla base variano in modo differente (Tab. 4.1 e 4.2). Questo limita la significativà di un confronto diretto tra le prestazioni dei ponteggi.

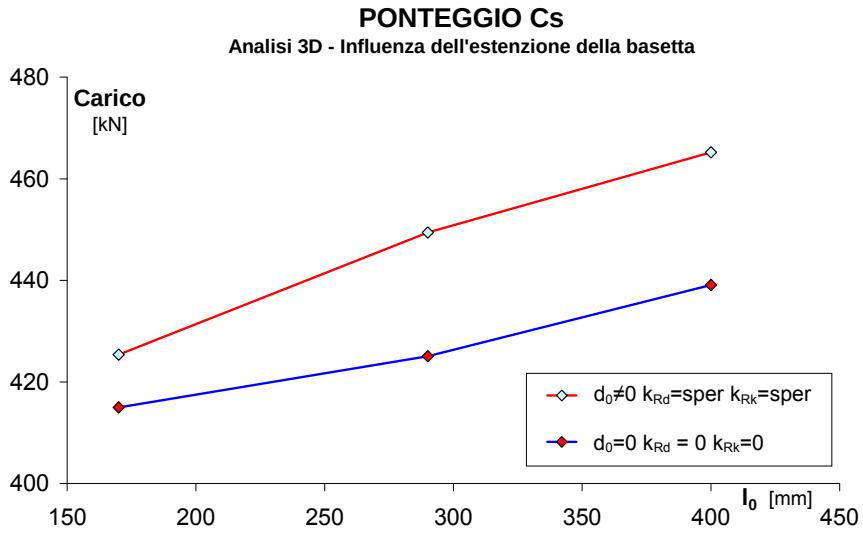


Figura 4.2 – Ponteggio Cs: influenza dell'estensione delle basetta

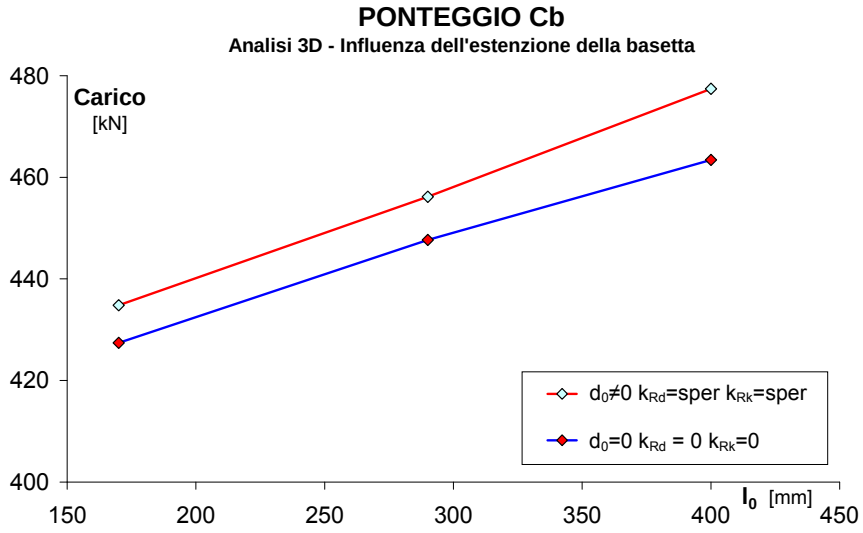


Figura 4.3 – Ponteggio Cb: influenza dell'estensione delle basetta

Anche i risultati delle analisi 2D (Tab. 4.4) confermano la marcata influenza delle imperfezioni alla base sulla risposta del sistema. I dati di tabella 4.4, riportati in forma grafica nelle figure 4.5-4.7 evidenziano chiaramente la diversa sensibilità delle stilate A e B. La stilata A, caratterizzata da un vincolo all'opera servita a quota 4m da terra, risente in modo meno marcato delle imperfezione alla base: la massima variazione della capacità portante è del 6,93% per il ponteggio Cb. Nel caso invece della stilata B la condizione di basetta con estensione minima determina un incremento rilevante della capacità portante che, nel caso del ponteggio D, raggiunge il 18,99%.

Le figure 4.5-4.7 permettono di rilevare l'influenza marcata che l'effetto combinato della variazione delle prestazioni del sistema di impalcato e dell'estensione della basetta ha sulla risposta della stilata B.

In questa sede non sono state riportate le deformate a collasso conseguenti alle analisi poiché qualitativamente simili a quelle relative alle analisi preliminari raccolte nell'allegato 5.

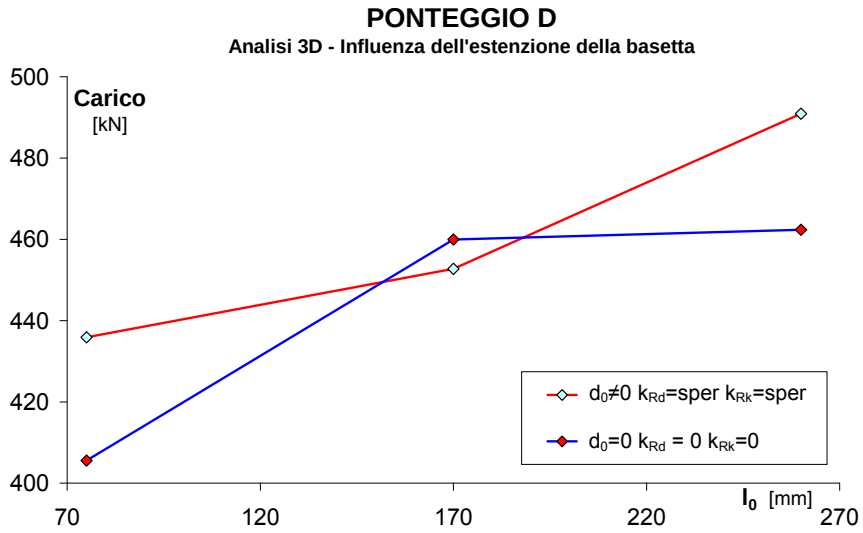


Figura 4.4 – Ponteggio D: influenza dell'estensione delle basetta

Tabella 4.4 – Analisi 2D: influenza delle imperfezioni alla base

Ponteggio	Stilata	Caratteristiche dei vincoli elastici	N_{EII} [kN]		
			Basetta estensione massima	Basetta estensione intermedia	Basetta estensione minima
Cs	A	($d_0 \neq 0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper)	74,014	76,387 (3,11%*)	78,650 (5,89%*)
		(d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0)	72,859	75,493 (3,49%*)	77,737 (6,28%*)
	B	($d_0 \neq 0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper)	57,180	61,560 (7,12%*)	65,708 (12,98%*)
		(d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0)	49,772	54,299 (8,34%*)	58,685 (15,19%*)
Cb	A	($d_0 \neq 0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper)	74,430	76,585 (2,81%*)	79,969 (6,93%*)
		(d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0)	74,326	76,597 (2,96%*)	78,934 (5,84%*)
	B	($d_0 \neq 0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper)	57,632	62,463 (7,73%*)	66,512 (13,35%*)
		(d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0)	50,704	55,308 (8,32%*)	59,991 (15,48%*)
D	A	($d_0 \neq 0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper)	78,938	79,807 (1,09%*)	82,382 (4,18%*)
		(d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0)	76,313	79,584 (4,11%*)	81,352 (6,19%*)
	B	($d_0 \neq 0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper)	61,475	65,808 (6,58%*)	69,885 (12,03%*)
		(d_0=0; k_{Rd}=0; k_{Rk}=0)	50,732	56,159 (10,70%*)	60,366 (18,99%*)

* variazione percentuale rispetto al caso di basetta completamente estesa

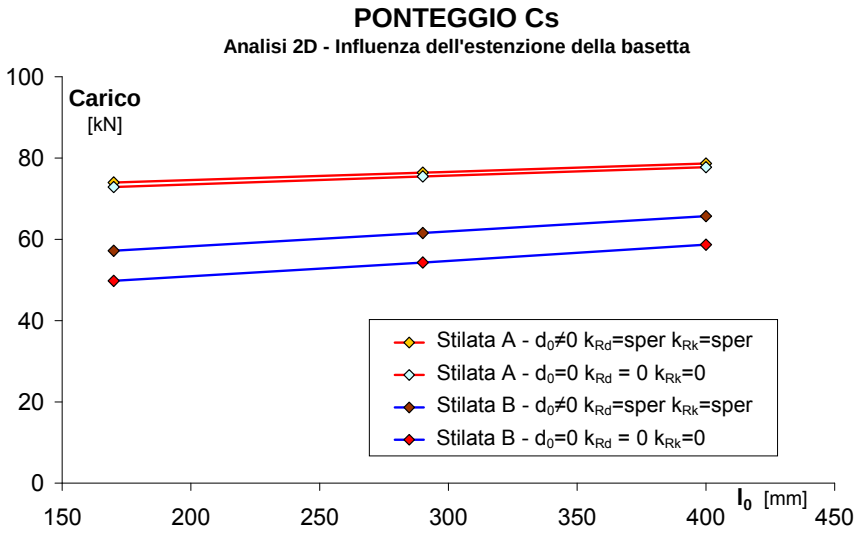


Figura 4.5 – Ponteggio Cs: influenza dell'estensione della basetta

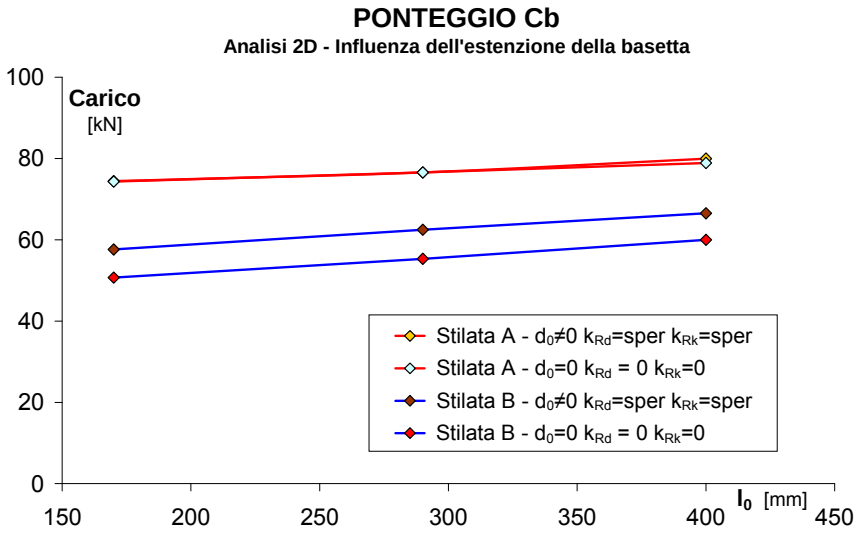


Figura 4.6 – Ponteggio Cb: influenza dell'estensione della basetta

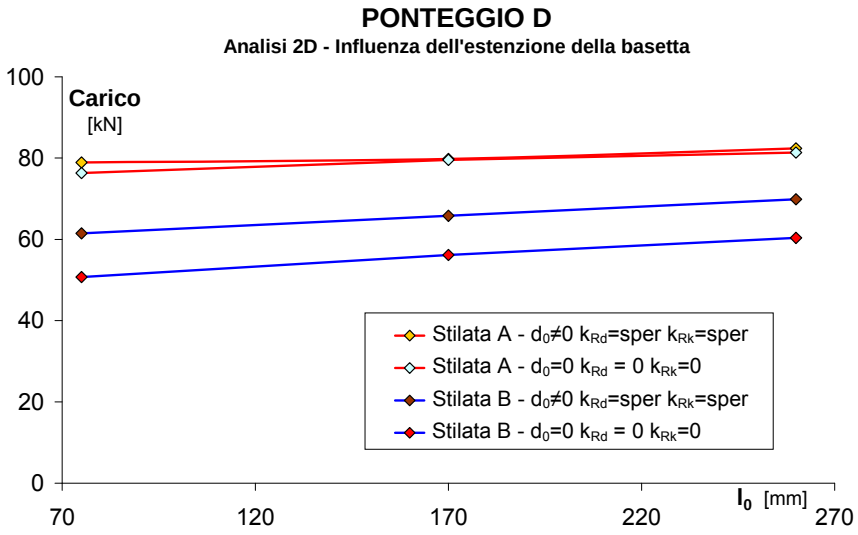


Figura 4.7 – Ponteggio D: influenza dell'estensione della basetta

4.2 L'influenza della rigidezza del sistema di impalcato

Al fine di chiarire in modo più approfondito l'influenza della risposta delle tavole di impalcato sul comportamento dei ponteggi sono state effettuate ulteriori analisi di sensitività al variare della rigidezza del sistema di piano. In particolare si è scelto di analizzare la risposta dei ponteggi al variare delle caratteristiche dell'impalcato nel solo piano di stilata mantenendo inalterate le caratteristiche nel piano parallelo all'opera servita. La scelta è giustificata dai risultati delle analisi presentate al capitolo precedente, che hanno messo in luce come la crisi dei ponteggi analizzati attivi sempre un meccanismo di stilata.

Assumendo come riferimento le leggi carico-spostamento delle tavole di impalcato presentate nelle figure 3.10-3.13 del capitolo precedente, le analisi di sensitività sono state svolte conservando inalterate le relazioni di figura 3.11 e 3.13 relative al piano di facciata e modificando quelle nel piano di stilata rappresentate nelle figure 3.10 e 3.12. Al riguardo si è scelto di modificare la pendenza del tratto che segue la fase di scorrimento iniziale compreso nell'intervallo di carico 0-R_d. Non si è ritenuto opportuno apportare variazioni alla rigidezza dell'ultimo tratto della relazione carico-spostamento perché i risultati della sperimentazione [11] hanno evidenziato come lo stato di degrado delle tavole per carichi successivi al carico di progetto (R_d) sia rilevante e la rigidezza residua del sistema di piano è limitata e pressoché simile indipendentemente dal sistema di aggancio tavole-telaio utilizzato. Non è pertanto apparso opportuno proporre una riduzione od un incremento rispetto al valore ricavato sperimentalmente. Limitatamente alla variazione di rigidezza del primo tratto della legge carico-spostamento nel piano di stilata, sono state considerate variazioni per eccesso e per difetto con step del 25% rispetto ai valori valutati mediante le analisi sperimentali (Fig. 4.8). Le leggi non lineari ridefinite secondo i criteri descritti sono presentate nelle tabelle 4.5 e 4.6 rispettivamente per i ponteggi tipo Cs-Cb e D.

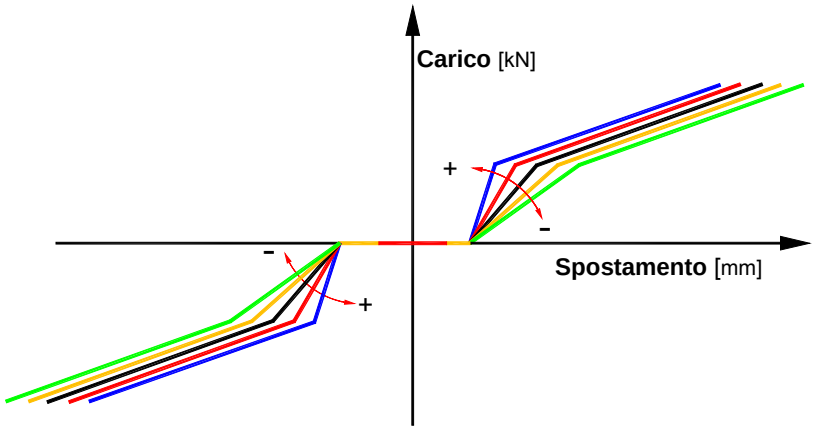


Figura 4.8 – Variazione della rigidezza dei vincoli di impalcato

Tabella 4.5 – Ponteggio Cs-Cb: risposta delle tavole di impalcato nel piano di stilata per le analisi di sensitività

Ponteggio Cs-Cb – Variazione di rigidezza							
+50%		+25%		-25%		-50%	
Spostamento [mm]	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Carico [kN]
-65,74	-1,21	-67,81	-1,21	-76,08	-1,21	-86,43	-1,21
-46,93	-0,74	-49,00	-0,74	-57,27	-0,74	-67,62	-0,74
-36,59	0	-36,59	0,00	-36,59	0	-36,59	0
0	0	0,00	0,00	0	0	0	0
36,59	0	36,59	0,00	36,59	0	36,59	0
46,93	0,74	49,00	0,74	57,27	0,74	67,62	0,74
65,74	1,21	67,81	1,21	76,08	1,21	86,43	1,21

I risultati delle analisi 3D e 2D di stilata sono riportati nelle tabelle 4.7 e 4.8 in termini di carico di collasso elastico del secondo ordine. E' possibile osservare come la variazione della rigidezza del tratto iniziale abbia una influenza trascurabile sulla risposta in condizioni ultime del sistema. Nel caso delle analisi 3D la variazione più sensibile, ma pur sempre limitata, si verifica nel caso del ponteggio D come conseguenza della riduzione del 25% della rigidezza.

Ad analoghe conclusioni si giunge se si considera anche una variazione della rigidezza delle tavole di impalcato nel piano parallelo all'opera servita. La tabella 4.9 illustra i risultati ottenuti applicando simultaneamente una variazione di egual entità alla rigidezza del tratto compreso nell'intervallo 0-R_d delle leggi carico-spostamento associate al piano di stilata ed al piano di facciata (Fig. 3.10-3.13). Ai fini delle

analisi sono state considerate variazioni del +50%, +25%, -25%, -50%. Si nota come anche sotto queste ipotesi le variazioni del carico di collasso, rispetto alla risposta del sistema ottenuta considerando le leggi di natura sperimentale, non siano rilevanti.

Tabella 4.6 – Ponteggio D: risposta delle tavole di impalcato nel piano di stilata per le analisi di sensitività

Ponteggio D – Variazione di rigidezza							
+50%		+25%		-25%		-50%	
Spostamento [mm]	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Carico [kN]
-43,51	-1,43	-45,64	-1,43	-54,17	-1,43	-64,83	-1,43
-26,64	-0,87	-28,77	-0,87	-37,30	-0,87	-47,97	-0,87
-15,98	0	-15,98	0	-15,98	0	-15,98	0
0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0
15,98	0	15,98	0	15,98	0	15,98	0
26,64	0,87	28,77	0,87	37,30	0,87	47,97	0,87
43,51	1,43	45,64	1,43	54,17	1,43	64,83	1,43

Tabella 4.7 – Influenza sul carico ultimo della rigidezza del sistema di impalcato nel piano di stilata (analisi 3D)

Ponteggio	N_{EII} [kN]				
	Rigidezza Sperimentale	Rigidezza +50%	Rigidezza +25%	Rigidezza -25%	Rigidezza -50%
Cs	425,395	421,294 (-0,964%*)	429,920 (1,064%*)	421,516 (-0,912%*)	430,560 (1,214%*)
Cb	434,817	437,623 (0,645%*)	437,185 (0,545%*)	443,429 (1,981%*)	437,726 (0,669%*)
D	435,896	441,852 (1,366%*)	443,532 (1,752%*)	444,394 (1,950%*)	435,492 (-0,093%*)

* variazione percentuale rispetto al caso di legge con rigidezza sperimentale

Tabella 4.8 – Influenza sul carico ultimo della rigidezza del sistema di impalcato nel piano di stilata (analisi 2D)

Ponteggio	Stilata	N_{EII} [kN]				
		Rigidezza Sperimentale	Rigidezza +50%	Rigidezza +25%	Rigidezza -25%	Rigidezza -50%
Cs	A	74,014	74,718 (0,95%*)	74,694 (0,92%*)	73,603 (-0,56%*)	73,745 (-0,36%*)
	B	57,180	57,448 (0,47%*)	57,347 (0,29%*)	57,092 (-0,15%*)	56,740 (-0,77%*)
Cb	A	74,430	74,190 (-0,32%*)	74,542 (0,15%*)	74,612 (0,24%*)	74,542 (0,15%*)
	B	57,632	57,739 (0,19%*)	57,484 (-0,26%*)	57,385 (-0,43%*)	57,484 (-0,26%*)
D	A	78,938	78,851 (-0,11%*)	78,889 (-0,06%*)	78,775 (-0,21%*)	78,728 (-0,27%*)
	B	61,475	61,411 (-0,10%*)	60,674 (-1,30%*)	60,509 (-1,57%*)	61,204 (-0,44%*)

* variazione percentuale rispetto al caso di legge con rigidezza sperimentale

Tabella 4.9 – Influenza sul carico ultimo della rigidezza del sistema di impalcato nel piano di stilata e di facciata (analisi 3D)

Ponteggio	N_{EII} [kN]				
	Rigidezza Sperimentale	Rigidezza +50%	Rigidezza +25%	Rigidezza -25%	Rigidezza -50%
Cs	425,395	420,740 (-1,106%*)	429,543 (0,966%*)	428,584 (0,744%*)	427,972 (0,602%*)
Cb	434,817	438,933 (0,938%*)	437,817 (0,685%*)	438,694 (0,88%*)	434,550 (-0,06%*)
D	435,896	434,590 (-0,301%*)	436,170 (0,063%*)	422,873 (-3,080%*)	433,023 (-0,663%*)

* variazione percentuale rispetto al caso di legge con rigidezza sperimentale

4.3 L'influenza dello scorrimento iniziale del sistema di impalcato

Benché le analisi preliminari discusse nel capitolo 3 abbiano rivelato una limitata influenza dello scorrimento iniziale sulla risposta dei ponteggi considerati, si è ritenuto opportuno completare lo studio

analizzando la risposta dei ponteggi al variare dell'entità del gap iniziale. Le variazioni sono state apportate allo scorrimento delle leggi carico-spostamento del sistema di impalcato nel piano di stilata, conservando inalterate le caratteristiche dell'impalcato nel piano parallelo al piano di facciata (Fig. 4.9). Con riferimento alle leggi sperimentali presentate nelle figure 3.10 e 3.12 e relative alla risposta dell'impalcato nel piano di stilata, si sono apportate variazioni per eccesso e difetto del gap iniziale con step del 25%. Le nuove leggi carico-spostamento presentate nella tabella 4.10 e 4.11 sono state caratterizzate da gap iniziali incrementati del +50%, +25%, -25% e -50% rispetto allo scorrimento iniziale valutato sperimentalmente.

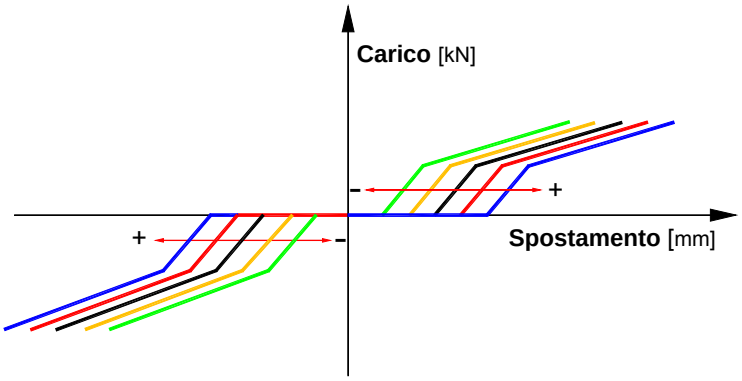


Figura 4.9 – Variazione dello scorrimento iniziale

Tabella 4.10 – Ponteggio Cs-Cb: risposta delle tavole di impalcato nel piano di stilata per le analisi di sensitività

Ponteggio Cs-Cb – Variazione del gap iniziale							
+50%		+25%		-25%		-50%	
Spostamento [mm]	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Carico [kN]
-89,21	-1,21	-80,06	-1,21	-61,76	-1,21	-52,62	-1,21
-70,40	-0,74	-61,25	-0,74	-42,95	-0,74	-33,81	-0,74
-54,89	0,00	-45,74	0,00	-27,44	0,00	-18,30	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
54,89	0,00	45,74	0,00	27,44	0,00	18,30	0,00
70,40	0,74	61,25	0,74	42,95	0,74	33,81	0,74
89,21	1,21	80,06	1,21	61,76	1,21	52,62	1,21

Tabella 4.11 – Ponteggio D: risposta delle tavole di impalcato nel piano di stilata per le analisi di sensitività

Ponteggio D – Variazione del gap iniziale							
+50%		+25%		-25%		-50%	
Spostamento [mm]	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Carico [kN]
-56,83	-1,43	-52,84	-1,43	-44,85	-1,43	-40,85	-1,43
-39,96	-0,87	-35,97	-0,87	-27,98	-0,87	-23,98	-0,87
-23,97	0,00	-19,98	0,00	-11,99	0,00	-7,99	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23,97	0,00	19,98	0,00	11,99	0,00	7,99	0,00
39,96	0,87	35,97	0,87	27,98	0,87	23,98	0,87
56,83	1,43	52,84	1,43	44,85	1,43	40,85	1,43

I risultati delle analisi 3D e 2D di stilata riportati nelle tabelle 4.12 e 4.13 in termini di carico di collasso elastico del secondo ordine, confermano la limitata influenza dello scorrimento iniziale sulla risposta in condizioni ultime dei sistemi. Nel caso delle analisi 3D la massima variazione della capacità portante rilevabile è pari a -2,56% per i ponteggi Cs a seguito di un incremento del 50% dello scorrimento iniziale. Nel caso delle analisi 2D si registra un incremento del 2,44% nel caso del ponteggio Cb per un incremento del 50% dello scorrimento iniziale.

4.4 Considerazioni finali

In questo capitolo sono presentati i risultati delle analisi di sensitività svolte sui tre sistemi di ponteggio oggetto del presente lavoro. Le analisi hanno analizzato la risposta del sistema al variare delle imperfezioni alla base, della rigidezza e dello scorrimento delle leggi che descrivono la risposta dei sistemi di piano.

I risultati delle analisi hanno evidenziato come la risposta dei sistemi intelaiati sia influenzata in modo rilevante dalle imperfezioni alla base: riduzioni del 25% delle imperfezioni alla base possono determinare un incremento del 13% (analisi 3D) e del 19% (analisi 2D-stilata B) della capacità portante ultima. Variazioni minori e trascurabili della capacità portante si riscontrano invece nel caso in cui si considerino variazioni anche rilevanti dello scorrimento iniziale e della rigidezza dei sistemi di impalcato. E' importante comunque puntualizzare che, benché i singoli parametri possano avere effetti trascurabili, l'effetto della contemporanea presenza di più di essi potrebbe incidere in modo rilevante sulla risposta dei sistemi.

Tabella 4.12 – Influenza sul carico ultimo dello scorrimento del sistema di impalcato nel piano di stilata (analisi 3D)

Ponteggio	N_{EII} [kN]				
	Scorrimento Sperimentale	Scorrimento +50%	Scorrimento +25%	Scorrimento -25%	Scorrimento -50%
Cs	425,395	414,790 (-2,56%)	421,621 (-0,90%)	422,980 (-0,57%)	420,403 (-1,19%)
Cb	434,817	435,576 (0,17%)	436,513 (0,39%)	441,096 (1,42%)	437,476 (0,61%)
D	435,896	430,248 (-1,31%)	432,570 (-0,77%)	435,425 (-0,11%)	438,000 (0,48%)

* variazione percentuale rispetto al caso di legge con scorrimento sperimentale

Tabella 4.13 – Influenza sul carico ultimo dello scorrimento del sistema di impalcato nel piano di stilata (analisi 2D)

Ponteggio	Stilata	N_{EII} [kN]				
		Scorrimento Sperimentale	Scorrimento +50%	Scorrimento +25%	Scorrimento -25%	Scorrimento -50%
Cs	A	74,014	73,749 (-0,36%*)	73,86 (-0,21%*)	74,068 (0,07%*)	73,991 (-0,03%*)
	B	57,180	56,893 (-0,50%*)	56,966 (-0,37%*)	57,623 (0,77%*)	58,000 (1,43%*)
Cb	A	74,430	74,394 (-0,05%*)	74,490 (0,08%)	75,466 (1,39%*)	74,634 (0,27%*)
	B	57,632	57,301 (-0,57%*)	57,591 (-0,07%*)	58,103 (0,82%*)	59,037 (2,44%*)
D	A	78,938	78,54 (-0,50%*)	78,917 (-0,03%*)	78,669 (-0,34%*)	78,809 (-0,16%*)
	B	61,475	61,594 (0,19%*)	60,667 (-1,31%*)	61,066 (-0,67%*)	61,404 (-0,12%*)

* variazione percentuale rispetto al caso di legge con scorrimento sperimentale

5. L'INFLUENZA DEL DIAGONALE DI FACCIATA

I modelli di calcolo utilizzati per lo sviluppo delle analisi numeriche di cui ai capitoli 3 e 4 di questo lavoro, hanno ipotizzato il diagonale di facciata vincolato ai montanti mediante cerniere ad asse orizzontale. Operando sotto queste ipotesi, ciò di cui non si tiene conto in sede di analisi è l'effettivo comportamento del diagonale pensato come parte integrante del telaio. Nell'ambito di questo lavoro si è voluto approfondire questo particolare aspetto, utilizzando i risultati della sperimentazione presentata nel capitolo 2. A tal fine, sono state svolte delle analisi numeriche sui sistemi 3D, implementando nei modelli di calcolo le leggi spostamento-azione assiale dei diagonali determinate sperimentalmente.

5.1 Il modello di calcolo

Le analisi numeriche, che hanno interessato le tre tipologie di ponteggio considerate nell'ambito di questo lavoro (ponteggi Cs, Cb e D), sono state svolte con il codice di calcolo ANSYS ver. 11 [12].
La necessità di implementare la legge spostamento-azione assiale dei diagonali nel modello di calcolo e di sviluppare le analisi nel campo dei grandi spostamenti, ha richiesto la modifica dei modelli rispetto a quanto descritto al paragrafo 3.2.1 adottando un elemento finito diverso per la schematizzazione degli elementi del ponteggio. All'elemento finito PIPE16 è stato sostituito l'elemento BEAM188 nella sua formulazione di tipo "finite strain", qui considerata in termini di sola non linearità geometrica. L'elemento ha 7 gradi di libertà per ogni nodo, di cui sei sfruttati in questo caso, mentre il settimo non sfruttato a seguito della simmetria circolare della sezione. L'elemento è del tipo beam a 3 nodi: 2 nodi coincidono con i nodi di estremità della mesh, mentre il terzo nodo è autogenerato in posizione intermedia tra i due di estremità con l'obiettivo di ottenere una più affidabile descrizione delle caratteristiche di sollecitazione. Le peculiarità dell'elemento BEAM188 rendono possibile l'implementazione delle legge spostamento-azione assiale dei diagonali in termini di relazione deformazione assiale–azione assiale agendo direttamente sulla matrice di rigidezza dell'elemento. La scelta dell'elemento BEAM188 richiede anche la definizione delle relazioni momento torcente-curvatura torsionale e taglio-scorrimento. Vista la particolarità del problema affrontato, queste sono state attribuite in modo tale che i diagonali siano chiamati a lavorare per prevalente azione assiale. Per soddisfare a quest'ultimo requisito le analisi sono state sviluppate mediante una procedura "trial and error", che ha determinato un appesantimento notevole dell'onere computazionale.

5.2 Le analisi numeriche

Le analisi del secondo ordine a collasso hanno considerato tre diverse condizioni di vincolo rappresentative delle tavole di impalcato. Nel dettaglio si è fatto riferimento alle seguenti tre condizioni:

- vincoli elastici di piano descritti mediante le leggi di derivazioni sperimentale (Fig. 3.10-3.13) ($d_0 \neq 0$; k_{Rd}=sper; k_{Rk}=sper) (caso di studio 1);
- i vincoli elastici in facciata e nella stilata hanno scorrimento iniziale nullo ($d_0=0$) e sono descritti da una legge elastica lineare simmetrica a trazione e compressione caratterizzata da una pendenza pari a quella associata alle tavole di impalcato, nella direzione pertinente, nell'intervallo di carico 0-R_d (Fig. 3.25-3.28) ($d_0=0$; k_{Rd}=sper; $k_{Rk}=k_{Rk}$) (caso 2);
- assenza del sistema di piano ($d_0=0$; $k_{Rd}=0$; $k_{Rk}=0$) (caso 3).

I risultati delle analisi sono presentati nella tabella 5.1 in termini di carico di collasso. Per meglio comprendere l'influenza dei diagonali sulla risposta del sistema, la tabella propone il confronto dei risultati delle analisi sviluppate considerando due diverse schematizzazioni dei diagonali:

- diagonali schematizzati come elementi beam tradizionali, collegati ai montanti mediante cerniere ad asse orizzontale;
- diagonali schematizzati come elementi beam caratterizzati mediante la legge spostamento-azione assiale di derivazione sperimentale.

Nella tabella 5.1 alla prima schematizzazione del diagonale è associata la denominazione "tradizionale schematizzazione" alla seconda invece è associata la denominazione "caratterizzazione sperimentale".
I risultati di tabella mostrano chiaramente come la diversa schematizzazione del diagonale di facciata abbia un'influenza moderata sulla risposta in condizioni ultime, nel caso in cui gli impalcati svolgano una efficace azione controventante (caso 1- $d_0 \neq 0$ k_{Rd}=sper k_{Rk}=sper; caso 2 - $d_0=0$ k_{Rd}=sper $k_{Rk}=k_{Rd}$). All'opposto la contemporanea presenza di un sistema di controventamento di piano scarsamente efficace (caso 3 - $d_0=0$; $k_{Rd}=0$; $k_{Rk}=0$) e di un più deformabile sistema di facciata determina una sostanziale riduzione della capacità portante che, nel caso del ponteggio D, raggiunge circa il 19%.
L'effetto della diversa schematizzazione del diagonale è ancor più evidente osservando le deformate a collasso dei sistemi. Le figure 5.1-5.6 illustrano le deformate determinate caratterizzando il diagonale attraverso la legge di derivazione sperimentale e considerando le schematizzazioni caso 1 e caso 3 del sistema di impalcato. Si osserva come, a differenza di quanto mostrato dalle analisi svolte utilizzando la tradizionale schematizzazione del diagonale (Fig. 3.29-3.34), la maggiore flessibilità delle facciate esterne

del ponteggio determina in tutti i casi analizzati un collasso che vede coinvolto in modo rilevante anche la facciata del sistema. L'assenza del sistema di impalcato (Fig. 5.4-5.6) amplifica ulteriormente questo effetto.

Tabella 5.1 – Influenza della schematizzazione dei diagonali di facciata

Ponteggio	Caso di studio	Vincoli elastici equivalenti all'impalcato	Diagonale		$N_{EII,CS}$/ $N_{EII,TS}$
			Caratterizzazione sperimentale	Tradizionale schematizzazione	
			$N_{EII,CS}$ [kN]	$N_{EII,TS}$ [kN]	
Cs	1	$d_0 \neq 0$ k_{Rd}=sper k_{Rk}=sper	426,032	455,396	0,936
	2	$d_0=0$ k_{Rd}=sper $k_{Rk}=k_{Rd}$	448,169	461,282	0,972
	3	$d_0=0$ k_{Rd}=0r $k_{Rk}=0$	392,293	444,810	0,882
Cb	1	$d_0 \neq 0$ k_{Rd}=sper k_{Rk}=sper	436,208	461,994	0,944
	2	$d_0=0$ k_{Rd}=sper $k_{Rk}=k_{Rd}$	449,534	466,722	0,963
	3	$d_0=0$ k_{Rd}=0r $k_{Rk}=0$	394,859	451,264	0,875
D	1	$d_0 \neq 0$ k_{Rd}=sper k_{Rk}=sper	430,097	452,572	0,950
	2	$d_0=0$ k_{Rd}=sper k_{Rk}=sper	438,952	454,858	0,965
	3	$d_0=0$ k_{Rd}=0r $k_{Rk}=0$	360,782	445,898	0,809

Un'interessante osservazione può essere fatta confrontando, a parità di condizioni di vincolo degli impalcati, i risultati della quinta colonna di tabella 5.1 ($N_{EII,TS}$) ai risultati della quarta colonna di tabella 3.6 (N_{EII}). In entrambi i casi, i risultati riguardano analisi effettuate su modelli 3D caratterizzati dalle stesse condizioni di vincolo, di carico e dalle medesime imperfezioni. La differenza tra i due modelli relativi alle tabelle 5.1 e 3.6, consiste nella tipologia di elemento finito utilizzato per la discretizzazione dei sistemi: i risultati di tabella 5.1 sono stati ottenuti discretizzando gli elementi del telaio mediante elementi BEAM188 mentre quelli di tabella 3.6 sono stati ottenuti utilizzando elementi PIPE16. L'elemento BEAM188 è un elemento particolarmente adatto alle analisi in grandi spostamenti ed in campo non elastico, la cui formulazione è tale per cui la convergenza risulta sicuramente migliorata rispetto all'elemento tradizionale PIPE16. Questo semplice confronto è indicativo di quanto possa incidere sul risultato finale la scelta dell'elemento finito. Non deve stupire quindi se l'uso di programmi di calcolo che utilizzano elementi finiti con formulazioni diverse, criteri di convergenza diversi, metodi di analisi caratterizzati da diversi livelli di accuratezza conduce a risultati fra loro anche sensibilmente differenziati.
Quale commento ai risultati delle analisi presentati ai capitoli 3-4, va osservato che i più comuni programmi di calcolo strutturale utilizzano elementi finiti di tipo "tradizionale" allineandosi all'elemento PIPE16 di ANSYS.

5.3 Considerazioni finali

Nell'ambito di questo capitolo sono riassunti i risultati di una serie di analisi numeriche svolte con l'obiettivo di investigare l'influenza della schematizzazione del sistema di controvento di facciata sulla risposta globale dei sistemi investigati. Lo studio, che ha utilizzato i risultati delle prove sperimentali presentate al capitolo 2, ha richiesto l'aggiornamento dei modelli di calcolo 3D in modo da consentire l'implementazione delle leggi sperimentali associate ai diagonali e lo svolgimento delle analisi nel campo dei grandi spostamenti. La necessità di garantire il funzionamento dei diagonali per prevalente azione assiale ha indotto all'utilizzo di una procedura "trial and error" appesantendo notevolmente l'onere computazionale.

I risultati delle analisi hanno permesso di evidenziare come la diversa modellazione del diagonale di facciata, rispetto all'ipotesi di diagonali incernierati ai montanti, non determini una sostanziale riduzione della capacità portante ad eccezione del caso in cui il sistema di piano non sia in grado di svolgere una adeguata azione di controventamento. I casi di studio considerati hanno fatto rilevare una variazione massima di circa il 19%. Si è inoltre osservato, come atteso, che una più contenuta azione del sistema di facciata determina l'attivazione di rilevanti spostamenti e di meccanismi di facciata viceversa non evidenziabili.

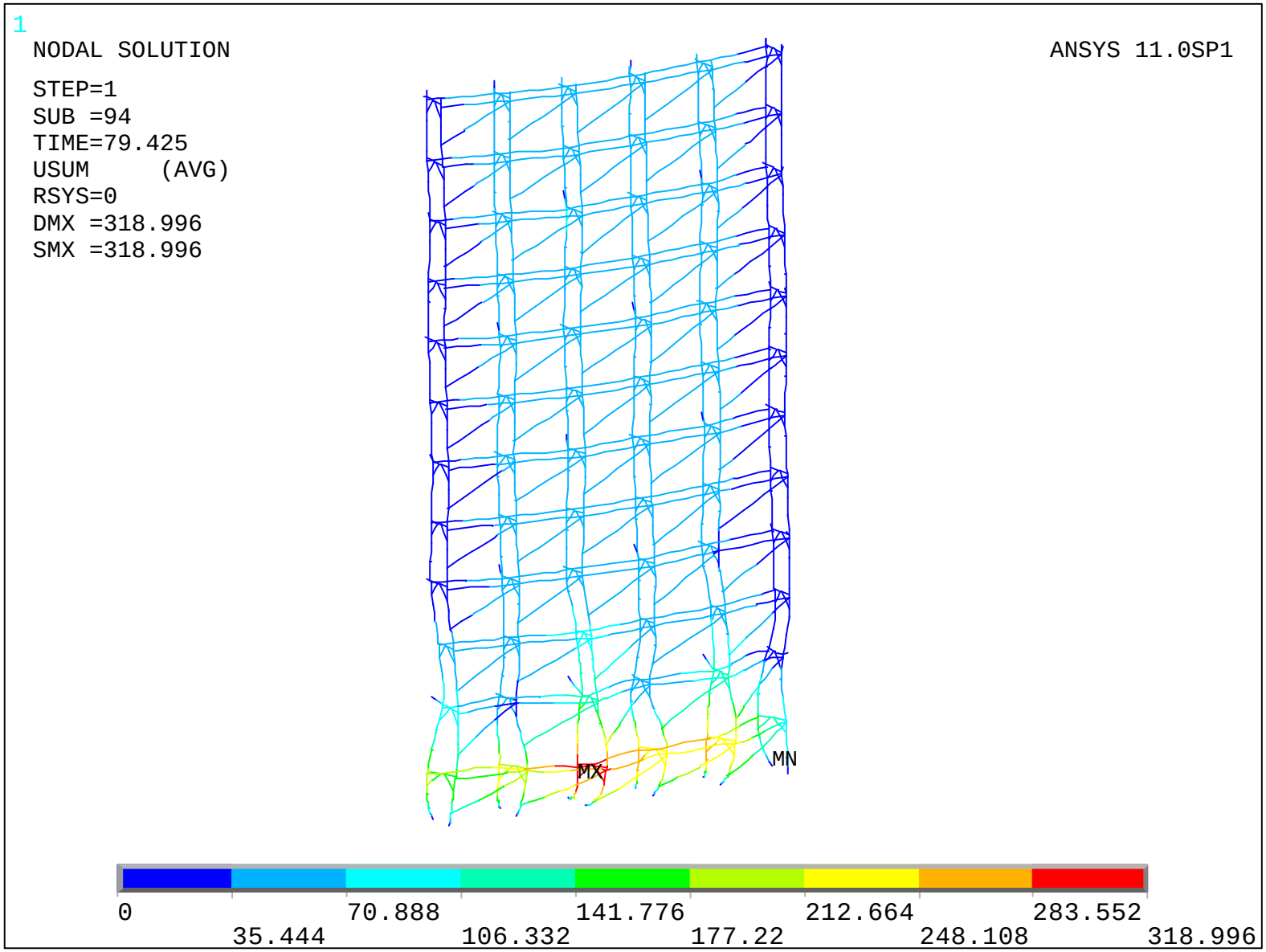


Figura 5.1 – Ponteggio Cs: deformate a collasso per la condizioni di vincolo di piano $d_0 \neq 0$, k_{Rd}=sper, k_{Rk}=sper, e con caratterizzazione sperimentale del diagonale

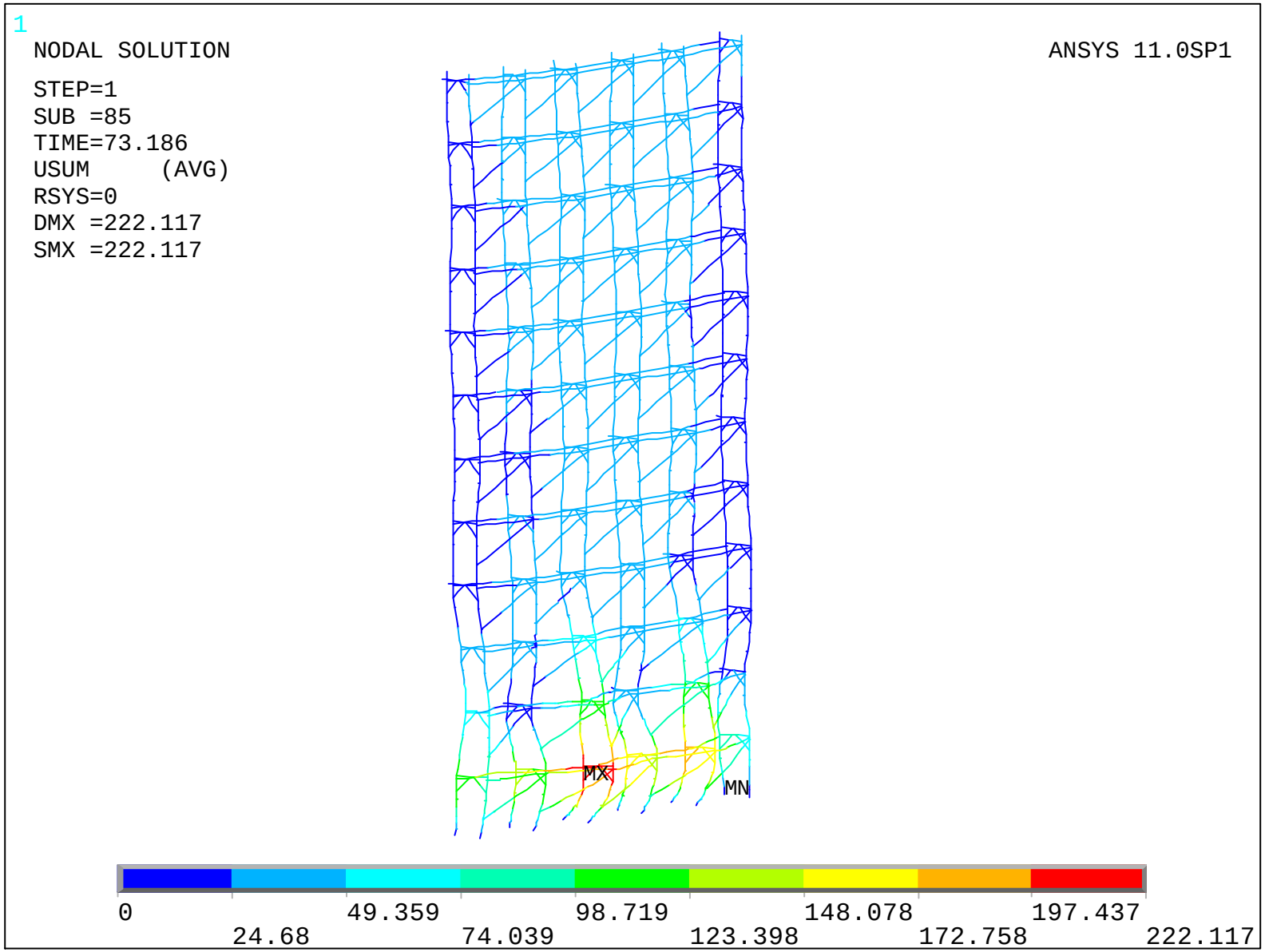


Figura 5.2 – Ponteggio Cs: deformate a collasso per la condizioni di vincolo di piano d_0=0, k_{Rd}=0, k_{Rk}=0, e con caratterizzazione sperimentale del diagonale

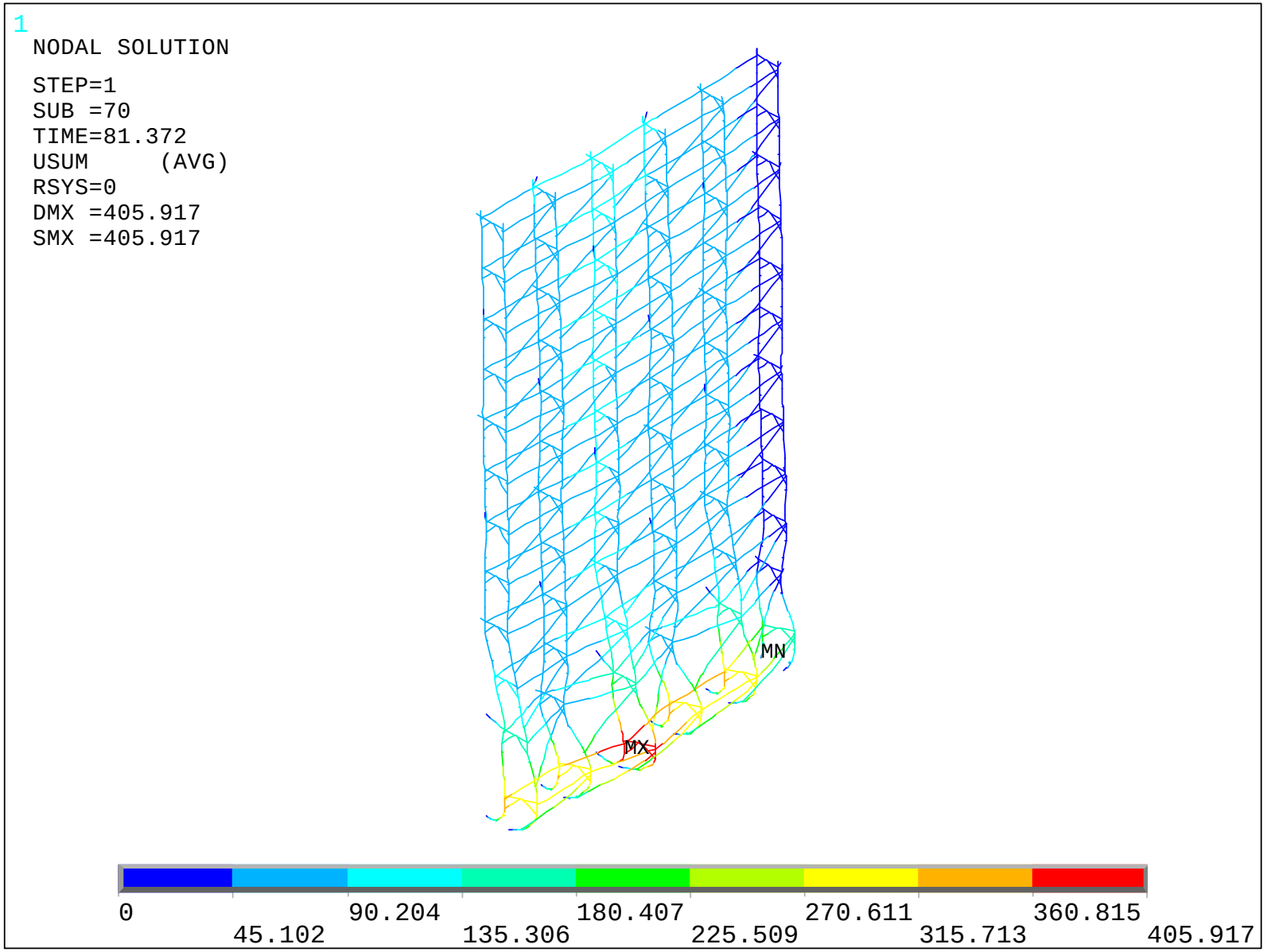


Figura 5.3 – Ponteggio Cb: deformate a collasso per la condizioni di vincolo di piano $d_0 \neq 0$, k_{Rd}=sper, k_{Rk}=sper, e con caratterizzazione sperimentale del diagonale

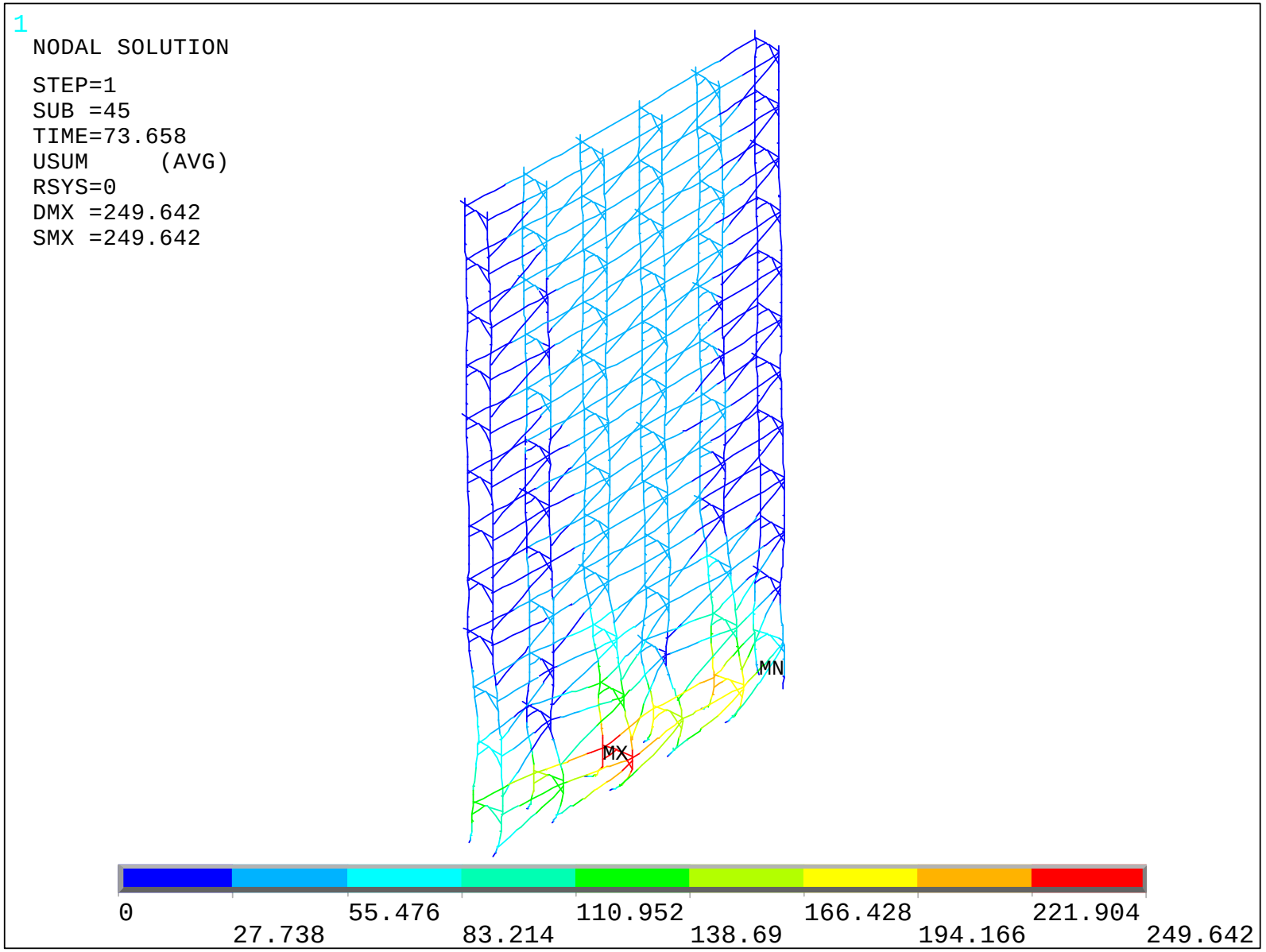


Figura 5.4 – Ponteggio Cb: deformate a collasso per la condizioni di vincolo di piano d_0=0, k_{Rd}=0, k_{Rk}=0, e con caratterizzazione sperimentale del diagonale

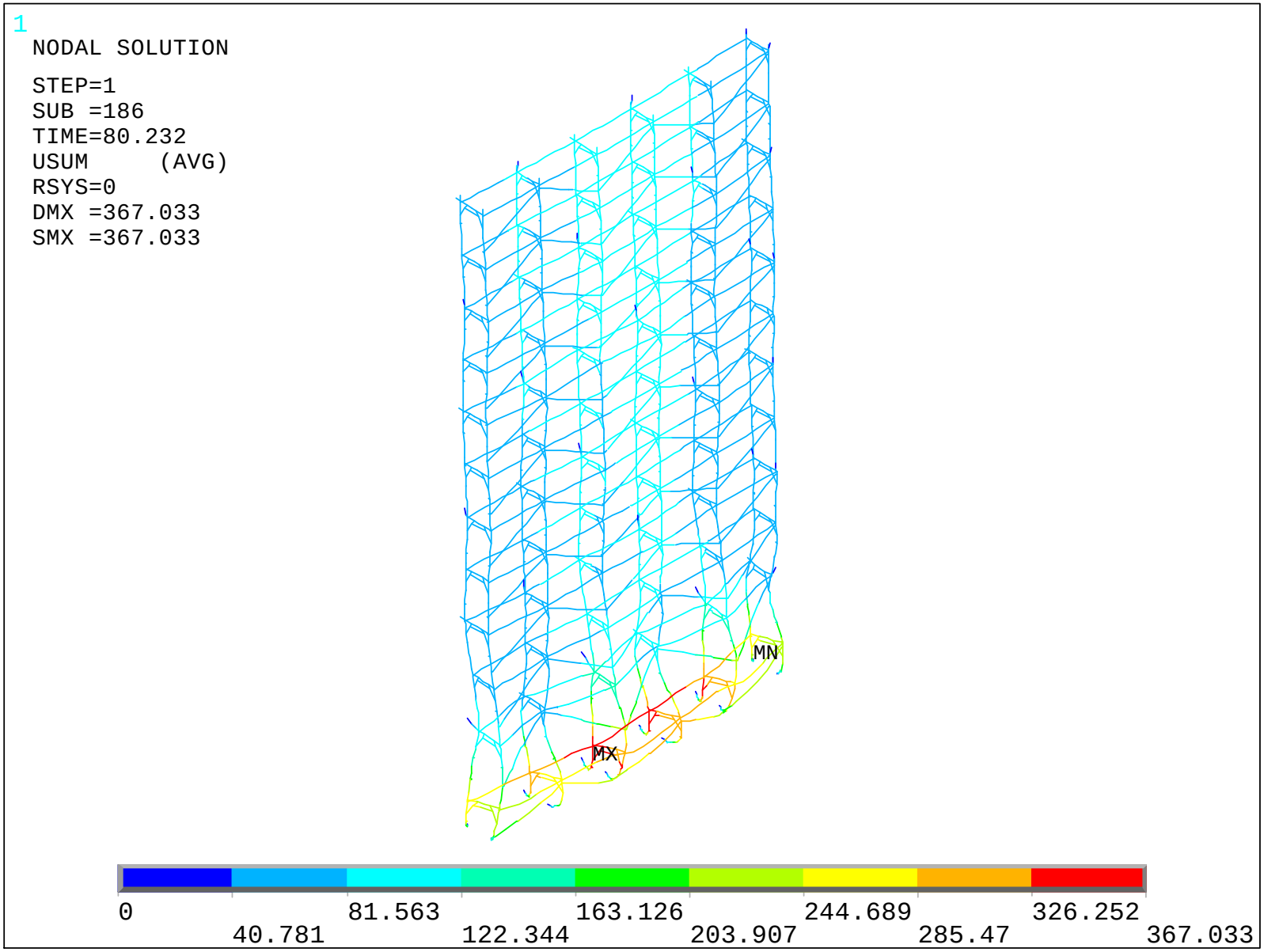


Figura 5.5 – Ponteggio D: deformate a collasso per la condizioni di vincolo di piano $d_0 \neq 0$, k_{Rd}=sper, k_{Rk}=sper, e con caratterizzazione sperimentale del diagonale

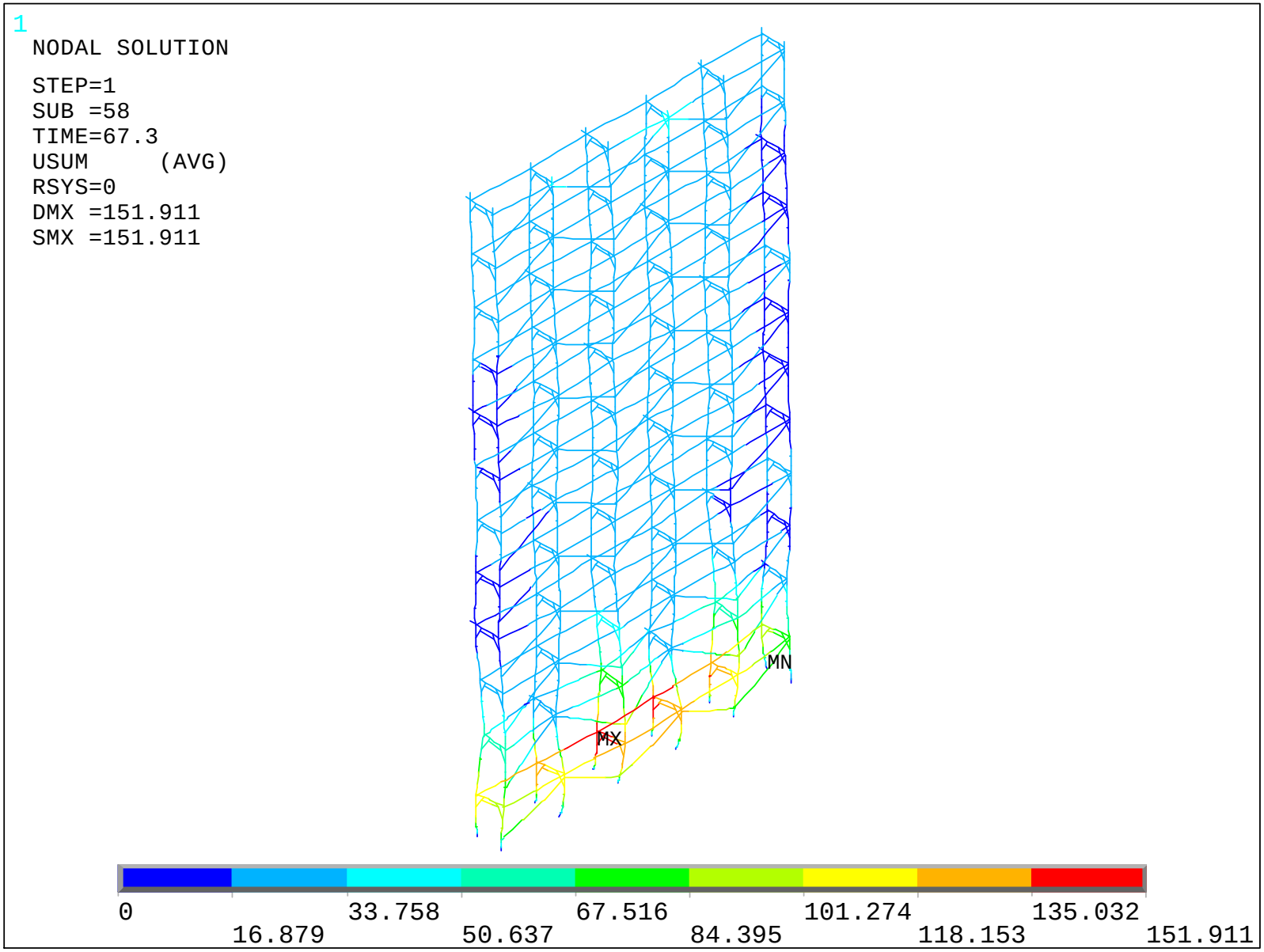


Figura 5.6 – Ponteggio D: deformate a collasso per la condizioni di vincolo di piano d_0=0, k_{Rd}=0, k_{Rk}=0, e con caratterizzazione sperimentale del diagonale

6. IL MODELLO 2D DI FACCIATA

Nell'ambito dei precedenti capitoli l'analisi della risposta dei sistemi di ponteggio è stata analizzata mediante modelli 3D e sottomodelli 2D di stilata sviluppati in accordo alla normativa europea UNI EN 12810-2:2004 [4]. Non è stato invece dato spazio al sottomodello 2D di facciata. Questo aspetto è invece trattato dettagliatamente in questo capitolo. Lo spazio più ampio dedicato a questa tematica è frutto di due osservazioni:

- a differenza di quanto accade per il modello 3D completo e il sottomodello 2D di stilata, il sottomodello 2D di facciata è definito in modo meno particolareggiato da parte della normativa;
- studi recenti [11] hanno messo in luce le difficoltà operative legate all'utilizzo del sottomodello 2D di facciata. Le problematiche riguardano oltre che la definizione del modello, che condensa su un medesimo piano i due piani di facciata, anche la fruibilità dei risultati ai fini progettuali.

Queste considerazioni hanno determinato lo sviluppo di studi successivi che hanno portato alla definizione di un nuovo sottomodello 2D di facciata, anch'esso basato sui principi di condensazione dei telai, che si è dimostrato in grado di predire in modo più realistico il carico di collasso del sistema.

6.1 Il modello 2D di facciata secondo la norma UNI EN 12810-2:2004 [4]

Il sottomodello 2D di facciata proposto dalla norma UNI EN 12810-2:2004 [4] e rappresentato in figura 6.1, prevede la condensazione del sistema 3D in un unico piano individuato appunto dalla facciata.

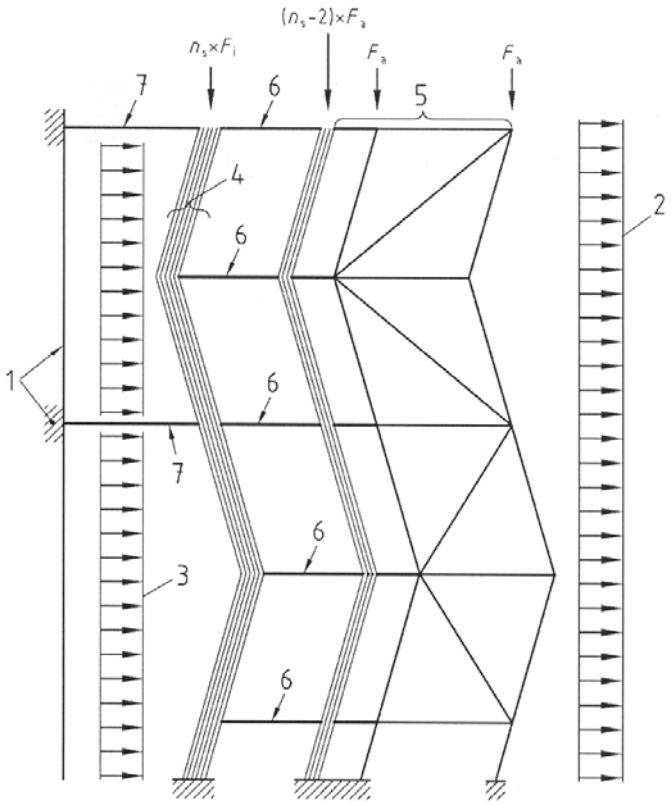


Figura 6.1 – Il modello 2D di facciata secondo la norma UNI EN 12810-2:2004 [4]

La condensazione delle strutture intelaiate trae spunto dalla letteratura anglosassone [17]. Il principio generale è che le caratteristiche flessionali di un telaio ad un'unica campata possono essere utilizzate per valutare le stesse caratteristiche di una famiglia particolare di strutture a telaio caratterizzate da più campate. Partendo dalla osservazione che una serie di telai identici soggetti ad una stessa condizione di carico presentano la stessa deformazione, ne consegue che colonne adiacenti possono essere unite tra loro senza causare alcuna ridistribuzione degli sforzi. A titolo di esempio si considerino i telai presentati in figura 6.2. Si ipotizzi che questi siano tutti caratterizzati dalle stesse caratteristiche flessionali e soprattutto dallo stesso carico di collasso. Per tutte le tipologie di telaio presentate in figura 6.2 ci si può ricondurre ad un telaio equivalente caratterizzato da proprietà geometriche e meccaniche degli elementi ottenute seguendo le semplici regole di condensazione presentate in tabella 6.1. Valutate quindi le caratteristiche geometriche e meccaniche del telaio equivalente è possibile procedere al calcolo delle azioni interne. I valori così ottenuti

devono essere suddivisi tra i vari elementi condensati in proporzione alla loro rigidezza. Per quel che riguarda invece la valutazione del carico di collasso è suggerita un'ulteriore assunzione che prevede di poter valutare il carico di collasso di ogni colonna come valore medio del carico di collasso ottenuto per il telaio nella sua interezza.

Come si può osservare in figura 6.2 le regole di condensazione proposte per le strutture a telaio sono relativamente semplici e di facile applicazione.

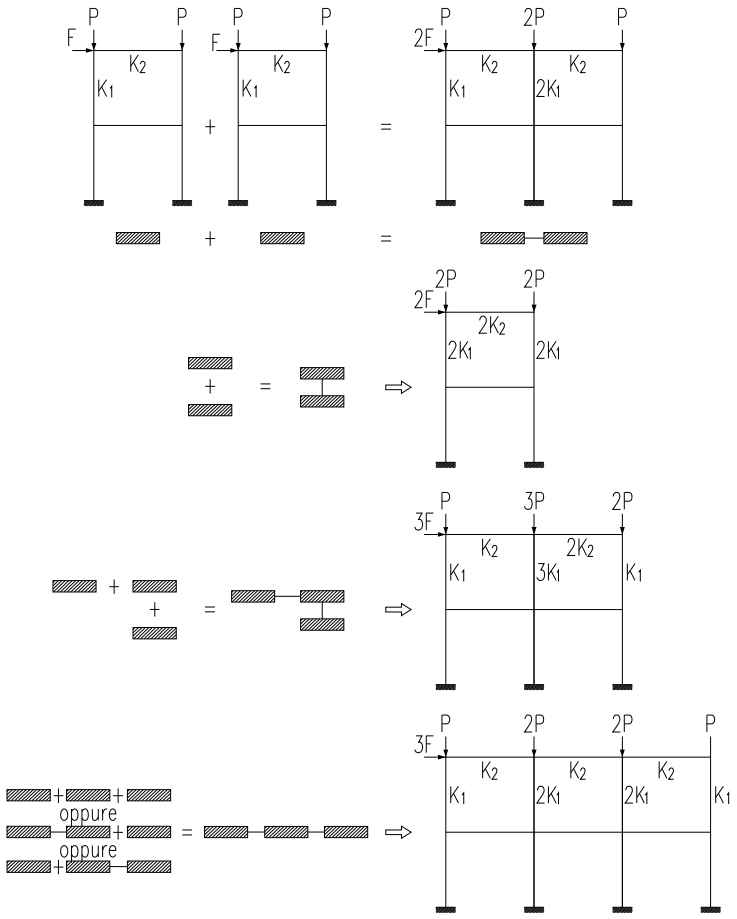


Figura 6.2 – Criteri di condensazione per i telai [17]

Tabella 6.1 – Criteri di condensazione per i telai [17]

Σ	Rigidezze delle colonne del telaio equivalente	=	Σ	Rigidezze delle colonne del telaio con n campate
Σ	Carichi sulle colonne del telaio equivalente	=	Σ	Carichi sulle colonne del telaio con n campate
	Rigidezza delle travi	=	Σ	Rigidezza delle travi

Seguendo queste poche regole per la condensazione dei telai ed i criteri della norma UNI EN 12810-2:2004 [4] per la rappresentazione del telaio di facciata, è stato possibile valutare le caratteristiche geometriche degli elementi condensati per le tre tipologie di ponteggio analizzate, mediante l'equivalenza delle aree e dei momenti di inerzia. I risultati del processo di condensazione sono presentati in tabella 6.2.
Con l'obiettivo di analizzare la risposta dei sistemi di ponteggio Cs, Cb e D utilizzando il modello 2D di facciata proposto dalla normativa, sono state fatte le seguenti ipotesi sui vincoli:

- vincoli all'opera servita: realizzati con semplici carrelli a traslazione verticale congruentemente a quanto fatto per il modello 3D completo. Le caratteristiche geometriche degli ancoraggi equivalenti presentate in tabella 6.2 sono ottenute mediante l'equivalenza delle aree e dei momenti di inerzia degli ancoraggi disposti sulla facciata;
- vincoli elastici tra montante equivalente interno e montante equivalente esterno: rappresentano il contributo delle tavole di impalcato nel piano di facciata. La rigidezza condensata equivalente è stata valutata come:

$$K_{eq} = K_{//} \cdot \frac{n-1}{2} \qquad [6.1]$$

dove:

n numero di montanti da stabilizzare nella facciata;

$K_{//}$ rigidezza del vincolo elastico rappresentativo delle tavole di impalcato nel piano parallelo alla facciata.

Poiché nei casi analizzati n è pari a 6, il coefficiente moltiplicativo(n-1)/2 risulta pari a 2,5, ottenendo quindi $K_{//,eq} = 2.5 \cdot K_{//}$.

Le analisi sono state inoltre sviluppate considerando due casi per quanto riguarda i vincoli elastici tra montanti interni ed esterni:

- legge di tipo non lineare, caratterizzata da uno scorrimento iniziale e basata sulle leggi presentate nelle figure 3.11 e 3.13. Le leggi equivalenti valutate in accordo all'equazione 6.1 sono state caratterizzate da uno lo scorrimento iniziale pari a quello valutato sperimentalmente immaginando per le tavole un funzionamento in parallelo. Le leggi ottenute sono presentate nelle figure 6.3 e 6.4 per i ponteggi Cs-Cb e D rispettivamente. Nel seguito questa condizione di vincolo è indicata come $d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper (caso 1);
- legge indefinitamente elastica basata sulle leggi presentate nelle figure 3.26 e 3.28. Le leggi equivalenti sono presentate nelle figure 6.5 e 6.6 per i ponteggi Cs-Cb e D rispettivamente. Nel seguito questa condizione di vincolo è indicata come d_0=0; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$.

Tabella 6.2 – Caratteristiche geometriche equivalenti degli elementi per il modello 2D di facciata ridotto secondo UNI EN 12810-2:2004 [4]

Montante equivalente interno (n°6 montanti)	Montante equivalente esterno (n°4 montanti)	Ancoraggio equivalente (n°3 ancoraggi)	Corrente equivalente esterno (n°4 correnti)	Diagonale equivalente di piano (n°5 diagonali)
		Ponteggio Cs		
ϕ = 60,41 mm sp = 19,15 mm	ϕ = 55,89 mm sp = 12,00 mm	ϕ = 52,78 mm sp = 9,77 mm	ϕ = 45,31 mm sp = 8,23 mm	ϕ = 46,50 mm sp = 11,80 mm
		Ponteggio Cb		
ϕ = 60,41 mm sp = 19,15 mm	ϕ = 55,89 mm sp = 12,00 mm	ϕ = 52,78 mm sp = 9,77 mm	ϕ = 45,31 mm sp = 8,23 mm	ϕ = 46,50 mm sp = 11,80 mm
		Ponteggio D		
ϕ = 60,41 mm sp = 19,15 mm	ϕ = 55,89 mm sp = 12,00 mm	ϕ = 52,78 mm sp = 9,77 mm	ϕ = 45,31 mm sp = 8,23 mm	ϕ = 46,50 mm sp = 11,80 mm

ϕ diametro esterno dei tubi equivalenti - sp spessore del tubo.

Spostamento [mm]	Carico [kN]
-35,10	-16,38
-25,51	-9,93
-10,31	0
0	0
10,31	0
25,51	9,93
35,10	16,38

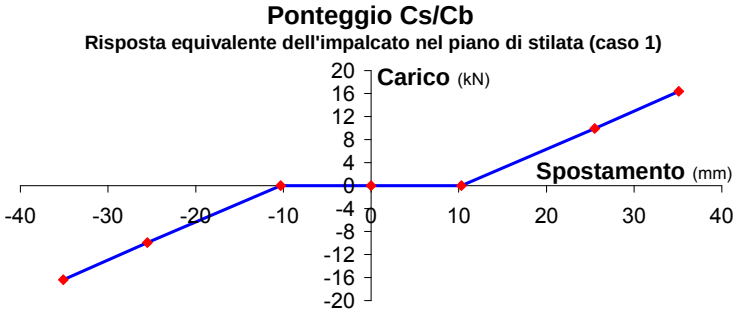


Figura 6.3 - Ponteggio Cs/Cb: Risposta equivalente alle tavole di impalcato nel piano di facciata (caso 1)

Spostamento [mm]	Carico [kN]
-32,05	-9,88
-23,46	-5,98
-12,12	0
0	0
12,12	0
23,4631	5,98
32,05	9,88

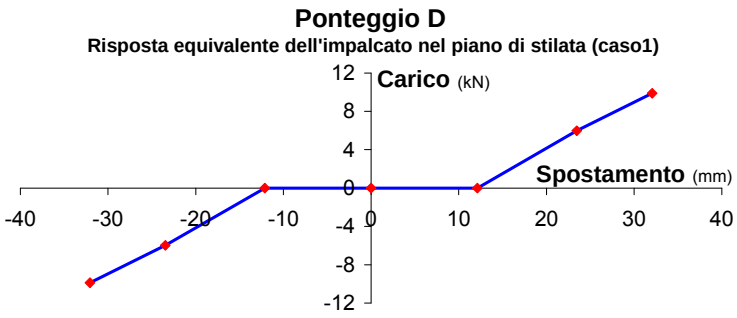


Figura 6.4 - Ponteggio D: Risposta equivalente alle tavole di impalcato nel piano di facciata (caso 1)

Spostamento [mm]	Carico [kN]
-24,79	-16,19
-15,20	-8,01
0,00	0,00
15,20	8,01
24,79	16,19

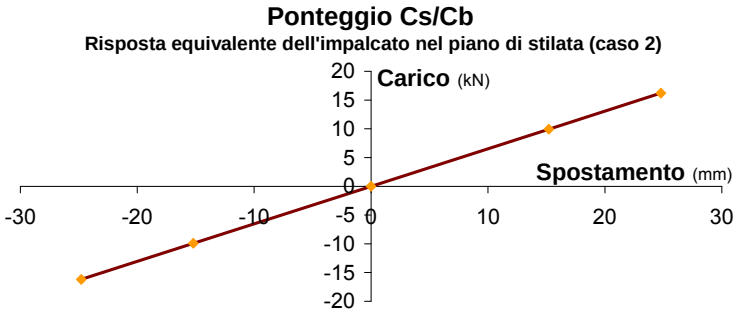


Figura 6.5 - Ponteggio Cs/Cb: Risposta equivalente alle tavole di impalcato nel piano di facciata (caso 2)

Spostamento [mm]	Carico [kN]
-19,93	-10,50
-11,34	-5,98
0	0
11,34	5,98
19,93	10,50

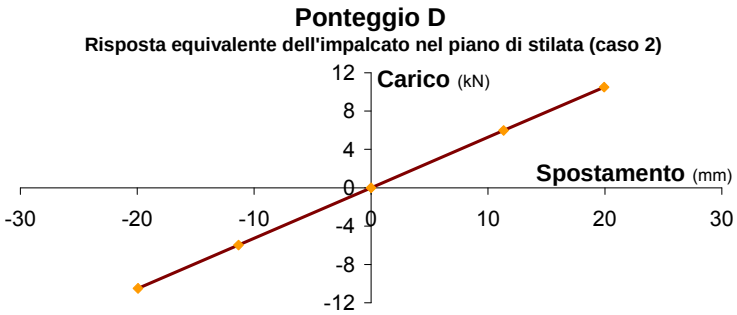


Figura 6.6 - Ponteggio D: Risposta equivalente alle tavole di impalcato nel piano di facciata (caso 2)

Le peculiarità del modello 2D di facciata che "riduce" il ponteggio ad un unico piano, pone alcuni interrogativi riguardo al sistema di imperfezioni da adottare, ovvero sul fatto che queste debbano essere valutate in accordo al piano della stilata o al piano della facciata. Per chiarire questo aspetto le analisi si sono svolte considerando due diversi schemi di imperfezioni, che traggono spunto dal modello 3D completo. Nel dettaglio nel modello 2D di facciata sono state considerate le seguenti distinte condizioni:

- imperfezioni alla base valutate secondo quanto indicato in tabella 3.4 ed imperfezioni tra telai successivi (tabella 3.5), in accordo allo schema proposto dalla normativa UNI EN 12811-1:2004 [5] (fig. 6.1). In questo modo sono riprodotte nel modello 2D di facciata le imperfezioni considerate per le stilate nell'ambito del modello 3D, opportunamente modificate per la diversa disposizione dei vincoli all'opera servita. In quanto segue questa condizione è convenzionalmente indicata come "imperfezioni stilata"
- imperfezioni alla base secondo quanto indicato in tabella 3.4 e fuori piombo globale del telaio di entità pari alla metà dell'imperfezione tra telai successivi (tabella 3.5). In questo modo si sono riportate al modello 2D di facciata le imperfezioni considerate del modello 3D nel piano parallelo all'opera servita. In quanto segue questa condizione è convenzionalmente indicata come "imperfezioni facciata".

La condizione di carico considerata in fase di analisi per il sottomodello 2D di facciata è presentata in figura 6.7.

I risultati delle analisi sono presentati in termine di carico di collasso delle analisi elastiche del secondo ordine nelle tabelle 6.3 e 6.4. In particolare i risultati di tabella 6.3 si riferiscono al caso di imperfezioni disposte secondo lo schema della stilata (imperfezioni stilata) mentre i risultati di tabella 6.4 riguardano il caso di imperfezioni che riproducono lo schema di facciata del modello 3D. Come parametro di verifica dei risultati, nelle tabelle è proposto il confronto tra il carico di collasso totale del ponteggio valutato sul sottomodello 2D di facciata e sul modello 3D completo.

Tabella 6.3 – Confronto tra i risultati delle analisi 3D e 2D del modello di facciata (imperfezioni stilata)

IMPERFEZIONI STILATA					
Ponteggio	Caso di studio	Caratteristiche dei vincoli elastici per analisi 2D di facciata	Modello 2D di facciata $N_{EII,\,2D}$ [kN]	Modello 3D $N_{EII,\,3D}$ [kN]	$\frac{N_{EII,2D}}{N_{EII,3D}}$
Cs	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	315,005	425,395	0,741
	2	$d_0$0; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=k_{Rd}	321,741	436,118	0,738
Cb	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	375,972	434,817	0,865
	2	$d_0$0; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=k_{Rd}	387,679	444,149	0,873
D	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	341,079	435,896	0,782
	2	$d_0$0; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=k_{Rd}	360,275	446,562	0,807

I risultati delle analisi mettono in luce come il sottomodello 2D di facciata:

- sia più sensibile alla schematizzazione delle imperfezioni adottata, nel caso in cui il sistema di piano sia caratterizzato da scorrimenti iniziali;
- non sia in grado di cogliere in modo soddisfacente la risposta del sistema 3D completo, sottostimando in maniera apprezzabile il valore del carico di collasso.

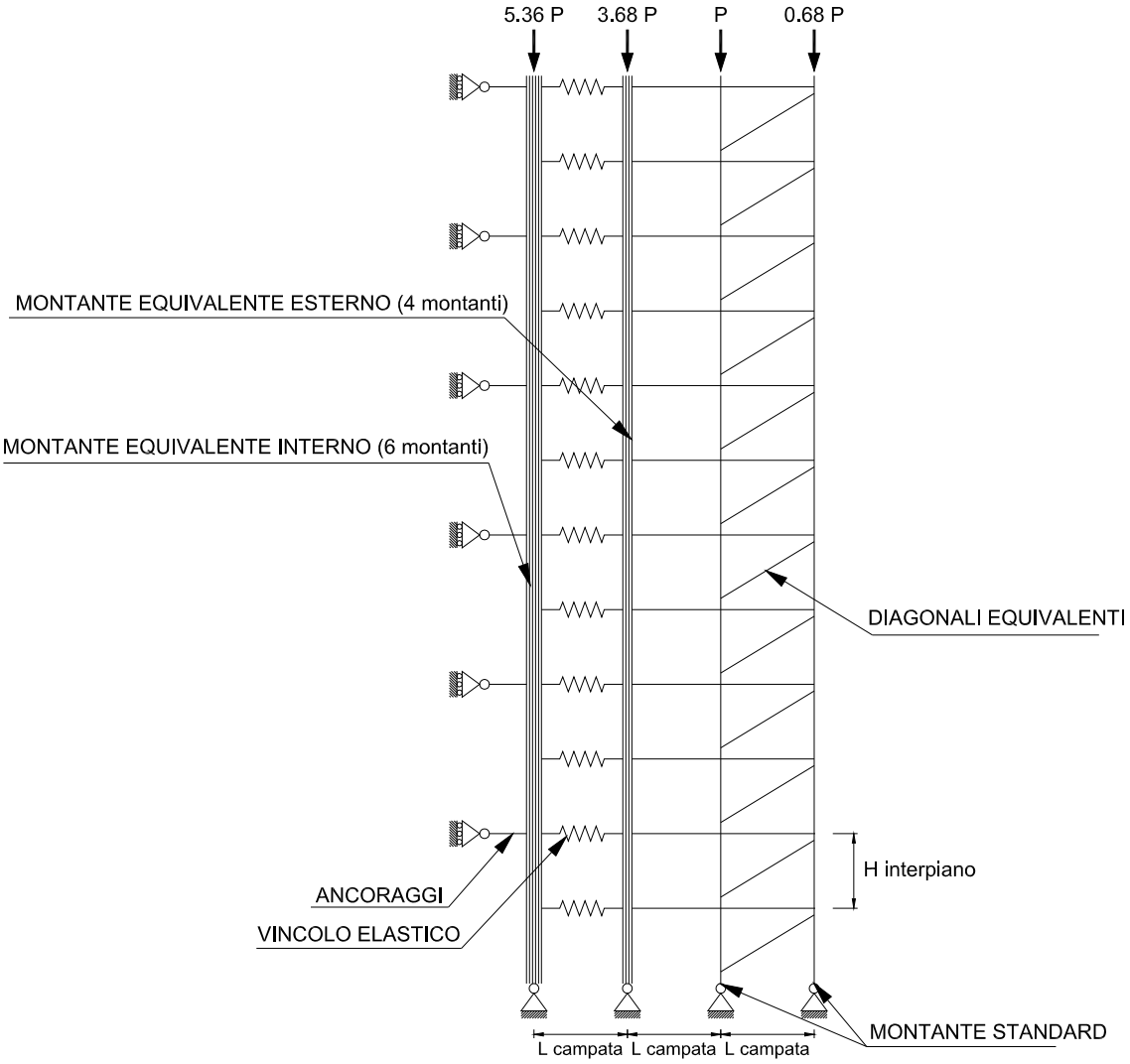


Figura 6.7 – Sottomodello di facciata in accordo a UNI EN 12810-2:2004 [4]

Tabella 6.4 – Confronto tra i risultati delle analisi 3D e 2D del modello di facciata (imperfezioni facciata)

IMPERFEZIONI FACCIATA					
Ponteggio	Caso di studio	Caratteristiche dei vincoli elastici per analisi 2D di facciata	Modello 2D di facciata $N_{EII,\,2D}$ [kN]	Modello 3D $N_{EII,\,3D}$ [kN]	$\frac{N_{EII,2D}}{N_{EII,3D}}$
Cs	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	329,762	425,395	0,775
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	337,958	436,118	0,775
Cb	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	342,998	434,817	0,789
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	386,343	444,149	0,870
D	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	355,329	435,896	0,815
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	359,716	446,562	0,806

La significatività dei risultati è valutabile osservando se il modello è in grado di riprodurre le modalità di collasso e quindi se è in grado di stimare il carico di collasso. I dati delle tabelle 6.3 e 6.4 devono quindi essere analizzati considerando anche i risultati del sottomodello 2D di stilata (Tab. 3.10). Per permettere il confronto tra i risultati delle analisi 3D e 2D si è reso necessario adottare un criterio per determinare il carico

di collasso a partire dai risultati delle analisi 2D di stilata. A tal fine il carico di collasso è stato assunto pari alla somma del carico ultimo delle stilate che compongono il ponteggio e quindi pari alla somma dei carichi di collasso di tre stilate tipo A e di tre stilate tipo B. Il confronto tra i risultati è presentato nelle tabelle 6.5 e 6.6.

Tabella 6.5 – Confronto tra i risultati delle analisi 3D e 2D del modello di facciata e di stilata (imperfezioni stilata)

IMPERFEZIONI STILATA					
Ponteggio	Caso di studio	Caratteristiche dei vincoli elastici per analisi 2D di facciata	Modello 2D di facciata $N_{EII,\ 2D}$ [kN]	Modello 2D di stilata $N_{EII,\ 2D}$ [kN]	Modello 3D $N_{EII,\ 3D}$ [kN]
Cs	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	315,005	393,582	425,395
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	321,741	411,759	436,118
Cb	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	375,972	396,186	434,817
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	387,679	415,911	444,149
D	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	341,079	421,239	435,896
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	360,275	430,347	446,562

Tabella 6.6 – Confronto tra i risultati delle analisi 3D e 2D del modello di facciata e di stilata (imperfezioni facciata

IMPERFEZIONI FACCIATA					
Ponteggio	Caso di studio	Caratteristiche dei vincoli elastici per analisi 2D di facciata	Modello 2D di facciata $N_{EII,\ 2D}$ [kN]	Modello 2D di stilata $N_{EII,\ 2D}$ [kN]	Modello 3D $N_{EII,\ 3D}$ [kN]
Cs	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	329,762	393,582	425,395
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	337,958	411,759	436,118
Cb	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	342,998	396,186	434,817
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	386,343	415,911	444,149
D	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	355,329	421,239	435,896
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	359,716	430,347	446,562

Si osserva come, indipendentemente dalle imperfezioni considerate e dalle condizioni di vincolo offerte dall'impalcato, per tutti ponteggi considerati i carichi di collasso stimati mediante i sottomodelli 2D di stilata risultano superiori rispetto ai risultati dei corrispondenti sottomodelli 2D di facciata. Ciò farebbe presupporre un collasso di facciata, condizione viceversa non verificata sulla base dei risultati del modello 3D completo.

Per analizzare ancora più nel dettaglio i risultati si è passati ad analizzare la risposta delle facciate interna ed esterna (Tab. 6.7 e 6.8). Per il modello 3D completo il carico associato alle due facciate è stato calcolato come somma delle reazioni vincolari dei montanti interni ed esterni, rispettivamente. Per il sottomodello 2D di facciata invece il carico di collasso per la facciata interna è stato assunto pari alla reazione vincolare del montante equivalente interno, mentre il carico di collasso associato alla facciata esterna è ottenuto come somma fra il carico di collasso valutato per il montante equivalente esterno e i montanti costituenti il controvento verticale.

Tabella 6.7 – Confronto reazioni del modello 2D di facciata e del modello 3D (imperfezioni stilata)

IMPERFEZIONI STILATA						
Ponteggio	Caso di studio	Caratteristiche dei vincoli elastici per analisi 2D di facciata	Modello 2D di facciata		Modello 3D	
			Reazioni facciata [kN]		Reazioni facciata [kN]	
			interna	esterna	interna	esterna
Cs	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	157,500	157,505	230,758	194,637
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	160,870	160,871	233,815	202,303
Cb	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	187,970	188,002	245,324	189,493
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	193,750	193,929	248,088	196,061
D	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	170,540	170,539	221,365	214,531
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	180,130	180,145	222,078	224,484

Dai valori di tabella 6.7 e 6.8 si osserva come l'uso del sottomodello 2D di facciata non sia soddisfacente neppure in termini di ripartizione della capacità portante tra facciata interna ed esterna. I risultati ottenuti non sono quindi utilizzabili, né per la valutazione del carico di collasso, né per il calcolo dei singoli elementi costituenti il ponteggio. In considerazione di ciò nell'ambito del presente di lavoro è stato proposto un nuovo sottomodello 2D di facciata che si è mostrato in grado di cogliere in maniera più realistica sia il valore del carico di collasso, sia la distribuzione delle azioni interne. A tale modello è dedicato il prossimo paragrafo.

Tabella 6.8 – Confronto reazioni del modello 2D di facciata e del modello 3D (imperfezioni facciata)

IMPERFEZIONI FACCIATA						
Ponteggio	Caso di studio	Caratteristiche dei vincoli elastici per analisi 2D di facciata	Modello 2D di facciata		Modello 3D	
			Reazioni facciata [kN]		Reazioni facciata [kN]	
			interna	esterna	interna	esterna
Cs	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	164,880	164,882	230,758	194,637
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	168,980	168,978	233,815	202,303
Cb	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	171,500	171,498	245,324	189,493
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	193,310	193,033	248,088	196,061
D	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	177,770	177,559	221,365	214,531
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	179,730	179,986	222,078	224,484

6.2 La proposta alternativa per il modello 2D di facciata

Il sottomodello 2D di facciata proposto nell'ambito di questo lavoro prevede, in modo analogo a quanto proposto dalla norma UNI EN 12810-2:2004 [4], la condensazione completa della facciata interna in un montante equivalente. Il sottomodello si distingue rispetto al precedente (Fig. 6.7) per le modalità di condensazione della facciata esterna. Come si può osservare dalla figura 6.8 la facciata esterna è caratterizzata unicamente da una campata che definisce il sistema di controvento verticale. I montanti verticali che definiscono il sistema di controvento sono ottenuti per condensazione dei montanti della facciata esterna. I diagonali del sistema di controvento sono ottenuti per condensazione dei diagonali posti al medesimo livello. La facciata interna, caratterizzata da un unico montante equivalente, è collegato ad ogni livello alla facciata esterna equivalente mediante vincoli elastici equivalenti. Seguendo quindi le regole di condensazione presentate nel paragrafo 6.1 sono state calcolate le caratteristiche geometriche degli elementi condensati per le tre tipologie di ponteggio analizzate (Tab. 6.9).

Tabella 6.9 – Caratteristiche geometriche equivalenti degli elementi per la nuova proposta del modello 2D di facciata ridotto

Montante equivalente interno (n°6 montanti)	Montante equivalente esterno (n°4 montanti)	Ancoraggio equivalente (n°3 ancoraggi)	Corrente equivalente esterno (n°4 correnti)	Diagonale equivalente di piano (n°5 diagonali)
Ponteggio Cs				
ϕ = 60,41 mm sp = 19,15 mm	ϕ = 53,47 mm sp = 8,85 mm	ϕ = 52,78 mm sp = 9,77	ϕ = 47,34 mm sp = 9,64 mm	ϕ = 46,50 mm sp = 11,80 mm
Ponteggio Cb				
ϕ = 60,41 mm sp = 19,15 mm	ϕ = 53,47 mm sp = 8,85 mm	ϕ = 52,78 mm sp = 9,77 mm	ϕ = 47,34 mm sp = 9,64 mm	ϕ = 46,50 mm sp = 11,80 mm
Ponteggio D				
ϕ = 60,41 mm sp = 19,15 mm	ϕ = 53,47 mm sp = 8,85 mm	ϕ = 52,78 mm sp = 9,77 mm	ϕ = 47,34 mm sp = 9,64 mm	ϕ = 46,50 mm sp = 11,80 mm

ϕ diametro esterno dei tubi equivalenti - sp spessore dei tubi equivalenti

Il montante interno è collegato ogni due livelli alla struttura servita dal ponteggio mediante un sistema di ancoraggi equivalenti. Il vincolo offerto dagli ancoraggi è di continuità lato montante e carrello a traslazione verticale lato opera servita, in conformità a quanto adottato nel modello 3D completo. Le analisi sono state svolte considerando per l'impalcato sia l'ipotesi di risposta lineare sia di risposta non lineare, definite secondo quanto indicato nelle figure 6.3-6.6.

Utilizzando le caratteristiche geometriche del nuovo sottomodello 2D di facciata sono state svolte le analisi numeriche elastiche del secondo ordine. Nelle tabella 6.10-6.11 sono riportati i risultati delle analisi in termini di carico di collasso valutato come reazione vincolare alla base dei montanti equivalenti così come descritti in figura 6.8. Come parametro di verifica dei risultati la risposta in termini di carico di collasso totale del ponteggio valutata con il sottomodello 2D di facciata è confrontata con la risposta del modello 3D completo.

I risultati delle tabelle 6.10 e 6.11 mostrano come il modello 2D di facciata proposto:

- colga in modo soddisfacente la risposta del sistema 3D completo, indipendentemente dalla schematizzazione adottata per le imperfezioni e per la risposta dell'impalcato
- risulti influenzato in modo poco rilevante dalla schematizzazione delle imperfezioni.

Il confronto diretto tra i risultati delle analisi 3D e 2D di facciata e di stilata è presentato nelle tabelle 6.12 e 6.13. Si nota come nel caso dei ponteggi Cs e Cb, il carico di collasso stimato sulla base del modello 2D di stilata sia inferiore rispetto ai risultati delle analisi 2D di facciata. Questo può essere rappresentativo di un meccanismo di collasso di stilata, così come le analisi 3D hanno accertato. Viceversa, per il ponteggio D si

osserva una buona corrispondenza tra i risultati tra delle analisi 2D di facciata e di stilata: questo potrebbe essere indicativo di una modalità di tipo misto così come mostrato dalle analisi 3D.

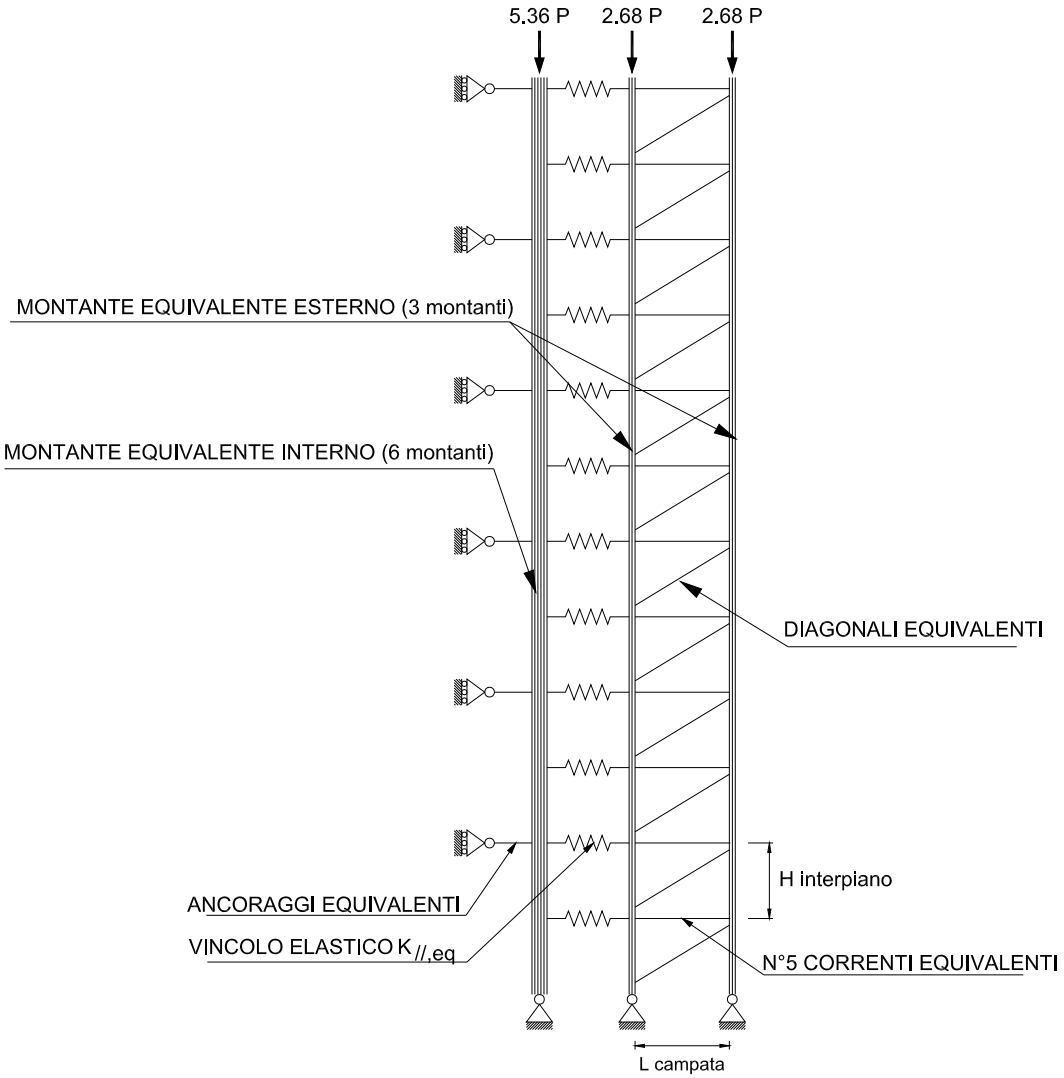


Figura 6.8 – Proposta alternativa per il sottomodello di facciata

Tabella 6.10 – Confronto tra i risultati delle analisi 3D e 2D del modello di facciata proposto (imperfezioni stilata)

IMPERFEZIONI STILATA					
Ponteggio	Caso di studio	Caratteristiche dei vincoli elastici per analisi 2D di facciata	Modello 2D di facciata $N_{EII,\ 2D}$ [kN]	Modello 3D $N_{EII,\ 3D}$ [kN]	$\frac{N_{EII,2D}}{N_{EII,3D}}$
Cs	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	426,836	425,395	1,003
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	436,361	436,118	1,001
Cb	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	476,709	434,817	1,096
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	462,386	444,149	1,041
D	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	405,648	435,896	0,931
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	431,118	446,562	0,965

Come ulteriore verifica dei risultati, nelle tabelle 6.14 e 6.15 è riportato il confronto tra i carichi agenti sulle facciate, distinte in facciata interna ed esterna del ponteggio. Questo confronto consente di analizzare la distribuzione delle azioni interne. E' utile osservare come la tecnica della condensazione, per come è concepita, non permette di valutare il carico di collasso per ogni singolo montante. Questo valore può essere solo stimato ripartendo in modo eguale tra i montanti le reazioni vincolari agenti sui corrispondenti elementi equivalenti. Questa osservazione conferma la difficoltà nel poter utilizzare un sottomodello 2D ottenuto per condensazione per il progetto dei singoli elementi. Per maggior chiarezza dei risultati di tabella 6.14 e 6.15 si

precisa che per il modello 3D completo, il carico di collasso per le due facciate è ottenuto come somma delle reazioni vincolari dei montanti interni ed esterni rispettivamente. Per il sottomodello 2D di facciata invece il carico di collasso per la facciata interna è pari alla reazione vincolare del montante equivalente interno, mentre il carico di collasso per la facciata esterna è ottenuto come somma fra il carico di collasso valutato per i due montanti equivalenti esterni.

Tabella 6.11 – Confronto tra i risultati delle analisi 3D e 2D del modello di facciata proposto (imperfezioni facciata)

IMPERFEZIONI FACCIATA					
Ponteggio	Caso di studio	Caratteristiche dei vincoli elastici per analisi 2D di facciata	Modello 2D di facciata $N_{EII,\,2D}$ [kN]	Modello 3D $N_{EII,\,3D}$ [kN]	$\frac{N_{EII,2D}}{N_{EII,3D}}$
Cs	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	452,281	425,395	1,063
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	454,000	436,118	1,041
Cb	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	449,871	434,817	1,035
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	455,070	444,149	1,025
D	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	419,758	435,896	0,963
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	434,515	446,562	0,973

Tabella 6.12 – Confronto tra i risultati delle analisi 3D e 2D del modello di facciata e di stilata (imperfezioni stilata)

IMPERFEZIONI STILATA					
Ponteggio	Caso di studio	Caratteristiche dei vincoli elastici per analisi 2D di facciata	Modello 2D di facciata $N_{EII,\,2D}$ [kN]	Modello 2D di stilata $N_{EII,\,2D}$ [kN]	Modello 3D $N_{EII,\,3D}$ [kN]
Cs	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	426,836	393,582	425,395
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	436,361	411,759	436,118
Cb	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	476,709	396,186	434,817
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	462,386	415,911	444,149
D	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	405,648	421,239	435,896
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	431,118	430,347	446,562

Tabella 6.13 – Confronto tra i risultati delle analisi 3D e 2D del modello di facciata e di stilata (imperfezioni facciata)

IMPERFEZIONI FACCIATA					
Ponteggio	Caso di studio	Caratteristiche dei vincoli elastici per analisi 2D di facciata	Modello 2D di facciata $N_{EII,\,2D}$ [kN]	Modello 2D di stilata $N_{EII,\,2D}$ [kN]	Modello 3D $N_{EII,\,3D}$ [kN]
Cs	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	452,281	393,582	425,395
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	454,000	411,759	436,118
Cb	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	449,871	396,186	434,817
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	455,070	415,911	444,149
D	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	419,758	421,239	435,896
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	434,515	430,347	446,562

Tabella 6.14 – Confronto reazioni della proposta di modello 2D di facciata e modello 3D (imperfezioni stilata)

IMPERFEZIONI STILATA						
Ponteggio	Caso di studio	Caratteristiche dei vincoli elastici per analisi 2D di facciata	Modello 2D di facciata		Modello 3D	
			Reazioni facciata [kN]		Reazioni facciata [kN])	
			interna	esterna	interna	esterna
Cs	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	213,420	213,416	230,758	194,637
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	218,180	218,181	233,815	202,303
Cb	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	238,560	238,149	245,324	189,493
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	231,210	231,176	248,088	196,061
D	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	202,820	202,828	221,365	214,531
	2	$d_0 0$; k_{Rd}=2,5 sper; $k_{Rk}=k_{Rd}$	215,570	215,548	222,078	224,484

Come si può osservare dai risultati di tabella 6.14 e 6.15 per il ponteggio tipo D, caratterizzato da un collasso di tipo misto, l'andamento delle reazioni vincolari per il modello 3D e il sottomodello 2D di facciata appare congruente.

A titolo puramente esplicativo, in figura 6.9 è presentata una deformata a collasso riferita al ponteggio Cs, determinata considerando la risposta delle tavole di impalcato relativa al caso 1 ($d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper;

k_{Rk}=2,5 sper) e le imperfezioni del piano di facciata.

Tabella 6.15 – Confronto reazioni della proposta di modello 2D di facciata e modello 3D (imperfezioni facciata)

IMPERFEZIONI FACCIATA						
Ponteggio	Caso di studio	Caratteristiche dei vincoli elastici per analisi 2D di facciata	Modello 2D di facciata		Modello 3D	
			Reazioni facciata [kN]		Reazioni facciata [kN]	
			interna	esterna	interna	esterna
Cs	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	226,140	226,141	230,758	194,637
	2	$d_0$0; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=k_{Rd}	227,000	227,000	233,815	202,303
Cb	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	224,910	224,961	245,324	189,493
	2	$d_0$0; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=k_{Rd}	227,520	227,550	248,088	196,061
D	1	$d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper	209,880	209,878	221,365	214,531
	2	$d_0$0; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=k_{Rd}	217,260	217,255	222,078	224,484

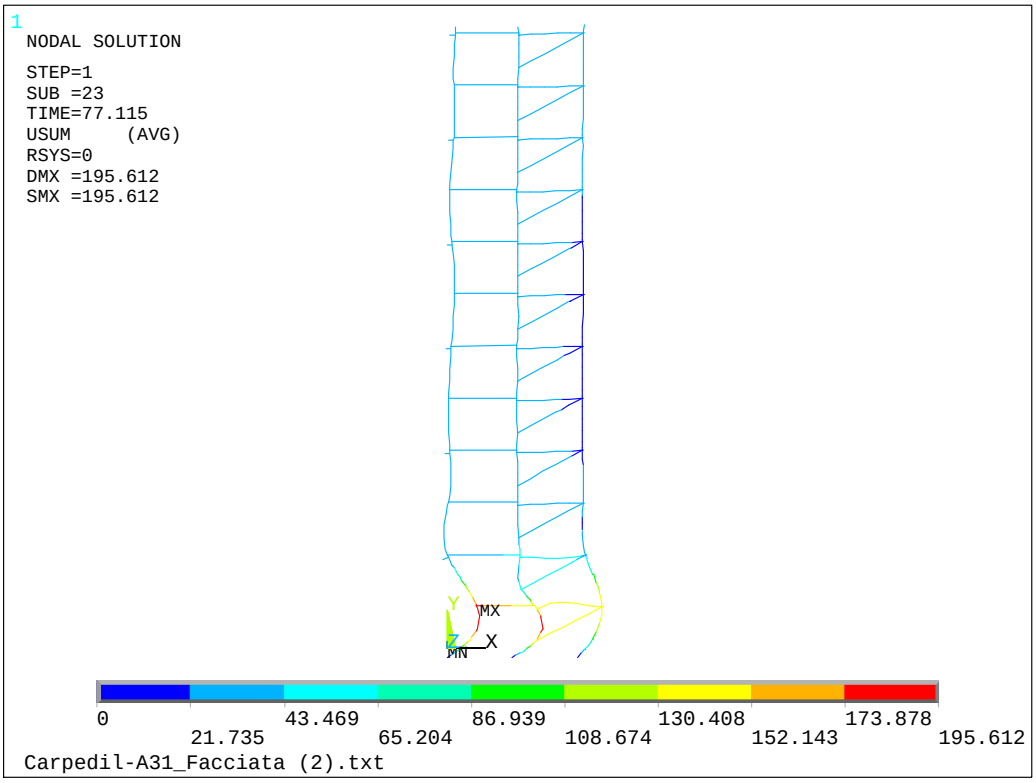


Figura 6.9 – Ponteggio Cs: deformata a collasso per il caso 1 ($d_0 \neq 0$; k_{Rd}=2,5 sper; k_{Rk}=2,5 sper)

6.3 Considerazioni finali

Questo capitolo è dedicato al modello 2D relativo al piano di facciata. L'attenzione riservata a questa tematica nasce da una serie di osservazioni e di perplessità che riguardano la definizione del modello secondo le indicazioni della norma UNI EN 12810-2:2004 [4] e la sua utilizzabilità ai fini progettuali.

Con l'obiettivo di analizzare questi aspetti sono state studiate le tre tipologie di ponteggio considerate nel presente lavoro. Le analisi sono state svolte in un primo momento utilizzando il modello di calcolo proposto dalla normativa. I risultati ottenuti hanno mostrato l'inadeguatezza del modello nel predire il carico di collasso del sistema. I risultati poco soddisfacenti hanno indotto all'approfondimento della tematica. Gli studi effettuati hanno portato alla definizione di un nuovo modello 2D di facciata anch'esso basato sui principi della condensazione dei telai. Questo nuovo strumento di calcolo, si è mostrato in grado di predire con maggiore accuratezza la risposta dei sistemi considerati. I risultati incoraggianti ottenuti suggeriscono una successiva e più approfondita validazione del modello estesa ad una più ampia casistica di tipologie di ponteggio.

7. LA PROCEDURA AUTOMATIZZATA PER LA GESTIONE DEI DATI

La procedura progettuale prevista dalla norma UNI EN 12810-2:2004 [4] per i ponteggi, affida un ruolo centrale alle analisi numeriche che devono essere sviluppate per mezzo di modelli di calcolo 3D/2D in grado di riprodurre in modo accurato la complessa risposta strutturale dei sistemi intelaiati. La rilevante snellezza degli elementi unita ai giochi ed alle imperfezioni che caratterizzano i ponteggi rende lo studio della loro risposta particolarmente complesso. Analizzare in modo completo ed esaustivo il problema per via numerica richiede lo sviluppo di modelli di calcolo articolati caratterizzati da un discreto onere computazionale e gestionale, specie se riferiti alla fase di input dati. Le difficoltà operative e le tempistiche necessarie che ne conseguono possono indurre il progettista alla scelta di modelli semplificati che possono risultare poco significativi se rapportati alla complessità strutturale di questi sistemi.

Nell'ambito di questo lavoro si è voluto creare una procedura guidata di supporto al progettista destinata alla gestione dei dati necessari alla creazione di un modello agli elementi finiti per i ponteggi a telai prefabbricati. Lo studio, che ha considerato sia il sistema 3D nel suo complesso sia il sottomodello 2D di stilata, è stato condotto considerando quale riferimento la norma UNI EN 12810-2:2004 [4]. Le incertezze legate al modello 2D di facciata non hanno fatto ritenere opportuno sviluppare anche per questo un analogo strumento.

Non volendo limitare lo studio ad una semplice descrizione delle variabili da considerare nei modelli di calcolo, sono state create delle specifiche procedure gestionali automatizzate che permettono al progettista di generare il file di input scritto nel linguaggio di macroprocedura tipico del codice utilizzato. Le specificità di ciascun programma di calcolo e la ampia disponibilità di codici in commercio, ha richiesto la scelta dei programmi di calcolo ai quali riferirsi.

7.1 La procedura automatizzata per analisi 3D

La procedura automatizzata di seguito descritta ha il compito di facilitare la gestione dei dati necessari alla 'costruzione' di un modello di calcolo, visto come strumento per l'analisi agli elementi finiti (F.E. analysis) di ponteggi a telai prefabbricati.

Più nello specifico, in questo ambito per gestione dei dati si intende la raccolta ordinata dei parametri necessari alla scrittura del codice di input nel linguaggio di macroprocedura caratteristico del programma ad elementi finiti che si intende utilizzare.

Data la vastità di programmi di calcolo disponibili in ambito strutturale e, considerato che ciascuno di essi gestisce in modo diverso la fase di input e di output dati, è stato necessario scegliere a priori il programma di calcolo al quale riferirsi. Nello specifico si è fatto riferimento a due codici di calcolo agli elementi finiti caratterizzati da diverse peculiarità e ambiti di applicazione:

- ANSYS ver 11.0 [12];
- SAP 2000N ver. 8.2.6 [14].

Il primo programma è del tipo "general purpose" e come tale consente l'analisi di problemi comunque complessi per geometria e stati di sollecitazione e/o deformazione. Il secondo programma di calcolo è caratterizzato da una libreria di elementi finiti specificatamente orientata all'analisi strutturale, con particolare riferimento alle strutture intelaiate. Mentre ANSYS trova utilizzo soprattutto nell'ambito della ricerca, SAP ha ampia diffusione in ambito professionale. La scelta di due programmi di calcolo, è derivata dalla volontà di creare una procedura operativa che possa rispondere alle necessità di utenti con diversa disponibilità di strumenti operativi.

La generazione dei codici di input è affidata ad uno strumento di ampia diffusione quale il foglio elettronico. Questa scelta è stata dettata dalla volontà di creare un sistema fruibile e gestibile da utenti anche non esperti nell'ambito della programmazione informatica. Nel caso specifico si è considerato Microsoft© Excel nelle versioni successive alla versione di Microsoft© Office del 2003.

L'elevata snellezza degli elementi che compongono i ponteggi e la rilevante entità delle imperfezioni che caratterizzano il sistema strutturale, richiede che la loro progettazione sia svolta considerando esplicitamente gli effetti del secondo ordine. In accordo alla procedura progettuale prevista dalla norma UNI EN 12810-2:2004 [4] questo può essere fatto in modo diretto mediante analisi del secondo ordine o in modo semplificato utilizzando il metodo dell'amplificazione dei momenti. Le incertezze circa l'affidabilità di quest'ultimo metodo hanno indotto a privilegiare le analisi del secondo ordine. La procedura operativa è stata quindi sviluppata pensando specificatamente alle analisi del secondo ordine svolte in campo elastico. Quest'ultima scelta è frutto dell'osservazione che, per i sistemi analizzati, la crisi è legata principalmente a fenomeni di instabilità elastica.

Volendo inquadrare la procedura operativa nell'ambito dello schema progettuale previsto dalla normativa UNI EN 12810-2:2004 [4], è possibile osservare come questa si collochi al passo immediatamente precedente allo svolgimento delle analisi del secondo ordine (Fig. 7.1).

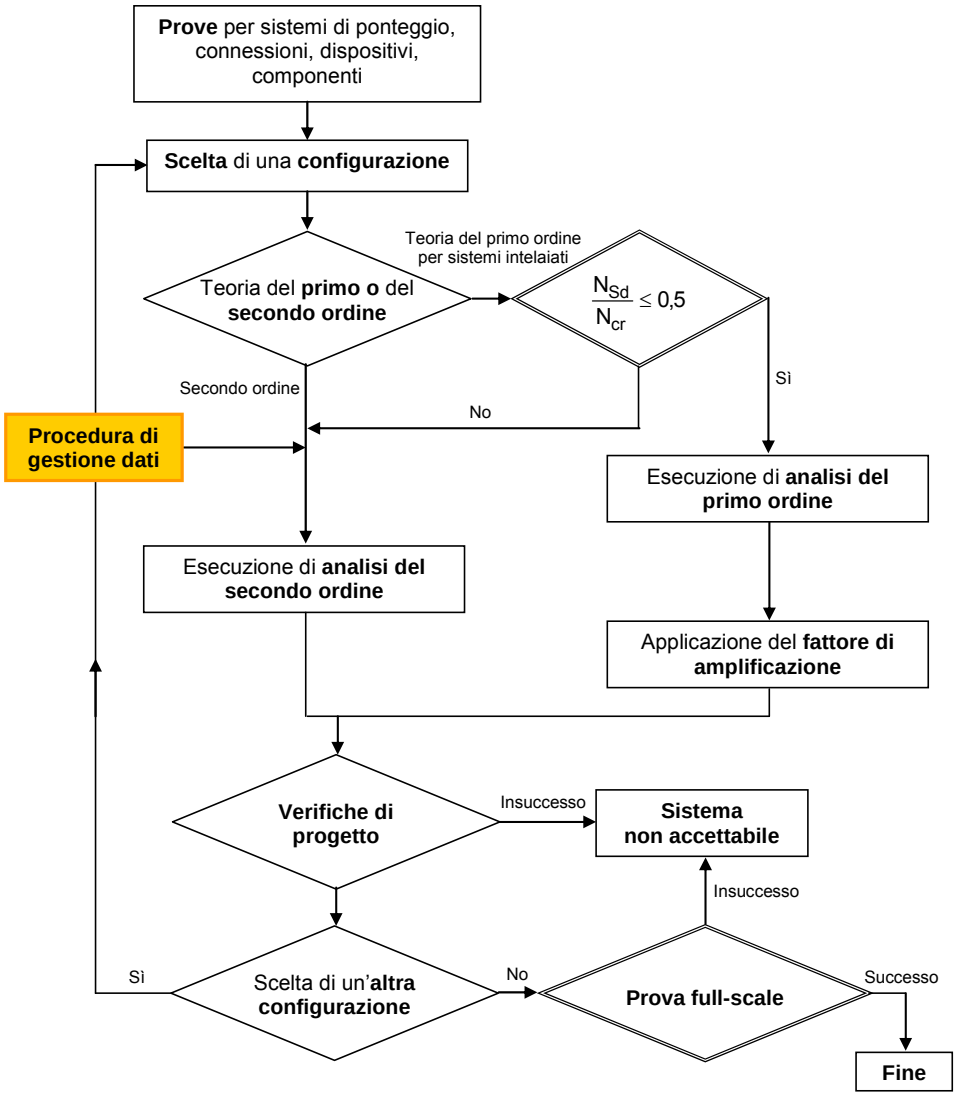


Figura 7.1 – Filosofia progettuale adottata dalla norma UNI EN 12810-2:2004 [4]

La procedura elaborata è gestita in forma modulare, in modo tale da consentire la sua espansione o l'affiancamento con moduli aggiuntivi qualora l'analisi di problemi con particolari specificità lo rendesse necessario. Quanto fornito in questo lavoro è un primo modulo, che consente l'analisi 3D di ponteggi a telaio con geometrie a griglia, privi di mensole e di passi carrai, con sistemi di controventamento di facciata disposti ad ogni livello sulla sola facciata esterna. E' inoltre possibile distinguere tra telai a boccole e telai a spinotti. Con ciò si intende che in sede di analisi potrà essere considerata o meno l'eccentricità tra gli elementi di facciata (diagonali, correnti) e i montanti.

Il numero massimo di campate e di livelli gestibili in forma automatizzata è pari a 18 e 15, rispettivamente. Queste limitazioni sono state guidate dalla opportunità di contenere il numero di nodi entro un massimo di 32000, soglia massima di utilizzo abbastanza diffusa tra i più comuni programmi di calcolo ad elementi finiti.

L'altezza dei telai è supposta costante all'interno di tutto il ponteggio e può essere scelta dall'utente. In questo primo modulo la disposizione dei diagonali è riconducibile a 4 tipologie standard. E' importante puntualizzare che queste due ultime limitazioni possono essere rimosse attraverso la costruzione di moduli aggiuntivi che permettano di ampliare le scelte e quindi le tipologie analizzabili.

La procedura di gestione rappresenta un sistema aperto e prevede 3 livelli di interazione con l'utenza (livelli di operatività):

- 1° livello o livello base che prevede l'interazione attraverso una semplice interfaccia grafica. A questo livello possono essere gestite le casistiche più regolari;
- 2° livello o livello intermedio, che prevede la gestione dati operando direttamente sul foglio di lavoro nel quale confluiscono i dati (foglio "DATI"). In questo modo l'utente può operare delle scelte più ampie per quanto riguarda la geometria e la disposizione dei vincoli;

- 3° livello o livello avanzato, nel quale l'utente può intervenire direttamente sul codice implementato nella macroprocedura modificando il modello agli elementi finiti in modo radicale.

La figura 7.2 illustra in modo chiaro ma sintetico la "struttura" della procedura. Cuore del sistema di gestione dati è la "macroprocedura" il cui compito è di elaborare e di disporre in forma ordinata, secondo le necessità del processore del codice di calcolo considerato, i dati riguardanti il problema analizzato. La macroprocedura è scritta in linguaggio VisualBasic for applications [18]. A tutti i livelli di operatività (livello 1, livello 2 e livello 3) la macroprocedura gestisce i dati memorizzati nel "DATABASE" ponteggi e nel foglio "DATI". Nonostante la diversa denominazione, il ""DATABASE" ponteggi" e il foglio "DATI", per una più agevole gestione sono parte integrante della medesima cartella di lavoro.

Entrando nello specifico:

- il "DATABASE" Ponteggi raccoglie i dati relativi alla geometria del telaio. Ad ogni geometria studiata è associato uno specifico foglio di lavoro che può essere conservato per successive analisi. Il numero massimo di tipologie creabili ed immagazzinabili da parte dell'utente è pari a 10. Questo limite è stato imposto per limitare le dimensioni del file. In condizioni iniziali il database contiene due fogli di lavoro uno relativo ai ponteggi a spinotti (PONTEGGIO SPINOTTI) e l'altro per i ponteggi a boccole (PONTEGGIO BOCCOLE) che non possono essere rimossi. Questi fogli di lavoro sono lo strumento attraverso il quale sono generati i fogli di lavoro relativi alle geometrie per le successive casistiche studiate. Si fa presente che il numero massimo di 10 geometrie immagazzinabili non include i due fogli base (PONTEGGIO SPINOTTI, PONTEGGIO BOCCOLE);
- il foglio "DATI" contiene invece tutte le indicazioni riguardo alla geometria nel piano parallelo alla facciata, (la distanza tra le stilate, le caratteristiche geometriche dei diagonali e dei traversi, la disposizione degli ancoraggi all'opera servita), i dati relativi alle imperfezioni, le caratteristiche del sistema di impalcato, le caratteristiche dei materiali, delle sezioni e dei carichi applicati.

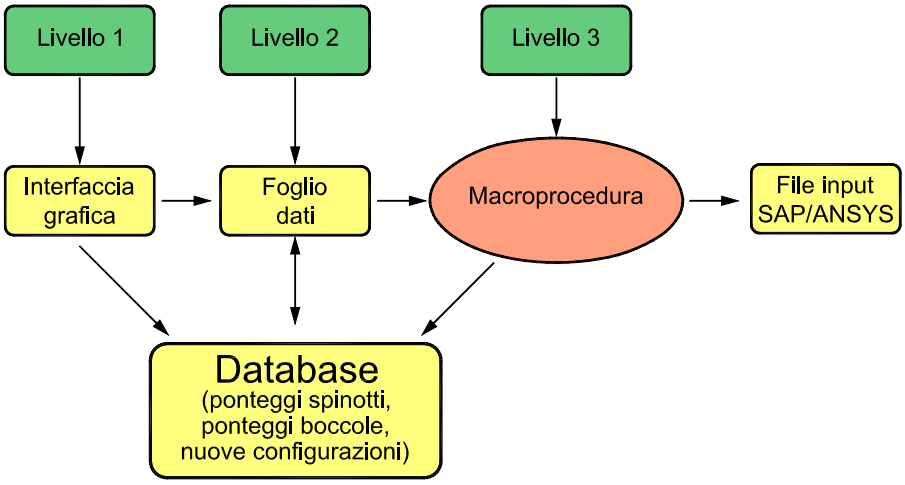


Figura 7.2 – Struttura della procedura di gestione dati

La compilazione del "DATABASE" e del foglio "DATI" può avere luogo attraverso l'interfaccia grafica (Livello 1) o direttamente agendo sul foglio "DATI" (livello 2). Maggiori e più specifiche indicazioni sulla struttura e sui contenuti sia del database sia del foglio di lavoro sono contenute negli allegati 6 e 7.

Per una maggiore chiarezza di quanto sarà esposto in seguito, è opportuno precisare che, benché si parli in generale di "procedura di gestione dati", le diverse modalità operative dei programmi di calcolo considerati (ANSYS e SAP) hanno richiesto la redazione due macroprocedure distinte. Ai livelli di operatività 1 e 2, dove non c'è traccia della generazione della mesh nella sua completezza, del tipo di elementi finiti utilizzati o delle condizioni di vincolo interne ed esterne, non c'è di fatto differenza tra i due programmi di calcolo. I livelli di operatività 1 e 2 si occupano infatti della sola raccolta dati riguardati le caratteristiche meccaniche e geometriche del problema che, come tali, non possono essere che univoci per i due programmi. E' invece al livello 3 che questi dati vengono gestiti e trasformati in files di input al programma in uso e dove quindi entrano in gioco le specificità dei due programmi di calcolo.

In quanto segue è data una descrizione delle ipotesi sulla base delle quali il modello 3D è redatto.

La descrizione delle fasi operative che permettono all'utente di analizzare uno specifico problema sono demandati al manuale d'uso contenuto nell'allegato 6 che tratta i diversi aspetti nell'ottica del livello di operatività 1 e 2. Per il terzo è invece necessario riferirsi al Manuale di VisualBasic for applications [18] allegato al pacchetto Microsoft© Excel e ai manuali di riferimento di SAP [14] e ANSYS [12] per quanto riguarda le caratteristiche degli elementi finiti utilizzati.

Le procedure denominate SAP20003D e ANSYS3D, associate ai programmi SAP e ANSYS rispettivamente, sono memorizzate sul CD denominato “PROCEDURE” allegato alla presente relazione.

7.1.1 Descrizione della procedura automatizzata

Di seguito sono descritte le ipotesi sulla base delle quali è stata redatta la procedura. Per una maggiore chiarezza espositiva, i vari aspetti sono stati elencati in sezioni separate. I temi trattati sono:

- definizione della mesh del telaio e della facciata;
- tipologie di elementi finiti utilizzati e loro caratteristiche;
- definizione delle proprietà delle sezioni e dei materiali;
- condizioni di vincolo tra gli elementi;
- condizioni di vincolo esterne;
- imperfezioni;
- condizioni di carico e tipologie di analisi;
- generazione del file di input;
- output dati.

Gli argomenti sono descritti in modo generale senza distinguere, ove possibile, tra i programmi SAP e ANSYS. Laddove invece le scelte sono legate alle peculiarità dei programmi si è proceduto a dare descrizioni separate degli argomenti.

7.1.1.1 Definizione della mesh del telaio e della facciata

Per uniformità di utilizzo dei due programmi si è scelto di definire la mesh del telaio direttamente tramite la procedura, senza affidare l’operazione di “meshing” al software. Al fine di cogliere in dettaglio gli effetti della non linearità geometrica (P-δ) e di caratterizzare il ponteggio con sufficiente precisione si è scelto di discretizzare il montante del telaio nel piano con 8 nodi (7 elementi). Analisi di sensitività svolte all’inizio di questo lavoro hanno mostrato infatti come questa scelta sia in grado di conciliare accuratezza e onere computazionale.

Per chiarire quanto si dirà in seguito è necessario fare una premessa sulla numerazione dei nodi adottata nella costruzione della mesh. Per garantire modularità al sistema si è scelto di caratterizzare la numerazione dei nodi di campata e di piano con intervalli numerici rispettivamente di 100 e di 2000. I nodi compresi in un “modulo”, inteso come l’insieme composto da un telaio di stilata e dagli elementi di facciata ad esso pertinenti (correnti e diagonale), sono quindi dotati di una numerazione compresa all’interno della stessa centinaia. Un tipico esempio della numerazione adottata è presentata nelle figure 7.3 e 7.4 che si riferiscono ad un modulo situato in corrispondenza della prima campata del primo piano. In particolare poi la figura 7.3 si riferisce alla discretizzazione adottata in SAP mentre la figura 7.4 si riferisce ad ANSYS. Le differenze tra le due mesh sono riscontrabili principalmente nel piano di facciata e sono dovute al diverso modo con il quale sono stati modellati i vincoli tra gli elementi di facciata ed i montanti.

Per entrambi i programmi (SAP ed ANSYS), la mesh del telaio di stilata è costituita da:

- n. 8 elementi finiti per ciascun montante (nodi di numerazione 01-08 nelle due cifre finali, nodi di numerazione 11-18 nelle due cifre finali (nel caso delle figure 7.3 e 7.4 nodi 101-108 e 111-118);
- n. 4 elementi finiti per il traverso del telaio (nodi di numerazione 08, 09, 10,19,18 nelle due cifre finali; nodi 108, 109, 110,119,118 nelle figure 7.3 e 7.4);
- n. 2 elementi finiti per ciascun irrigidimento obliquo nel telaio di stilata (nodi di numerazione 05-25-09; nodi di numerazione 15-31-19 nelle due cifre finali; nelle figure 7.3 e 7.4 nodi 105-125-109 e 115-131-119);
- n. 1 elemento finito per l’eventuale irrigidimento orizzontale nel telaio di stilata (nodi di numerazione 25-31 nelle due cifre finali; nelle figure 7.3 e 7.4 nodi 125-131).

E’ contemplato anche il caso in cui l’irrigidimento è assente.

In facciata invece si utilizzano:

- n. 6 elementi finiti per i correnti (nodi di numerazione 17,39,40,41,42,43,17 nelle due ultime cifre per la facciata esterna del ponteggio e nodi di numerazione 07,44,45,46,47,48,07 nelle due ultime cifre per la facciata interna; nodi 117-139-140-141-142-143-217 e nodi 107-144-145-146-147-148-207 nelle figure 7.3 e 7.4);
- n. 6 elementi finiti per il diagonale (nodi di numerazione 32-38; nodi 132-138 nelle figure 7.3 e 7.4).

Gli elementi finiti all’estremo del diagonale (nodi 12,32 e 38,16 nelle due ultime cifre; nodi 112, 132 e 138, 216 nelle figure7.3 e 7.4) hanno il compito di schematizzare il collegamento tra il diagonale e il montante. Specificatamente, agendo sulla lunghezza di questi elementi è possibile o meno simulare l’eccentricità del diagonale rispetto al montante e quindi distinguere tra la tipologia dei ponteggi a boccole e a spinotti.

Per motivi legati alla modellazione dei vincoli interni correnti-montanti e diagonali-montanti, il modulo preparato per ANSYS presenta i seguenti nodi aggiuntivi:

- nodi di numerazione 82 e 88 sulle ultime due cifre coincidenti e collegati ai nodi numerati con 32 e 38 sulle ultime due cifre posti alle estremità del diagonale (nodi 182 e 188, nodi 132 e 138 nella figura 7.4). Agendo su questi nodi è stato possibile simulare il collegamento tra diagonale e montante;
- nodi di numerazione 52 e 53 sulle ultime due cifre (nodi 152 e 153 nella figura 7.4), collegati e coincidenti con i nodi di numerazione 07 sulle ultime due cifre (nodi 107 e 207 nella figura 7.4) per la facciata interna. Per la facciata esterna del ponteggio, nodi di numerazione 63 e 62 sulle ultime due cifre (nodi 163 e 162 nella figura 7.4), collegati e coincidenti con i nodi di numerazione17 sulle ultime due cifre (nodi 117 e 217 nella figura 7.4).Le coordinate dei suddetti nodi sono fra loro coincidenti

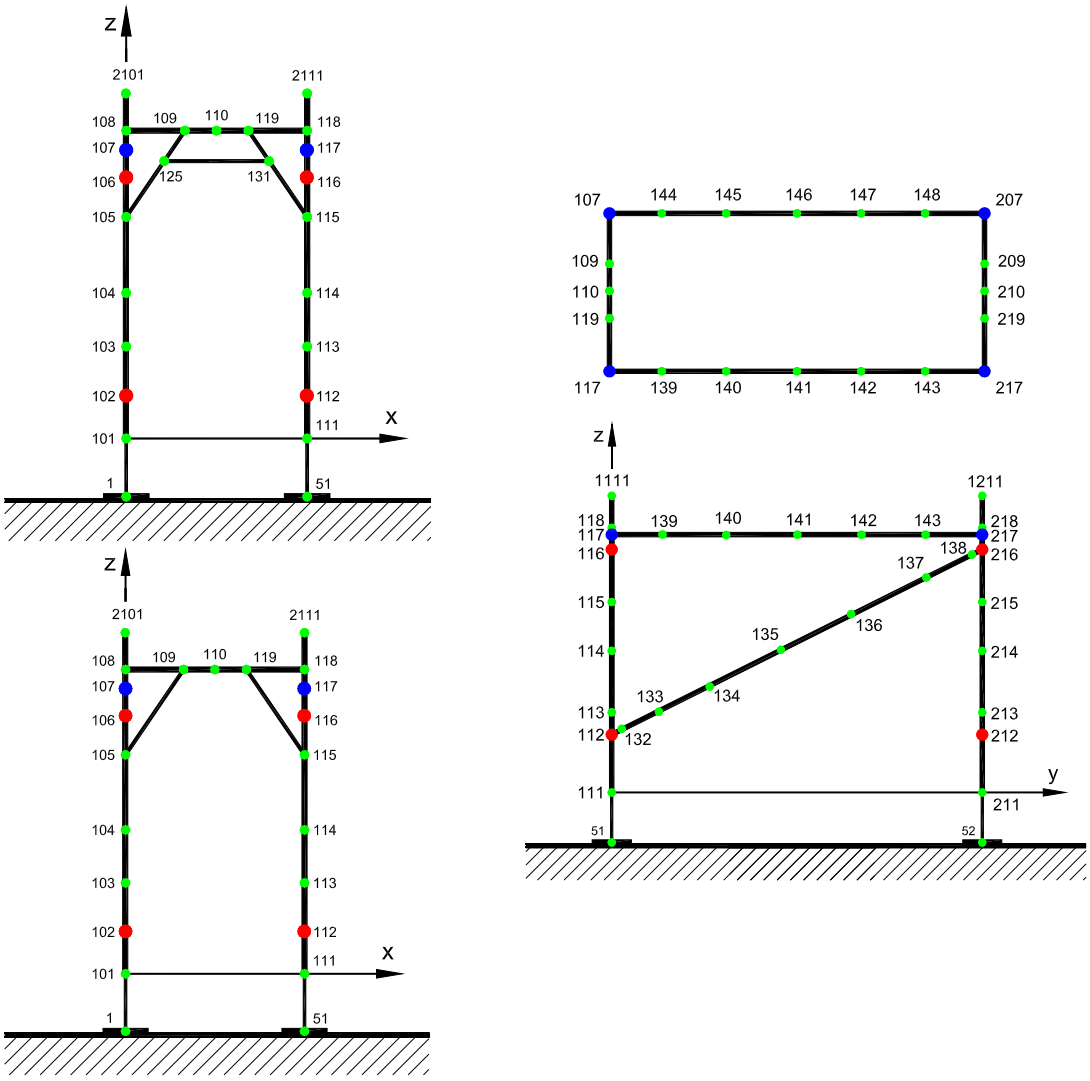


Figura 7.3 – Discretizzazione adottata in SAP

Di questi nodi accessori non vi è traccia né al livello di operatività 1 né al livello 2. Si tratta di nodi generati automaticamente dalla macroprocedura ANSYS.
La numerazione progressiva dei nodi è vincolata ai punti di aggancio degli elementi che collegano le stilate successive. Con ciò si intende che al punto di aggancio del diagonale deve sempre corrispondere o il nodo avente numerazione 12 sulle ultime due cifre, o il nodo avente numerazione 16 sulle ultime due cifre, a seconda che il diagonale sia agganciato in basso o in alto sul montante. Parimenti, al punto di aggancio dei correnti interno ed esterno devono sempre corrispondere i nodi aventi numerazione 07 sulle ultime due cifre per quanto riguarda l'aggancio dei correnti interni sul montante, e numerazione 17 sulle ultime due cifre per quanto riguarda l'aggancio dei correnti esterni. Le figure 7.3 e 7.4 si riferiscono come già detto al caso del modulo situato in corrispondenza della prima campata del primo piano, avente il diagonale diretto dal basso verso l'alto guardando il ponteggio da sinistra verso destra.
Il vincolo tra la base dei montanti del primo livello ed il terreno è realizzato mediante elementi finiti aggiuntivi di lunghezza definita dall'utente. I nodi di base sono numerati progressivamente da 1 a 19 (19 numero massimo delle stilate) per quanto riguarda i montanti disposti sulla facciata verso l'opera servita, mentre la numerazione varia da 51 a 69 sulla facciata esterna. Sulla facciata interna gli elementi finiti collegano i nodi

con numerazione 01 sulle ultime due cifre lato montante, con i nodi a terra con numerazione compresa tra 1 e 19. In analogia, sulla facciata esterna invece, gli elementi finiti collegano i nodi con numerazione 11 sulle ultime due cifre lato montante con i nodi a terra con numerazione compresa tra 51 e 69 (nelle figure 7.3 e 7.4 nodo 1 collegato al nodo 101 e nodo 51 collegato al nodo 111).

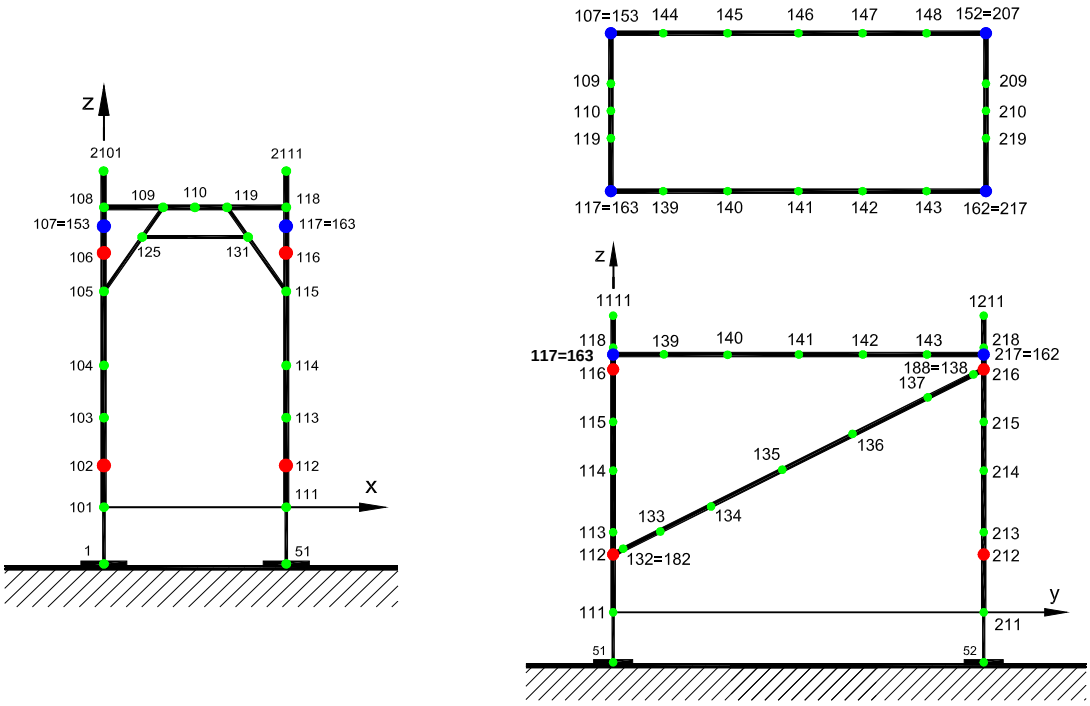


Figura 7.4 – Discretizzazione adottata in ANSYS

La disposizione dei nodi ovvero la loro posizione rispetto all'estremo inferiore del telaio, può essere definita per mezzo dell'interfaccia grafica o alternativamente attraverso il foglio "DATI". Nel primo caso devono essere fornite semplicemente le coordinate dei nodi che discretizzano il telaio nel rispetto dei 'vincoli' necessari per la disposizione del diagonale e dei traversi. Sarà poi cura della macroprocedura generare coordinate ed elementi associati a tutto il sistema 3D. Al livello 2, in modo del tutto analogo è necessario compilare la parte del foglio elettronico che si riferisce alle coordinate dei nodi del generico telaio. Anche in questo caso sarà la macroprocedura che provvederà alla generazione della mesh completa.
Per maggiori dettagli si rimanda alle guide utenti contenute nell'allegato 6 e nell'allegato 7 per il modello 3D e 2D, rispettivamente.

7.1.1.2 Tipologie di elementi finiti utilizzati e loro caratteristiche

Gli elementi del ponteggio, per le loro peculiarità, sono stati schematizzati mediante elementi finiti a sviluppo lineare. In particolare, tutti gli elementi del telaio (i montanti, i traversi, gli irrigidimenti), gli elementi di facciata (diagonali e traversi), le basette di collegamento della struttura con il terreno e i vincoli all'opera servita, sono stati modellati con elementi monodimensionali a due nodi. Il contributo del tavolato è stato riprodotto, in accordo alle prescrizioni normative, con vincoli elastici rappresentati da leggi carico-spostamento in generale multi-lineari. Le scelte sulla tipologia di elementi finiti utilizzati per caratterizzare l'impalcato sono fra loro differenti nel caso di SAP e di ANSYS: nel primo caso (SAP) il comportamento è stato schematizzato con elementi finiti monodimensionali ad un grado di libertà di tipo LINK non lineare, nel secondo (ANSYS) si sono utilizzati elementi di tipo COMBINATION (COMBIN39).
Gli elementi finiti monodimensionali utilizzati nel caso del programma SAP sono di tipo FRAME3D, a 2 nodi, con sei gradi di libertà per ogni nodo (Fig. 7.5). Per questi elementi i valori delle sollecitazioni sono calcolati in termini di risultanti degli sforzi (momenti, azioni assiali, tagli nelle due direzioni che la sezione definisce). Le proprietà della matrice di rigidezza dell'elemento finito permettono di caratterizzare il suo comportamento in termini di non linearità geometrica attraverso i grandi spostamenti e le grandi rotazioni in regime di piccole deformazioni.
Gli elementi di tipo LINK (Fig. 7.6), utilizzati per schematizzare l'effetto delle tavole, sono in grado di rispondere ad una legge di tipo multilineare elastica, che viene implementata in termini di legge forza assiale–elongazione.
Gli elementi finiti monodimensionali utilizzati nel caso del programma ANSYS sono di tipo BEAM, (BEAM188, Fig. 7.7) nella formulazione di tipo "finite strain", qui considerata in termini di sola non linearità

geometrica. L'elemento ha 7 gradi di libertà per ogni nodo, di cui sei sono sfruttati in questo caso, mentre il settimo non sfruttato a seguito della simmetria circolare della sezione. Si configura come elemento beam a 3 nodi, autogenerando un nodo interno ai nodi di estremità definiti dalla mesh. L'autogenerazione del terzo nodo si rende necessaria per una più affidabile descrizione delle caratteristiche di sollecitazione. I valori delle sollecitazioni sono restituiti anzitutto in termini di risultanti sulla sezione nel sistema di riferimento globale. E' possibile inoltre determinare le relazioni tensione – deformazione sulle fibre della sezione considerata, utilizzando il legame costitutivo del materiale implementato in fase di analisi.

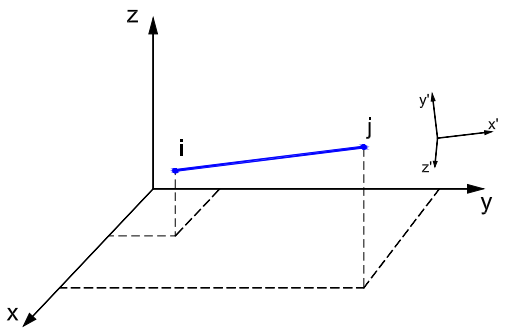


Figura 7.5 – Caratteristiche dell'elemento finito FRAME3D

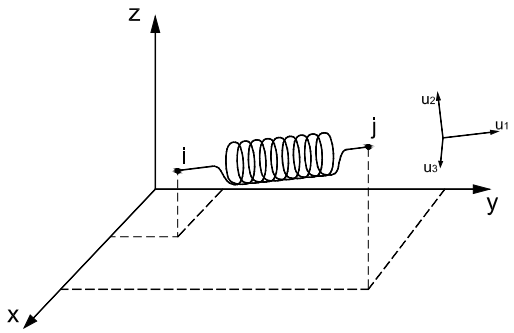


Figura 7.6 – Caratteristiche dell'elemento finito LINK

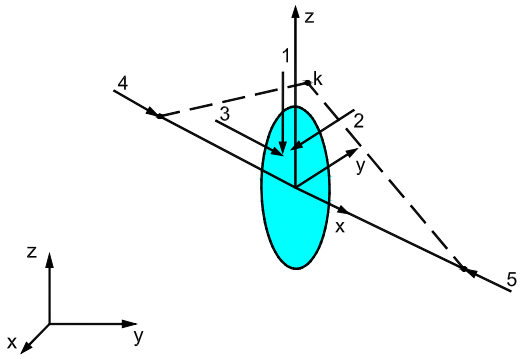


Figura 7.7 – Caratteristiche dell'elemento finito BEAM188

Gli elementi di tipo COMBINATION (Fig. 7.8) utilizzati per riprodurre la risposta dell'impalcato, rispondono ad una legge carico-spostamento non lineare generalizzata, di carattere longitudinale o torsionale, fino ad un numero massimo di tre gradi di libertà per ogni nodo. In questo caso la specificità dei vincoli ha determinato la caratterizzazione degli elementi COMBINATION mediante leggi monodimensionale di tipo assiale definite nel sistema di riferimento locale dell'elemento. Tale legge non corrisponde ad un legame costitutivo, quindi non ha le proprietà ad esso correlate, ma risulta essere unicamente una proprietà della matrice di rigidezza dell'elemento.
Gli elementi finiti descritti sono automaticamente implementati nella macroprocedura. Ai livelli operativi 1 e 2 non è richiesto alcun intervento da parte dell'operatore riguardo alla scelta di elementi finiti. Qualora l'utente

volesse, per particolari peculiarità delle analisi, modificare la tipologia di uno o più elementi dovrà agire direttamente al terzo livello di operatività, intervenendo approfonditamente sul codice in VBA della macroprocedura per rendere effettive eventuali modifiche.

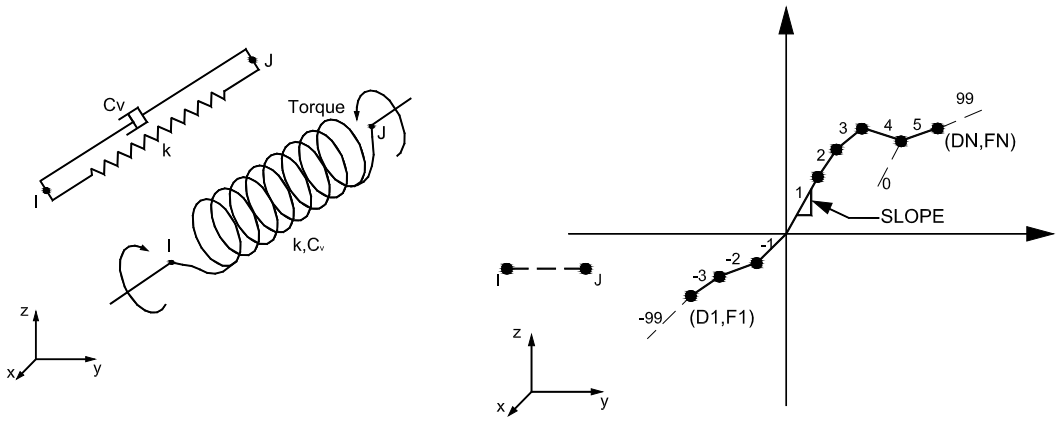


Figura 7.8 – Caratteristiche dell'elemento finito COMBIN39

7.1.1.3 Definizione delle proprietà delle sezioni e dei materiali

Le modalità di definizione delle sezioni sono diverse in SAP ed in ANSYS.

In SAP per attribuire le proprietà geometriche della sezione è necessario fornire le caratteristiche geometriche significative. In particolare, per le sezioni di tipo anulare è necessario attribuire i diametri interni ed esterni mentre le sezioni circolari sono caratterizzate dal solo diametro. Le proprietà elastiche del materiale vengono definite attraverso il modulo di elasticità (E) ed il coefficiente di Poisson (ν).

Nel caso di ANSYS si procede in modo del tutto analogo, attribuendo i valori dei semidiametri interno ed esterno per quanto riguarda le sezioni anulari, e il solo raggio per le sezioni circolari. Così come per SAP, anche per ANSYS le proprietà elastiche del materiale sono definite tramite i valori del modulo di elasticità (E) e del coefficiente di Poisson (ν). Agendo sulla macroprocedura è stato possibile riportare le caratteristiche delle sezioni richieste da ANSYS a quelle invece richieste da SAP, uniformando la procedura di inserimento dati.

E' importante precisare che questa procedura riferendosi alle analisi elastiche del secondo ordine utilizza per i materiali leggi costitutive indefinitamente elastiche. Non è contemplata la possibilità di tener in conto della non linearità del materiale. La non linearità del materiale può essere implementata affiancando ai parametri elastici già implementati nella procedura, i parametri che ne caratterizzano la risposta inelastica. Questa operazione è di fatto sufficiente per quanto riguarda ANSYS. Per quanto riguarda SAP è invece necessario agire a livello di sezione implementando le leggi di comportamento di tipo non lineare espresse in termini di relazioni tra componente di spostamento/rotazione e caratteristica di sollecitazione ad essa correlata attraverso le relazioni di rigidezza.

Nell'ambito della procedura l'attribuzione delle proprietà elastiche del materiale può avvenire attraverso sia l'interfaccia grafica, sia agendo direttamente sul foglio di lavoro. Eventuali aggiunte relative a leggi costitutive non lineari richiedono di agire al terzo livello di operatività.

7.1.1.4 Condizioni di vincolo tra gli elementi

La continuità fra gli elementi finiti è garantita dalla presenza dei nodi in comune tra elementi adiacenti. Il modello sviluppato presenta, tuttavia, condizione di continuità nel piano di stilata ma non nel piano di facciata. Sul piano di facciata i vincoli tra gli elementi, ed in particolare i collegamenti montante-diagonale e montante–traverso, sono schematizzati mediante cerniere. La schematizzazione della cerniera tra gli elementi è risolta in modo diverso in SAP ed in ANSYS. L'opzione è da entrambi i programmi denominata con il termine comune "end release": nonostante la comune denominazione l'opzione presenta peculiarità diverse in SAP ed in ANSYS.

In SAP l'opzione "end release" introduce l'azzeramento di una o più componenti delle sollecitazioni generalizzate (M,N,V). Nel caso specifico per simulare la cerniera tra montante e corrente di facciata (esterno od interno) è attivata l'opzione "end-release" sulla sollecitazione momento flettente che nasce a seguito della rotazione dell'estremo del corrente attorno ad un asse parallelo all'asse longitudinale del montante. Nel caso invece del collegamento tra diagonale e montante per rappresentare la cerniera ad asse orizzontale, è attivata l'opzione "end release" sulla sollecitazione momento flettente associata alla rotazione del diagonale attorno ad un asse parallelo (nel sistema di riferimento di SAP l'asse denominato asse u_3) all'asse ortogonale alla direttrice longitudinale del montante, nel piano ortogonale all'opera servita.

Nel caso di ANSYS l'opzione "end release" introduce uno "svincolo" interno ovvero attiva una o più componenti di spostamento generalizzate. Nel caso di collegamento tra montante e corrente (esterni ed interni) si è attivata l'opzione "end release" sul grado di libertà rotazionale dell'estremo del corrente intorno all'asse parallelo all'asse longitudinale del montante. Nel caso invece del collegamento tra montante e diagonale l'opzione "end release" è stata attivata sul grado di libertà che caratterizza la rotazione del lembo di estremità del diagonale intorno all'asse parallelo all'asse ortogonale alla direttrice longitudinale del montante, nel piano ortogonale all'opera servita.
Le condizioni di vincolo di cui sopra sono attivate automaticamente a tutti e due i livelli di operatività. La modifica delle condizioni di vincolo fra gli elementi richiede il terzo livello di operatività, con significative modifiche al codice in VBA implementato.

7.1.1.5 Condizioni di vincolo esterne

Le condizioni di vincolo esterne sono qui intese come l'insieme di condizioni al contorno utilizzate per caratterizzare il collegamento del ponteggio a terra, il collegamento del ponteggio all'opera servita e l'insieme dei vincoli fittizi che riproducono il comportamento delle tavole dell'impalcato.
Il collegamento del ponteggio a terra è riprodotto in modo semplificato attraverso una cerniera. Sia in ANSYS sia in SAP la cerniera è stata schematizzata, così come la definizione di cerniere perfetta impone, bloccando le componenti di spostamento e lasciando libere invece le rotazioni attorno ai tre assi del sistema di riferimento.
Il sistema di ancoraggio del ponteggio all'opera servita è schematizzato con i medesimi elementi finiti utilizzati per modellare i montanti di lunghezza scelta dall'utente, caratterizzati da un vincolo di continuità rispetto al montante e collegati alla facciata dell'opera servita mediante vincoli liberi di ruotare e di traslare verticalmente. Questa schematizzazione è comune sia nella procedura implementata per il software SAP, sia nella procedura implementata per il software ANSYS.
La modifica delle condizioni di vincolo a terra e all'opera servita richiede il terzo livello di operatività, con modifiche significative del codice in VBA.
Il comportamento del tavolato di piano viene schematizzato in conformità a quanto previsto dalla norma UNI EN 12810-2:2004 [4], utilizzando elementi caratterizzati da una legge carico-spostamento, in generale non lineare, disposti in modo da riprodurre la risposta dell'impalcato nel piano parallelo e nel piano ortogonale all'opera servita. Le leggi di comportamento del tavolato sono definibili dall'utente sia attraverso il livello 1 di operatività, sia attraverso il livello 2. I vincoli che riproducono la risposta del sistema di impalcato nel piano perpendicolare all'opera servita collegano tra loro i montanti e l'opera servita mentre nel piano parallelo all'opera servita il collegamento si realizza tra i montanti esterni e una superficie verticale fittizia.
Nel caso di SAP è previsto l'utilizzo di elementi di tipo LINK (§7.1.1.2). In una prima fase si era previsto il collegamento rigido tra elementi LINK e superficie verticali. Questa scelta si è mostrata poco affidabile infatti gli spostamenti verticali che i montanti subiscono a causa dei carichi applicati, determina la nascita di reazioni verticali agli estremi degli elementi LINK di entità tali da influenzare in modo rilevante la risposta del ponteggio. Al fine di ridurre questo effetto parassita si è adottato un semplice accorgimento che consiste nell'aumentare fittiziamente la lunghezza dei vincoli elastici, in modo che essa risultati di un ordine di grandezza superiore rispetto alle misure dei parametri geometrici che caratterizzano la definizione del ponteggio. Questa soluzione si è dimostrata affidabile e in grado di determinare risultati in perfetta linea con quanto ottenuto con ANSYS (§7.3).
In ambito ANSYS invece la natura degli elementi COMBINATION rispetto agli elementi LINK di SAP, non determina anomalie di comportamento. Pertanto tali elementi sono disposti come collegamento diretto tra montanti/superficie fittizia, e montanti/opera servita.
La posizione degli elementi di ancoraggio alla parete e degli vincoli elastici che schematizzano l'effetto dell'impalcato può essere modificata ai livelli 1 e 2 di operatività. In particolare al livello 1 vi è la possibilità di scegliere, utilizzando l'interfaccia grafica, la posizione dei vincoli di strutture caratterizzate da un massimo di 8 campate e 6 livelli. Poichè le dimensioni delle finestre di dialogo intendono essere volutamente compatibili con risoluzioni dei monitor pari al minimo di 800x600, si è ritenuto opportuno limitare l'attribuzione dei vincoli elastici tramite l'interfaccia grafica al caso che contempla al massimo 6 livelli, demandando al livello 2 la caratterizzazione di schemi di vincolo più estesi. Si precisa inoltre che la procedura è gestita in modo che non vi sia la possibilità di lasciare un numero di livelli maggiore di sei privi di ancoraggi all'opera servita. Al riguardo si osserva che la limitazione imposta dalla procedura è meno restrittiva rispetto alle prescrizioni normative che impongono la presenza di ancoraggi almeno ogni 4 livelli.

7.1.1.6 Imperfezioni

Le imperfezioni del sistema 3D sono imposte nelle due direzioni principali del ponteggio: la direzione della facciata e della stilata. Entrando nel dettaglio, si sono considerate:

- nella direzione della facciata:
  - imperfezione alla base a rappresentare i giochi tra basetta e telai sovrapposti (Fig. 3.5);

- fuori piombo globale del sistema;
- imperfezione degli elementi (local bow imperfection);

▪ nel piano invece della stilata:
- imperfezione alla base a rappresentare i giochi tra basetta e telai sovrapposti (Fig. 3.5);
- imperfezione tra i telai sovrapposti (Fig. 3.5);
- imperfezione degli elementi (local bow).

I valori delle imperfezioni vengono imposti dall'utente.
La distribuzione delle imperfezioni nel piano di stilata dipendenti dai giochi tra telai sovrapposti è correlata alla disposizione dei vincoli all'opera servita, e deve essere scelta in modo tale da massimizzare gli effetti del secondo ordine. Come spiegato al paragrafo precedente al livello di operatività 1 l'utente ha la possibilità di scegliere la disposizione dei vincoli all'opera servita fino configurazioni caratterizzate da un numero di campate e livelli pari rispettivamente a 8 e 6. In relazione alla disposizione degli ancoraggi scelta dall'utente, la procedura provvederà a distribuire le imperfezioni nel piano della stilata in accordo alle figure di seguito presentate (Fig. 7.9). Per ulteriori dettagli riguardo alle imperfezioni nel piano di stilata è possibile fare riferimento al paragrafo 3.2.1 di questa relazione.

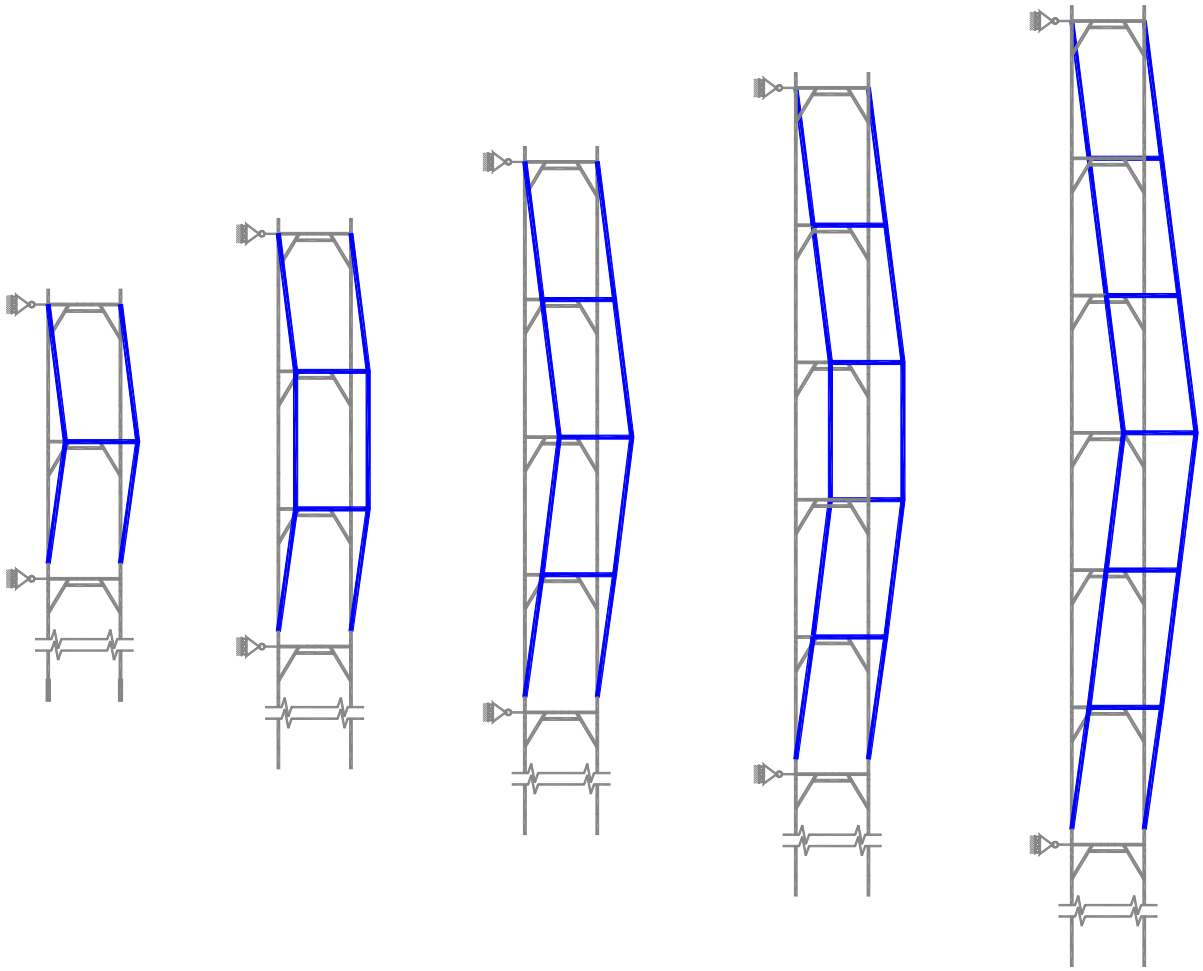


Figura 7.9 – Distribuzione delle imperfezioni nel piano di stilata in relazione al sistema di ancoraggi all'opera servita

Qualora l'utente volesse inserire distribuzioni delle imperfezioni diverse rispetto a quanto riportato nella figura 7.9 dovrà operare al livello di operatività 2 o in casi estremi al livello di operatività 3.

7.1.1.7 Condizioni di carico e tipologie di analisi
La procedura è stata elaborata in modo tale da consentire analisi del secondo ordine a collasso o alternativamente del secondo ordine in presenza dei carichi di progetto. La scelta del tipo di analisi è lasciata all'utente.
Nel caso in cui si intendano svolgere analisi del secondo ordine a collasso automaticamente vengono applicati carichi verticali in corrispondenza dell'estremità superiore di ogni montante. Al fine di riprodurre le condizioni di carico sulle stilate estreme ai montanti di queste è applicato un carico pari al 68% rispetto a

quello dei montanti interni del ponteggio (Fig. 3.19). L'operatore agendo direttamente al livello 2 e quindi sul foglio "DATI" può modificare questa scelta. Eventualmente agendo sempre a questo livello può anche introdurre eventuali azioni orizzontali in entrambe le direzioni di piano.
Nel caso si vogliano sviluppare le analisi in presenza dei carichi di progetto, la procedura consente di gestire i carichi secondo le combinazioni previste dalla norma UNI EN 12811-1:2004 [5] (condizioni di servizio e di fuori servizio). I carichi sono suddivisi in tre gruppi fondamentali: peso proprio, carichi verticali e carichi orizzontali dovuti all'azione del vento. Questi vengono gestiti nell'ambito della procedura secondo i seguenti criteri:

- al livello di operatività 1:
  - pesi propri: conteggiati automaticamente dal programma di calcolo in base alla peso specifico attribuito al materiale;
  - carichi verticali: determinati autonomamente dalla procedura in accordo alle prescrizioni della normativa UNI EN 12811-1:2004 [5] sulla base del carico sull'impalcato, funzione della classe del ponteggio. I valori dei carichi verticali sono comunque attribuiti dall'utente;
  - carichi orizzontali dovuti al vento: forniti dall'utente sotto forma di carichi equivalenti applicati ai montanti ai diversi livelli. Dovrà essere cura dell'utente provvedere ad una valutazione autonoma e separata dei carichi equivalenti alle azioni del vento.
- al livello di operatività 2:
  - pesi propri: conteggiati automaticamente dal programma di calcolo in base alla peso specifico attribuito al materiale;
  - carichi verticali: attribuibili da parte dell'utente come carichi equivalenti applicati in corrispondenza ai montanti;
  - carichi orizzontali dovuti al vento: forniti dall'utente sotto forma di carichi equivalenti applicati ai montanti ai diversi livelli. Dovrà essere cura dell'utente provvedere ad una valutazione autonoma e separata dei carichi equivalenti alle azioni del vento.

7.1.1.8 Generazione del file di input

La fase di input dei dati termina con la definizione delle condizioni di carico sul ponteggio e la scelta del tipo di analisi da effettuare. Il passo successivo prevede di attivare la macroprocedura che, a sua volta, genera un file di input da esportare in formato Testo (tipo Unicode (denominato rispettivamente "TESTO SAP2000" e "TESTO ANSYS" nelle due procedure, rispettivamente). Questo file costituisce la fase di preprocessing dei dati scambiati con i codici di calcolo.
L'impostazione della metodologia di soluzione è lasciata all'utente. L'esecuzione di analisi del secondo ordine richiede l'utilizzo di una procedura di tipo incrementale-iterativa che, per sua natura, necessita di indicazioni relative agli incrementi di carico (in SAP denominati steps ed in ANSYS denominati sub-steps), al numero di iterazioni all'interno di ciascun incremento di carico (in SAP maximum iteration per step, in ANSYS max number of iteration) e dei criteri di convergenza. La scelta al riguardo non può essere univoca ma è strettamente legata alla problematica analizzata.
In sede di analisi si raccomanda comunque all'utente di attivare le opzioni di analisi relative alla non linearità geometrica che permettano di creare la matrice di rigidezza tangente geometrica.

7.1.1.9 Output dati

E' opportuno che la gestione dei dati di output abbia luogo attraverso operazioni dirette sull'interfaccia del programma di calcolo: entrambi (SAP ed ANSYS) permettono la visualizzazione delle deformate, delle curve carico-spostamento e dei diagrammi delle azioni interne desiderati agendo interattivamente con l'utente. In questo modo è possibile individuare gli elementi critici, intesi come quelli maggiormente sollecitati, che dovranno essere oggetto delle successive verifiche strutturali.
A tal riguardo va precisato che entrambi i programmi di calcolo permettono di esportare i risultati delle analisi in formato testo e/o in forma di foglio elettronico. La disponibilità dei risultati in forma tabellare rende sicuramente più agevole la successiva fase di progetto/verifica del ponteggio da attivare secondo i criteri previsti dalla norme UNI EN 1993-1-1:2005 [8] e UNI EN 12811-3:2005 [7]. Per facilitare questa fase è stato sviluppato un foglio di calcolo in Microsoft© Excel [16] denominato VERIFICA SEZIONI. xls che permette di svolgere la verifica delle sezioni tubolari nel rispetto delle prescrizioni dell'Eurocodice 3 [8] e della UNI EN 12811-3:2005 [7]. La semplicità del foglio di calcolo predisposto allo scopo, non fa ritenere necessario la descrizione delle modalità del suo utilizzo. Il foglio di calcolo è memorizzato nel CD denominato "PROCEDURE" allegato alla presente relazione.
Benché gli effetti del secondo ordine nell'ambito della procedura siano considerati in fase di analisi, il progettista deve sempre verificare la necessità di un ulteriore controllo nei confronti dell'instabilità per presso-flessione.

7.2 La procedura automatizzata per analisi 2D

La costruzione della procedura di gestione dati per le analisi 3D ha permesso di creare, come suo sottoprodotto, la procedura automatizzata rivolta alle analisi 2D del telaio di stilata. Si è scelto di non procedere alla generazione di una analoga procedura relativa al sottomodello di facciata a causa delle incertezze legate al suo impiego, alle quali si è dedicato ampio spazio nel capitolo 6.

La procedura è stata sviluppata limitatamente al programma di calcolo SAP. La scelta è giustificata dalla maggiore diffusione di questo programma tra la comunità dei progettisti.

I principi operativi utilizzati nella redazione della procedura 2D ricalcano quelli relativi alla procedura 3D. Informazioni relative ai criteri di discretizzazione del telaio, alle tipologie di elementi finiti, alla definizione delle proprietà delle sezioni e dei materiali, alle condizioni di vincolo tra gli elementi, alle condizioni di vincolo esterne, alle imperfezioni, alle condizioni di carico e alle tipologie di analisi possono essere reperite nel paragrafo precedente, limitatamente alla parte riguardante ovviamente il piano di stilata.

I dettagli riguardo all'utilizzo della procedura sono presentati nel manuale utente contenuto nell'allegato 7.

La procedura denominata SAP20002D è memorizzata sul CD denominato "PROCEDURE" allegato alla presente relazione.

7.3 Confronti fra i risultati di SAP e di ANSYS

Al fine di validare le procedure di gestione dati e di chiarire quale possa essere l'influenza del tipo di codice di calcolo sui risultati delle analisi, sono state messi a confronto i risultati di analisi svolte con SAP e con ANSYS. Lo studio, che ha riguardato i tre ponteggi Cs, Cb e D, ha considerato la risposta dei sistemi in condizioni ultime ed in presenza dei carichi di progetto (condizioni di servizio e di fuori servizio) previsti dalla normativa UNI EN 12811-1:2004 [5]. Le analisi hanno riguardato sia i sistemi 3D nel loro complesso sia i modelli 2D di stilata. Il confronto è stato effettuato a parità di caratteristiche geometriche, di condizioni di vincolo, di sistemi di imperfezione e di carichi applicati. Nelle analisi i vincoli elastici equivalenti all'impalcato sono stati assunti in accordo alle leggi indicate nelle figure 3.10-3.13 del capitolo 3.

7.3.1 Condizioni di carico

Per la determinazione del carico ultimo le analisi sono state sviluppate utilizzando le condizioni di carico già descritte ai paragrafo precedenti, e così sintetizzabili:

- analisi 3D: carichi applicati alla sommità di ciascun montante. Per riprodurre gli effetti di bordo sui montanti delle stilate esterne è stato applicato un carico pari al 68% rispetto al quello applicato ai montanti interni (Fig. 3.19);
- analisi 2D: carichi verticali concentrati applicati in sommità ad ogni montante (Fig. 3.20).

I carichi associati alle condizioni di servizio e di fuori servizio sono stati determinati seguendo le prescrizioni della normativa UNI EN 12811-1:2004 [5]. Nel dettaglio, sono stati considerati il peso proprio del ponteggio, i carichi variabili (ponteggi di classe 3), ed i carichi dovuti al vento distinguendo tra i casi di vento parallelo e vento ortogonale alla facciata. I carichi dovuti al vento sono stati applicati come forze concentrate agenti sui nodi del ponteggio in corrispondenza ad ogni livello. I dettagli dei carichi utilizzati durante le elaborazioni sono raccolti nell'allegato 8. Le azioni del vento sono state determinate in accordo alle normative UNI EN 1991-1-4 [19] e UNI EN 12811-1:2004 [5] per un velocità di riferimento pari a 28 m/s.

7.3.2 Confronto fra i risultati di SAP e di ANSYS per le analisi 3D

I risultati delle analisi 3D sono stati fra loro confrontati in termini di reazioni associate ai montanti, alle stilate, alle facciate e di carico verticale applicato al ponteggio nel suo complesso. Questo ha reso possibile confrontare la distribuzione degli sforzi all'interno del ponteggio sia in condizioni ultime sia nelle condizioni operative di servizio e di fuori servizio. In questa sede per brevità sono riportati i confronti relativi alle stilate, alle facciate ed al ponteggio. I dettagli relativi al confronto dei carichi alla base dei montanti sono raccolti nell'allegato 8.

I risultati relativi alle analisi a collasso sono presentati nella tabella 7.1 mentre il confronto per le condizioni di servizio e di fuori servizio è mostrato nelle tabelle 7.2-7.7. In particolare, le tabelle 7.2 e 7.3 si riferiscono al ponteggio Cs, le tabelle 7.4 e 7.5 riguardano il ponteggio Cb mentre le tabelle 7.6 e 7.7 sono relative al ponteggio D.

Il confronto delle analisi a collasso (Fig. 7.1) evidenzia la marcata differenza delle due soluzioni SAP e ANSYS riscontrabile per tutte e tre le tipologie di ponteggio. Se si confrontano i carichi di collasso associati all'intero ponteggio si osserva come la soluzione SAP sia sensibilmente inferiore rispetto alla corrispondente soluzione ANSYS. Le differenze riscontrate variano da un minimo di circa il 16% nel caso del ponteggio Cs ad un massimo di circa il 21% nel caso del ponteggio D. Il confronto tra le deformate a collasso, qui non riportato per motivi di spazio, ha mostrato una buona corrispondenza qualitativa tra le due tipologie di soluzioni. Queste differenze possono essere ascrivibili alla diversa formulazione degli elementi finiti utilizzati

dai due programmi, al diverso criterio di risoluzione del problema non lineare analizzato e alla diversa storia di carico intesa come procedura di tipo incrementale-iterativa adottata durante le elaborazioni. L'effetto della diversa formulazione degli elementi finiti è già stato messo in evidenza al termine del capitolo 5 dove si è fatto rilevare come, già in ambito ANSYS, l'utilizzo di un elemento finito tipo PIPE piuttosto che BEAM determina, per i casi analizzati, una riduzione della capacità portante ultima de ponteggi, a parità di prestazioni del sistema di impalcato, che varia da un minimo di 1,82% ad un massimo del 9,04% (variazione media del 5,48%). E' importatnte puntualizzare che queste variazioni sono strettamente pertinenti alle casistiche studiate e alle particolari ipotesi di calcolo adottate e che quindi non devono essere considerate come riferimento generale e come parametro discriminatorio riguardo al tipo di elemento finito. Va inoltre osservato che le analisi svolte in queste lavoro sono elastiche del secondo ordine. Se la struttura dovesse raggiungere locali plasticizzazioni le osservazioni di cui sopra potrebbero non trovare conferma.

Tabella 7.1 – Confronto carichi di collasso ANSYS - SAP

Stilata	Reazione [kN]					
	Ponteggio Cs		Ponteggio Cb		Ponteggio D	
	ANSYS	SAP	ANSYS	SAP	ANSYS	SAP
1 Tipo A	83,092	70,855 (-14,73%)	83,377	69,937 (-16,12%)	84,219	63,550 (-24,54%)
2 Tipo B	70,579	59,988 (-15,01%)	70,435	58,629 (-16,76%)	72,015	57,296 (-20,44%)
3 Tipo A	88,508	72,484 (-18,10%)	89,809	72,711 (-19,04%)	85,542	71,174 (-16,80%)
4 Tipo B	71,125	61,044 (-14,17%)	70,971	59,791 (-15,75%)	75,720	58,755 (-22,41%)
5 Tipo A	89,417	71,389 (-20,16%)	91,760	71,732 (-21,83%)	82,032	67,662 (-17,52%)
6 Tipo B	64,457	55,145 (-14,45%)	64,770	55,800 (-13,85%)	66,653	50,887 (-23,65%)
Totale facciata interna	254,081	185,237 (-27,10%	254,910	176,177 (-30,89%)	236,207	161,771 (-31,51%)
Totale facciata esterna	213,097	205,669 (-3,49%)	216,212	212,422 (-1,75%)	229,974	207,552 (-9,75%)
Totale ponteggio	467,178	390,906 (-16,33%)	471,122	388,599 (-17,52%)	466,181	369,323 (-20,78%)

Tabella 7.2 – Ponteggio Cs: Confronto condizioni di servizio ANSYS - SAP

Stilata	Reazione [kN]			
	Vento ortogonale alla facciata		Vento parallela alla facciata	
	ANSYS	SAP	ANSYS	SAP
1 Tipo A	20,348	22,195 (9,08%)	18,761	19,566 (4,29%)
2 Tipo B	31,386	30,246 (-3,63%)	32,269	31,791 (-1,48%)
3 Tipo A	33,921	34,781 (2,54%)	33,707	33,905 (0,59%)
4 Tipo B	33,005	32,058 (-2,87%)	33,790	33,421 (-1,09%)
5 Tipo A	32,394	32,673 (0,86%)	32,631	32,673 (0,13%)
6 Tipo B	21,381	21,317 (-0,30%)	21,709	21,916 (0,95%)
Totale facciata interna	90,139	96,397 (6,94%)	90,337	96,150 (6,43%)
Totale facciata esterna	82,296	76,874 (-6,59%)	82,530	77,121 (-6,55%)
Totale ponteggio	172,435	173,271 (0,49%)	172,867	173,271 (0,23%)

Per quanto riguarda invece le condizioni di servizio e di fuori servizio si osserva come vi sia in generale una buona corrispondenza tra i risultati SAP ed ANSYS. E' importante osservare che il confronto sul carico totale sul ponteggio non è significativo. Si tratta infatti di analisi del secondo ordine svolte non a collasso ma per un assegnato valore di carico. Il risultato sul carico totale è stato riportato a puro titolo di controllo. Va però osservato che le piccole differenze che si riscontrano sul carico totale sono comunque indicative della diversa sequenza incrementale-iterativa adottata dai due programmi di calcolo.
I risultati mostrano che, a parte alcuni picchi che si registrano a carico delle stilate esterne (Stilata 1 Tipo A e Stilata 6 Tipo B), le variazioni registrate sulle stilate intermedie sono modeste. Le massime variazioni, nell'ordine del ± 9%, si registrano per il ponteggio tipo D per le condizioni di carico di servizio. Per tutti gli altri casi le massime variazioni sono nell'ordine del ± 5%. Per quanto riguarda il carico sulle facciate si osserva la tendenza di SAP a sovrastimare il carico sulle facciata interna lato opera servita.

Tabella 7.3 – Ponteggio Cs: Confronto condizioni di fuori servizio ANSYS - SAP

Stilata	Reazione [kN]			
	Vento ortogonale alla facciata		Vento parallelo alla facciata	
	ANSYS	SAP	ANSYS	SAP
1 Tipo A	14,768	15,781 (6,86%)	11,300	11,578 (2,46%)
2 Tipo B	19,027	19,630 (3,17%)	20,683	20,860 (0,85%)
3 Tipo A	22,728	22,547 (-0,79%)	22,076	21,990 (-0,39%)
4 Tipo B	20,938	20,709 (-1,10%)	22,284	22,152 (-0,59%)
5 Tipo A	21,068	20,690 (-1,79%)	21,597	21,708 (0,51%)
6 Tipo B	15,336	14,852 (-3,16%)	16,068	15,921 (-0,91%)
Totale facciata interna	57,631	61,242 (6,26%)	59,671	62,340 (4,47%)
Totale facciata esterna	56,234	52,967 (-5,81%)	54,337	51,869 (-4,54%)
Totale ponteggio	113,865	114,209 (0,30%)	114,008	114,209 (0,18%)

Tabella 7.4 – Ponteggio Cb: Confronto condizioni di servizio ANSYS - SAP

Stilata	Reazione [kN]			
	Vento ortogonale alla facciata		Vento parallelo alla facciata	
	ANSYS	SAP	ANSYS	SAP
1 Tipo A	20,924	23,020 (10,02%)	18,550	19,551 (5,39%)
2 Tipo B	31,091	29,647 (-4,64%)	31,905	31,446 (-1,44%)
3 Tipo A	33,830	35,433 (4,74%)	33,557	34,130 (1,71%)
4 Tipo B	32,937	31,608 (-4,03%)	33,707	33,182 (-1,56%)
5 Tipo A	32,097	32,945 (2,64%)	32,483	32,821 (1,04%)
6 Tipo B	21,844	20,545 (-5,95%)	22,931	22,068 (-3,76%)
Totale facciata interna	89,230	95,749 (7,31%)	89,859	96,880 (7,81%)
Totale facciata esterna	83,493	77,449 (-7,24%)	83,274	76,319 (-8,35%)
Totale ponteggio	172,723	173,198 (0,28%)	173,133	173,198 (0,04%)

Tabella 7.5 – Ponteggio Cb: Confronto condizioni di fuori servizio ANSYS - SAP

Stilata	Reazione [kN]			
	Vento ortogonale alla facciata		Vento parallelo alla facciata	
	ANSYS	SAP	ANSYS	SAP
1 Tipo A	15,425	17,037 (10,45%)	10,369	14,210 (37,05%)
2 Tipo B	18,483	18,882 (2,16%)	20,504	21,745 (6,05%)
3 Tipo A	22,844	21,417 (-6,25%)	21,815	21,990 (0,80%)
4 Tipo B	20,639	21,074 (2,11%)	22,160	22,054 (-0,48%)
5 Tipo A	20,904	21,982 (5,16%)	21,555	20,767 (-3,66%)
6 Tipo B	15,895	13,745 (-13,53%)	17,791	13,370 (-24,85%)
Totale facciata interna	57,120	59,800 (4,69%)	59,931	63,661 (6,22%)
Totale facciata esterna	57,070	54,336 (-4,79%)	54,263	50,475 (-6,98%)
Totale ponteggio	114,190	114,136 (-0,05%)	114,194	114,136 (-0,05%)

Tabella 7.6 – Ponteggio D: Confronto condizioni di servizio ANSYS - SAP

Stilata	Reazione [kN]			
	Vento ortogonale alla facciata		Vento parallelo alla facciata	
	ANSYS	SAP	ANSYS	SAP
1 Tipo A	21,338	23,232 (8,88%)	20,661	21,919 (6,09%)
2 Tipo B	30,915	28,538 (-7,69%)	30,558	28,340 (-7,26%)
3 Tipo A	33,649	36,600 (8,77%)	34,425	36,978 (7,42%)
4 Tipo B	34,933	32,403 (-7,24%)	34,296	32,143 (-6,28%)
5 Tipo A	30,803	32,894 (6,79%)	28,353	33,170 (16,99%)
6 Tipo B	21,264	20,154 (-5,22%)	21,886	21,272 (-2,81%)
Totale facciata interna	91,260	93,922 (2,92%)	90,135	97,153 (7,79%)
Totale facciata esterna	81,642	79,900 (-2,13%)	80,044	76,669 (-4,22%)
Totale ponteggio	172,902	173,822 (0,53%)	170,179	173,822 (2,14%)

Tabella 7.7 – Ponteggio D: Confronto condizioni di fuori servizio ANSYS - SAP

Stilata	Reazione [kN]			
	Vento ortogonale alla facciata		Vento parallelo alla facciata	
	ANSYS	SAP	ANSYS	SAP
1 Tipo A	16,067	17,931 (11,60%)	13,593	14,612 (7,50%)
2 Tipo B	17,669	17,725 (0,31%)	18,289	17,605 (-3,74%)
3 Tipo A	23,613	23,949 (1,42%)	24,231	25,227 (4,11%)
4 Tipo B	21,254	20,262 (-4,67%)	20,595	18,877 (-8,34%)
5 Tipo A	20,171	20,256 (0,42%)	21,081	22,723 (7,79%)
6 Tipo B	15,351	14,637 (-4,65%)	16,613	15,715 (-5,40%)
Totale facciata interna	59,525	60,121 (1,00%)	62,598	65,591 (4,78%)
Totale facciata esterna	54,600	60,121 (10,11%)	51,804	49,168 (-5,09%)
Totale ponteggio	114,125	120,241 (5,36%)	114,402	114,759 (0,31%)

7.3.3 Confronto fra i risultati di SAP e di ANSYS per le analisi 2D nel piano di stilata

Le analisi 2D hanno interessato sia la stilata tipo A sia la stilata tipo B (Fig. 3.17). I risultati sono stati fra loro confrontati in termini di reazioni alla base associate ai montanti e di carico totale verticale applicato alle stilate. Questo ha reso possibile confrontare la distribuzione degli sforzi all'interno della stilata sia in condizioni ultime sia nelle condizioni operative di servizio e di fuori servizio.

I risultati relativi alle analisi a collasso sono presentati nella tabella 7.8, mentre il confronto per le condizioni di servizio e di fuori servizio è mostrato nelle tabelle 7.9-7.11 che riguardano i ponteggi Cs, Cb e D, rispettivamente.

Così come per le analisi 3D a collasso anche nel caso delle analisi 2D si nota una tendenza da parte di SAP alla sottostima del carico ultimo. La massima variazione è risultata comunque più contenuta rispetto alle analisi 3D ed al massimo ha raggiunto approssimativamente il 7%. Si osserva inoltre che questo effetto è più rilevante per la stilata tipo B. Per le stilate tipo A, ad eccezione del ponteggio D, i risultati SAP e ANSYS sono pressoché coincidenti.

Per quanto riguarda invece le condizioni di servizio e di fuori servizio si osserva come vi sia in generale una buona corrispondenza tra i risultati SAP ed ANSYS, eccezion fatta per la stilata A del ponteggio D, per la quale nelle condizioni di fuori servizio, si osservano delle rilevanti variazioni in termini di carichi agenti alla base dei montanti. Al riguardo va comunque osservato che la condizione di carico di fuori servizio, non risulta la più significativa ai fini progettuali.

Tabella 7.8 – Analisi 2D: confronto carichi di collasso ANSYS - SAP

Stilata	Elemento stilata	Reazione [kN]					
		Ponteggio Cs		Ponteggio Cb		Ponteggio D	
		ANSYS	SAP	ANSYS	SAP	ANSYS	SAP
A	Montante interno	55,660	52,925 (-4,91%)	54,576	53,384 (-2,18%)	53,244	52,604 (-1,20%)
	Montante esterno	18,354	21,235 (15,70%)	19,854	21,230 (6,93%)	25,694	22,566 (-12,17%)
	Totale stilata	74,014	74,160 (0,20%)	74,430	74,614 (0,25%)	78,938	75,170 (-5,01%)
B	Montante interno	44,804	41,103 (-8,26%)	44,823	40,729 (-9,13%)	43,229	42,204 (-2,37%)
	Montante esterno	12,376	12,271 (-0,85%)	12,809	13,125 (2,47%)	14,246	12,621 (-11,41%)
	Totale stilata	57,180	53,374 (-7,13%)	57,632	53,854 (-7,02%)	57,475	54,825 (-4,83%)

Tabella 7.9 – Ponteggio Cs : Analisi 2D - confronto carichi di collasso ANSYS - SAP

Stilata	Elemento stilata	Reazione [kN]			
		Condizioni di servizio		Condizioni di fuori serivzio	
		ANSYS	SAP	ANSYS	SAP
A	Montante interno	15,133	15,354 (1,46%)	5,520	6,176 (11,88%)
	Montante esterno	16,184	16,030 (-0,95%)	13,985	13,395 (-4,22%)
	Totale stilata	31,317	31,384 (0,21%)	19,505	19,572 (0,34%)
B	Montante interno	20,810	22,120 (6,29%)	15,097	15,522 (2,82%)
	Montante esterno	10,507	9,264 (-11,83%)	4,408	4,049 (-8,14%)
	Totale stilata	31,317	31,384 (0,21%)	19,505	19,572 (0,34%)

Tabella 7.10 – Ponteggio Cb : Analisi 2D - confronto carichi di collasso ANSYS - SAP

Stilata	Elemento stilata	Reazione [kN]			
		Condizioni di servizio		Condizioni di fuori serivzio	
		ANSYS	SAP	ANSYS	SAP
A	Montante interno	14,452	15,250 (5,52%)	4,590	6,101 (32,93%)
	Montante esterno	16,865	16,134 (-4,33%)	14,915	13,471 (-9,68%)
	Totale stilata	31,317	31,384 (0,21%)	19,505	19,572 (0,34%)
B	Montante interno	20,363	21,761 (6,87%)	14,285	15,343 (7,41%)
	Montante esterno	10,955	9,623 (-12,16%)	5,220	4,228 (-19,00%)
	Totale stilata	31,318	31,384 (0,21%)	19,505	19,571 (0,34%)

Tabella 7.11 – Ponteggio D : Analisi 2D - confronto carichi di collasso ANSYS - SAP

Stilata	Elemento stilata	Reazione [kN]			
		Condizioni di servizio		Condizioni di fuori serivzio	
		ANSYS	SAP	ANSYS	SAP
A	Montante interno	15,171	15,895 (4,77%)	3,199	7,256 (126,81%)
	Montante esterno	16,212	15,601 (-3,77%)	16,372	12,428 (-24,09%)
	Totale stilata	31,383	31,496 (0,36%)	19,571	19,683 (0,57%)
B	Montante interno	21,444	20,216 (-5,72%)	15,376	14,367 (-6,56%)
	Montante esterno	9,941	11,279 (13,46%)	4,196	5,316 (26,68%)
	Totale stilata	31,385	31,496 (0,35%)	19,572	19,683 (0,57%)

7.4 Considerazioni finali

Nell'ambito di questo capitolo è presentata una procedura automatizzata redatta al fine di facilitare la gestione dei dati necessari alla 'costruzione' di un modello di calcolo visto come strumento per l'analisi agli elementi finiti di ponteggi a telai prefabbricati aperti. Benché in termini generici si parli di "procedura automatizzata" sono state redatte tre procedure, due relative all'analisi dei ponteggi nella loro globalità (modelli 3D) mediante i programmi ANSYS e SAP, ed una relativa all'analisi del sottomodello 2D di stilata con il programma SAP. In questo capitolo sono state descritte le caratteristiche generali e le ipotesi sulla

base delle quali le procedure sono state costruite rimandando agli allegati 6 e 7 per la descrizione dettagliata delle loro modalità operative. Il capitolo si conclude con il confronto dei risultati di analisi svolte con SAP e ANSYS sia sul modello 3D sia sul modello 2D di stilata dei ponteggi Cs, Cb e D. Le analisi sono state svolte considerando la risposta dei sistemi a collasso ed in presenza dei carichi di servizio e di fuori servizio. I risultati hanno permesso di osservare come in generale SAP tende a sottostimare il carico di collasso. Questo effetto è più marcato per i sistemi 3D dove la massima sottostima registrata è stata del 21% circa. Per le condizioni di servizio e di fuori servizio ad eccezione di alcuni picchi, in generale si è notata una buona corrispondenza tra i risultati. A chiarimento dei confronti proposti nell'ultimo paragrafo del capitolo, vale la pena di osservare che le differenze riscontrate sono del tutto giustificate considerando che i due programmi utilizzano elementi finiti con formulazioni diverse, diversi criteri di convergenza ed infine diversa procedura di tipo incrementale-iterativa durante le elaborazioni.

8. CONCLUSIONI

8.1 Riepilogo dei principali risultati

Questo lavoro si è occupato del comportamento dei ponteggi metallici, con particolare riferimento al caso dei ponteggi a telaio prefabbricato. A tal fine, sono stati considerati quale casi di studio tre ponteggi a telaio aperto di produzione italiana. Lo studio, che ha considerato diversi aspetti di questa complessa tematica, è stato condotto considerando quale riferimento le prescrizioni delle normative UNI EN riguardanti la progettazione dei sistemi di ponteggio [3], 4], [5], [6], [7].

Il lavoro può essere suddiviso in tre parti: una prima parte sperimentale, una seconda parte numerica, ed infine una parte gestionale.

La parte sperimentale si è occupata della risposta dei diagonali di facciata visti come parte integrante del sistema intelaiato. L'obiettivo dello studio è stato quello di determinare una legge spostamento-azione assiale associata al diagonale, facilmente implementabile nei modelli 3D di analisi numerica. Assumendo come riferimento lo schema previsto dalla norma UNI EN 12810-2:2004 [4], è stato progettato un dispositivo di prova per mezzo del quale sono stati "testati" dei "sistemi di facciata" dotati di diagonali, appartenenti alle tre tipologie di ponteggio considerate nello studio. Nel complesso sono state effettate 36 prove, 12 per ciascuna tipologia di ponteggio. Le prove svolte in campo ciclico, sono state condotte nel rispetto delle prescrizioni della norma UNI EN 12810-2:2004 [4]. L'elaborazione dei dati è stata effettuata in accordo alla complessa ed articolata procedura prevista dal documento UNI EN 12811-3:2004 [7]. In questo modo è stato possibile determinare delle leggi multilineari associate ai diagonali delle tre tipologie di ponteggio, che riassumono in modo semplificato l'articolata risposta dei sistemi di facciata. Il lavoro ha permesso di puntualizzare alcuni aspetti riguardanti sia l'aspetto normativo, sia la risposta dei sistemi in sè. Sul fronte normativo si è osservato come le informazioni riguardanti le modalità di attuazione della sperimentazione, intese come sistema di prova e modalità di svolgimento delle prove, siano trattati in modo succinto e non esaustivo lasciando all'operatore libertà gestionale ed operativa. Analoghe considerazioni possono essere fatte anche per quanto riguarda la procedura di elaborazioni dati che, così come descritta dalla normativa, presenta alcuni punti non chiari e, per certi aspetti contraddittori, non facilitando l'operatore nella fase di analisi dei risultati. A ciò si aggiunge il fatto che la procedura è laboriosa e caratterizzata da un onere computazionale non trascurabile. Le risposte sperimentali dei tre sistemi di facciata, hanno evidenziato un comportamento marcatamente asimmetrico, sia per quanto riguarda gli scorrimenti iniziali, sia per quanto riguarda la risposta per livelli di carico più rilevanti. La variabilità dei giochi tra diagonali e sistemi di connessione al montante (boccole o spinotti) e la diversa rigidezza dei sistemi in trazione e compressione si è tradotta in risposte sperimentali asimmetriche.

La seconda parte dello studio, che ha voluto contribuire all'approfondimento delle conoscenze sulla risposta dei ponteggi, si è attuata mediante analisi numeriche svolte per tutti e tre i sistemi di ponteggio considerati su modelli agli elementi finiti appositamente messi a punto. Lo studio, che si è attuato mediante analisi elastiche del secondo ordine, ha considerato sia la risposta dei sistemi nella loro globalità (modelli 3D) sia la risposta nel piano di stilata (modello 2D). I risultati di preliminari analisi svolte durante la fase di messa a punto dei modelli, hanno permesso di evidenziare l'importanza della risposta del sistema di piano nei confronti della prestazioni dei sistemi, l'influenza della distribuzione dei vincoli all'opera servita nei confronti delle risposta delle stilate e l'affidabilità dei modelli 2D di stilata. Sulla scorta dei risultati delle analisi preliminari sono state svolte delle analisi di sensitività, con l'obiettivo di analizzare la risposta dei sistemi al variare delle imperfezioni alla base e della risposta del sistema di impalcato. I risultati delle analisi hanno evidenziato come le prestazioni dei ponteggi siano influenzate in modo rilevante dalle imperfezioni alla base: riduzioni del 25% delle imperfezioni possono determinare un incremento del 13% (analisi 3D) e del 19% (analisi 2D-stilata B) della capacità portante ultima. Variazioni minori e trascurabili della capacità portante si sono riscontrate invece nel caso in cui si considerino variazioni anche rilevanti dello scorrimento iniziale e della rigidezza dei sistemi di impalcato.

I risultati delle prove sperimentali sui diagonali di facciata, hanno permesso di investigare l'influenza della schematizzazione del sistema di controvento di facciata sulla risposta globale dei ponteggi. Lo studio, ha richiesto l'aggiornamento dei modelli di calcolo 3D in modo da consentire l'implementazione delle leggi sperimentali associate ai diagonali e lo svolgimento delle analisi nel campo dei grandi spostamenti. La necessità di garantire il funzionamento dei diagonali per prevalente azione assiale ha indotto all'utilizzo di una procedura "trial and error" appesantendo notevolmente l'onere computazionale. I risultati delle analisi hanno permesso di evidenziare come la diversa modellazione del diagonale di facciata, rispetto all'ipotesi di diagonali incernierati ai montanti usualmente adottata, non determina una sostanziale riduzione della capacità portante ad eccezione del caso in cui il sistema di piano non sia in grado di svolgere una adeguata azione di controventamento.

Lo studio si è proposto anche di approfondire le problematiche associate all'utilizzo del modello 2D di facciata. Le analisi svolte sui tre casi di studio hanno mostrato le difficoltà del modello proposto dalla normativa UNI EN 12810-2:2004 [4] nel predire il carico di collasso del sistema. I risultati poco soddisfacenti

hanno indotto all'approfondimento della tematica. Gli studi effettuati hanno portato alla definizione di un nuovo modello 2D di facciata che si è mostrato in grado di predire con maggiore accuratezza la risposta dei sistemi considerati.

Le difficoltà operative conseguenti alla gestione dei modelli di calcolo, specie se riferite alla risposta globale del sistema, hanno suggerito l'opportunità dello sviluppo di una procedura automatizzata finalizzata alla gestione dei dati necessari alla 'costruzione' di un modello di calcolo. A questo aspetto è stata dedicata l'ultima parte del lavoro. La procedura gestionale progettata si propone come strumento dedicato alla raccolta ordinata dei parametri necessari alla scrittura del codice di input dati nel linguaggio di macroprocedura caratteristico del programma ad elementi finiti che si intende utilizzare. Data la vastità di programmi di calcolo disponibili in ambito strutturale e, considerato che ciascuno di essi gestisce in modo diverso la fase di input e di output dati, è stato necessario scegliere a priori il programma di calcolo al quale riferirsi. Nello specifico si è fatto riferimento a due codici di calcolo agli elementi finiti caratterizzati da diverse peculiarità e ambito di applicazione ANSYS ver. 11.0 [12] e SAP 2000N ver. 8.2.6 [14]. Lo studio ha portato alla redazione di tre procedure, due relative all'analisi dei ponteggi nella loro globalità (modelli 3D) mediante i programmi ANSYS e SAP, ed una relativa all'analisi del sottomodello 2D di stilata limitatamente al programma SAP.

8.2 Sviluppi futuri

La articolata risposta dei sistemi di ponteggio lascia aperti innumerevoli fronti sui quali ancora investigare, sia dal punto di vista numerico, sia dal punto di vista sperimentale.

I risultati presentati in questo lavoro non permettono di trarre delle conclusioni di carattere generale, perché frutto di uno studio ristretto ad una tipologia di ponteggio ed ad un limitato numero di casi ma rappresentano una base di partenza sulla quale progettare successivi sviluppi. L'estensione sistematica dello studio, sia sperimentale sia numerico ad una più ampia gamma di tipologie di ponteggio permetterebbe di trarre delle indicazioni utili ai fini progettuali sicuramente più esaustive riguardo alla risposta complessa di queste strutture. Calibrazione dei modelli di calcolo attraverso le prove full-scale, approfondimento sulla risposta sperimentale delle componenti con particolare riferimento alla basette, alle imperfezioni dei sistemi intelaiati nel piano di facciata e nel piano di stilata sono tutti aspetti di primaria importanza. L'approfondimento delle conoscenze sulla riposta di questi sistemi potrebbe fornire delle utili indicazioni anche per quanto riguarda l'aspetto della robustezza strutturale. Quest'ultimo concetto, trascurato fino a pochi anni fa, sta assumendo un ruolo sempre più centrale in ambito progettuale. Con il termine robustezza si intende la capacità della struttura di subire danni non sproporzionati alle cause che li hanno generati. Entrando nello specifico nei ponteggi significa verificare la capacità di queste strutture di subire danni conseguenti alla rimozione di elementi strutturali chiave, quali ad esempio le basette, senza determinare il collasso del sistema.

RINGRAZIAMENTI

Lo studio è frutto del lavoro e dell'impegno di diverse persone. Gli autori vogliono esprimere il loro ringraziamento :

- ai sig. Stefano Girardi e Marco Graziadei, per il loro contributo alla progettazione e messa a punto dell'attrezzatura di prova e allo svolgimento della campagna sperimentale;
- agli ing. Stefano Gasperetti, Mattia Giovannini, Valerio Mancini e Marco Zini per il loro impareggiabile contributo allo sviluppo delle analisi numeriche e alla redazione della procedura gestionale dei dati.

BIBLIOGRAFIA

[1] Gylltoft K., Mroz K., Laod-carrying capacity of scaffolds, *Structural Engineering International*, 1/95, IABSE Publications, 1995.

[2] Godley M. H. R., Beale R. G., Sway stiffness of scaffold structures, *The Structural Engineer*, vol. 75/1, IStruct Publications, 1997.

[3] UNI EN 12810-1, Ponteggi di facciata realizzati con componenti prefabbricati. Parte 1: Specifiche di prodotto, Ente Nazionale di Unificazione, 2004

[4] UNI EN 12810-2, Ponteggi di facciata realizzati con componenti prefabbricati. Parte 1: Metodi particolari di progettazione strutturale, Ente Nazionale di Unificazione, 2004

[5] UNI EN 12811-1, Attrezzature provvisionali di lavoro. Parte 1: Ponteggi – Requisiti prestazionali e progettazione generale, Ente Nazionale di Unificazione, 2004

[6] UNI EN 12811-2, Attrezzature provvisionali di lavoro. Parte 2: Informazioni sui materiali, Ente Nazionale di Unificazione, 2004.

[7] UNI EN 12811-3, Attrezzature provvisionali di lavoro. Parte 3: Prove di carico, Ente Nazionale di Unificazione, 2005.

[8] UNI EN 1993-1-1, Eurocodice 3: Progettazione delle strutture di acciaio. Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici, Ente Nazionale di Unificazione, 2005.

[9] Report on Structural Design of "Plettac SL 70" following theory 1st order method, CEN/TC 53/WG 2 Subgroup BILAT D/I.

[10] Report on the Validation study of the simplified method of analysis of scaffolds as in the prEN 12810-2, Department of Mechanical and Structural Engineering, University of Trento, January 2002.
[11] Baldassino N., Zandonini R., Validazione di un sistema di calcolo per ponteggi prefabbricati di facciata basato sul metodo dell'amplificazione dei momenti dell'Eurocodice 3, Progetto di ricerca ISPESL B4/2000. Rapporto finale, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale, Università degli Studi di Trento, agosto 2004.
[12] Ansys Inc., *Theory Reference for Ansys and Ansys Workbench 11.0*, 2007.
[13] Galea Y., Bureau A., *PEPmicro - User's manual - version 4.0*, Centre Technique Industriel de la Construction Métallique France, 2006
[14] Components and Structures Inc., *SAP2000 Nonlinear 8.2.6 Structural Analysis Program - Reference Manual*, 2003.
[15] Mathematica Professional Version 6.1.1 for Windows, Wolfram Research.
[16] Microsoft© Office Excel 2003, Pacchetto Microsoft© Office Professional Edition, 2003.
[17] Horne M.R., Merchant W., *The stability of frames*, Pergamon Press, Ltd., 1965.
[18] Microsoft© Office Visal Basic 6.3, Pacchetto Microsoft© Office Professional Edition, 2003.
[19] UNI EN 1991-1-4, Eurocodice 1: Azioni sulle strutture. Parte 1-1: Azioni in generale – Azioni del vento, Ente Nazionale di Unificazione, 2005.

B1-5/DTS/05

I ponteggi metallici di facciata utilizzati nei cantieri temporanei o mobili.
Le nuove norme di prodotto: aspetti tecnici e legislativi

Relazione finale – Allegato 1

Autori: N. Baldassino, R. Zandonini

Affiliazione: Università degli Studi di Trento
Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale

Ricerca finanziata da:

Dipartimento Tecnologie di Sicurezza

10/02/2009

PONTEGGIO Cs

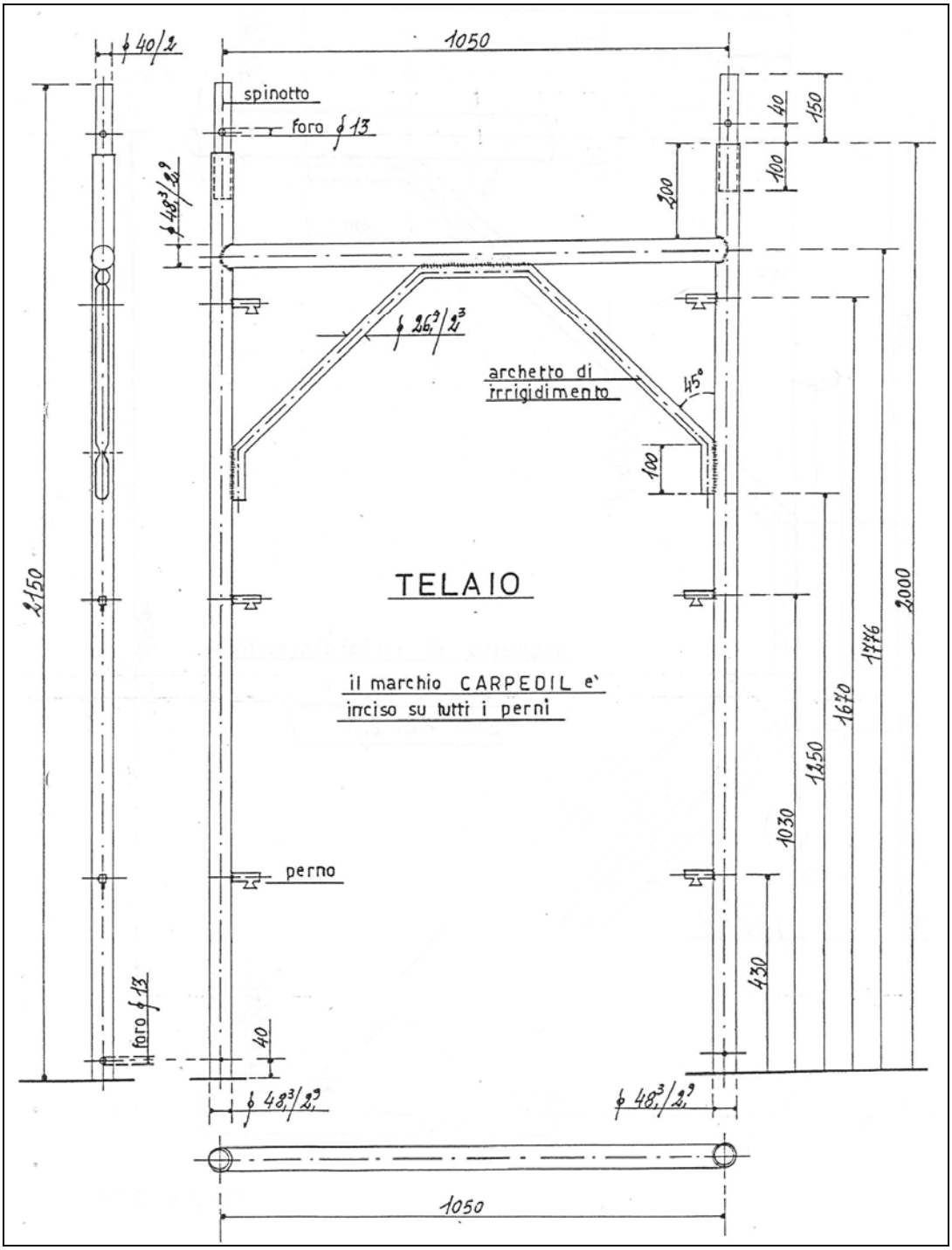


Figura A1.1 - Ponteggio Cs - Geometria del telaio

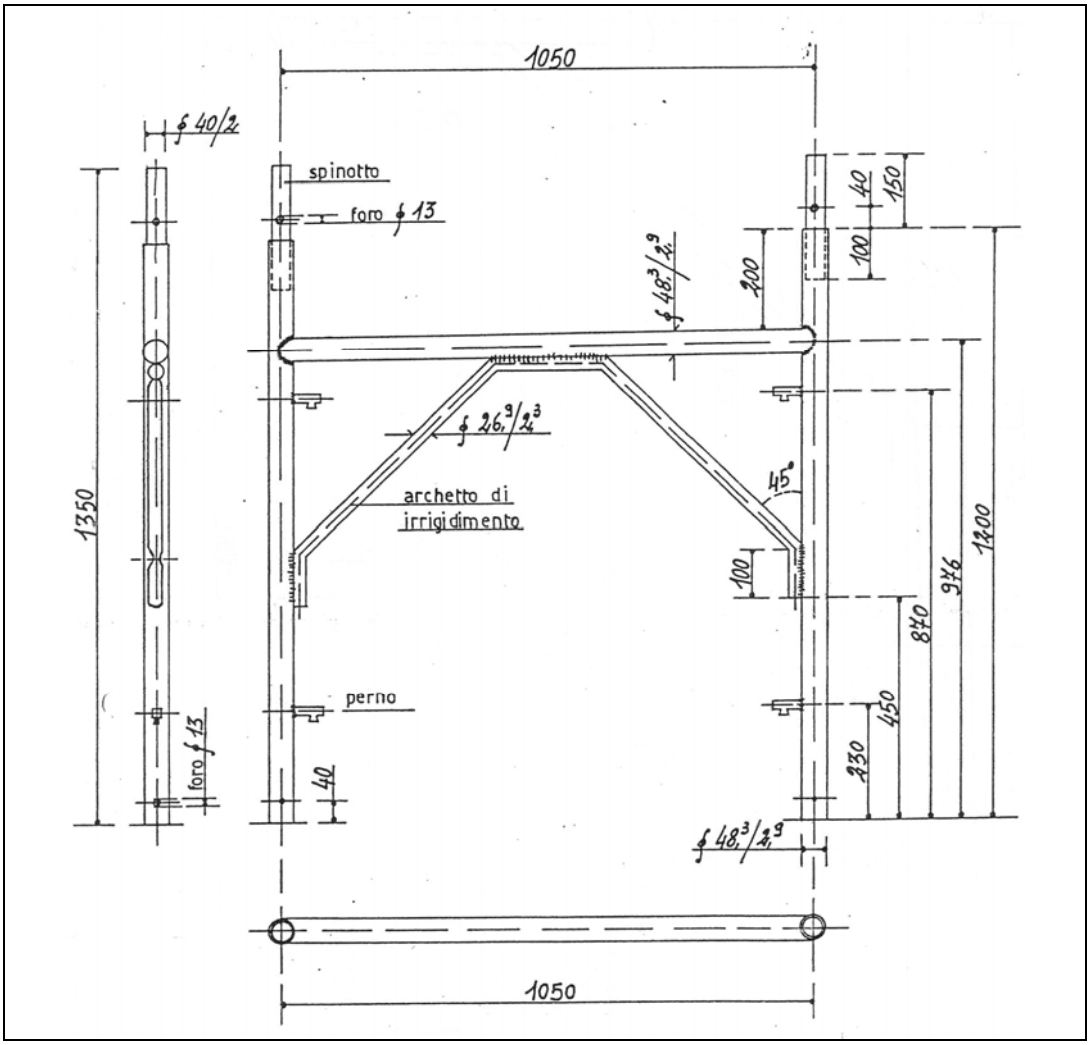


Figura A1.2 - Ponteggio Cs - Geometria del mezzo telaio

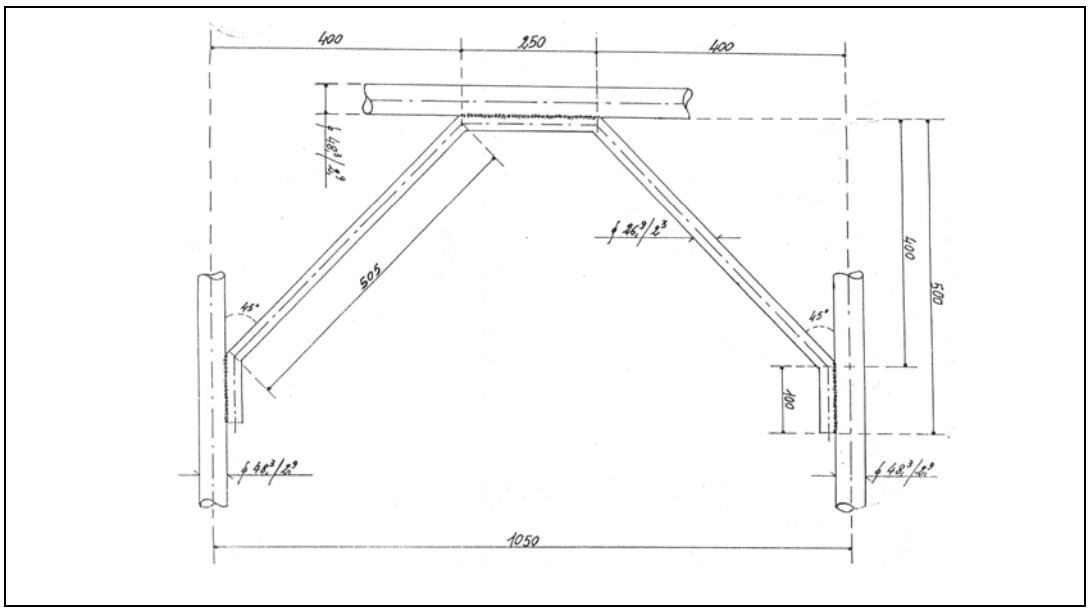


Figura A1.3 - Ponteggio Cs - Particolare dell'irrigidimento

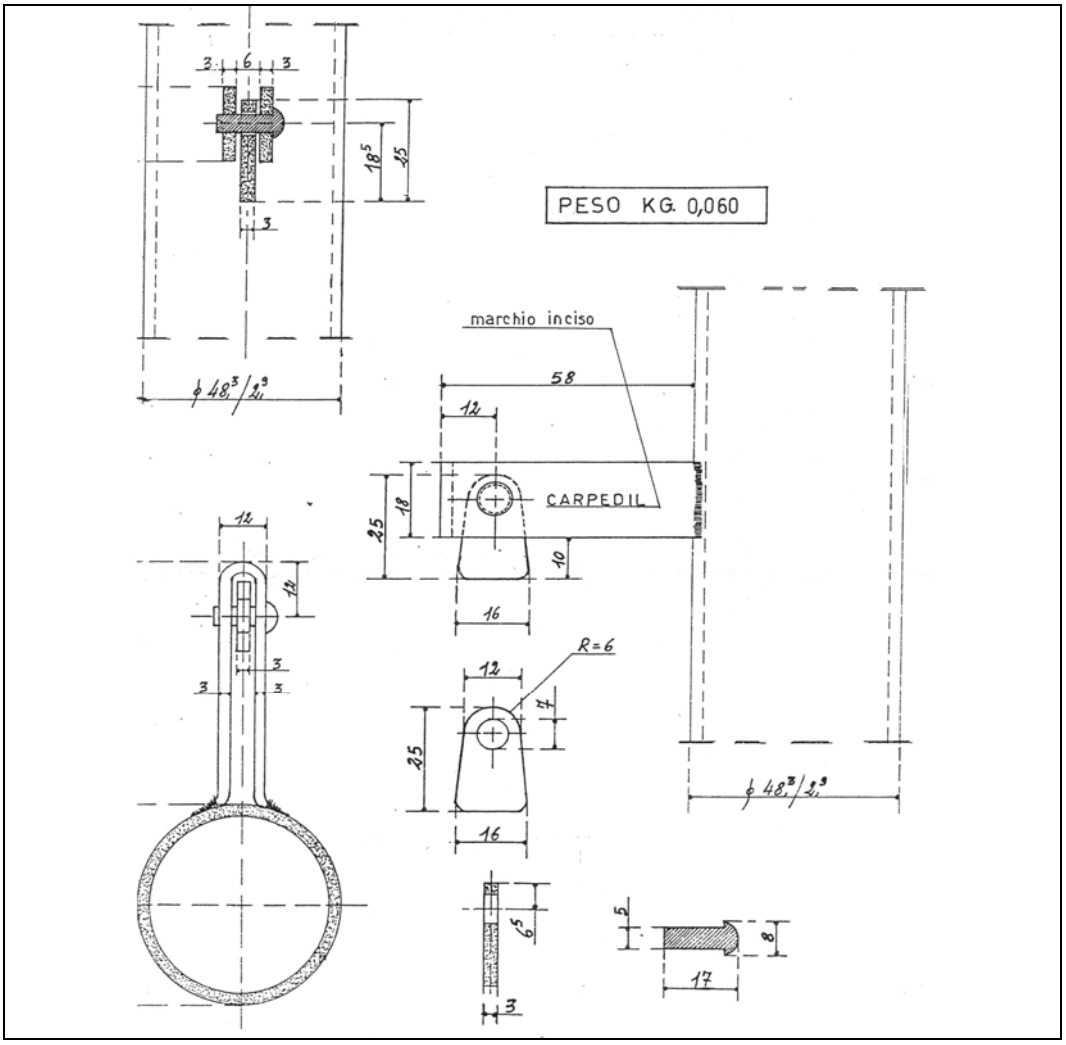


Figura A1.4 - Ponteggio Cs - Particolare del perno

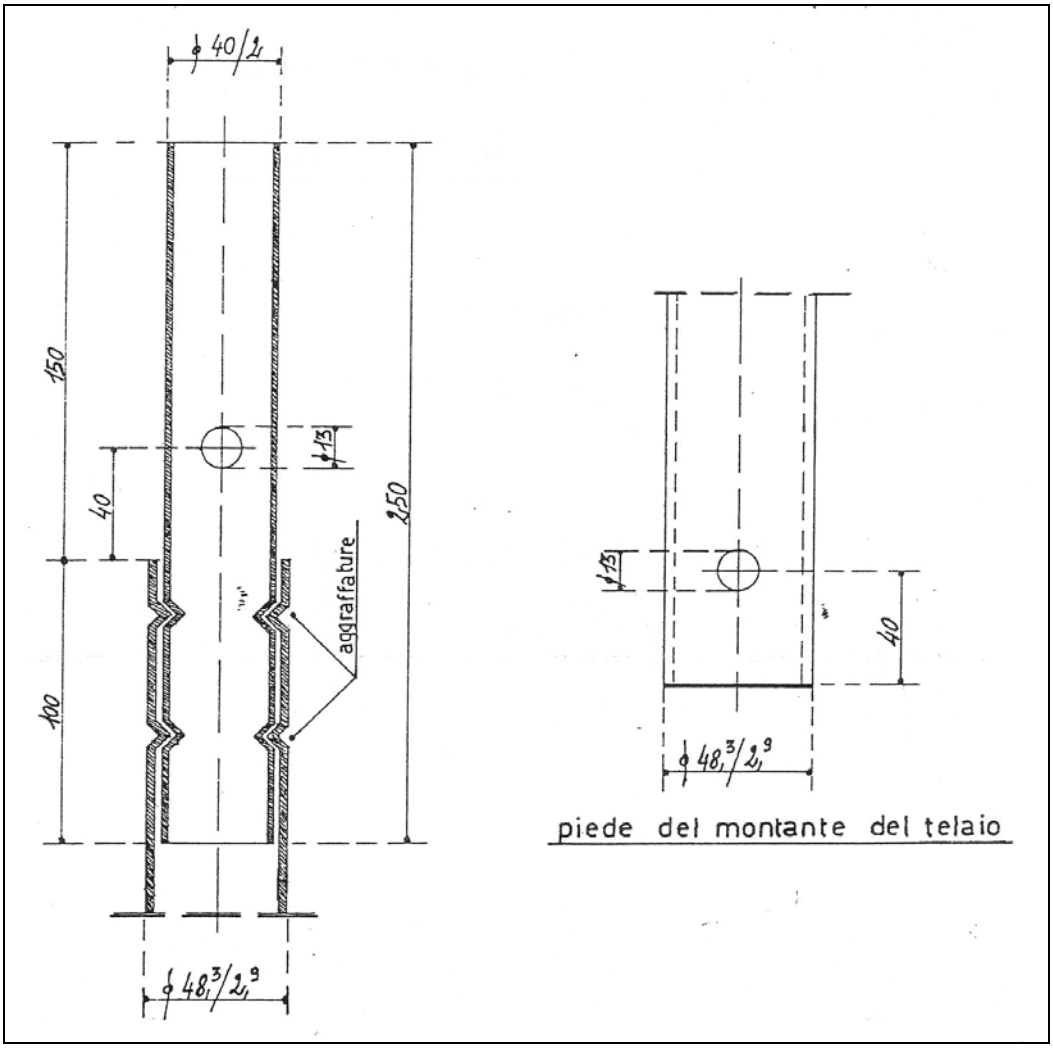


Figura A1.5 - Ponteggio Cs - Particolare della connessione tra telai

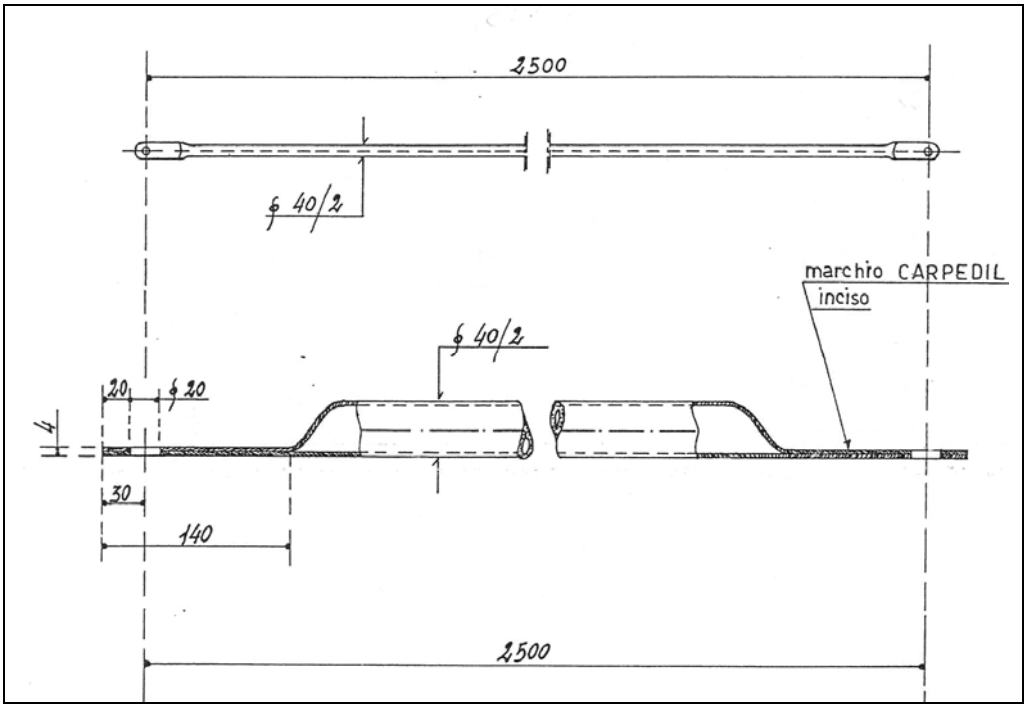


Figura A1.6 - Ponteggio Cs - Geometria del corrente

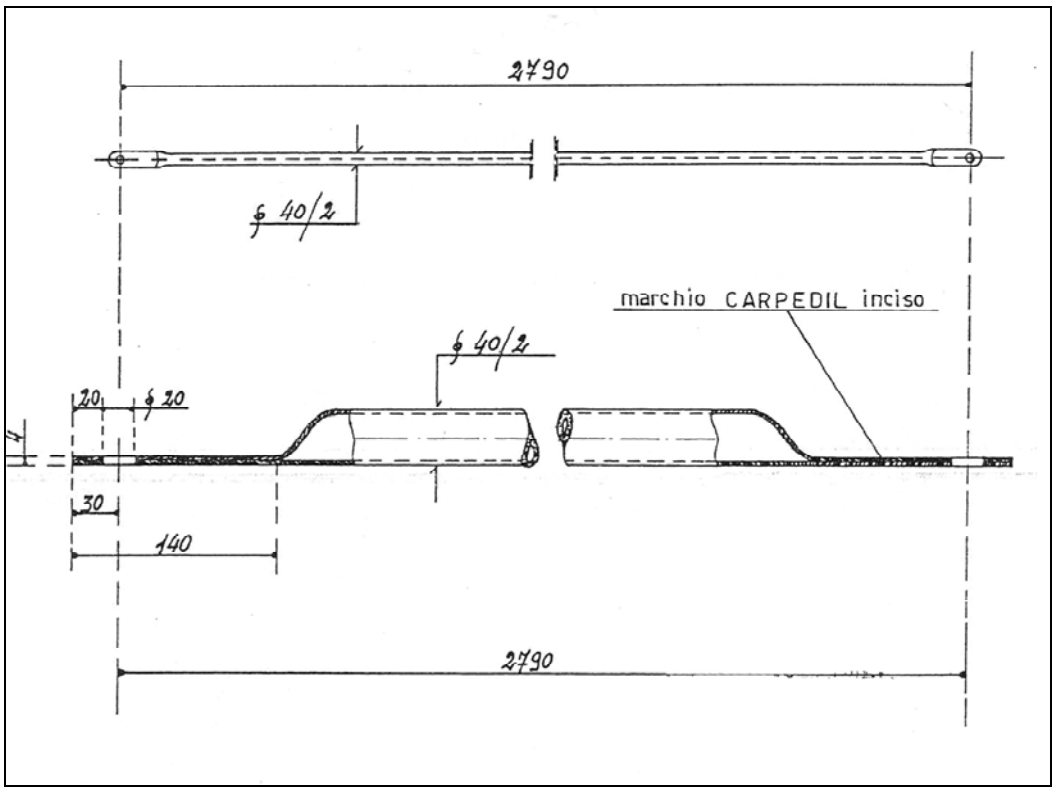


Figura A1.7 - Ponteggio C - Geometria del diagonale

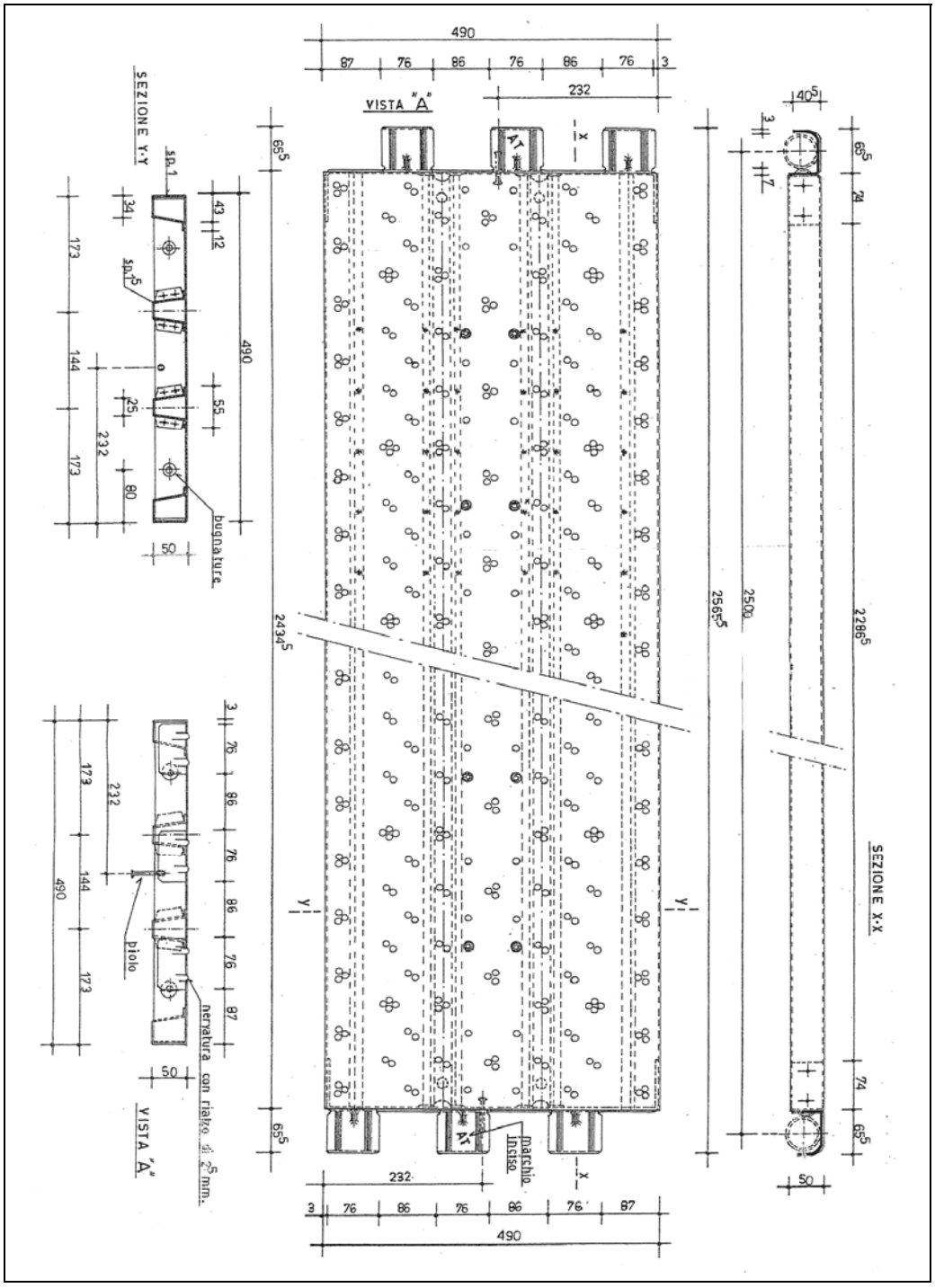


Figura A1.8 - Ponteggio Cs - Geometria delle tavole di impalcato

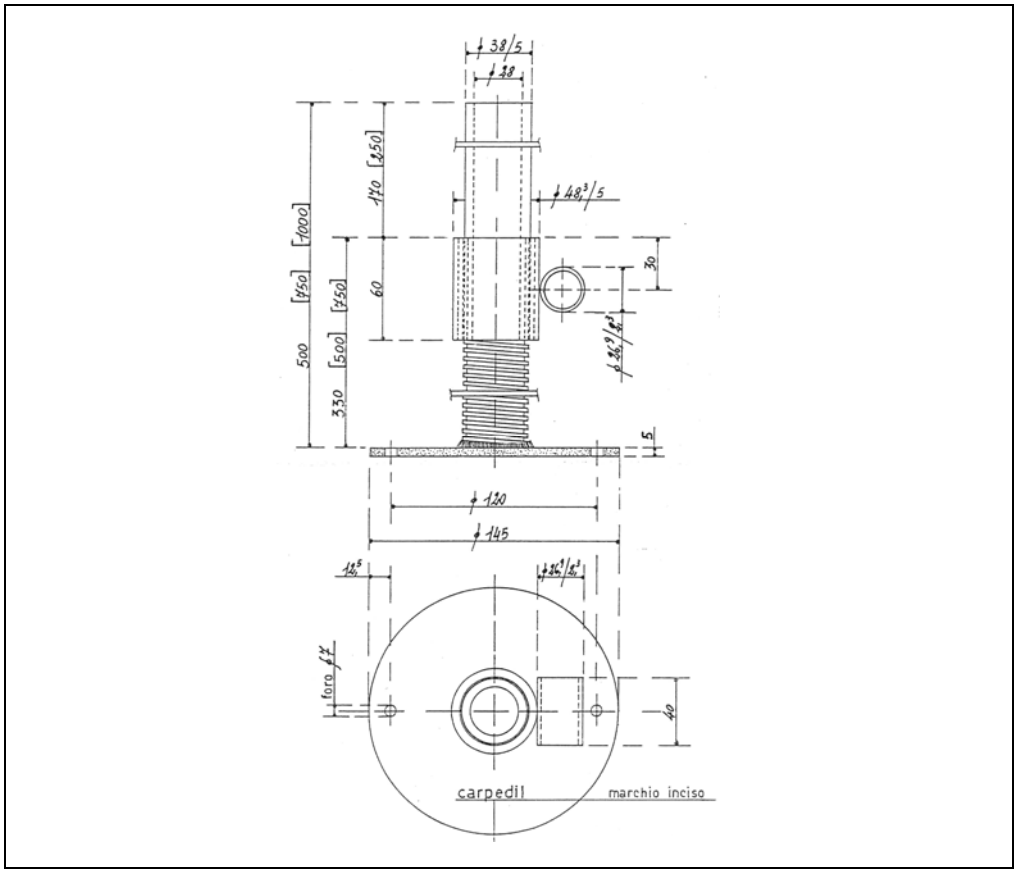


Figura A1.9 - Ponteggio Cs - Basetta regolabile

PONTEGGIO Cb

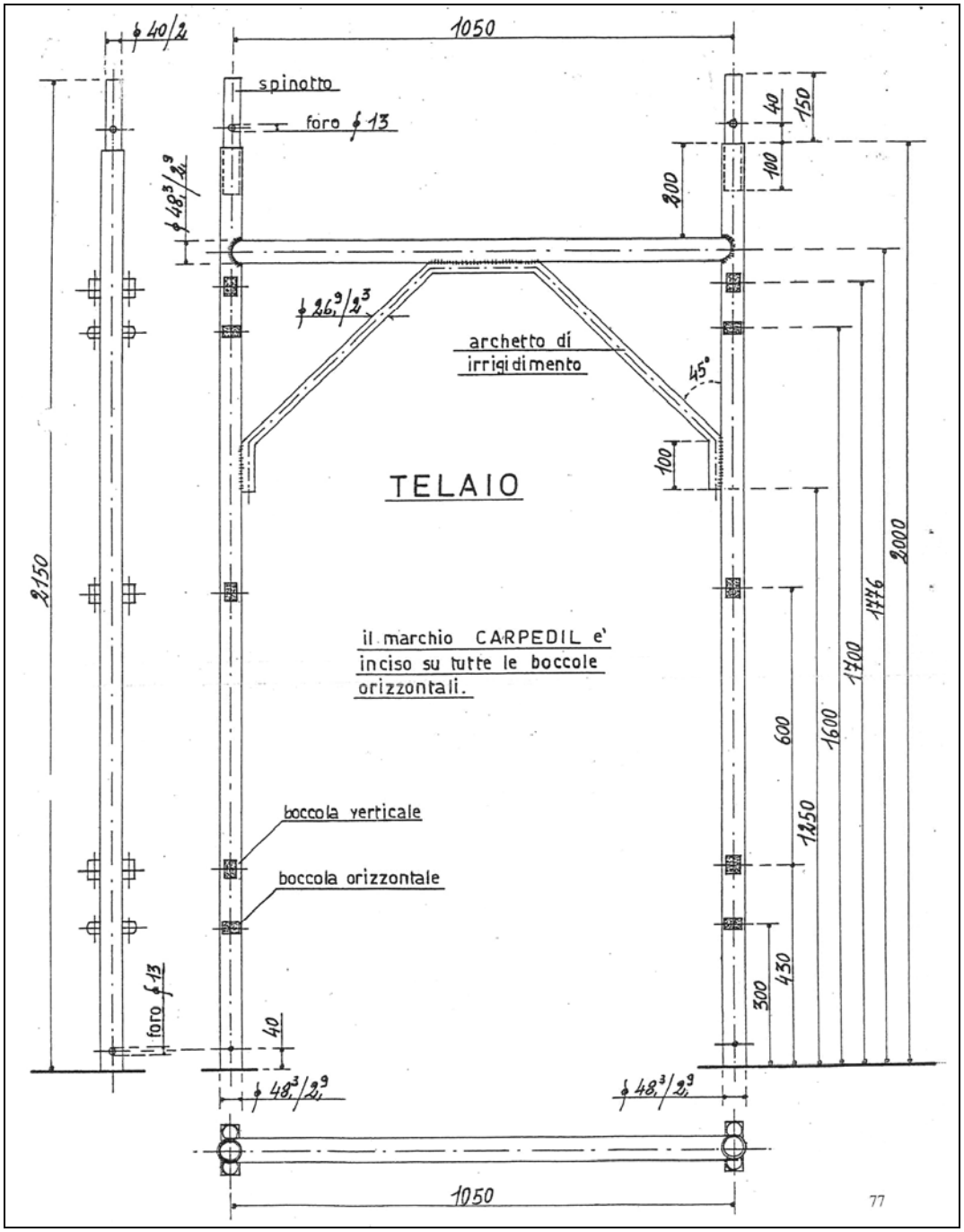


Figura A1.10 - Ponteggio Cb - Geometria del telaio

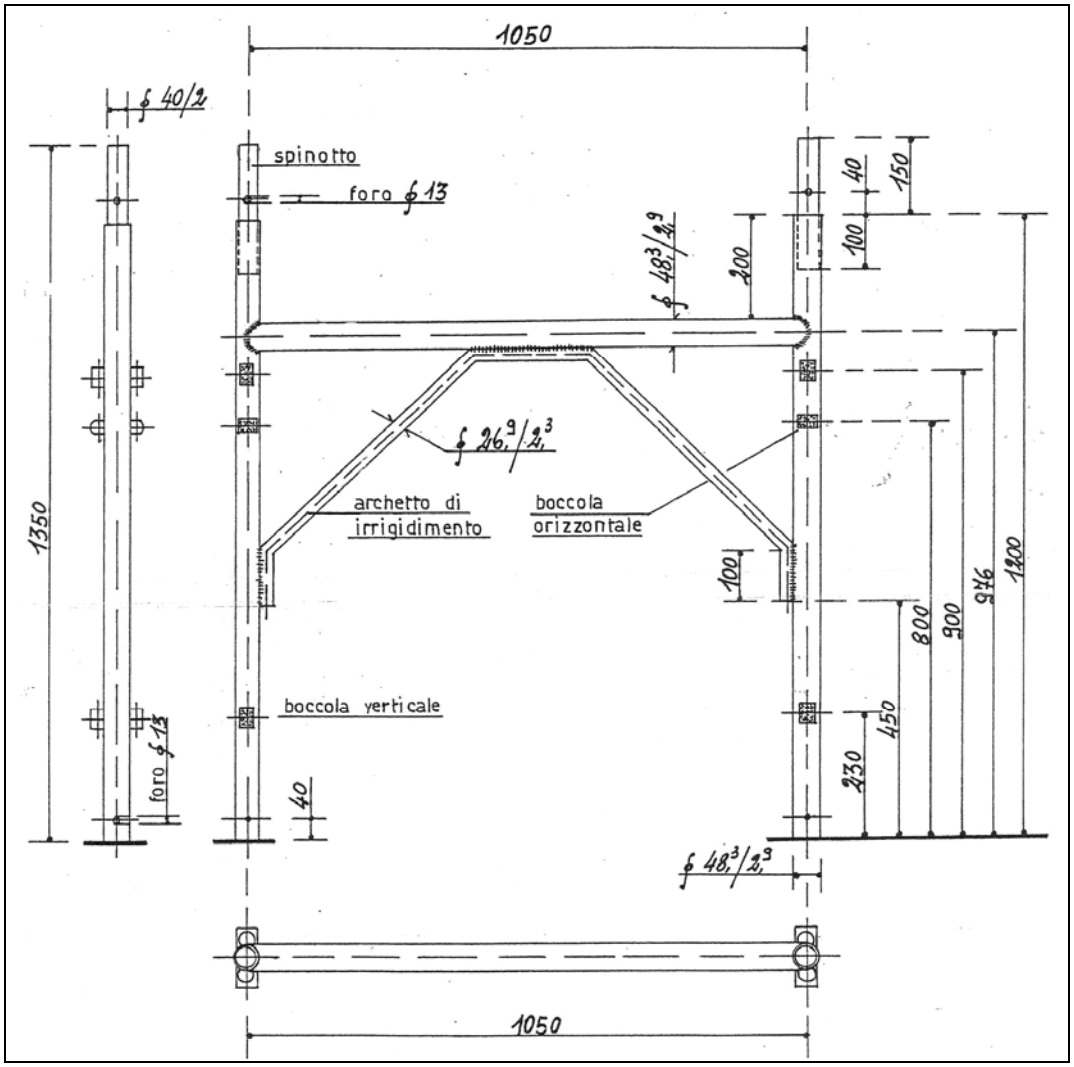


Figura A1.11 - Ponteggio Cb - Geometria del mezzo telaio

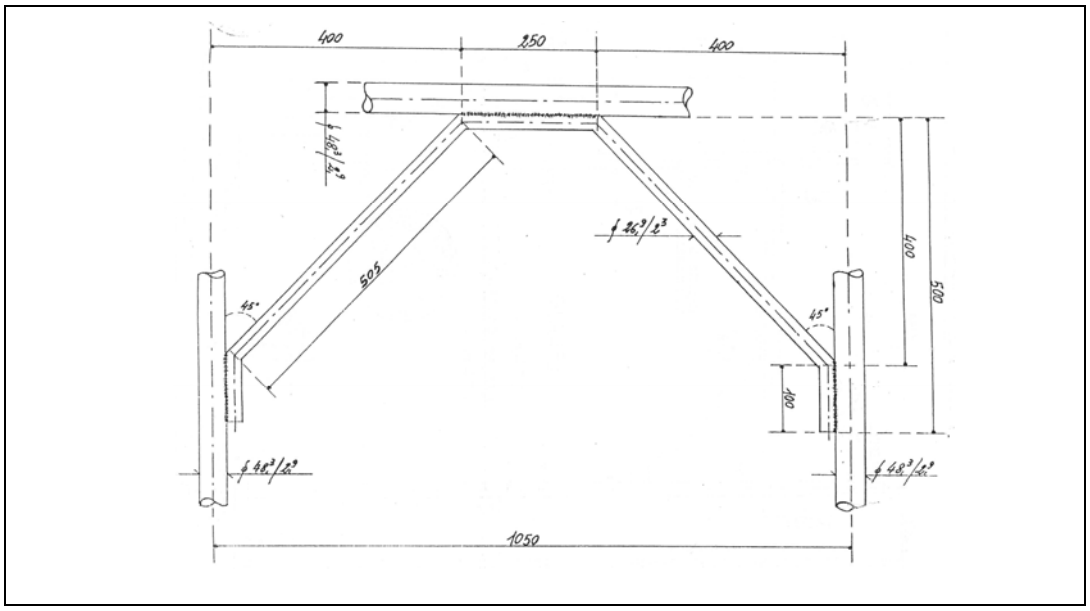


Figura A1.12 - Ponteggio Cs - Particolare dell'irrigidimento

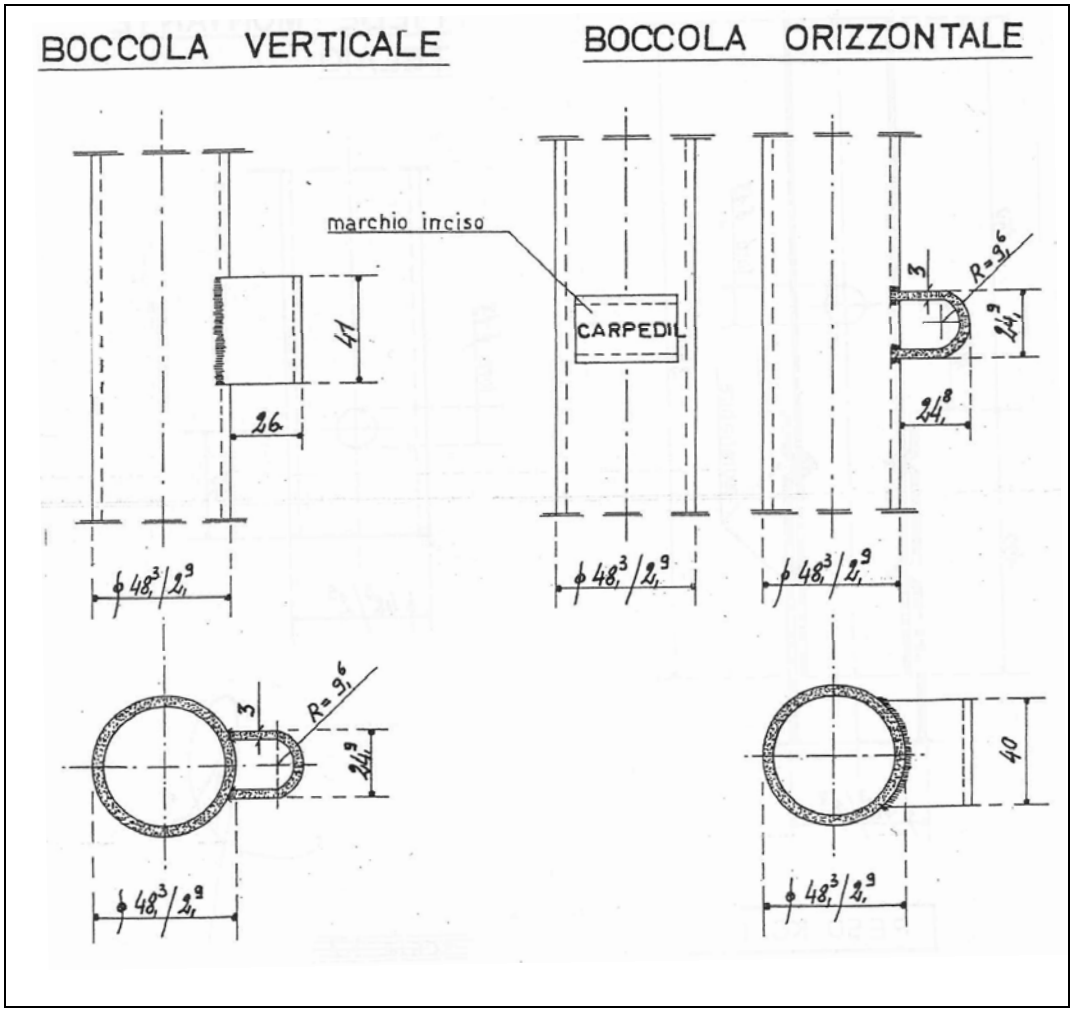


Figura A1.13 - Ponteggio Cb - Particolare della boccola

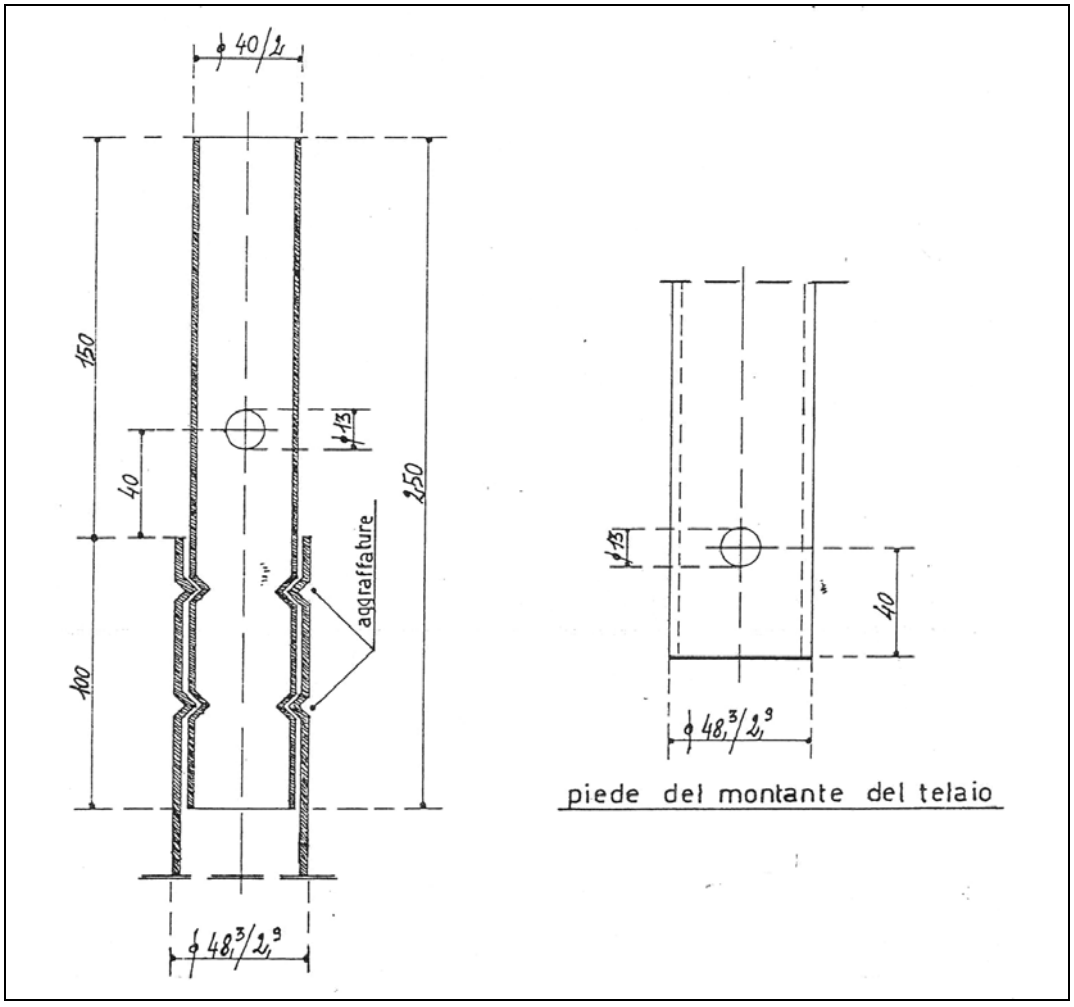


Figura A1.14 - Ponteggio Cb - Particolare della connessione tra telai

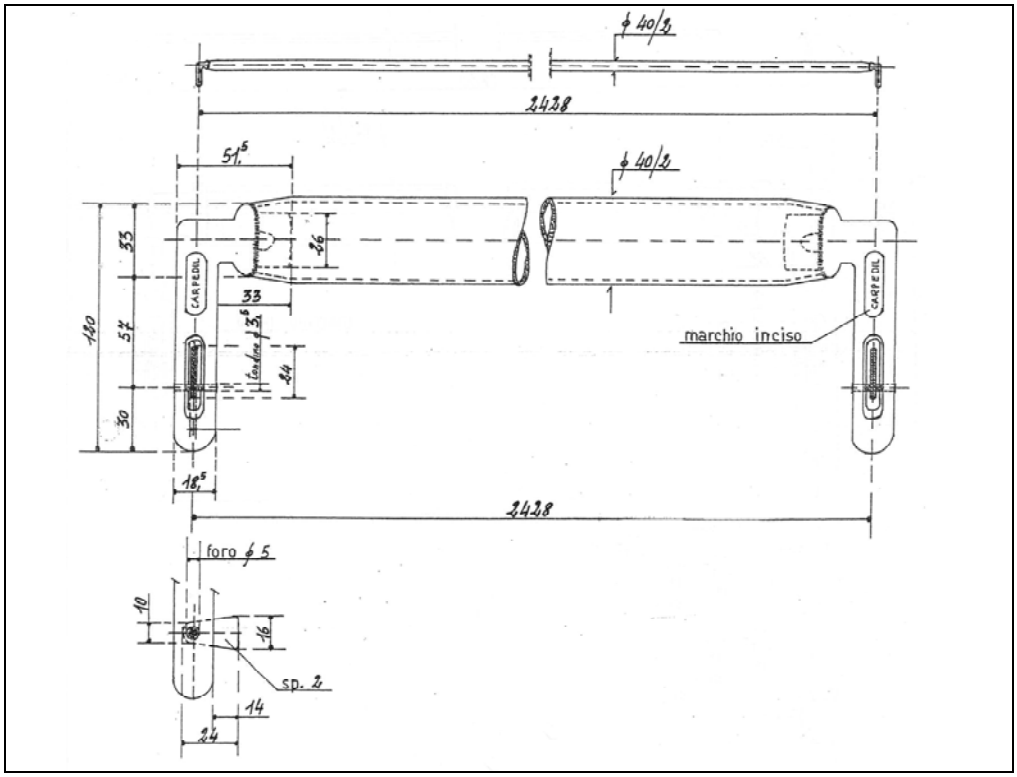


Figura A1.15 - Ponteggio Cb - Geometria del corrente

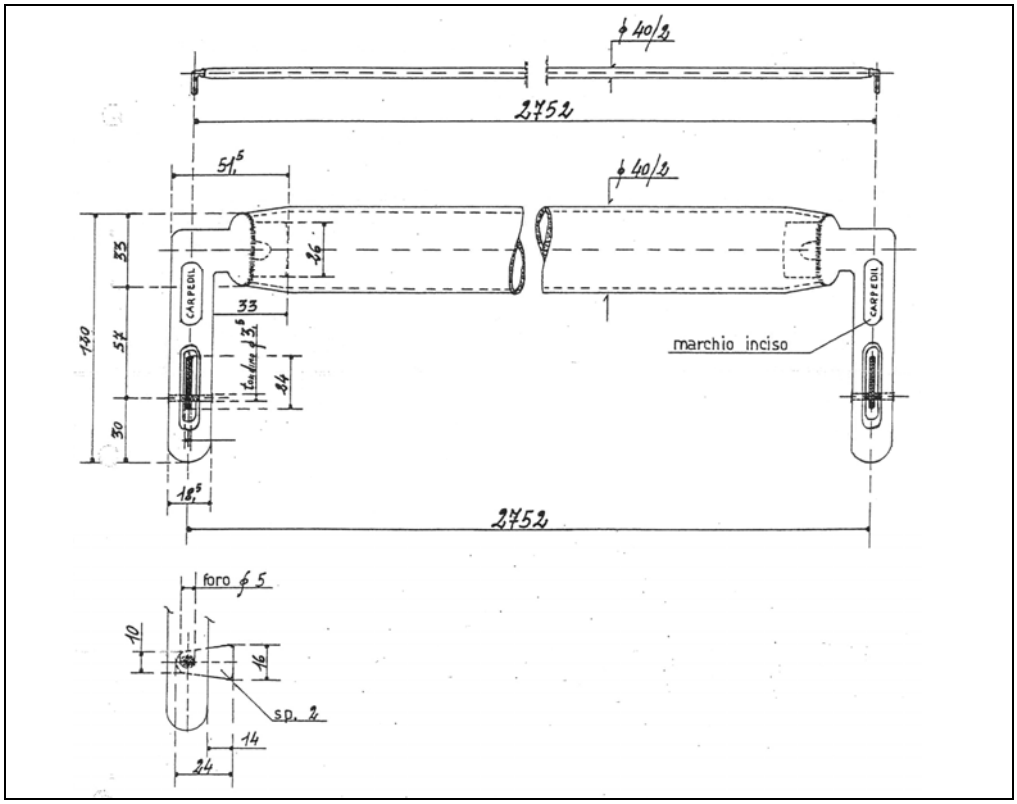


Figura A1.16 - Ponteggio Cb - Geometria del diagonale

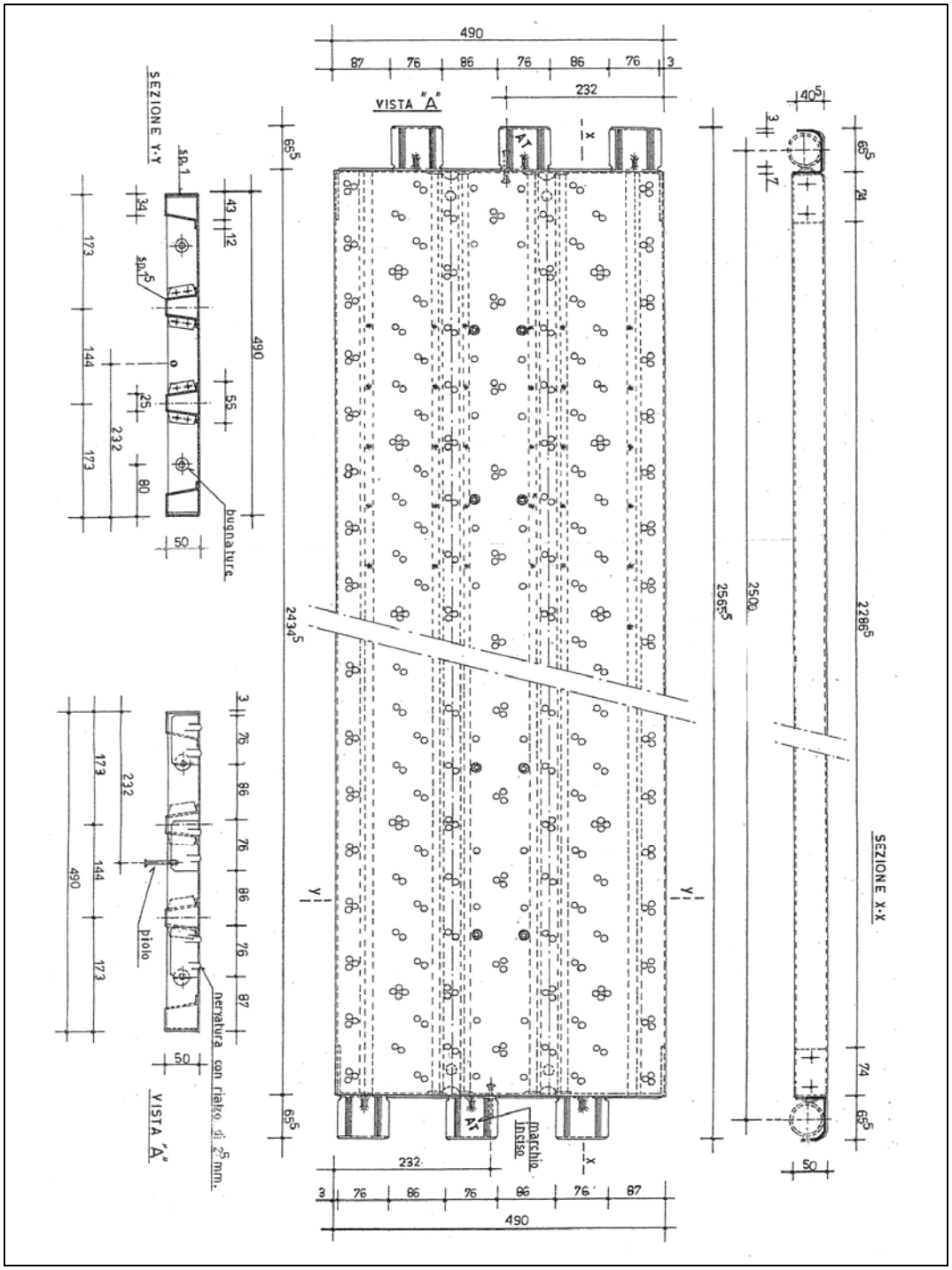


Figura A1.17 - Ponteggio Cb - Geometria delle tavole di impalcato

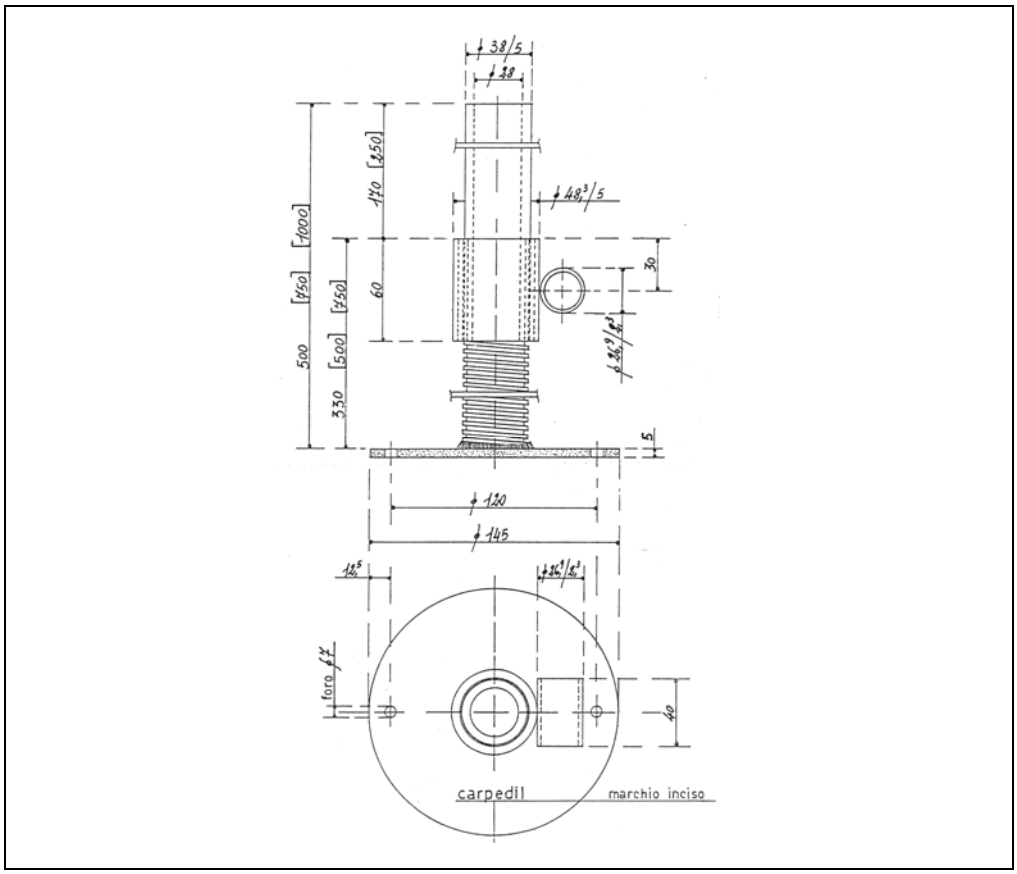


Figura A1.18 - Ponteggio Cs - Basetta regolabile

PONTEGGIO D

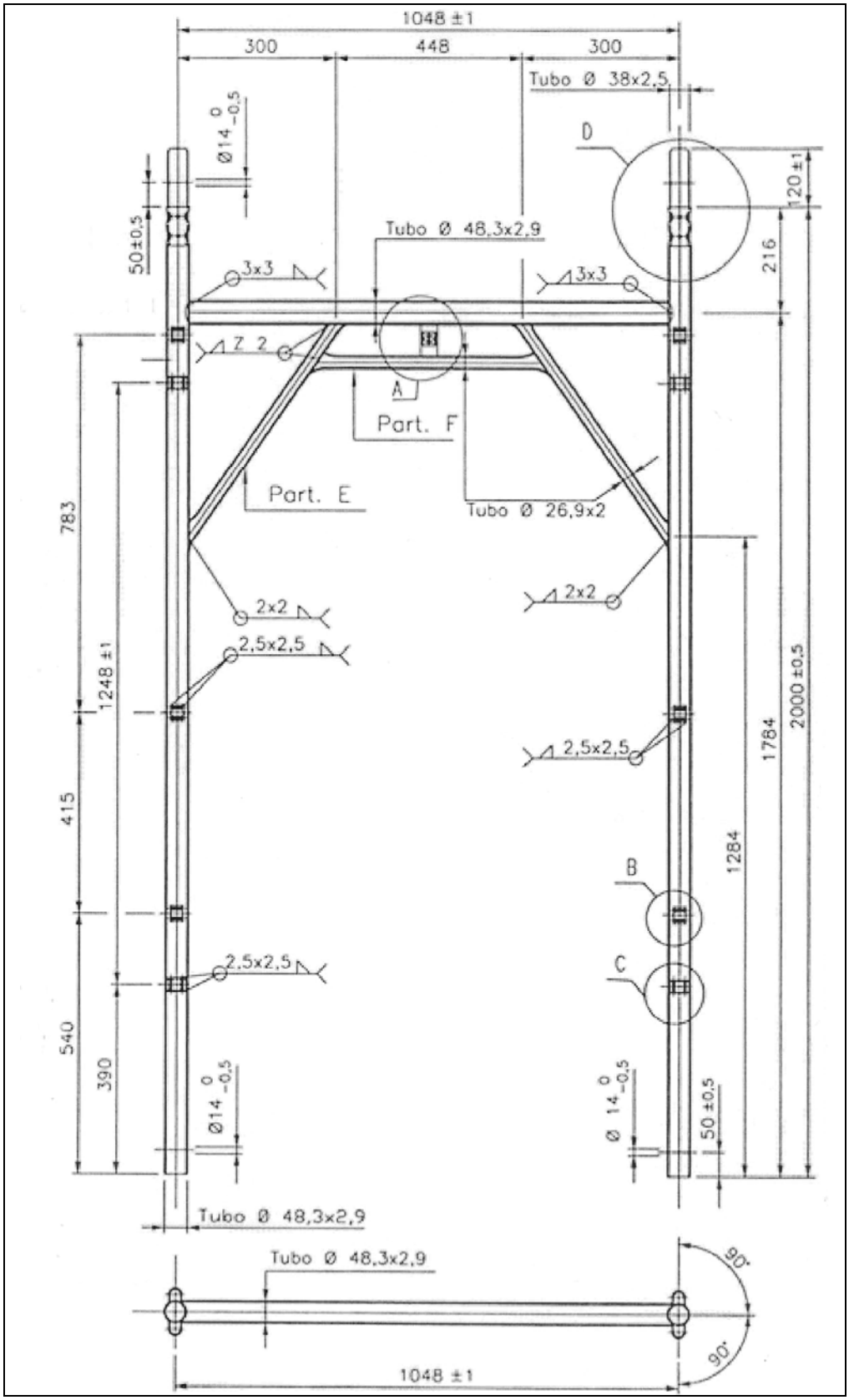


Figura A1.19 - Ponteggio D - Geometria del telaio

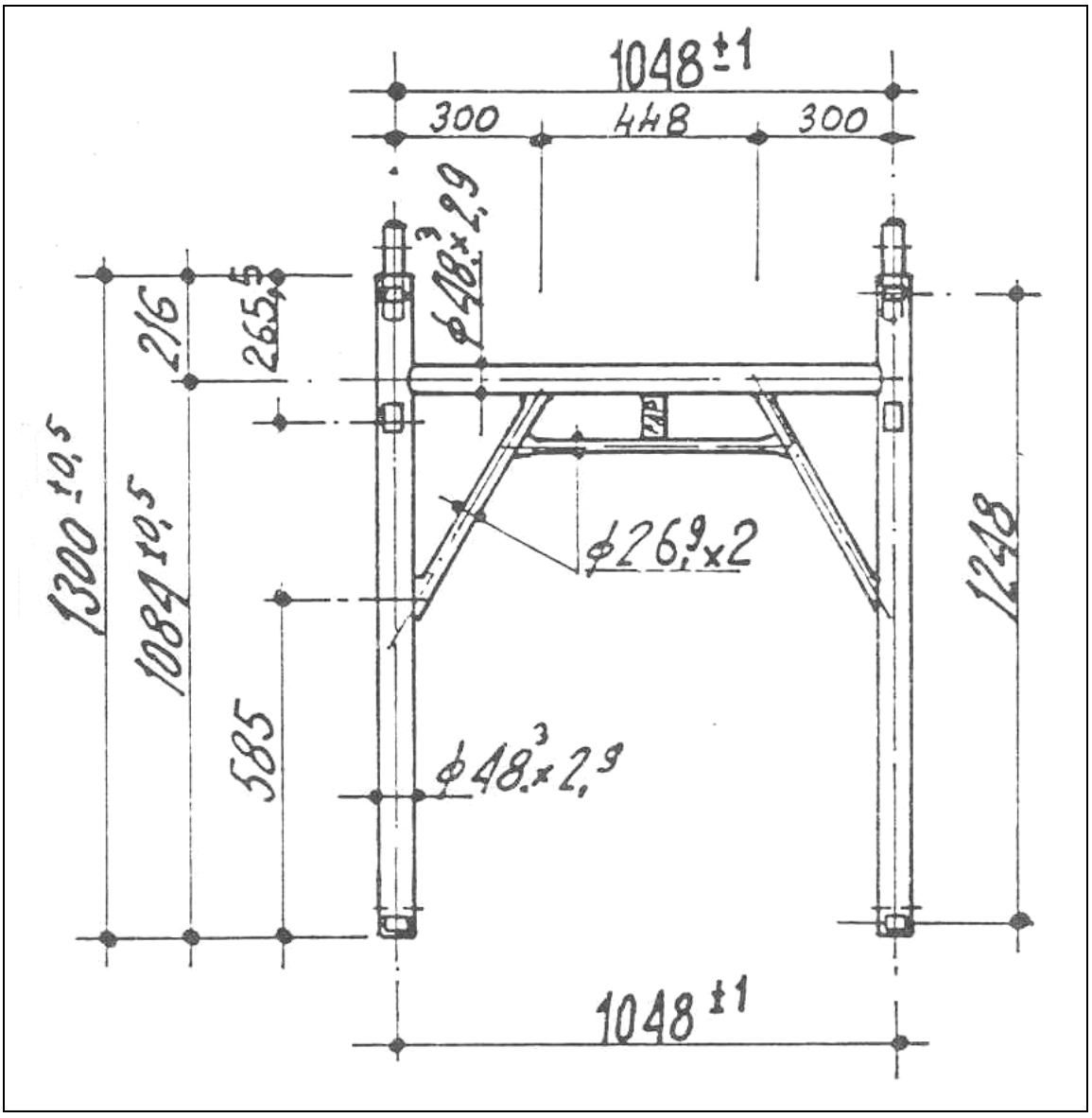


Figura A1.20 - Ponteggio D - Geometria del mezzo telaio

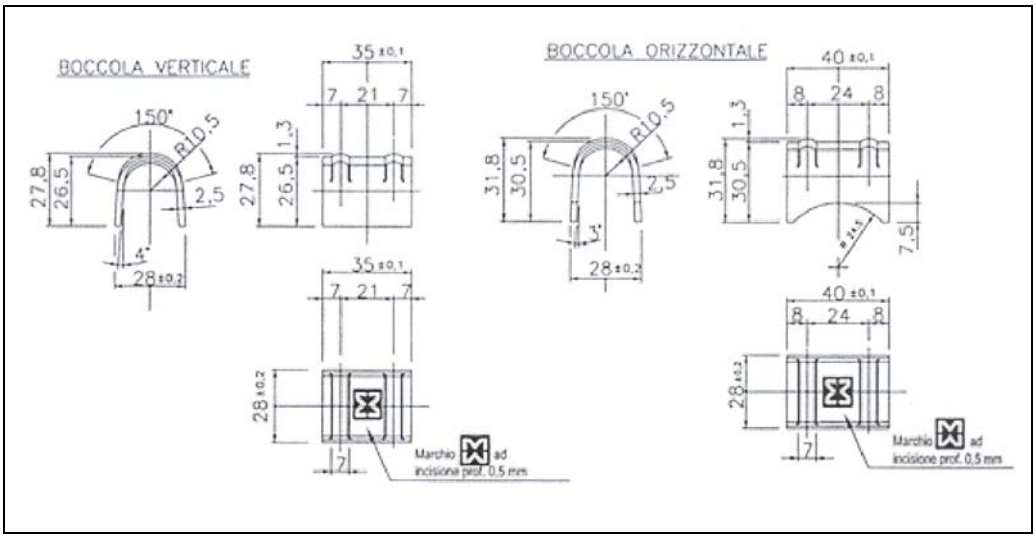


Figura A1.21 - Ponteggio D - Particolare della boccola

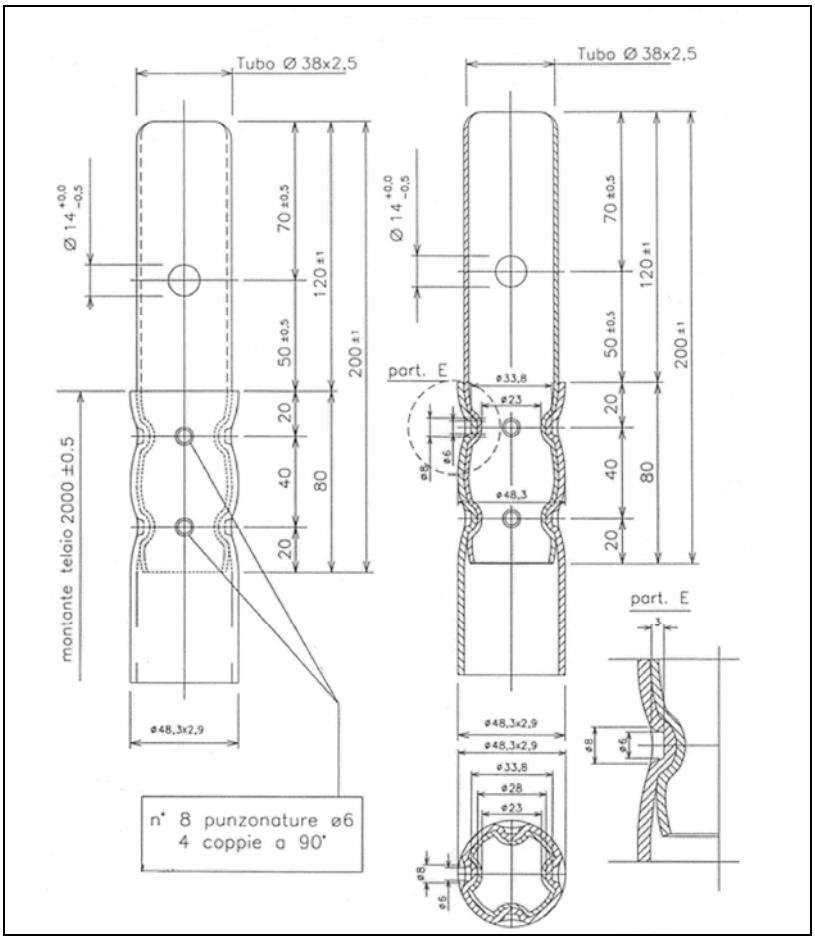


Figura A1.22 - Ponteggio D - Particolare della connessione tra telai

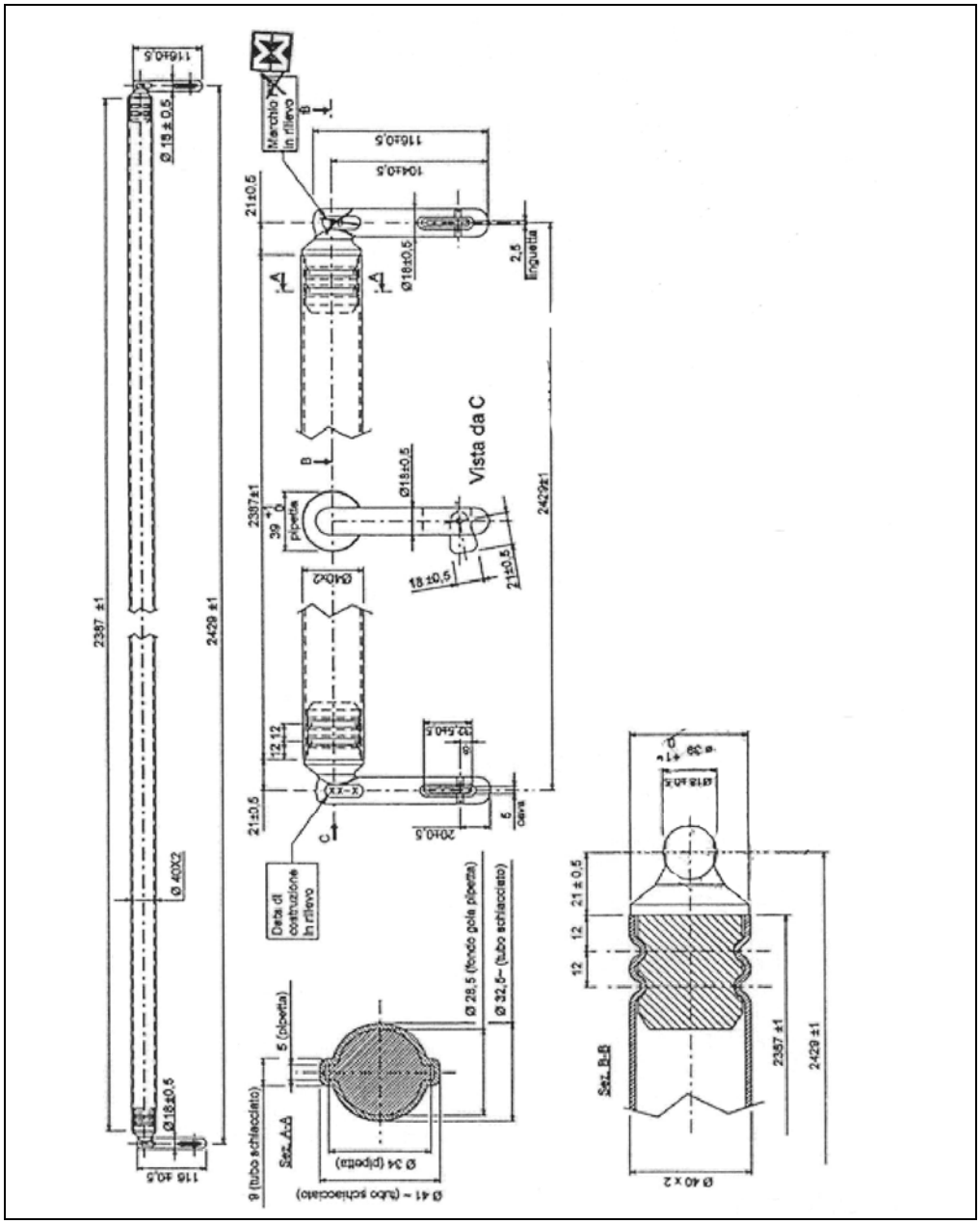


Figura A1.23 - Ponteggio D - Geometria del corrente

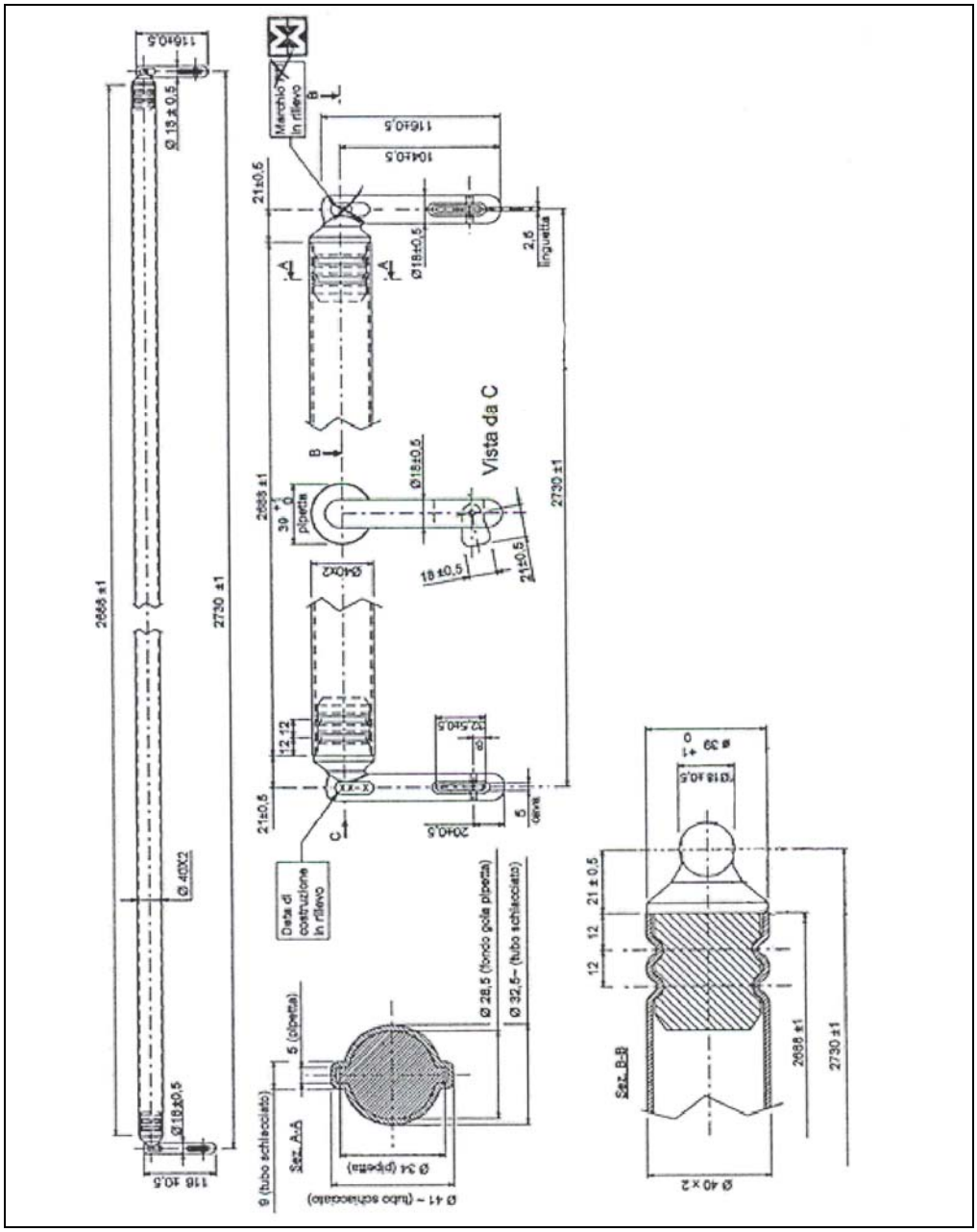


Figura A1.24 - Ponteggio D - Geometria del diagonale

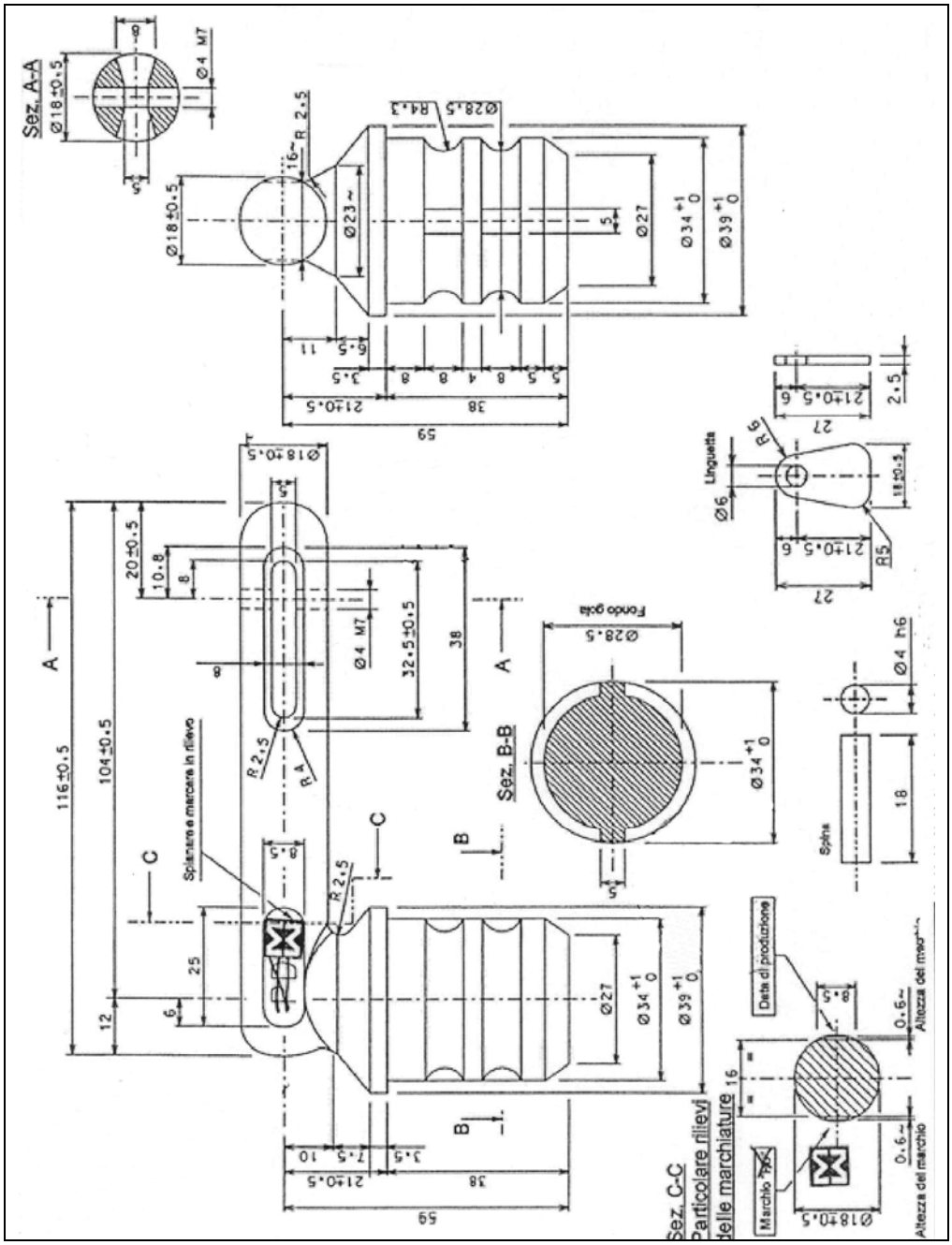


Figura A1.25 - Ponteggio D - Geometria della pipetta

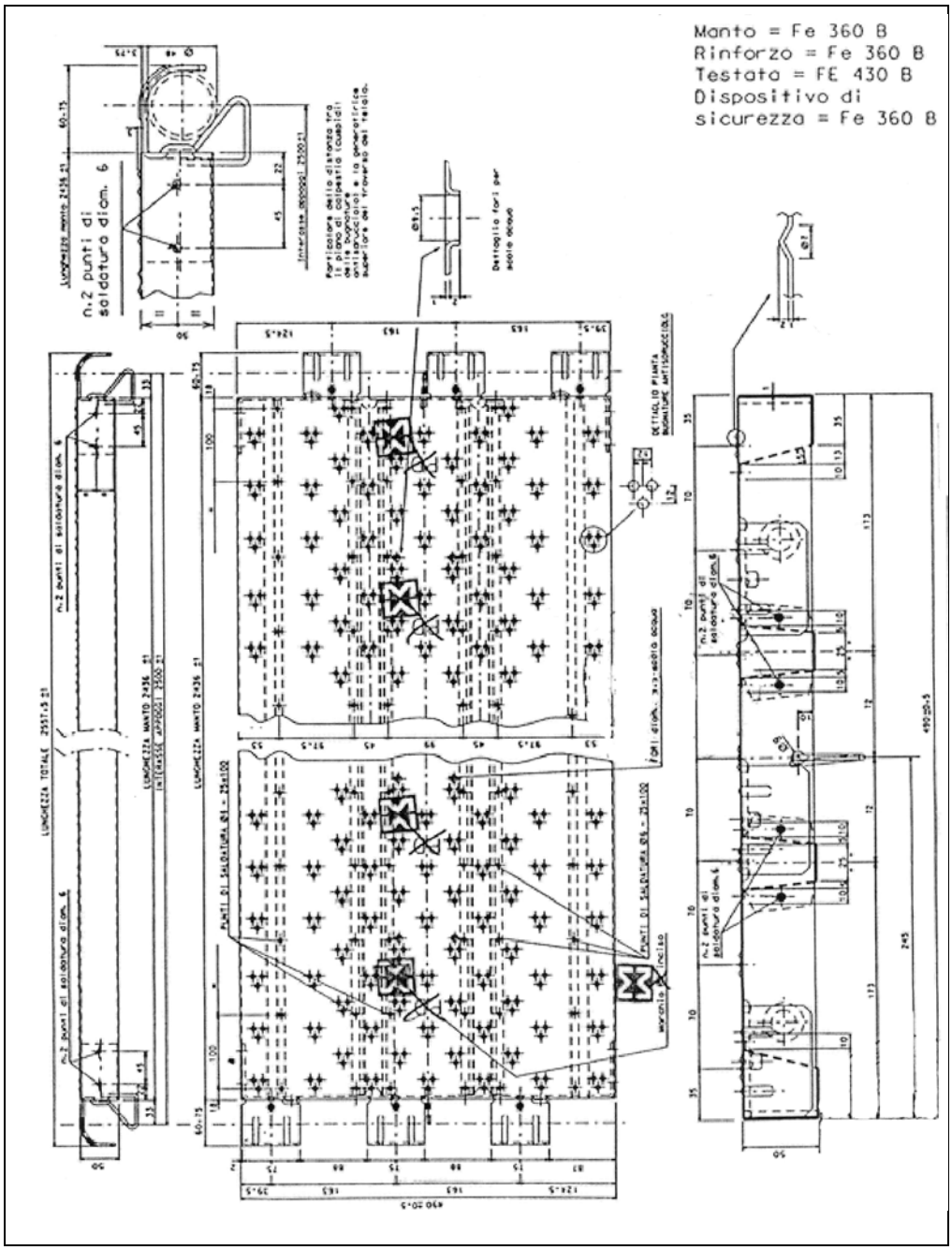


Figura A1.26 - Ponteggio D - Geometria delle tavole di impalcato

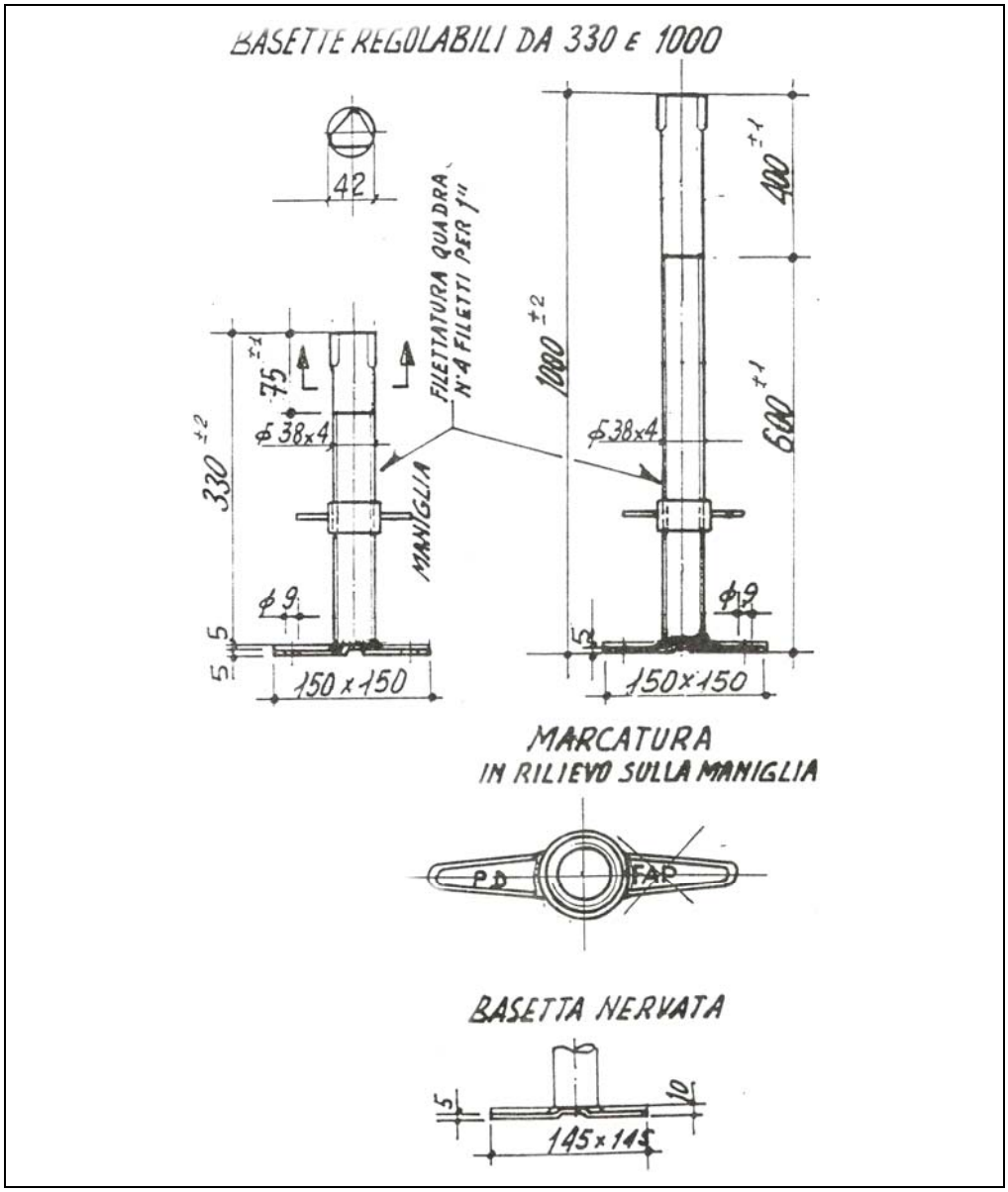


Figura A1.27 - Ponteggio D - Basetta regolabile

B1-5/DTS/05

I ponteggi metallici di facciata utilizzati nei cantieri temporanei o mobili.
Le nuove norme di prodotto: aspetti tecnici e legislativi

Relazione finale – Allegato 2

Autori: N. Baldassino, R. Zandonini

Affiliazione: Università degli Studi di Trento
Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale

Ricerca finanziata da:

Dipartimento Tecnologie di Sicurezza

10/02/2009

INTRODUZIONE

In questo allegato sono raccolti i risultati delle prove preliminari e delle elaborazioni che hanno permesso di determinare i valori dei carichi caratteristici e di progetto.
Il documento è diviso in tre parti, ciascuna delle quali relativa ad una delle tipologie di ponteggio analizzate, nell'ordine Cs, Cb e D. La struttura è la medesima per ciascuna delle tre parti. In ciascuna di esse, nell'ordine, sono raccolti:

- le leggi sperimentali, presentate in forma grafica come curve spostamento-azione assiale (Fig. A2.1-A2.6 per il ponteggio Cs, Fig. A2.7-A2.12 per il ponteggio Cb e Fig. A2.13-A2.24 per il ponteggio D);
- le funzioni interpolanti relative alle fasi di carico e di scarico (Tab. A2.1, A2.6 e A2.11 per i ponteggi Cs, Cb e D rispettivamente). Nell'ultima colonna delle tabelle è riportato il valore di R^2. Le tabelle distinguono tra il caso della sollecitazione di compressione e di trazione;
- il calcolo dei coefficienti $\overline{q_e}$ e γ_{R2}. A tal fine sono riportati i valori delle energie associate alla fase di carico (E_{l0}),e alla fase di scarico (E_{lu}) ed il loro rapporto q_e. (Tab. A2.2, A2.7 e A2.12 per i ponteggi Cs, Cb e D rispettivamente);
- il calcolo della resistenza ultima corretta ($r^c_{u,i}$) ottenuta modificando la resistenza ultima ($r^a_{u,i}$) attraverso l'effetto geometrico e l'effetto del materiale (Tab. A2.3, A2.8 e A2.13 per i ponteggi Cs, Cb e D rispettivamente);
- il calcolo della resistenza caratteristica di base ($R_{k,b}$) ottenuta utilizzando i valori della resistenza media a collasso (R_m), dallo scarto quadratico medio (s) e dal coefficiente k dipendente dalla distribuzione statistica e dalla numerosità dei campioni (Tab. A2.4, A2.9 e A2.14 per i ponteggi Cs, Cb e D, rispettivamente);
- il calcolo della resistenza caratteristica (R_k) e di progetto (R_d) ottenute utilizzando i valori della resistenza caratteristica di base ($R_{k,b}$), del coefficiente γ_{R2} e dei coefficienti di sicurezza γ_M e γ_F (Tab. A2. 5, A2.10 e A2.15 per i ponteggi Cs, Cb e D, rispettivamente).

Per una maggiore comprensione della procedura di elaborazione utilizzata e della simbologia adottata si rimanda al capitolo 2 della relazione.

PONTEGGIO Cs

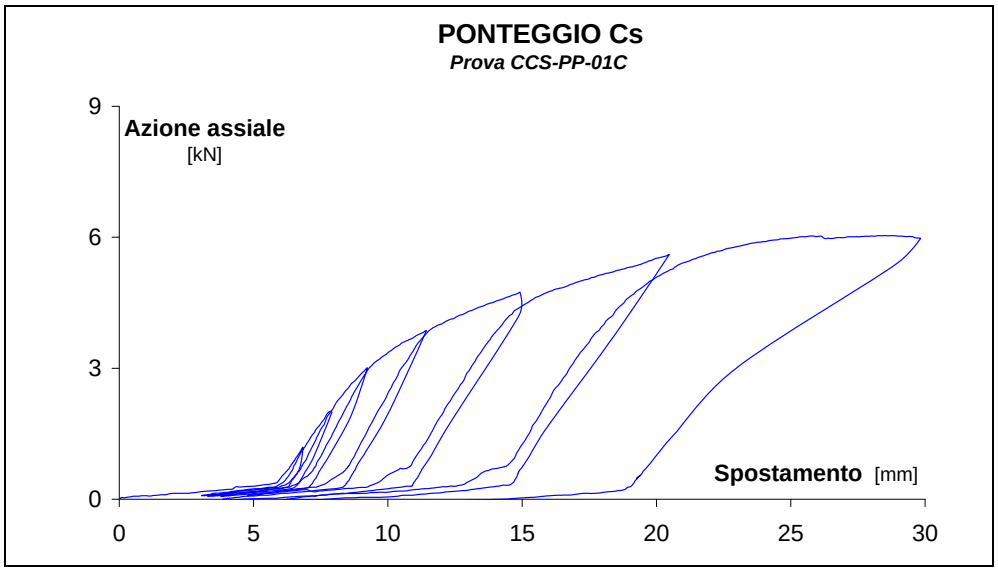


Figura A2.1 – Ponteggio Cs: riposta sperimentale relativa al campione CCS-PP-01C

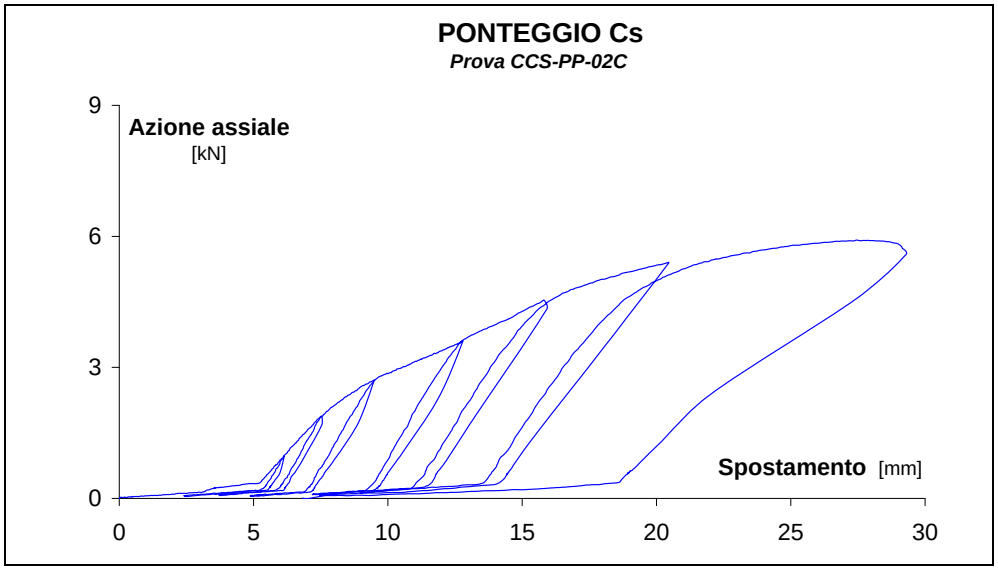


Figura A2.2 – Ponteggio Cs: riposta sperimentale relativa al campione CCS-PP-02C

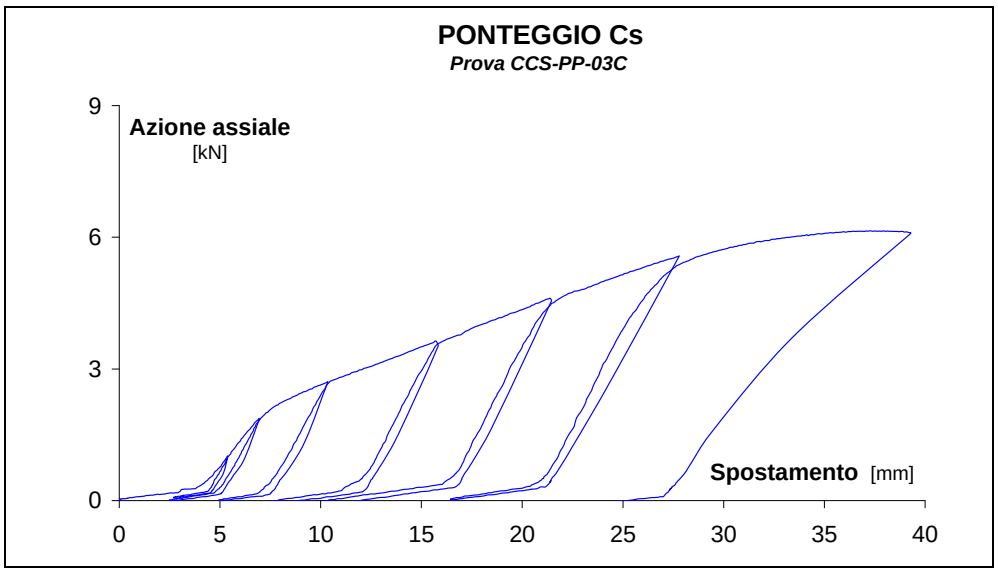


Figura A2.3 – Ponteggio Cs: riposta sperimentale relativa al campione CCB- PP-03C

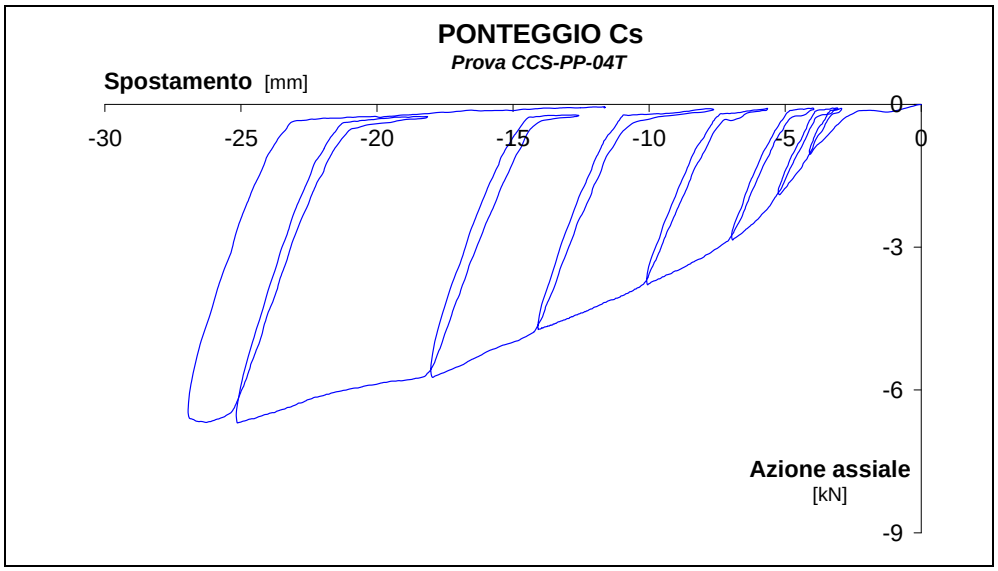


Figura A2.4 – Ponteggio Cs: riposta sperimentale relativa al campione CCS- PP-04T

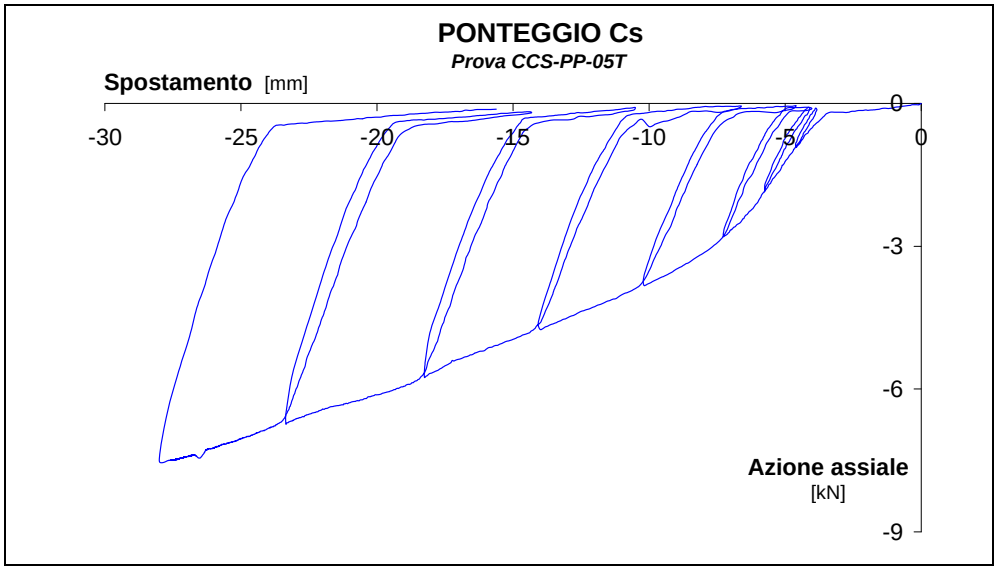


Figura A2.5 – Ponteggio Cs: riposta sperimentale relativa al campione CCB- PP-05T

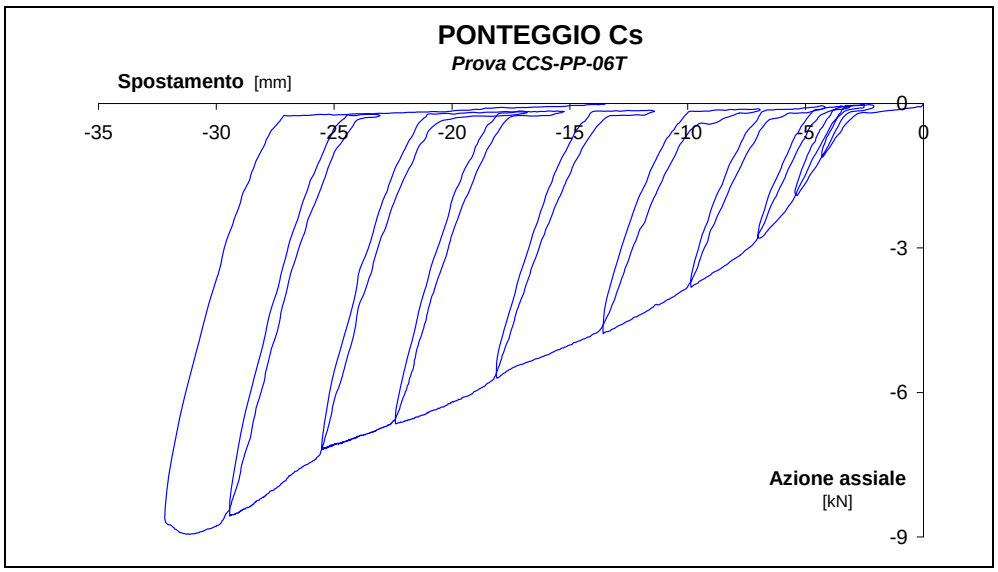


Figura A2.6 – Ponteggio Cs: riposta sperimentale relativa al campione CCB- PP-06T

Tabella A2.1 – Ponteggio Cs: funzioni interpolanti le fasi di carico e di scarico (prove preliminari)

Ponteggio Cs			
Prova	***Fase***	***Funzione interpolante***	***R^2***
CCS-PP-01C	carico	$y = 5{,}04664246E\text{-}07x^6 - 4{,}98243115E\text{-}05x^5 + 1{,}86438492E\text{-}03x^4 - 3{,}16874650E\text{-}02x^3 + 1{,}99001453E\text{-}01x^2 + 7{,}22645466E\text{-}01x - 6{,}28036799E+00$	0,999
	scarico	$y = 3{,}93964842E\text{-}03x^3 - 3{,}04649100E\text{-}01x^2 + 8{,}24731529E+00x - 7{,}35321620E+0$	1,000
CCS-PP-02C	carico	$y = -5{,}07924527E\text{-}07x^6 + 5{,}92295458E\text{-}05x^5 - 2{,}74796630E\text{-}03x^4 + 6{,}47245270E\text{-}02x^3 - 8{,}23169528E\text{-}01x^2 + 5{,}69597769E+00x - 1{,}44775410E+01$	0,999
	scarico	$y = 4{,}90678039E\text{-}01x - 8{,}70952742E+00$	0,998
CCS-PP-03C	carico	$y = 1{,}31940396E\text{-}06x^5 - 1{,}54991044E\text{-}04x^4 + 6{,}83263458E\text{-}03x^3 - 1{,}42175604E\text{-}01x^2 + 1{,}56359344E+00x - 4{,}17259150E+00$	0,999
	scarico	$y = -1{,}39088193E\text{-}02x^2 + 1{,}41682808E+00x - 2{,}81046610E+01$	1,000
CCS-PP-04T	carico	$y = 5{,}75061949E\text{-}05x^4 + 3{,}85624188E\text{-}03x^3 + 9{,}79602048E\text{-}02x^2 + 1{,}31205476E+00x + 2{,}80553439E+00$	0,998
	scarico	$y = -2{,}06544395E\text{-}01x^2 - 8{,}03644306E+00x - 7{,}78028279E+01$	0,999
CCS-PP-05T	carico	$y = 5{,}02178515E\text{-}05x^4 + 3{,}87762686E\text{-}03x^3 + 1{,}09926042E\text{-}01x^2 + 1{,}55862613E+00x + 4{,}16752192E+00$	0,999
	scarico	$y = -1{,}85994459E\text{-}01x^2 - 8{,}00510352E+00x - 8{,}55838601E+01$	0,999
CCS-PP-06T	carico	$y = 4{,}39859245E\text{-}07x^6 + 4{,}75463870E\text{-}05x^5 + 2{,}03041180E\text{-}03x^4 + 4{,}39091994E\text{-}02x^3 + 5{,}12625358E\text{-}01x^2 + 3{,}36993663E+00x + 6{,}60259593E+00$	0,997
	scarico	$y = -1{,}91682597E\text{-}01x^2 - 9{,}77186140E+00x - 1{,}24235077E+02$	0,999

Tabella A2.2 – Determinazione del coefficiente γ_{R2}

Ponteggio Cs						
Carico	Prova	E_{l0} [kNmm]	E_{lu} [kNmm]	q_e	$\overline{q_e}$	γ_{R2}
Compressione	CCS-PP-01C	103,74	37,58	2,76	2,87	1,20
	CCS-PP-02C	92,84	35,63	2,61		
	CCS-PP-03C	138,41	42,85	3,23		
Trazione	CCS-PP-04T	98,27	11,91	8,25	8,01	1,07
	CCS-PP-05T	119,39	14,69	8,13		
	CCS-PP-06T	149,87	19,55	7,67		

Tabella A2.3 – Determinazione della resistenza "corretta"

Ponteggio Cs					
Carico	Prova	$r^a_{u,i}$ [kN]	Effetto geometrico	Effetto materiale	$r^c_{u,i}$ [kN]
Compressione	CCS-PP-01C	6,038	1	1	6,038
	CCS-PP-02C	5,914	1	1	5,914
	CCS-PP-03C	6,147	1	1	6,147
Trazione	CCS-PP-04T	-6,683	1	1	-6,683
	CCS-PP-05T	-7,509	1	1	-7,509
	CCS-PP-06T	-8,944	1	1	-8,944

Tabella A2.4 – Determinazione della resistenza caratteristica di base

Ponteggio Cs				
Carico	R_m [kN]	s [kN]	k	$R_{k,b}$ [kN]
Compressione	1,797	0,0194	3,15	5,675
Trazione	2,036	0,0215	3,15	4,824

Tabella A2.5 – Determinazione della resistenza caratteristica e di progetto

Ponteggio Cs						
Carico	R_m [kN]	γ_{R2}	R_k [kN]	γ_M	γ_F	R_d [kN]
Compressione	5,675	1,20	4,716	1,10	1,50	2,858
Trazione	4,824	1,07	4,489	1,10	1,50	2,721

PONTEGGIO Cb

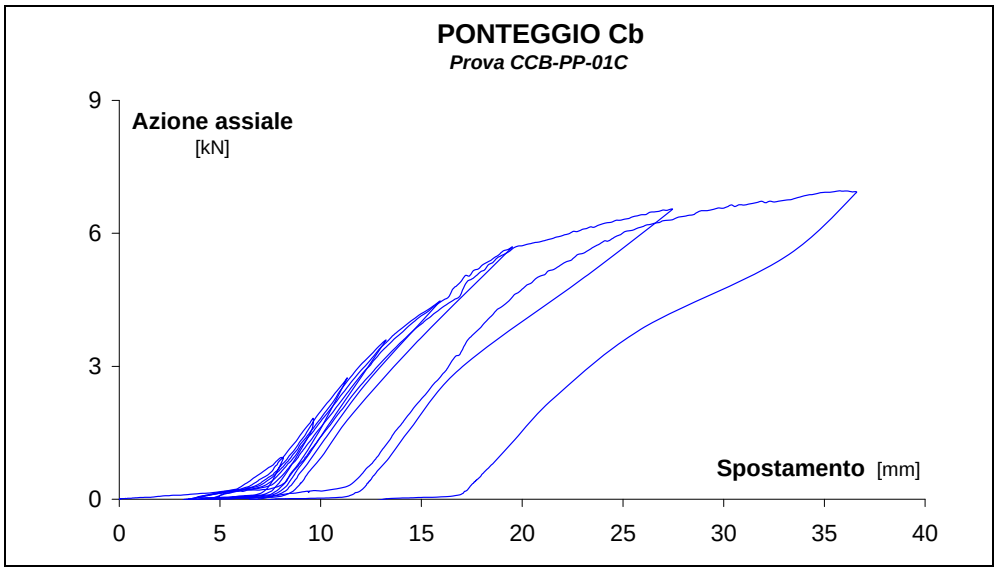


Figura A2.7 – Ponteggio Cb: riposta sperimentale relativa al campione CCB-PP-01C

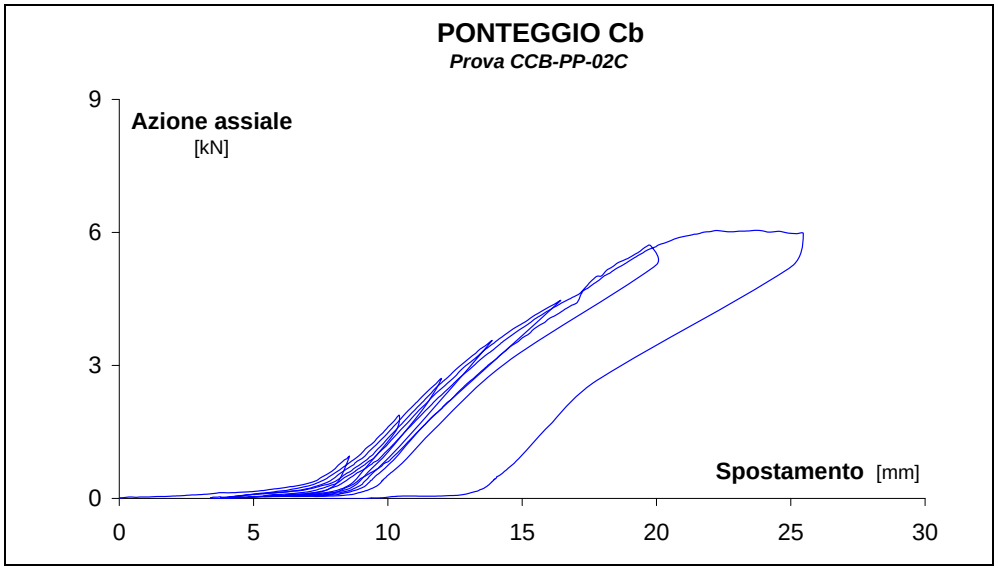


Figura A2.8 – Ponteggio Cb: riposta sperimentale relativa al campione CCB-PP-02C

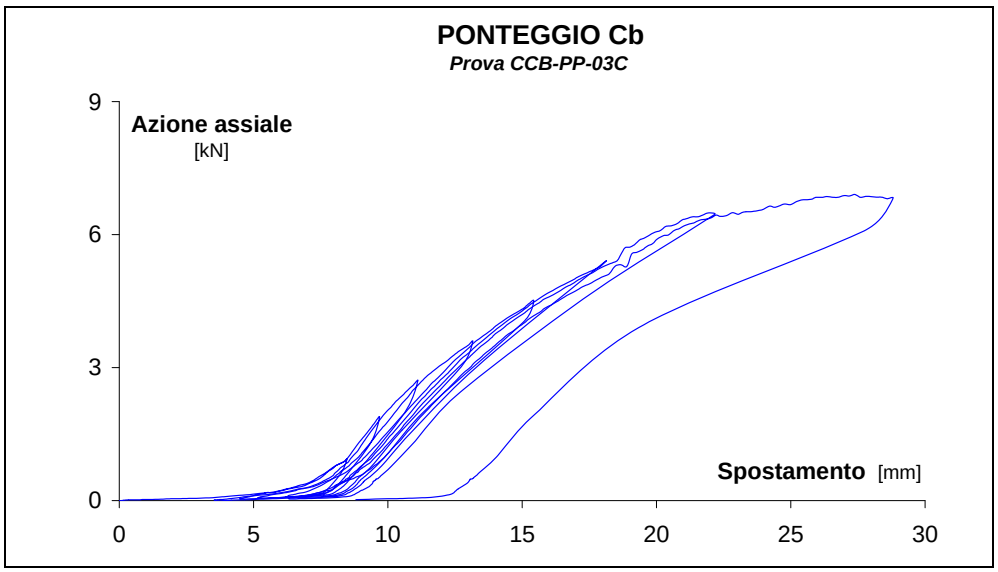


Figura A2.9 – Ponteggio Cb: riposta sperimentale relativa al campione CCB-PP-03C

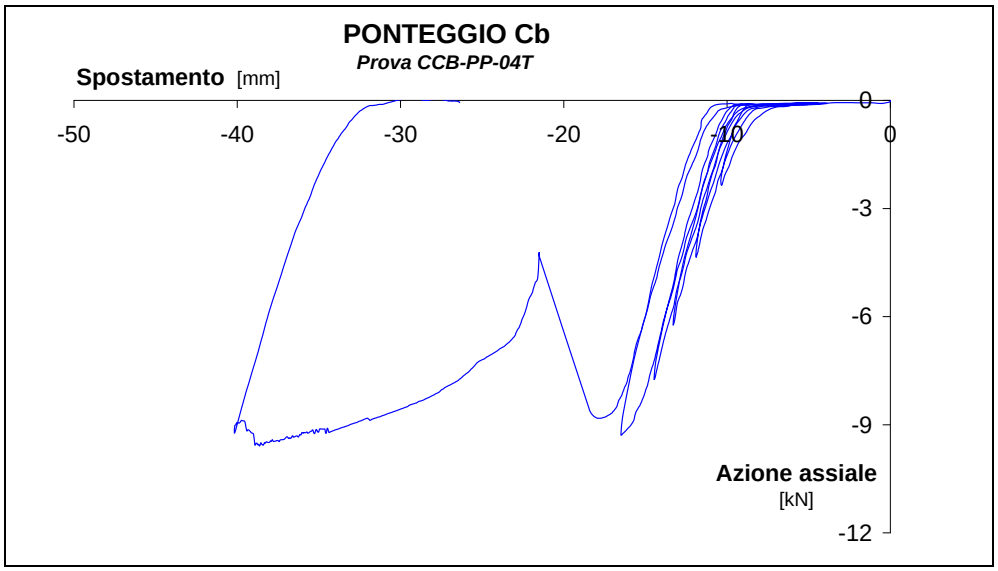


Figura A2.10 – Ponteggio Cb: riposta sperimentale relativa al campione CCB-PP-04T

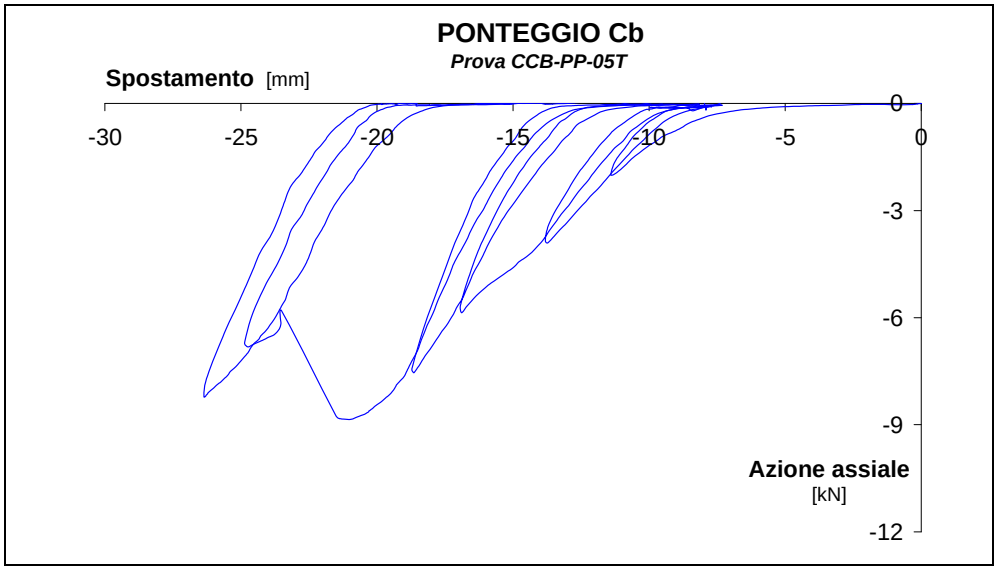


Figura A2.11 – Ponteggio Cb: riposta sperimentale relativa al campione CCB-PP-05T

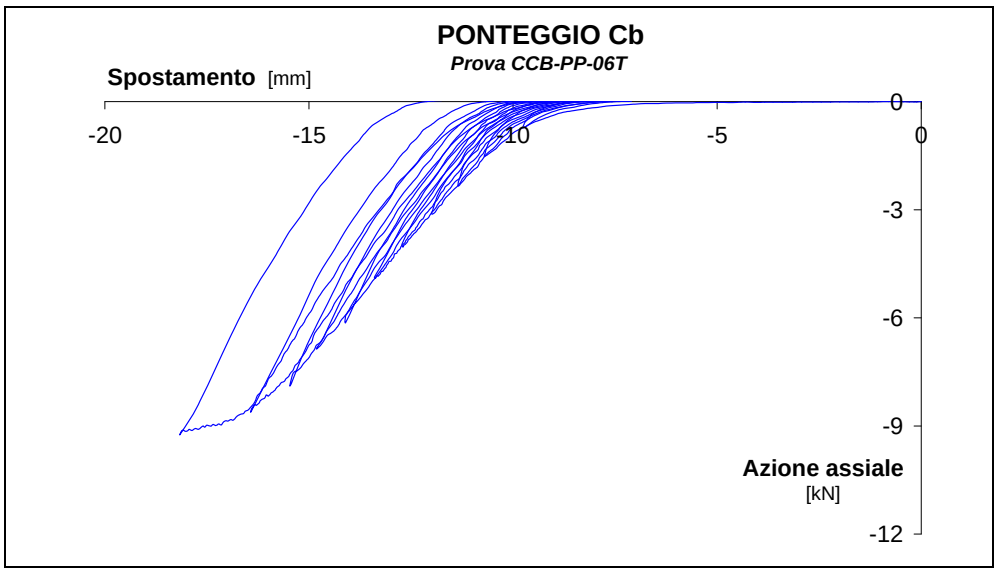


Figura A2.12 – Ponteggio Cb: riposta sperimentale relativa al campione CCB-PP-06T

Tabella A2.6 – Ponteggio Cb: funzioni interpolanti le fasi di carico e di scarico (prove preliminari)

Ponteggio Cb			
Prova	***Fase***	***Funzione interpolante***	***R^2***
CCB-PP-01C	carico	$y = -1{,}48676250E\text{-}06x^5 + 1{,}78490483E\text{-}04x^4 - 7{,}82103746E\text{-}03x^3 + 1{,}42906915E\text{-}01x^2 - 6{,}58879114E\text{-}01x + 4{,}67598036E\text{-}01$	0,999
	scarico	$y = -1{,}19969964E\text{-}05x^5 + 1{,}61982817E\text{-}03x^4 - 8{,}57728049E\text{-}02x^3 + 2{,}21309757E+00x^2 - 2{,}73364420E+01x + 1{,}28417515E+02$	1,000
CCB-PP-02C	carico	$y = -4{,}15077051E\text{-}06x^4 - 7{,}12476688E\text{-}04x^3 + 2{,}53056045E\text{-}02x^2 + 2{,}03765052E\text{-}01x - 2{,}17633828E+00$	0,999
	scarico	$y = -1{,}85220721E\text{-}02x^2 + 1{,}15709327E+00x - 1{,}21242173E+01$	0,999
CCB-PP-03C	carico	$y = 9{,}21610203E\text{-}06x^4 - 7{,}38782935E\text{-}04x^3 + 5{,}32139404E\text{-}03x^2 + 6{,}18765103E\text{-}01x - 4{,}09734505E+00$	0,998
	scarico	$y = 3{,}68528448E\text{-}04x^4 - 2{,}84456723E\text{-}02x^3 + 7{,}82152807E\text{-}01x^2 - 8{,}61843059E+00x + 3{,}22481887E+01$	1,000
CCB-PP-04T	carico	$y = 9{,}70363251E\text{-}04x^4 + 3{,}11812341E\text{-}02x^3 + 2{,}39616293E\text{-}01x^2 + 3{,}14280432E\text{-}01x - 1{,}22702075E+00$	0,999
	scarico	$y = 1{,}57720036E+00x + 1{,}78876570E+01$	0,992
CCB-PP-05T	carico	$y = 2{,}31329996E\text{-}05x^6 + 1{,}82565525E\text{-}03x^5 + 5{,}79848317E\text{-}02x^4 + 9{,}43321375E\text{-}01x^3 + 8{,}21578878E+00x^2 + 3{,}64378394E+01x + 6{,}45307308E+01$	0,999
	scarico	$y = -1{,}34027865E\text{-}01x^2 - 4{,}88143564E+00x - 4{,}36253596E+01$	0,999
CCB-PP-06T	carico	$y = 5{,}06097586E\text{-}04x^4 + 8{,}00331327E\text{-}03x^3 - 2{,}18185239E\text{-}01x^2 - 3{,}91596180E+00x - 1{,}53366081E+01$	1,000
	scarico	$y = -1{,}63548090E\text{-}01x^2 - 3{,}28747625E+00x - 1{,}53188202E+01$	1,000

Tabella A2.7 – Determinazione del coefficiente γ_{R2}

Ponteggio Cb						
Carico	Prova	E_{I0} [kNmm]	E_{Iu} [kNmm]	q_e	$\overline{q_e}$	γ_{R2}
Compressione	CCB-PP-01C	152,65	72,76	2,10	1,90	1,23
	CCB-PP-02C	74,01	37,91	1,95		
	CCB-PP-03C	103,85	62,61	1,66		
Trazione	CCB-PP-04T	40,26	20,95	1,92	2,26	1,22
	CCB-PP-05T	57,55	21,78	2,64		
	CCB-PP-06T	45,77	20,68	2,21		

Tabella A2.8 – Determinazione della resistenza “corretta”

Ponteggio Cb					
Carico	Prova	$r^a_{u,i}$ [kN]	Effetto geometrico	Effetto materiale	$r^c_{u,i}$ [kN]
Compressione	CCB-PP-01C	6,957	1	1	6,957
	CCB-PP-02C	6,049	1	1	6,049
	CCB-PP-03C	6,905	1	1	6,905
Trazione	CCB-PP-04T	-9,283	1	1	-9,283
	CCB-PP-05T	-8,856	1	1	-8,856
	CCB-PP-06T	-9,151	1	1	-9,151

Tabella A2.9 – Determinazione della resistenza caratteristica di base

Ponteggio Cb				
Carico	R_m [kN]	s [kN]	k	$R_{k,b}$ [kN]
Compressione	1,891	0,0787	3,15	5,170
Trazione	2,208	0,0006	3,15	8,428

Tabella A2.10 – Determinazione della resistenza caratteristica e di progetto

Ponteggio Cb						
Carico	$R_{k,b}$ [kN]	γ_{R2}	R_k [kN]	γ_M	γ_F	R_d [kN]
Compressione	5,170	1,23	4,212	1,10	1,50	2,553
Trazione	8,428	1,22	6,916	1,10	1,50	4,192

PONTEGGIO D

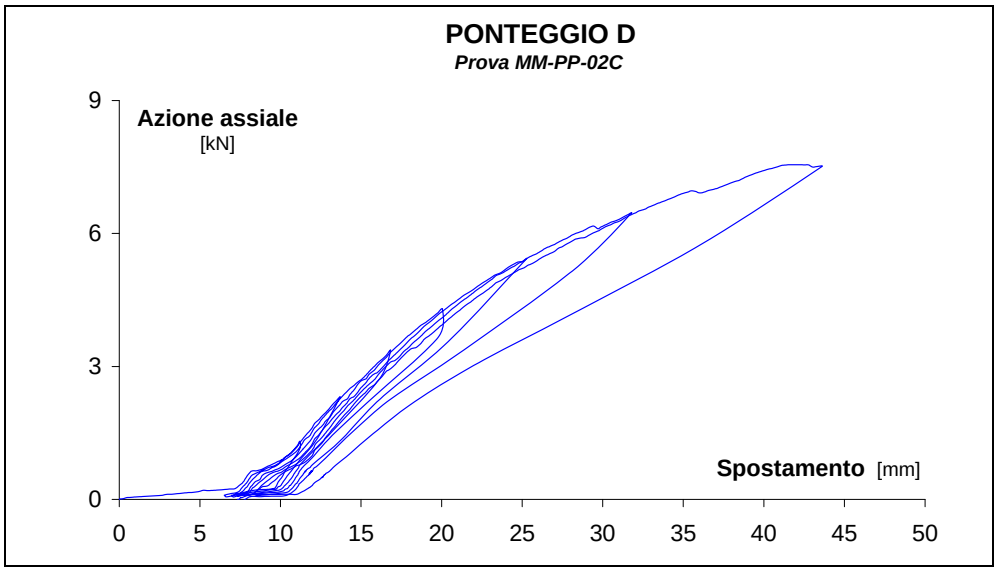


Figura A2.13 – Ponteggio D: riposta sperimentale relativa al campione MM-PP-02C

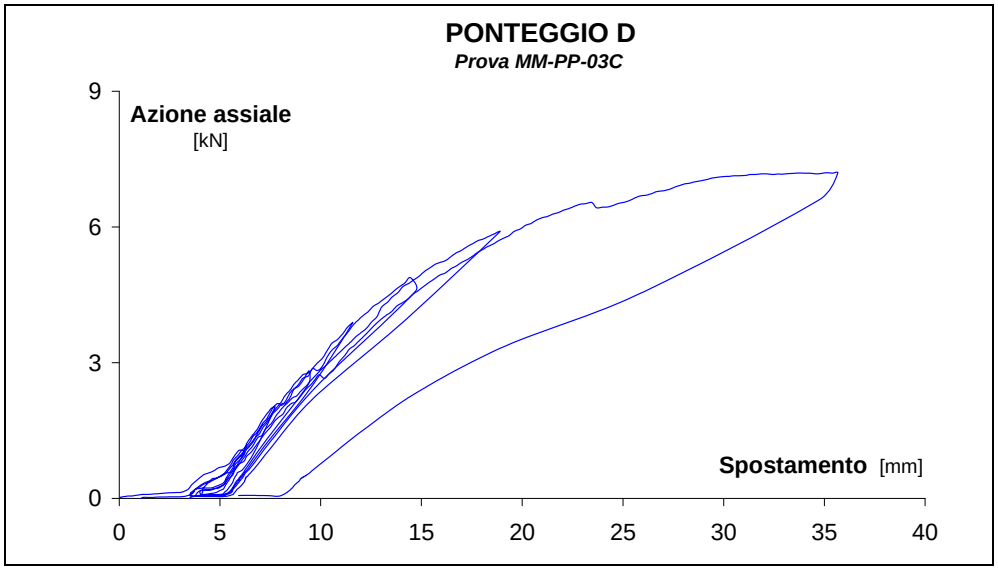


Figura A2.14 – Ponteggio D: riposta sperimentale relativa al campione MM-PP-03C

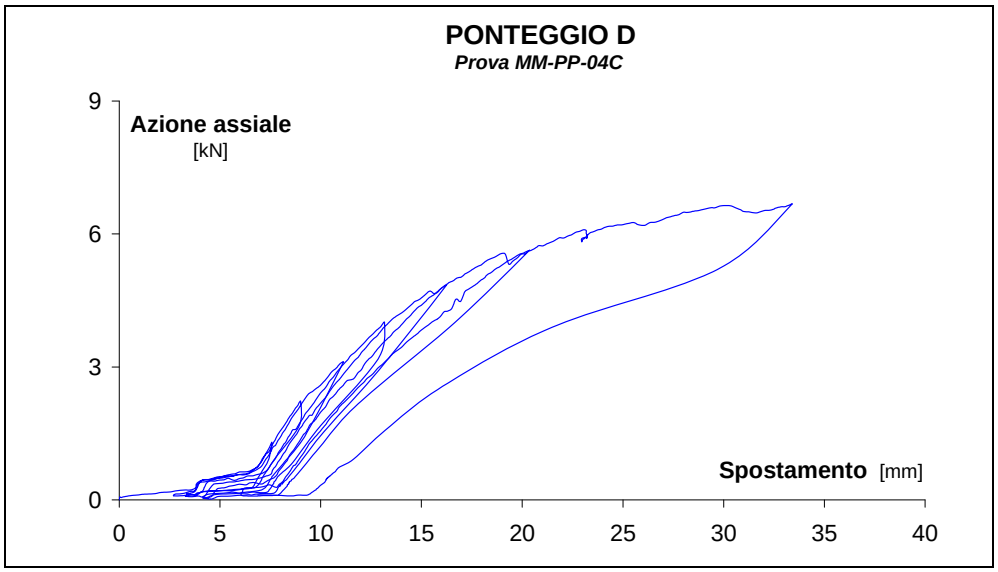


Figura A2.15 – Ponteggio D: riposta sperimentale relativa al campione MM-PP-04C

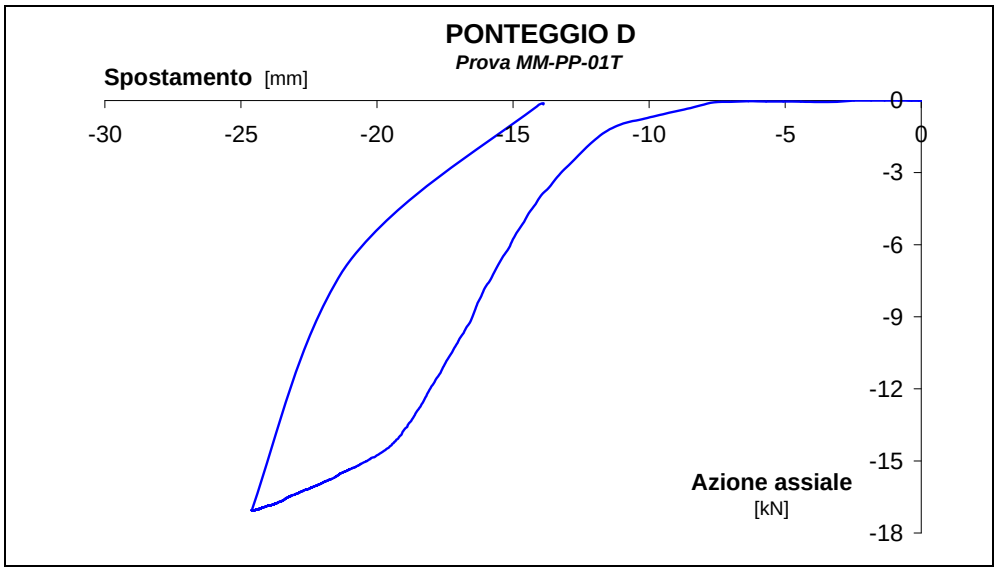


Figura A2.16 – Ponteggio D: riposta sperimentale della prova preliminare MM-PP-01T

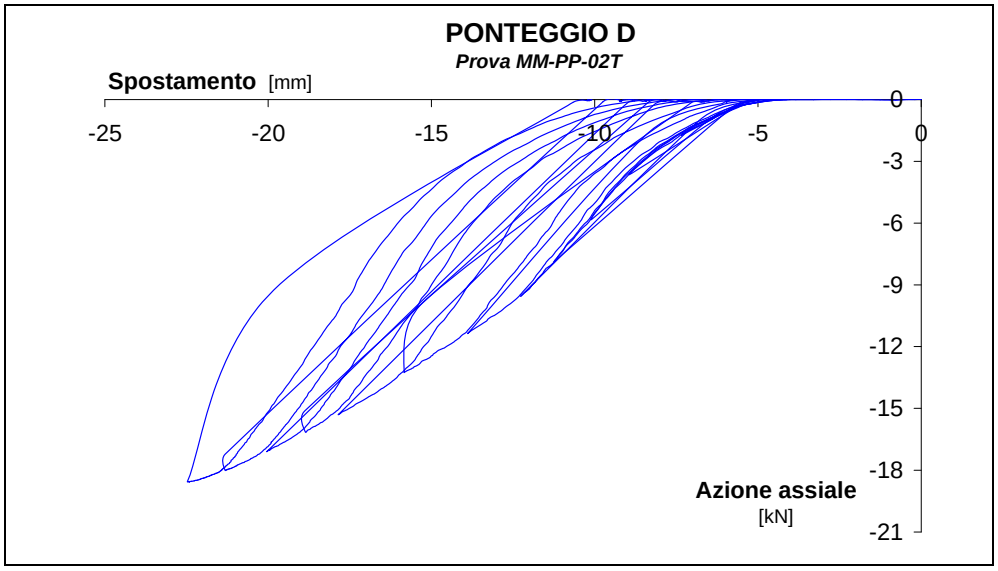


Figura A2.17 – Ponteggio D: riposta sperimentale della prova preliminare MM-PP-02T

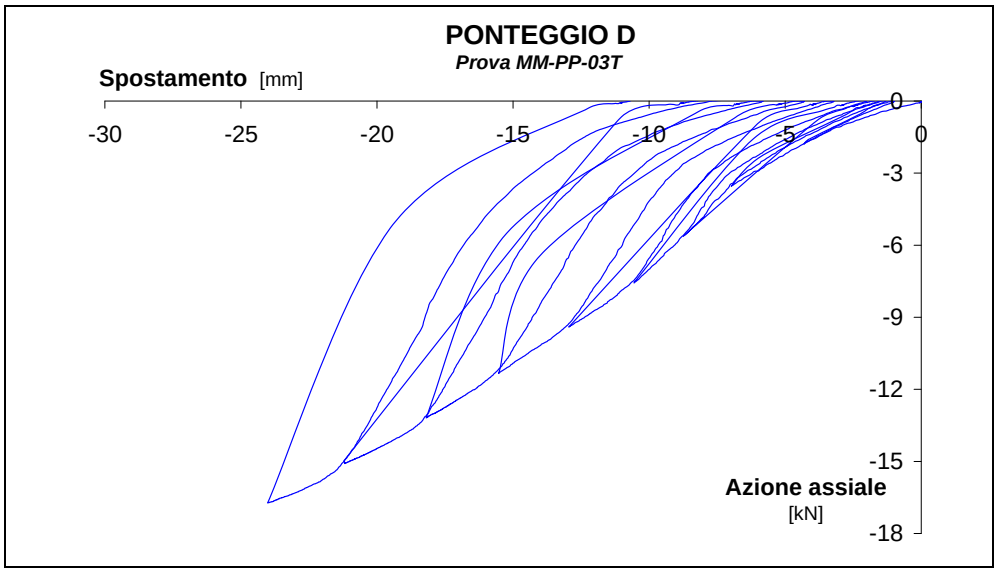


Figura A2.18 – Ponteggio D: riposta sperimentale della prova preliminare MM-PP-03T

Tabella A2.11 – Ponteggio D: funzioni interpolanti le fasi di carico e di scarico (prove preliminari)

Ponteggio D			
Prova	***Fase***	***Funzione interpolante***	***R^2***
MM-PP-02C	carico	$y = -1{,}90311395E\text{-}09x^6 - 2{,}38289680E\text{-}07x^5 + 5{,}31635836E\text{-}05x^4 - 2{,}98959357E\text{-}03x^3 + 6{,}65490248E\text{-}02x^2 - 2{,}80040749E\text{-}01x - 4{,}56064629E\text{-}01$	1,000
	scarico	$y = -2{,}69793040E\text{-}07x^5 + 3{,}36029668E\text{-}05x^4 - 1{,}38955199E\text{-}03x^3 + 1{,}80542334E\text{-}02x^2 + 3{,}16231977E\text{-}01x - 4{,}35011529E+00$	1,000
MM-PP-03C	carico	$y = 4{,}87469808E\text{-}08x^6 - 7{,}53752955E\text{-}06x^5 + 4{,}44823905E\text{-}04x^4 - 1{,}25326117E\text{-}02x^3 + 1{,}62117577E\text{-}01x^2 - 4{,}40819643E\text{-}01x + 9{,}14485138E\text{-}02$	0,999
	scarico	$y = 3{,}42223393E\text{-}04x^3 - 2{,}44983256E\text{-}02x^2 + 7{,}63818020E\text{-}01x - 4{,}72506696E+00$	1,000
MM-PP-04C	carico	$y = -4{,}91877162E\text{-}08x^6 + 5{,}10484946E\text{-}06x^5 - 2{,}16266904E\text{-}04x^4 + 5{,}28370232E\text{-}03x^3 - 9{,}77236468E\text{-}02x^2 + 1{,}50042491E+00x - 6{,}17833648E+00$	0,999
	scarico	$y = 9{,}90376096E\text{-}04x^3 - 6{,}84941809E\text{-}02x^2 + 1{,}72613220E+00x - 1{,}15089507E+01$	0,999
MM-PP-01T	carico	$y = 6{,}53395442E\text{-}05x^6 + 7{,}21670932E\text{-}03x^5 + 3{,}25523279E\text{-}01x^4 + 7{,}65591821E+00x^3 + 9{,}88161922E+01x^2 + 6{,}64304663E+02x + 1{,}82026994E+03$	1,000
	scarico	$y = 9{,}34550169E\text{-}01x + 1{,}28783733E+01$	1,000
MM-PP-02T	carico	$y = -1{,}76443926E\text{-}04x^4 - 1{,}08937930E\text{-}02x^3 - 2{,}03309475E\text{-}01x^2 + 1{,}38928494E\text{-}03x + 5{,}40389409E+00$	0,999
	scarico	$y = 9{,}93423736E\text{-}01x + 1{,}04510674E+01$	1,000
MM-PP-03T	carico	$y = -8{,}97955748E\text{-}05x^4 - 5{,}34541575E\text{-}03x^3 - 9{,}97503719E\text{-}02x^2 + 1{,}65855989E\text{-}01x + 4{,}23251563E\text{-}01$	0,999
	scarico	$y = 2{,}49447768E+00x + 4{,}31864567E+01$	1,000

Tabella A2.12 – Determinazione del coefficiente γ_{R2}

Ponteggio D						
Carico	Prova	E_{I0} [kNmm]	E_{Iu} [kNmm]	q_e	$\overline{q_e}$	γ_{R2}
Compressione	MM-PP-02C	166,34	119,01	1,40	1,39	1,24
	MM-PP-03C	114,85	96,42	1,19		
	MM-PP-04C	133,80	84,98	1,57		
Trazione	MM-PP-01T	197,58	56,12	3,52	3,04	1,20
	MM-PP-02T	169,96	54,73	3,11		
	MM-PP-03T	176,39	71,01	2,48		

Tabella A2.13 – Determinazione della resistenza "corretta"

Ponteggio D					
Carico	Prova	$r^a_{u,i}$ [kN]	Effetto geometrico	Effetto materiale	$r^c_{u,i}$ [kN]
Compressione	MM-PP-02C	7,552	1	1	7,552
	MM-PP-03C	7,200	1	1	7,200
	MM-PP-04C	6,674	1	1	6,674
Trazione	MM-PP-01T	-18,567	1	1	-18,567
	MM-PP-02T	-16,732	1	1	-16,732
	MM-PP-03T	-17,067	1	1	-17,067

Tabella A2.14 – Determinazione della resistenza caratteristica di base

Ponteggio D				
Carico	R_m [kN]	s [kN]	k	$R_{k,b}$ [kN]
Compressione	1,965	0,0624	3,15	5,861
Trazione	2,859	0,0553	3,15	14,652

Tabella A2.15 – Determinazione della resistenza caratteristica e di progetto

Ponteggio D						
Carico	R_m [kN]	γ_{R2}	Rk [kN]	γ_M	γ_F	R_d [kN]
Compressione	5,861	1,24	4,725	1,10	1,50	2,864
Trazione	14,652	1,20	12,220	1,10	1,50	7,406

B1-5/DTS/05

I ponteggi metallici di facciata utilizzati nei cantieri temporanei o mobili.
Le nuove norme di prodotto: aspetti tecnici e legislativi

Relazione finale – Allegato 3

Autori: N. Baldassino, R. Zandonini

Affiliazione: Università degli Studi di Trento
Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale

Ricerca finanziata da:

Dipartimento Tecnologie di Sicurezza

10/02/2009

INTRODUZIONE

In questo allegato sono raccolti i risultati delle prove cicliche e delle elaborazioni che hanno permesso la determinazione delle leggi semplificate spostamento-azione assiale del diagonale.
Il documento è diviso in tre parti, ciascuna delle quali relativa ad una delle tipologie di ponteggio analizzate, nell'ordine Cs, Cb e D. La struttura è la medesima per ciascuna delle tre parti. In ciascuna di esse, nell'ordine, sono raccolti:

- le leggi sperimentali presentate in forma grafica come curve spostamento-azione assiale (Fig. A3.1-A3.6 per il ponteggio Cs, Fig. A3.19-A3.24 per il ponteggio Cb e Fig. A3.37-A3.42 per il ponteggio D);
- le funzioni interpolanti relative alle fasi di carico e di scarico associate ai tre cicli svolti nell'intervallo R_d^+/R_d^- (Tab. A3.1-A3.6 per il ponteggio Cs, Tab. A3.16-A3.21 per il ponteggio Cs e Tab. A3.31-36 per il ponteggio D). Nell'ultima colonna delle tabelle è riportato il valore di R^2. Le tabelle distinguono tra il caso della sollecitazione di compressione e di trazione;
- il riepilogo delle grandezze significative relative ai cicli svolti negli intervalli di carico R_d^+/R_d^- e R_k^+/R_k^- rispettivamente (d_0, k_{Rd}, R_d, s_{Rk}, R_k) (Tab. A3.7-A3.12 per il ponteggio Cs, Tab. A3.22-A3.27 per il ponteggio Cs e Tab. A3.37-A3.42 per il ponteggio D). Nelle medesime tabelle sono riportati i valori medi delle grandezze e le equazioni delle rette che permettono di descrivere il comportamento del campione nell'intervallo 0-R_d e R_d-R_k. I dati sono raccolti distinguendo tra il carico di compressione e di trazione;
- il confronto tra le leggi sperimentali e la pertinente legge semplificata spostamento-azione assiale (Fig. A3.7-A3.12 per il ponteggio Cs, Fig. A3.25-A3.30 per il ponteggio Cb e Fig. A3.43-A3.48 per il ponteggio D);
- il riepilogo delle grandezze che caratterizzano ciascuna prova ciclica (scorrimento iniziale medio ($\overline{d_0}$), pendenza media nell'intervallo 0-R_d ($\overline{k_{Rd}}$), valore medio del carico associato ai tre cicli nell'intervallo 0-R_d ($\overline{R_d}$), valore medio del massimo carico raggiunto nei cicli compiuti nell'intervallo 0-R_k ($\overline{R_k}$), valor medio dello spostamento associato al carico caratteristico ($\overline{s_{Rk}}$)). Sono inoltre riportati i risultati delle elaborazioni svolte sui dati delle prove cicliche (scorrimento medio iniziale ($\overline{\overline{d_0}}$), pendenza media nell'intervallo 0-R_d ($\overline{\overline{k_{Rd}}}$),valor medio della resistenza di progetto ($\overline{\overline{R_d}}$), valori medi della resistenza caratteristica ($\overline{\overline{R_k}}$) e dello spostamento ad essa associato ($\overline{\overline{s_{Rk}}}$)) (Tab. A3.13, A3.28, A3.43 per i ponteggi Cs, Cb e D, rispettivamente);
- i risultati del test necessario alla verifica dell'utilizzabilità della medesima pendenza nell'intervallo 0-R_d per carichi positivi e per carichi negativi (Tab. A3.14, A3.29 e A3.44 per i ponteggi Cs, Cb e D rispettivamente);
- l'equazione della curva globale media spostamento-azione assiale (Tab. A3.15, A3.30 e A3.45 per i ponteggi Cs, Cb e D, rispettivamente);
- il confronto tra le risposte sperimentali e la legge media globale spostamento-azione assiale (Fig. A3.13-A3.18 per il ponteggio Cs, Fig. A3.31-A3.36 e per il ponteggio b e Fig. A3.49 –A3.54 per il ponteggio D).

Per una maggiore comprensione della procedura di elaborazione utilizzata e della simbologia adottata si rimanda al capitolo 2 della relazione.

PONTEGGIO Cs

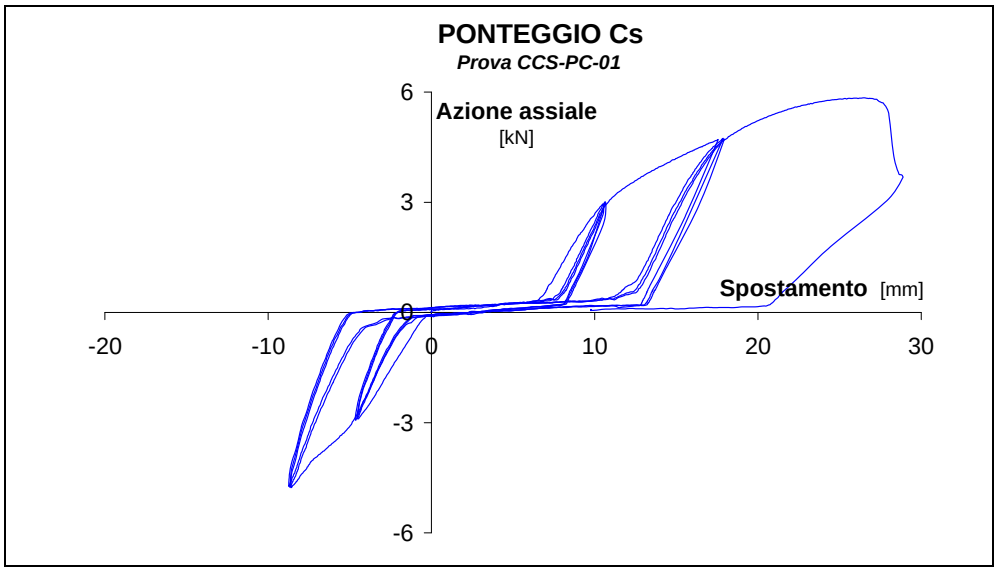


Figura A3.1 – Ponteggio Cs: riposta sperimentale relativa al campione CCS-PC-01

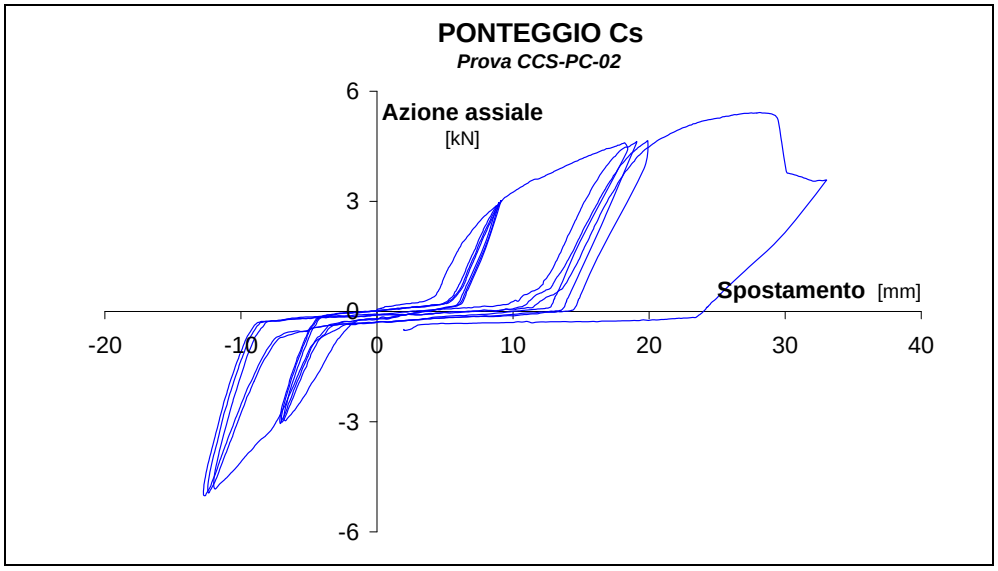


Figura A3.2 – Ponteggio Cs: riposta sperimentale relativa al campione CCS-PC-02

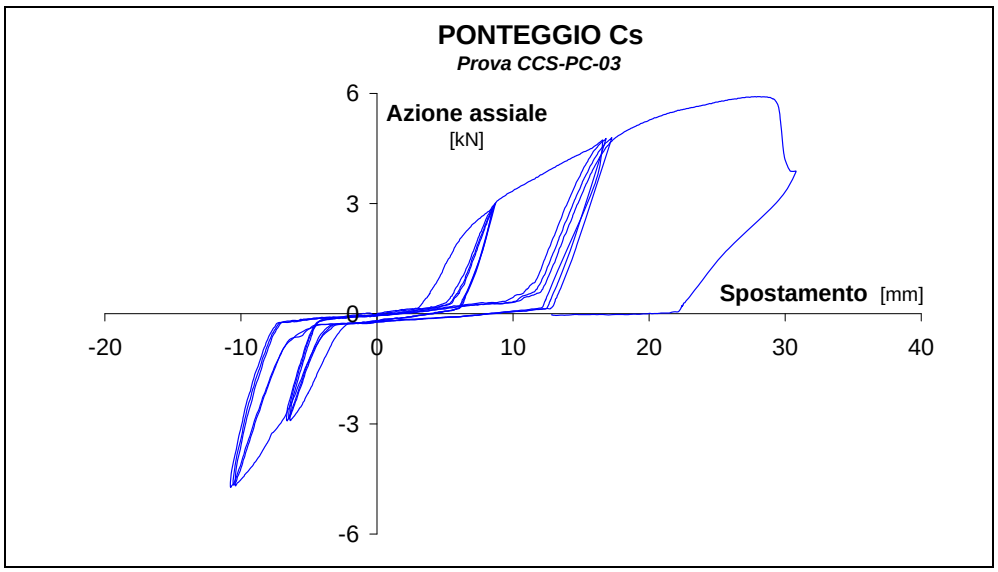


Figura A3.3 – Ponteggio Cs: riposta sperimentale relativa al campione CCS-PC-03

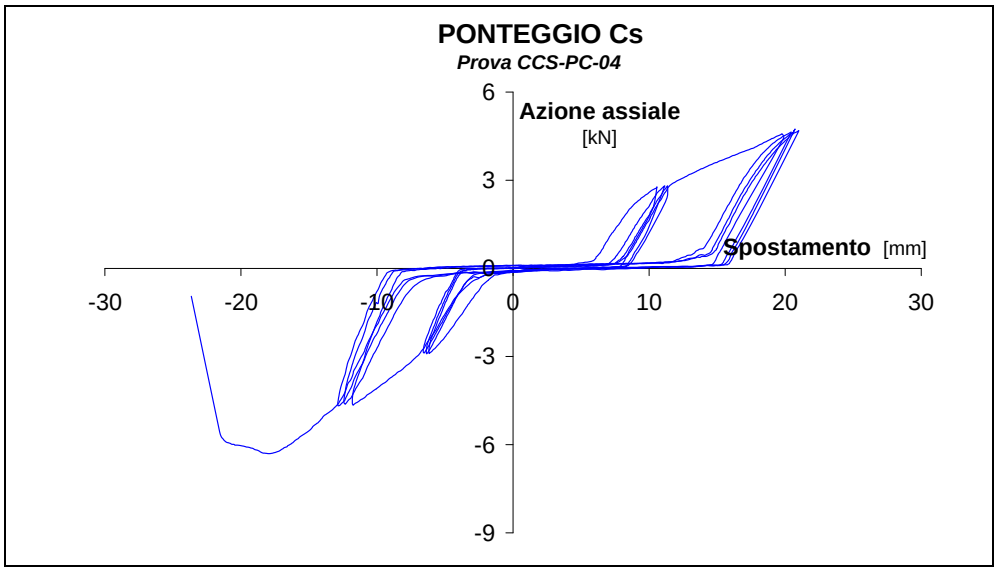


Figura A3.4 – Ponteggio Cs: riposta sperimentale relativa al campione CCS-PC-04

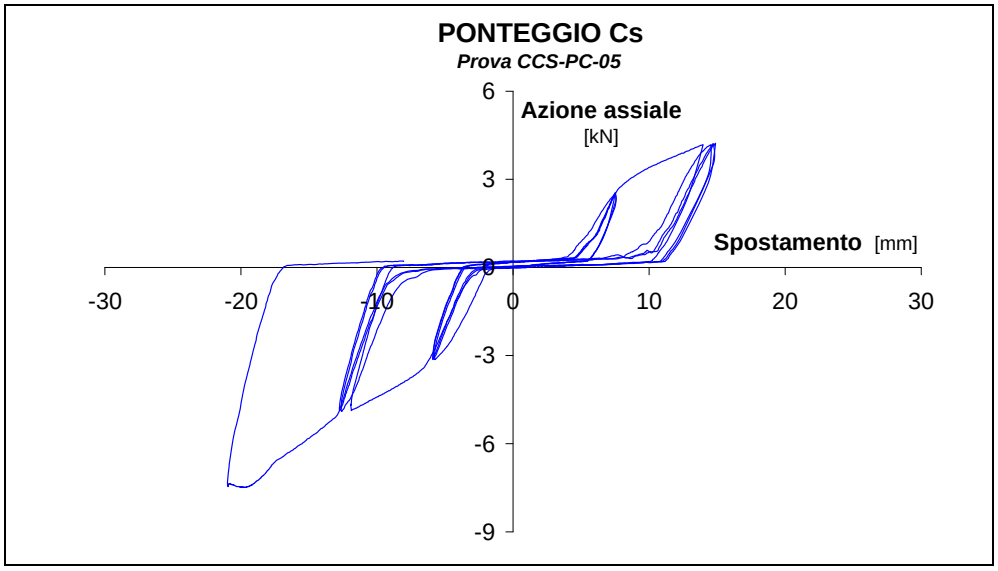


Figura A3.5 – Ponteggio Cs: riposta sperimentale relativa al campione CCS-PC-05

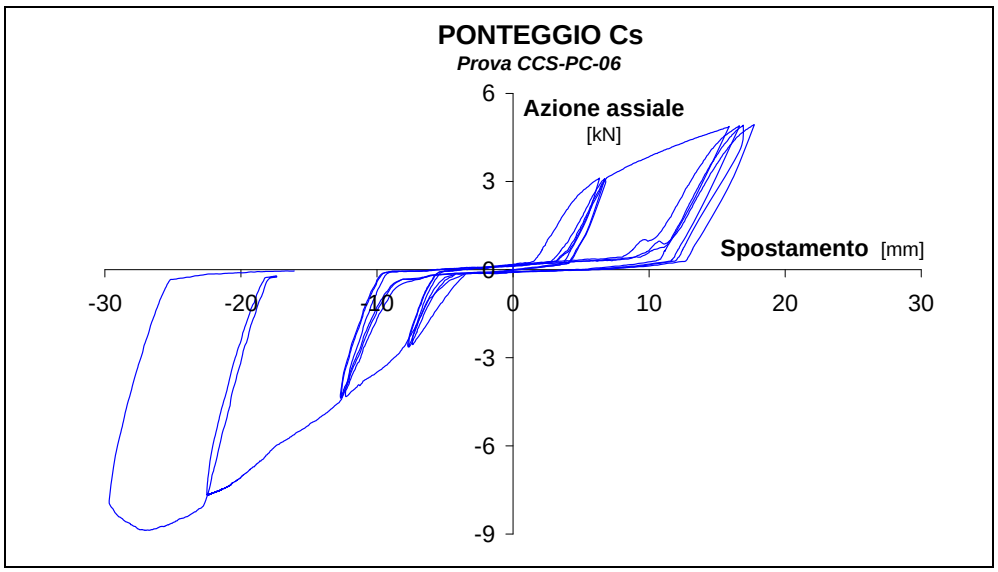


Figura A3.6 – Ponteggio Cs: riposta sperimentale relativa al campione CCS-PC-06

Tabella A3.1 – Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-01: funzioni interpolanti le fasi di carico e di scarico (prove cicliche)

Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-01				
Tipo di carico	***Ciclo***	***Fase***	***Funzione interpolante***	***R^2***
compressione	1°	carico	$y = -6{,}56235456E\text{-}04x^2 + 6{,}97847089E\text{-}01x - 4{,}21855292E+00$	0,994
	2°	scarico	$y = 6{,}38617714E\text{-}02x^2 - 1{,}75933837E\text{-}01x - 2{,}54030615E+00$	0,999
	1°	carico	$y = 8{,}20112664E\text{-}02x^2 - 6{,}06773450E\text{-}01x + 3{,}09207738E\text{-}01$	0,994
	2°	scarico	$y = 1{,}34265749E\text{-}01x^2 - 1{,}41648089E+00x + 2{,}84844267E+00$	0,998
	1°	carico	$y = 8{,}53344869E\text{-}02x^2 - 6{,}61972338E\text{-}01x + 4{,}14687524E\text{-}01$	0,996
	2°	scarico	$y = 1{,}21341456E\text{-}01x^2 - 1{,}33347867E+00x + 3{,}02187823E+00$	0,990
trazione	1°	carico	$y = -1{,}69333596E\text{-}02x^2 + 6{,}09275296E\text{-}01x + 9{,}04649259E\text{-}02$	0,997
	2°	scarico	$y = -2{,}71982733E\text{-}01x^2 - 7{,}23435713E\text{-}01x - 4{,}55091793E\text{-}01$	0,996
	1°	carico	$y = -1{,}13484160E\text{-}01x^2 + 1{,}97484368E\text{-}01x + 2{,}97165762E\text{-}01$	0,999
	2°	scarico	$y = -2{,}50815795E\text{-}01x^2 - 5{,}79954928E\text{-}01x - 1{,}48591312E\text{-}01$	0,998
	1°	carico	$y = -1{,}13484160E\text{-}01x^2 + 1{,}97484368E\text{-}01x + 2{,}97165762E\text{-}01$	0,999
	2°	scarico	$y = -2{,}36738803E\text{-}01x^2 - 5{,}37125153E\text{-}01x - 9{,}45694125E\text{-}02$	0,998

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.2 – Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-02: funzioni interpolanti le fasi di carico e di scarico (prove cicliche)

Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-02				
Tipo di carico	***Ciclo***	***Fase***	***Funzione interpolante***	***R^2***
compressione	1°	carico	$y = -6{,}23591402E\text{-}02x^2 + 1{,}11338820E+00x - 1{,}40725280E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = 1{,}75291501E\text{-}01x^2 - 6{,}96561577E\text{-}01x + 4{,}33632971E\text{-}01$	0,998
	1°	carico	$y = 3{,}72916066E\text{-}02x^2 + 4{,}14438629E\text{-}01x - 1{,}26234946E+00$	0,998
	2°	scarico	$y = 1{,}72532704E\text{-}01x^2 - 8{,}08069362E\text{-}01x + 6{,}73140333E\text{-}01$	0,999
	1°	carico	$y = 8{,}52602343E\text{-}02x^2 - 1{,}70240316E\text{-}02x - 5{,}75477564E\text{-}01$	0,997
	2°	scarico	$y = 1{,}42529740E\text{-}01x^2 - 5{,}38102752E\text{-}01x + 2{,}07359588E\text{-}02$	0,999
trazione	1°	carico	$y = -1{,}98414440E\text{-}02x^2 + 4{,}26538429E\text{-}01x + 1{,}65267093E+00$	1,000
	2°	scarico	$y = -3{,}14867697E\text{-}01x^2 - 2{,}93077178E+00x - 6{,}81642638E+00$	0,999
	1°	carico	$y = -1{,}40226273E\text{-}01x^2 - 8{,}76609489E\text{-}01x - 1{,}24956924E+00$	0,997
	2°	scarico	$y = -3{,}05561560E\text{-}01x^2 - 2{,}94488834E+00x - 7{,}07812778E+00$	0,998
	1°	carico	$y = -1{,}79457718E\text{-}01x^2 - 1{,}35967679E+00x - 2{,}53455879E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = -2{,}97279257E\text{-}01x^2 - 2{,}86158471E+00x - 6{,}84219545E+00$	0,998

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.3 – Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-03: funzioni interpolanti le fasi di carico e di scarico (prove cicliche)

Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-03				
Tipo di carico	***Ciclo***	***Fase***	***Funzione interpolante***	***R^2***
compressione	1°	carico	$y = -6{,}23591402E\text{-}02x^2 + 1{,}11338820E+00x - 1{,}40725280E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = 1{,}75291501E\text{-}01x^2 - 6{,}96561577E\text{-}01x + 4{,}33632971E\text{-}01$	0,998
	1°	carico	$y = 3{,}72916066E\text{-}02x^2 + 4{,}14438629E\text{-}01x - 1{,}26234946E+00$	0,998
	2°	scarico	$y = 1{,}72532704E\text{-}01x^2 - 8{,}08069362E\text{-}01x + 6{,}73140333E\text{-}01$	0,999
	1°	carico	$y = 8{,}52602343E\text{-}02x^2 - 1{,}70240316E\text{-}02x - 5{,}75477564E\text{-}01$	0,997
	2°	scarico	$y = 1{,}42529740E\text{-}01x^2 - 5{,}38102752E\text{-}01x + 2{,}07359588E\text{-}02$	0,999
trazione	1°	carico	$y = -1{,}98414440E\text{-}02x^2 + 4{,}26538429E\text{-}01x + 1{,}65267093E+00$	1,000
	2°	scarico	$y = -3{,}14867697E\text{-}01x^2 - 2{,}93077178E+00x - 6{,}81642638E+00$	0,999
	1°	carico	$y = -1{,}40226273E\text{-}01x^2 - 8{,}76609489E\text{-}01x - 1{,}24956924E+00$	0,997
	2°	scarico	$y = -3{,}05561560E\text{-}01x^2 - 2{,}94488834E+00x - 7{,}07812778E+00$	0,998
	1°	carico	$y = -1{,}79457718E\text{-}01x^2 - 1{,}35967679E+00x - 2{,}53455879E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = -2{,}97279257E\text{-}01x^2 - 2{,}86158471E+00x - 6{,}84219545E+00$	0,998

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.4 – Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-04: funzioni interpolanti le fasi di carico e di scarico (prove cicliche)

Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-04				
Tipo di carico	***Ciclo***	***Fase***	***Funzione interpolante***	***R^2***
compressione	1°	carico	$y = -6{,}44749665E\text{-}02x^2 + 1{,}62491313E+00x - 7{,}20773420E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = 1{,}05772498E\text{-}01x^2 - 1{,}00416733E+00x + 1{,}40813450E+00$	0,992
	1°	carico	$y = -1{,}86853771E\text{-}02x^2 + 1{,}04166483E+00x - 6{,}41387534E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = 1{,}15110354E\text{-}01x^2 - 1{,}28733126E+00x + 2{,}82582906E+00$	0,999
	1°	carico	$y = 5{,}94493798E\text{-}03x^2 + 6{,}32246584E\text{-}01x - 5{,}09139174E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = 1{,}08855580E\text{-}01x^2 - 1{,}27759048E+00x + 3{,}10267384E+00$	0,994
trazione	1°	carico	$y = 5{,}12477407E\text{-}03x^2 + 6{,}41890157E\text{-}01x + 7{,}92315933E\text{-}01$	0,997
	2°	scarico	$y = -1{,}66222862E\text{-}01x^2 - 5{,}86824224E\text{-}01x + 3{,}41367790E\text{-}02$	0,999
	1°	carico	$y = -4{,}50193397E\text{-}02x^2 + 4{,}17319272E\text{-}01x + 1{,}47677403E+00$	0,998
	2°	scarico	$y = -1{,}78204859E\text{-}01x^2 - 7{,}75073122E\text{-}01x - 4{,}55936094E\text{-}01$	0,998
	1°	carico	$y = -2{,}78581547E\text{-}02x^2 + 5{,}11504802E\text{-}01x + 1{,}61566608E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = -1{,}81145493E\text{-}01x^2 - 9{,}36075004E\text{-}01x - 1{,}02303538E+00$	0,998

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.5 – Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-05: funzioni interpolanti le fasi di carico e di scarico (prove cicliche)

Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-05				
Tipo di carico	***Ciclo***	***Fase***	***Funzione interpolante***	***R^2***
compressione	1°	carico	$y = 4{,}32605714E\text{-}02x^2 + 1{,}42746933E\text{-}01x - 9{,}13697503E\text{-}01$	0,998
	2°	scarico	$y = 2{,}32663864E\text{-}01x^2 - 2{,}09723102E+00x + 4{,}71737411E+00$	1,000
	1°	carico	$y = 7{,}47854868E\text{-}01x - 3{,}24521449E+00$	0,973
	2°	scarico	$y = 1{,}69788885E\text{-}01x^3 - 2{,}85397025E+00x^2 + 1{,}65337945E+01x - 3{,}26287851E+01$	1,000
	1°	carico	$y = 3{,}61006103E\text{-}02x^3 - 4{,}85717669E\text{-}01x^2 + 2{,}60570817E+00x - 4{,}85600242E+00$	0,997
	2°	scarico	$y = 1{,}98652190E\text{-}02x^3 - 9{,}61390670E\text{-}02x^2 - 3{,}06744770E\text{-}01x + 1{,}50632188E+00$	1,000
trazione	1°	carico	$y = 9{,}71760767E\text{-}02x^2 + 1{,}57648417E+00x + 2{,}69685092E+00$	1,000
	2°	scarico	$y = -3{,}27915917E\text{-}01x^2 - 1{,}83464736E+00x - 2{,}53959193E+00$	0,996
	1°	carico	$y = -5{,}20182445E\text{-}02x^2 + 6{,}22791870E\text{-}01x + 2{,}25114943E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = -2{,}91921433E\text{-}01x^2 - 1{,}52096654E+00x - 1{,}72501790E+00$	0,995
	1°	carico	$y = -8{,}47673806E\text{-}02x^2 + 3{,}45843454E\text{-}01x + 1{,}81537744E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = -3{,}12699801E\text{-}01x^2 - 1{,}73686685E+00x - 2{,}23654247E+00$	0,995

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.6 – Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-06: funzioni interpolanti le fasi di carico e di scarico (prove cicliche)

Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-06				
Tipo di carico	***Ciclo***	***Fase***	***Funzione interpolante***	***R^2***
compressione	1°	carico	$y = -6{,}23591402E\text{-}02x^2 + 1{,}11338820E+00x - 1{,}40725280E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = 1{,}75291501E\text{-}01x^2 - 6{,}96561577E\text{-}01x + 4{,}33632971E\text{-}01$	0,998
	1°	carico	$y = 3{,}72916066E\text{-}02x^2 + 4{,}14438629E\text{-}01x - 1{,}26234946E+00$	0,998
	2°	scarico	$y = 1{,}72532704E\text{-}01x^2 - 8{,}08069362E\text{-}01x + 6{,}73140333E\text{-}01$	0,999
	1°	carico	$y = 8{,}52602343E\text{-}02x^2 - 1{,}70240316E\text{-}02x - 5{,}75477564E\text{-}01$	0,997
	2°	scarico	$y = 1{,}42529740E\text{-}01x^2 - 5{,}38102752E\text{-}01x + 2{,}07359588E\text{-}02$	0,999
trazione	1°	carico	$y = -1{,}98414440E\text{-}02x^2 + 4{,}26538429E\text{-}01x + 1{,}65267093E+00$	1,000
	2°	scarico	$y = -3{,}14867697E\text{-}01x^2 - 2{,}93077178E+00x - 6{,}81642638E+00$	0,999
	1°	carico	$y = -1{,}40226273E\text{-}01x^2 - 8{,}76609489E\text{-}01x - 1{,}24956924E+00$	0,997
	2°	scarico	$y = -3{,}05561560E\text{-}01x^2 - 2{,}94488834E+00x - 7{,}07812778E+00$	0,998
	1°	carico	$y = -1{,}79457718E\text{-}01x^2 - 1{,}35967679E+00x - 2{,}53455879E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = -2{,}97279257E\text{-}01x^2 - 2{,}86158471E+00x - 6{,}84219545E+00$	0,998

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.7 – Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-01: Legge semplificata multilineare

Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-01							
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
compressione	1°	6,956	0,863	2,950	4°	17,563	4,705
	2°	7,347	0,947	3,009	5°	17,876	4,738
	3°	7,432	0,942	2,973	6°	17,942	4,714
	Valori medi	7,245	0,917	2,977	Valori medi	17,794	4,719
	Equazione	7,245	y=0,917x-6,645		Equazione	y=0,239x+0,475	
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
trazione	1°	-0,896	0,834	-2,895	4°	-8,563	-4,756
	2°	-1,493	0,961	-2,892	5°	-8,675	-4,763
	3°	-1,564	0,970	-2,938	6°	-8,742	-4,738
	Valori medi	-1,318	0,922	-2,908	Valori medi	-8,660	-4,752
	Equazione	-1,318	y=0,922x+1,214		Equazione	y=0,440x-0,938	

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.8 – Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-02: Legge semplificata multilineare

Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-02							
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
compressione	1°	4,510	0,720	2,874	4°	18,234	4,587
	2°	5,189	0,829	2,957	5°	19,102	4,619
	3°	5,272	0,831	2,961	6°	19,905	4,644
	Valori medi	4,990	0,793	2,931	Valori medi	19,080	4,617
	Equazione	4,990	y=0,793x-3,958		Equazione	y=0,162x+1,522	
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
trazione	1°	-2,636	0,754	-2,978	4°	-11,915	-4,836
	2°	-3,179	0,814	-3,014	5°	-12,384	-4,943
	3°	-3,355	0,832	-3,049	6°	-12,630	-5,014
	Valori medi	-3,057	0,800	-3,014	Valori medi	19,080	-4,931
	Equazione	-3,057	y=0,800x+2,445		Equazione	y=0,349x-0,629	

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.9 – Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-03: Legge semplificata multilineare

Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-03							
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
compressione	1°	4,200	0,697	2,845	4°	16,596	4,727
	2°	4,996	0,853	2,967	5°	16,834	4,770
	3°	5,249	0,901	3,016	6°	17,258	4,789
	Valori medi	4,815	0,817	2,943	Valori medi	16,896	4,762
	Equazione	4,815	y=0,817x-3,934		Equazione	y=0,215x+1,137	
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
trazione	1°	-3,037	0,915	-2,909	4°	-10,417	-4,683
	2°	-3,083	0,863	-2,863	5°	-10,528	-4,667
	3°	-3,170	0,873	-2,915	6°	-10,773	-4,729
	Valori medi	-3,097	0,884	-2,896	Valori medi	-10,573	-4,693
	Equazione	-3,097	y=0,884x+2,736		Equazione	y=0,428x-0,168	

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.10 – Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-04: Legge semplificata multilineare

Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-04							
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
compressione	1°	6,764	0,725	2,766	4°	19,783	4,572
	2°	7,616	0,821	2,803	5°	20,446	4,634
	3°	7,912	0,830	2,801	6°	20,714	4,728
	-	-	-	-	7°	21,005	4,680
	Valori medi	7,431	0,792	2,790	Valori medi	20,314	4,645
	Equazione	7,431	y=0,792x-5,887		Equazione	y=0,198x+0,620	
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
trazione	1°	-2,418	0,800	-2,899	4°	-11,769	-4,652
	2°	-3,190	0,945	-2,909	5°	-12,349	-4,624
	3°	-3,173	0,867	-2,876	6°	-12,750	-4,670
	Valori medi	-2,927	0,871	-2,894	Valori medi	-12,289	-4,648
	Equazione	-2,927	y=0,871x+2,549		Equazione	y=0,291x-1,078	

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.11 – Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-05: Legge semplificata multilineare

Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-05							
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
compressione	1°	3,969	0,732	2,525	4°	4,175	13,963
	2°	4,731	0,845	2,551	5°	4,178	14,567
	3°	4,223	0,779	2,502	6°	4,208	14,723
	-	-	-	-	7°	4,226	14,879
	Valori medi	4,308	0,786	2,526	Valori medi	4,193	14,645
	Equazione	4,308	y=0,786x-3,384		Equazione	y=0,234x+0,764	
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
trazione	1°	-2,512	0,981	-3,136	4°	-11,888	-4,871
	2°	-3,225	1,208	-3,116	5°	-12,623	-4,900
	3°	-3,271	1,206	-3,134	6°	-12,756	-4,874
	Valori medi	-3,003	1,132	-3,128	Valori medi	-12,422	-4,881
	Equazione	-3,003	y=1,132x+3,399		Equazione	y=0,263x-1,610	

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.12 – Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-06: Legge semplificata multilineare

Ponteggio Cs – Prova CCS-PC-06							
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
compressione	1°	2,286	0,787	3,112	4°	4,872	15,883
	2°	3,044	0,871	3,095	5°	4,889	16,637
	3°	3,218	0,897	3,067	6°	4,915	16,928
	-	-	-	-	7°	4,915	17,642
	Valori medi	2,849	0,852	3,091	Valori medi	4,902	16,783
	Equazione	2,849	y=0,852x-2,427		Equazione	y=0,176x+1,953	
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
trazione	1°	-4,059	0,776	-2,547	4°	-12,289	-4,320
	2°	-4,556	0,877	-2,631	5°	-12,598	-4,360
	3°	-4,732	0,903	-2,636	6°	-12,688	-4,371
	Valori medi	-4,449	0,852	-2,605	Valori medi	-12,525	-4,350
	Equazione	-4,449	y=0,852x+3,791		Equazione	y=0,348x+0,005	

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

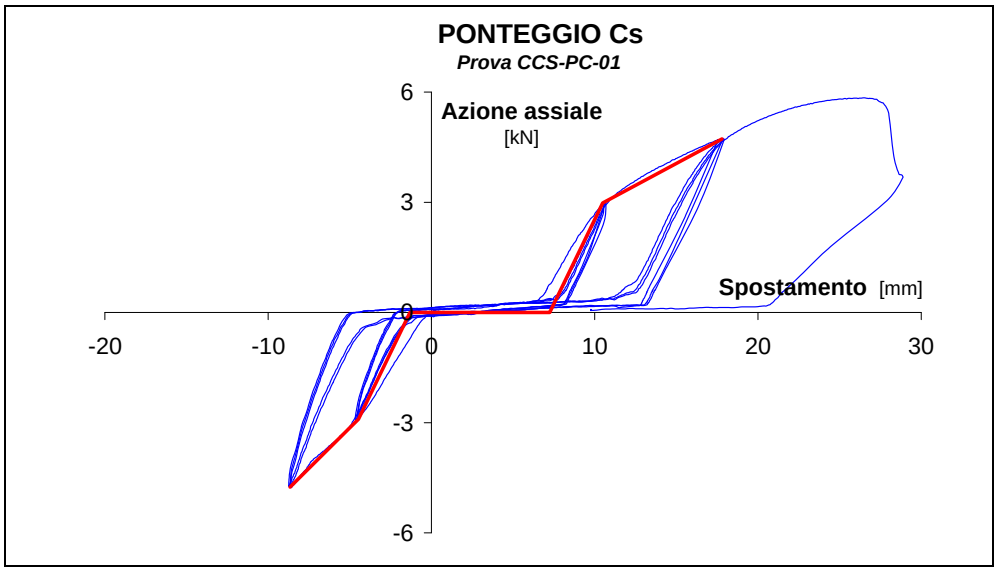


Figura A3.7 – Ponteggio Cs: confronto risposta sperimentale - legge semplificata

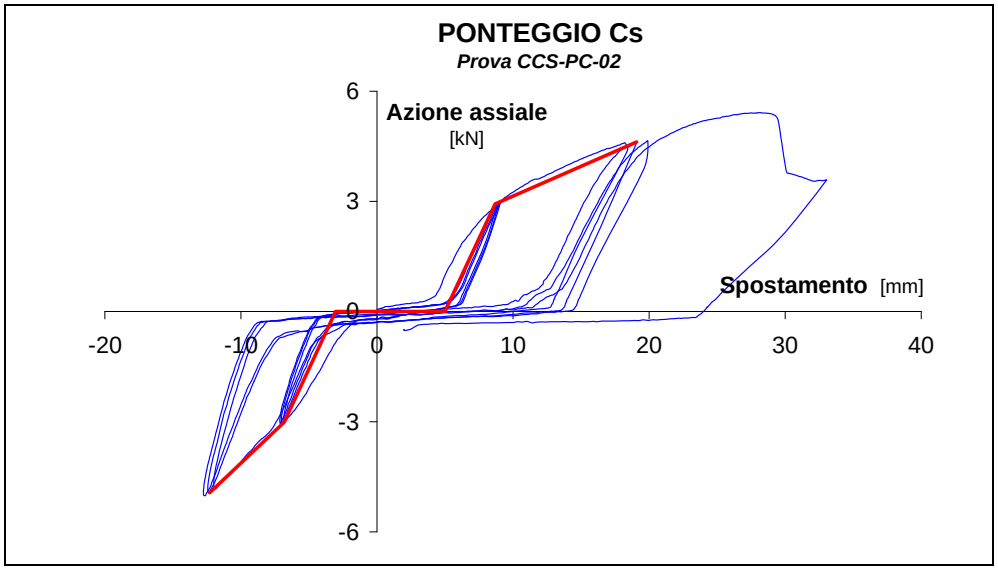


Figura A3.8 – Ponteggio Cs: confronto risposta sperimentale - legge semplificata

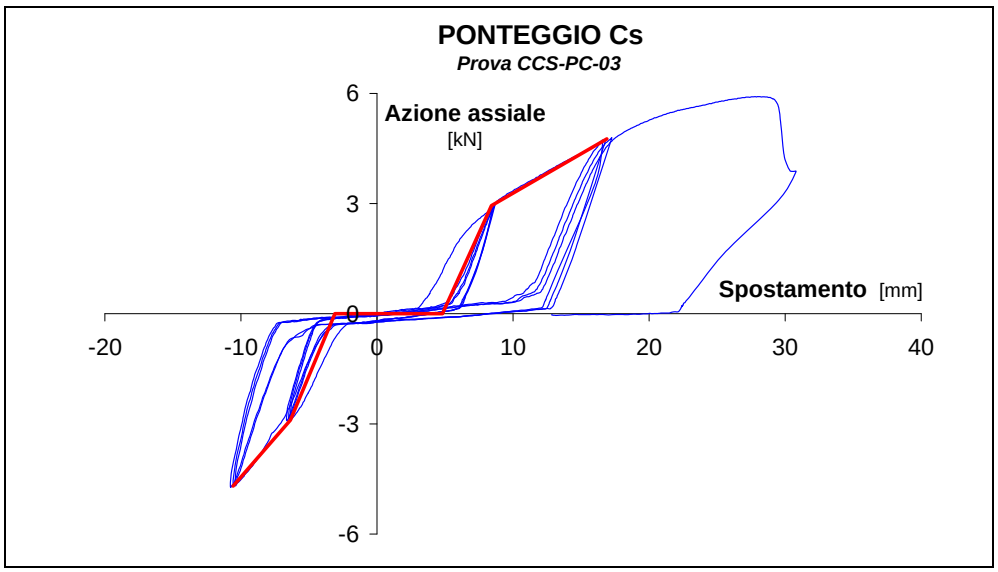


Figura A3.9 Ponteggio Cs: confronto risposta sperimentale - legge semplificata

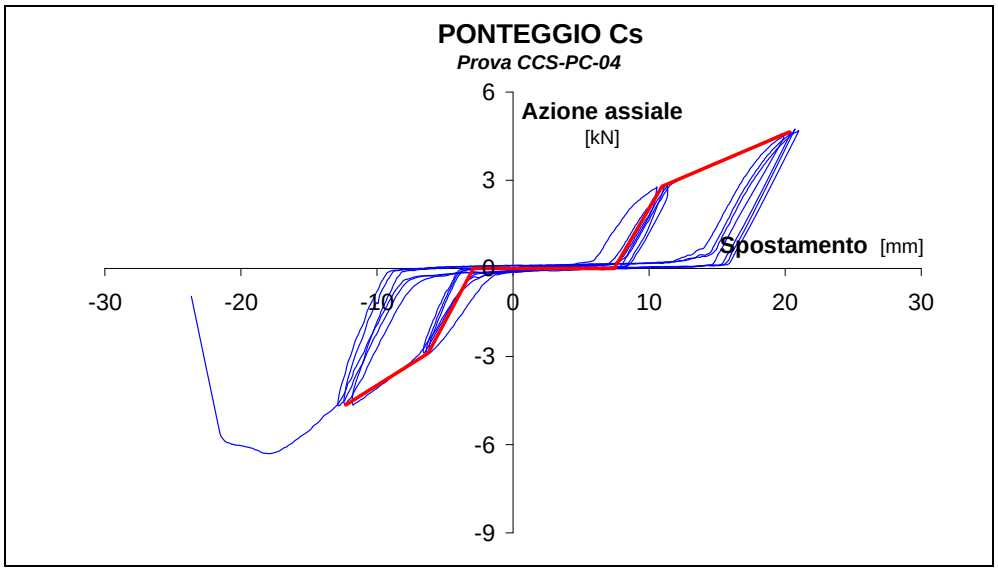


Figura A3.10 – Ponteggio Cs: confronto risposta sperimentale - legge semplificata

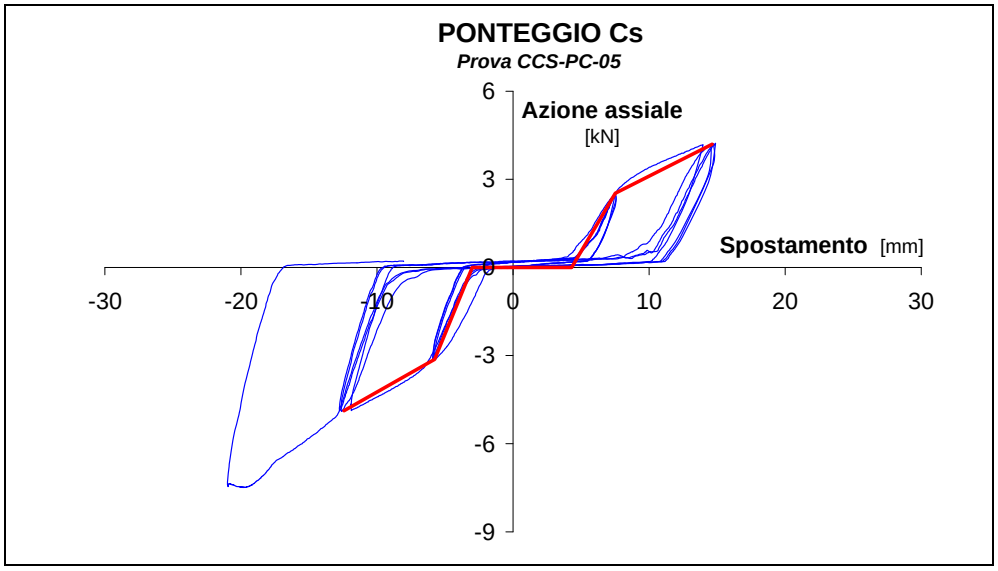


Figura A3.11 – Ponteggio Cs: confronto risposta sperimentale - legge semplificata

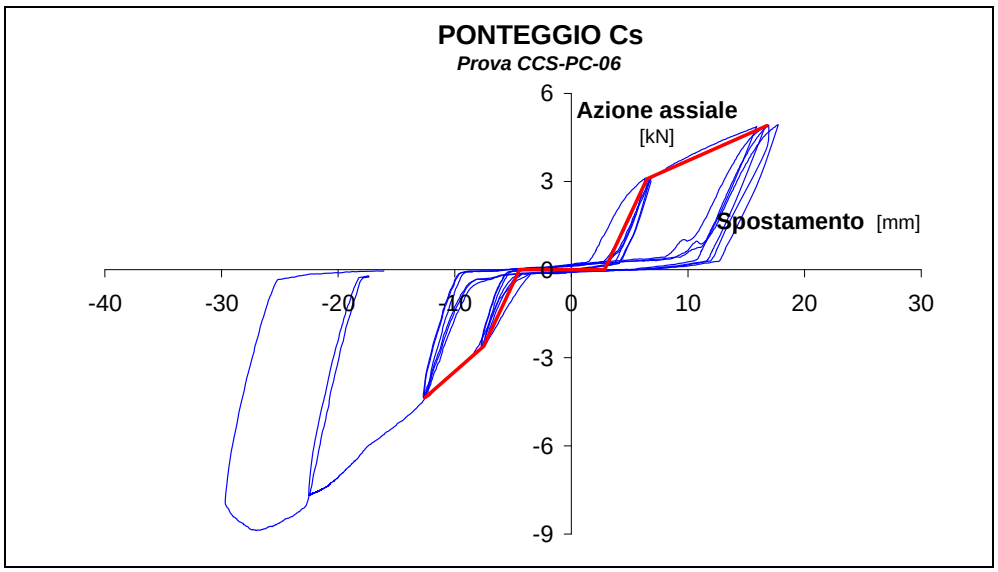


Figura A3.12 – Ponteggio Cs: confronto risposta sperimentale - legge semplificata

Tabella A3.13 – Ponteggio Cs: legge globale spostamento-azione assiale

Ponteggio Cs						
Carico	Prova	$\overline{d_0^+}$ [mm]	$\overline{k_{Rd}^+}$ [kN/mm]	$\overline{R_d^+}$ [kN]	$\overline{s_{Rk}^+}$ [mm]	$\overline{R_k^+}$ [kN]
compressione	CCS-PC-01	7,245	0,917	2,977	17,794	4,719
	CCS-PC-02	4,990	0,793	2,931	19,080	4,617
	CCS-PC-03	4,815	0,817	2,943	16,896	4,762
	CCS-PC-04	7,431	0,792	2,790	20,314	4,645
	CCS-PC-05	4,308	0,786	2,526	14,645	4,193
	CCS-PC-06	2,849	0,852	3,091	16,783	4,902
	Valori medi	$\overline{\overline{d_0^+}}$ [mm]	$\overline{\overline{k_{Rd}^+}}$ [kN/mm]	$\overline{\overline{R_d^+}}$ [kN]	$\overline{\overline{s_{Rk}^+}}$ [mm]	$\overline{\overline{R_k^+}}$ [kN]
		5,273	0,824	2,876	17,397	4,640
Carico	Prova	$\overline{d_0^-}$ [mm]	$\overline{k_{Rd}^-}$ [kN/mm]	$\overline{R_d^-}$ [kN]	$\overline{s_{Rk}^-}$ [mm]	$\overline{R_k^-}$ [kN]
trazione	CCS-PC-01	-1,318	0,922	-2,908	-8,660	-4,752
	CCS-PC-02	-3,057	0,800	-3,014	-12,310	-4,931
	CCS-PC-03	-3,097	0,884	-2,896	-10,573	-4,693
	CCS-PC-04	-2,927	0,871	-2,894	-12,289	-4,648
	CCS-PC-05	-3,003	1,132	-3,128	-12,422	-4,881
	CCS-PC-06	-4,449	0,852	-2,605	-12,525	-4,350
	Valori medi	$\overline{\overline{d_0^-}}$ [mm]	$\overline{\overline{k_{Rd}^-}}$ [kN/mm]	$\overline{\overline{R_d^-}}$ [kN]	$\overline{\overline{s_{Rk}^-}}$ [mm]	$\overline{\overline{R_k^-}}$ [kN]
		-2,975	0,899	-2,908	-11,257	-4,709

Tabella A3.14 – Ponteggio Cs: test sulla rigidezza nell'intervallo 0-R_d

$\overline{\overline{k_{Rd}^+}}$ [kN/mm]	$\overline{\overline{k_{Rd}^-}}$ [kN/mm]	$\left\lvert\frac{\lvert\overline{\overline{k_{Rd}^+}}\rvert - \lvert\overline{\overline{k_{Rd}^-}}\rvert}{\lvert\overline{\overline{k_{Rd}^+}}\rvert + \lvert\overline{\overline{k_{Rd}^-}}\rvert}\right\rvert \cdot 100$	Test	$\overline{\overline{k_{Rd}}}$ [kN/mm]
0,824	0,899	4,384	Utilizzo unica rigidezza	0,861

Tabella A3.15 – Equazione legge globale

Ponteggio Cs	
Spostamento [mm]	Carico [kN]
-11,399*	-4,709
-6,350	-2,908
-2,975	0,000
0,000	0,000
5,273	0,000
8,612	2,876
17,244*	4,640

* valori diversi rispetto a tabella A3.13 a causa del cambio di rigidezza

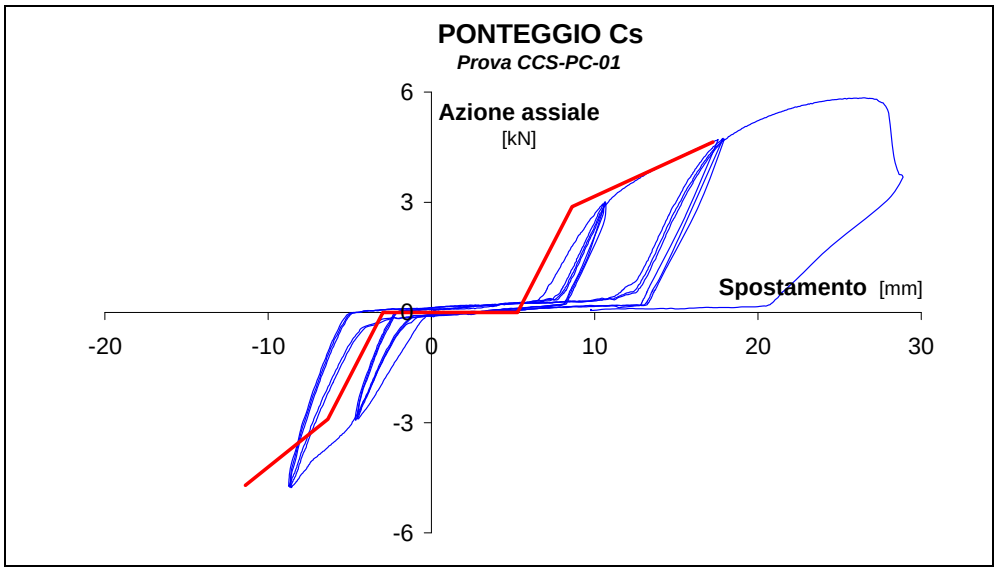


Figura A3.13 – Ponteggio Cs: confronto risposta sperimentale - legge semplificata media

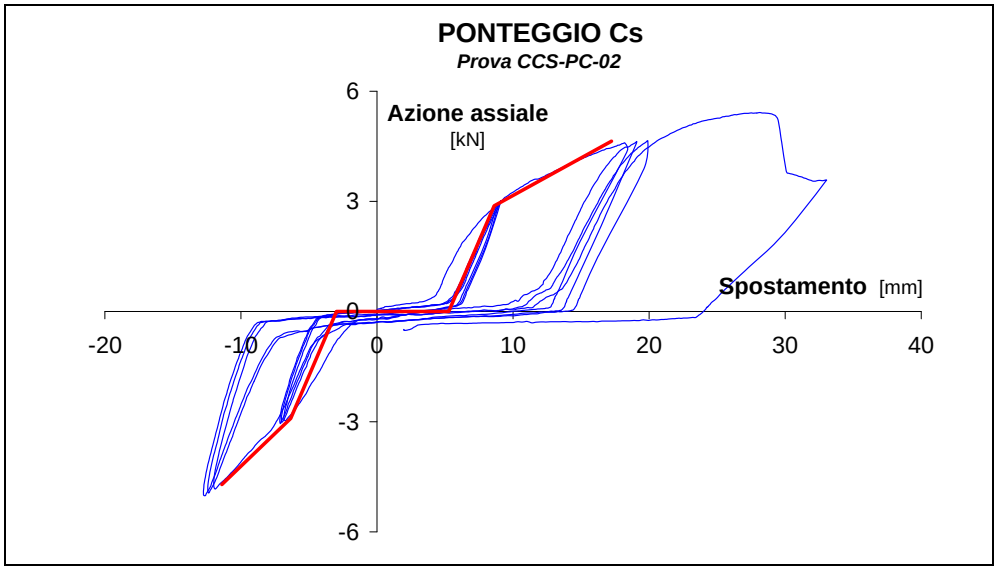


Figura A3.14– Ponteggio Cs: confronto risposta sperimentale - legge semplificata media

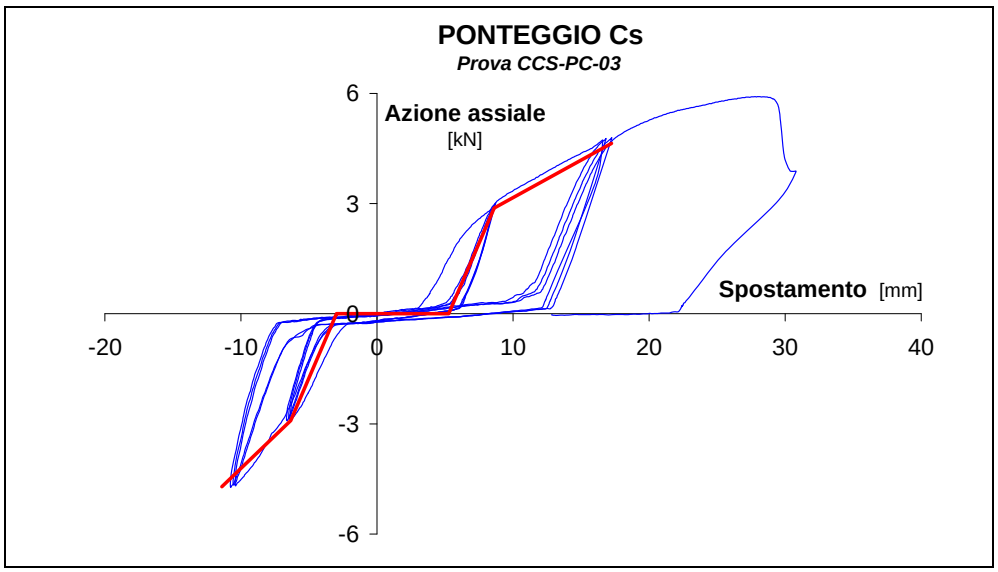


Figura A3.15 – Ponteggio Cs: confronto risposta sperimentale - legge semplificata media

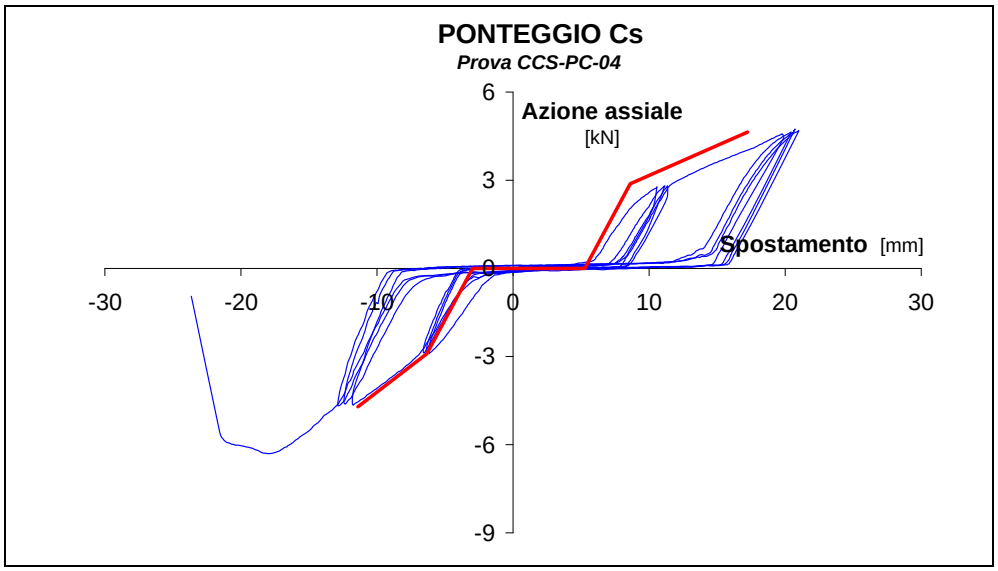


Figura A3.16 – Ponteggio Cs: confronto risposta sperimentale - legge semplificata media

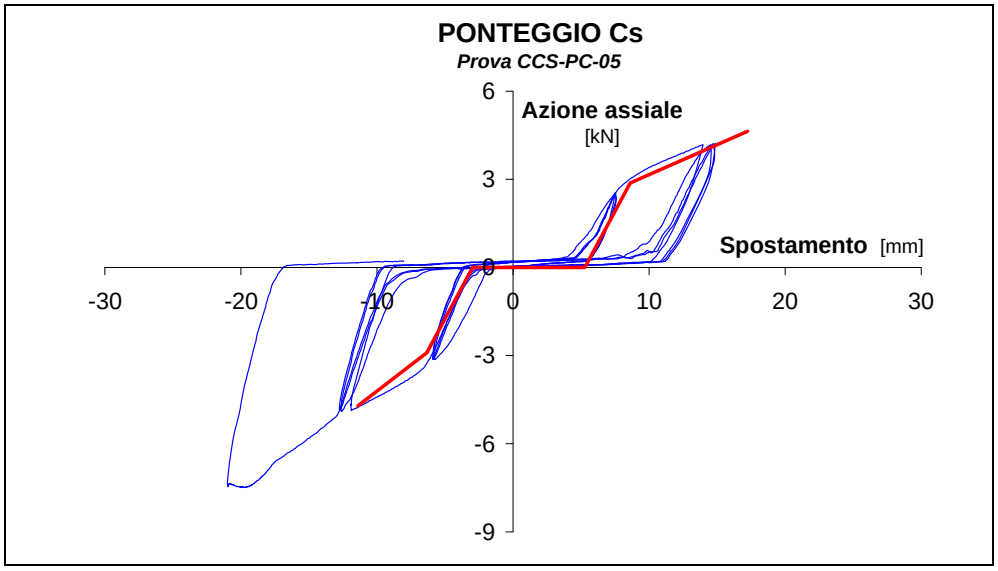


Figura A3.17 – Ponteggio Cs: confronto risposta sperimentale - legge semplificata media

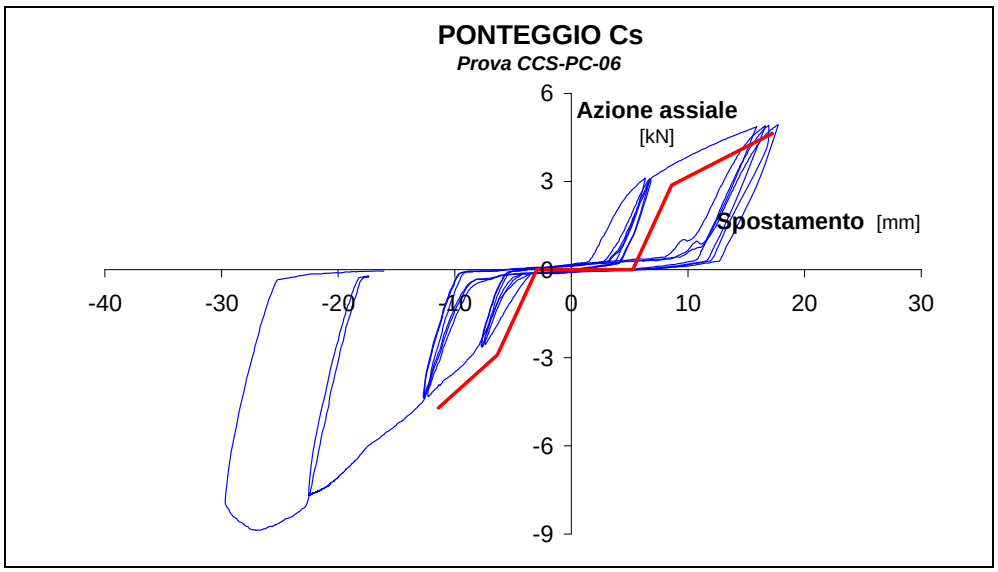


Figura A3.18 – Ponteggio Cs: confronto risposta sperimentale - legge semplificata media

PONTEGGIO Cb

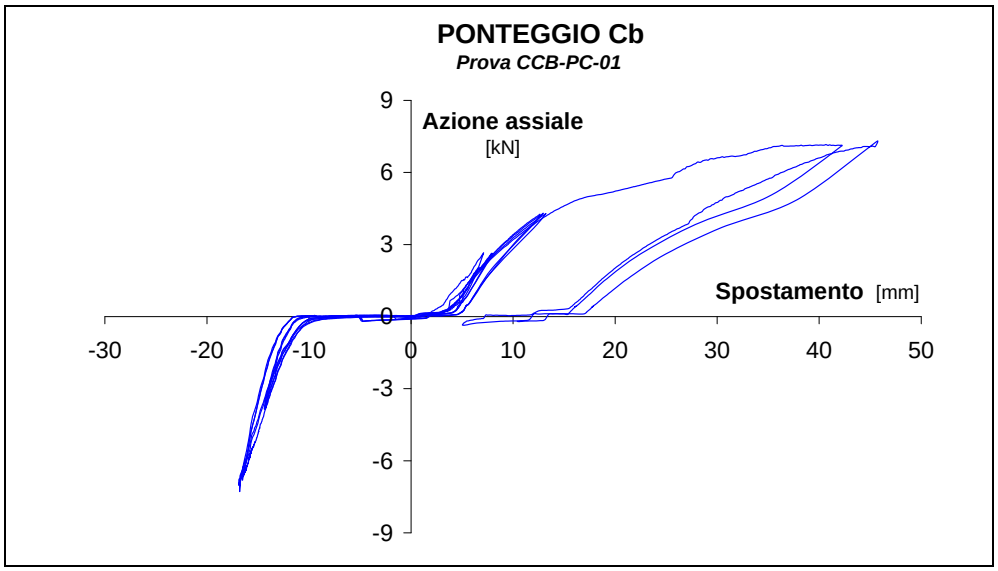


Figura A3.19 – Ponteggio Cb: riposta sperimentale relativa al campione CCB-PC-01

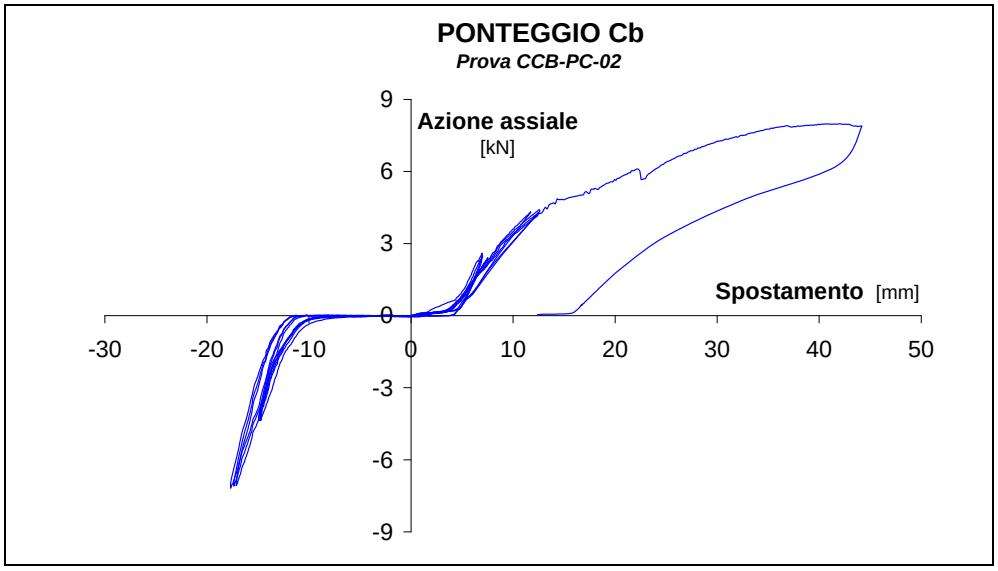


Figura A3.20 – Ponteggio Cb: riposta sperimentale relativa al campione CCB-PC-02

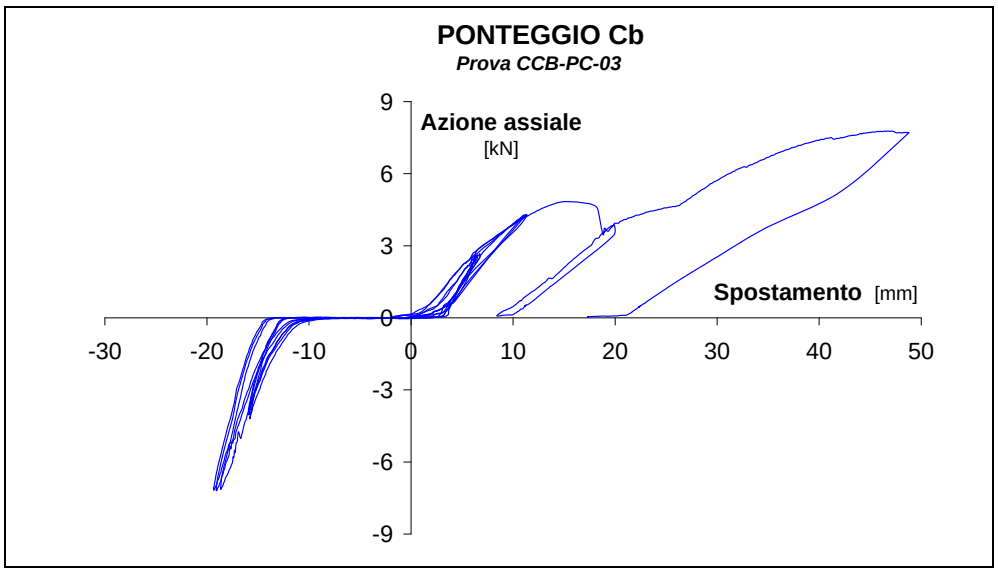


Figura A3.21 – Ponteggio Cb: riposta sperimentale relativa al campione CCB-PC-03

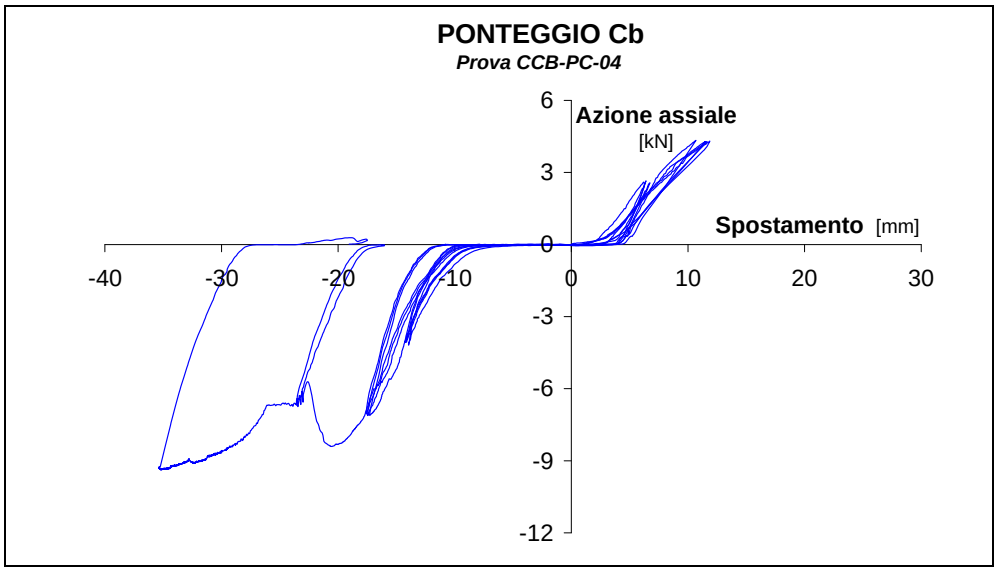


Figura A3.22 – Ponteggio Cb: riposta sperimentale relativa al campione CCB-PC-04

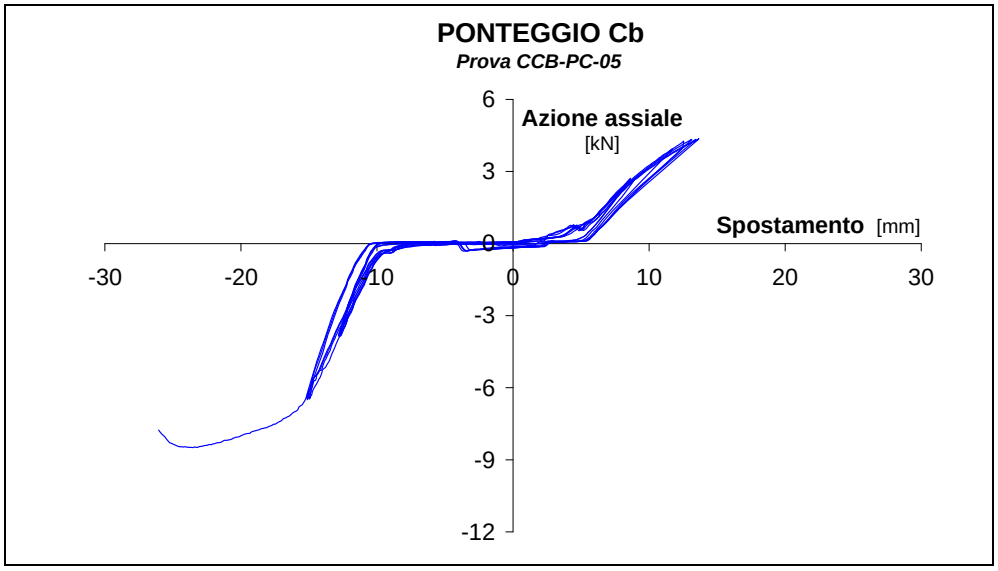


Figura A3.23 – Ponteggio Cb: riposta sperimentale relativa al campione CCB-PC-05

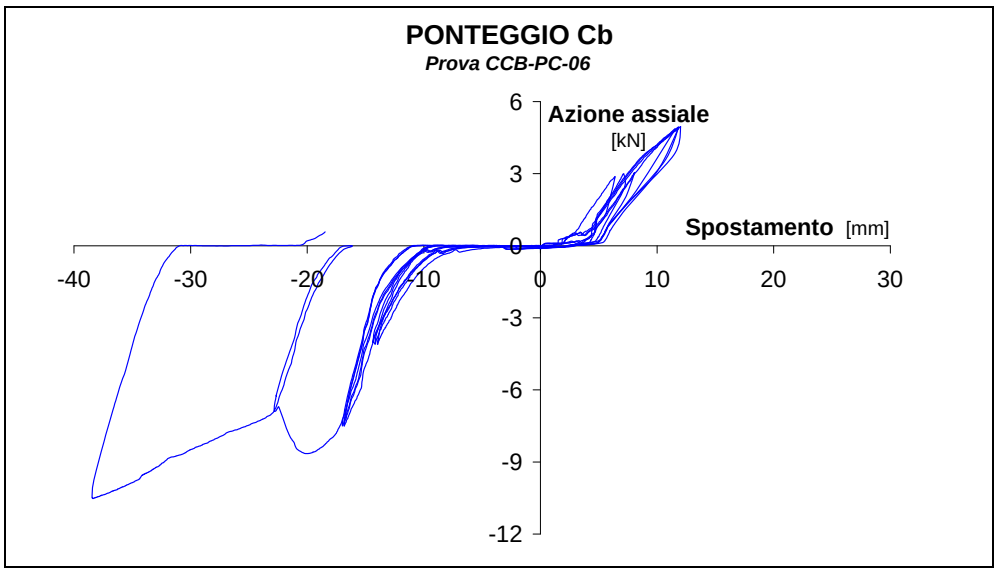


Figura A3.24 – Ponteggio Cb: riposta sperimentale relativa al campione CCB-PC-06

Tabella A3.16 – Ponteggio Cb – Prova CCB-PC-01: funzioni interpolanti le fasi di carico e di scarico (prove cicliche)

Ponteggio Cb – Prova CCB-PC-01				
Tipo di carico	***Ciclo***	***Fase***	***Funzione interpolante***	***R^2***
compressione	1°	carico	$y = 3{,}14290579E\text{-}02x^2 + 2{,}00399622E\text{-}01x - 3{,}62590782E\text{-}01$	0,995
	2°	scarico	$y = 1{,}17069513E\text{-}01x^2 - 4{,}94374747E\text{-}01x + 2{,}16330179E\text{-}01$	0,999
	1°	carico	$y = -9{,}70505246E\text{-}03x^3 + 1{,}64840146E\text{-}01x^2 - 3{,}80679493E\text{-}01x + 9{,}47985421E\text{-}02$	0,995
	2°	scarico	$y = 3{,}88440771E\text{-}02x^2 + 2{,}03316749E\text{-}01x - 1{,}39692226E+00$	0,999
	1°	carico	$y = -1{,}50392822E\text{-}03x^2 + 5{,}68110692E\text{-}01x - 1{,}78651948E+00$	0,990
	2°	scarico	$y = 4{,}59557148E\text{-}02x^2 + 8{,}23269840E\text{-}02x - 9{,}81448394E\text{-}01$	0,998
trazione	1°	carico	$y = 1{,}18531267E\text{-}02x^4 + 5{,}79542726E\text{-}01x^3 + 1{,}04306166E+01x^2 + 8{,}27010654E+01x + 2{,}44817692E+02$	1,000
	2°	scarico	$y = 4{,}57714459E\text{-}02x^3 + 1{,}44566356E+00x^2 + 1{,}56682568E+01x + 5{,}83093079E+01$	0,999
	1°	carico	$y = 9{,}88509319E\text{-}03x^4 + 5{,}03709921E\text{-}01x^3 + 9{,}41838370E+00x^2 + 7{,}75015621E+01x + 2{,}38084831E+02$	0,999
	2°	scarico	$y = 2{,}69731560E\text{-}02x^3 + 7{,}27418564E\text{-}01x^2 + 6{,}48546491E+00x + 1{,}91158142E+01$	0,999
	1°	carico	$y = 1{,}39775154E\text{-}02x^3 + 3{,}76433886E\text{-}01x^2 + 3{,}77740524E+00x + 1{,}41801404E+01$	0,999
	2°	scarico	$y = 1{,}02323240E\text{-}01x^5 + 6{,}64506308E+00x^4 + 1{,}72407754E+02x^3 + 2{,}23356783E+03x^2 + 1{,}44478887E+04x + 3{,}73301989E+04$	0,999

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.17 – Ponteggio Cb – Prova CCB-PC-02: funzioni interpolanti le fasi di carico e di scarico (prove cicliche)

Ponteggio Cb – Prova CCB-PC-02				
Tipo di carico	***Ciclo***	***Fase***	***Funzione interpolante***	***R^2***
compressione	1°	carico	$y = 1{,}51088802E\text{-}02x^3 - 9{,}07746245E\text{-}02x^2 + 3{,}12504688E\text{-}01x - 1{,}37313684E\text{-}01$	0,993
	2°	scarico	$y = 1{,}46745179E\text{-}01x^2 - 8{,}75599060E\text{-}01x + 1{,}26401026E+00$	0,998
	1°	carico	$y = -1{,}63463115E\text{-}02x^4 + 3{,}10123012E\text{-}01x^3 - 1{,}99572053E+00x^2 + 5{,}52169663E+00x - 5{,}50648284E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = 1{,}62094878E\text{-}01x^2 - 9{,}53847131E\text{-}01x + 1{,}21320289E+00$	0,999
	1°	carico	$y = 6{,}80247879E\text{-}02x^2 - 1{,}65721158E\text{-}01x - 1{,}18518059E\text{-}01$	0,997
	2°	scarico	$y = 3{,}59068242E\text{-}02x^2 + 3{,}33748787E\text{-}01x - 2{,}08808922E+00$	0,997
trazione	1°	carico	$y = 7{,}46884998E\text{-}03x^4 + 3{,}53386689E\text{-}01x^3 + 6{,}07689569E+00x^2 + 4{,}56000188E+01x + 1{,}26622372E+02$	0,999
	2°	scarico	$y = 1{,}51123765E\text{-}01x^5 + 9{,}68308707E+00x^4 + 2{,}47861193E+02x^3 + 3{,}16802426E+03x^2 + 2{,}02179823E+04x + 5{,}15399046E+04$	0,999
	1°	carico	$y = 2{,}11653195E\text{-}02x^3 + 6{,}07175732E\text{-}01x^2 + 6{,}05232969E+00x + 2{,}08418849E+01$	0,999
	2°	scarico	$y = 3{,}47968875E\text{-}02x^3 + 1{,}03810043E+00x^2 + 1{,}03916422E+01x + 3{,}50128942E+01$	0,998
	1°	carico	$y = -3{,}16876296E\text{-}03x^4 - 1{,}28574296E\text{-}01x^3 - 1{,}98598043E+00x^2 - 1{,}33983209E+01x - 3{,}21653406E+01$	0,999
	2°	scarico	$y = 1{,}39215477E\text{-}02x^4 + 7{,}80154369E\text{-}01x^3 + 1{,}59972036E+01x^2 + 1{,}43667922E+02x + 4{,}79532775E+02$	0,999

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.18 – Ponteggio Cb – Prova CCB-PC-03: funzioni interpolanti le fasi di carico e di scarico (prove cicliche)

Ponteggio Cb – Prova CCB-PC-03				
Tipo di carico	***Ciclo***	***Fase***	***Funzione interpolante***	***R^2***
compressione	1°	carico	$y = 2{,}05110158E\text{-}02x^2 + 3{,}60809478E\text{-}01x - 4{,}92588508E\text{-}01$	0,996
	2°	scarico	$y = 1{,}80006271E\text{-}02x3 - 1{,}07207604E\text{-}01x2 + 4{,}89799807E\text{-}01x - 8{,}00025264E\text{-}01$	0,995
	1°	carico	$y = -8{,}69396620E\text{-}03x^4 + 1{,}26902492E\text{-}01x^3 - 5{,}47010220E\text{-}01x^2 + 1{,}08060856E+00x - 6{,}62311034E\text{-}01$	0,999
	2°	scarico	$y = 3{,}54955367E\text{-}02x^2 + 4{,}21460706E\text{-}01x - 1{,}61721093E+00$	0,998
	1°	carico	$y = 6{,}76970223E\text{-}02x^2 - 3{,}34985368E\text{-}02x - 9{,}12216025E\text{-}02$	0,995
	2°	scarico	$y = 6{,}87026370E\text{-}01x - 2{,}10822775E+00$	0,997
trazione	1°	carico	$y = 5{,}56455852E\text{-}03x^3 + 1{,}13247708E\text{-}01x^2 + 8{,}16831235E\text{-}01x + 2{,}42781293E+00$	1,000
	2°	scarico	$y = 6{,}17857574E\text{-}02x^3 + 2{,}37202322E+00x^2 + 3{,}11346941E+01x + 1{,}39308509E+02$	1,000
	1°	carico	$y = 1{,}54548199E\text{-}03x^5 + 1{,}03655287E\text{-}01x^4 + 2{,}77796901E+00x^3 + 3{,}70527984E+01x^2 + 2{,}45807257E+02x + 6{,}49168973E+02$	0,999
	2°	scarico	$y = 7{,}10116357E\text{-}02x^3 + 2{,}78871586E+00x^2 + 3{,}72603814E+01x + 1{,}68871905E+02$	0,999
	1°	carico	$y = -2{,}11436679E\text{-}04x^5 - 1{,}29780806E\text{-}02x^4 - 2{,}97726033E\text{-}01x^3 - 3{,}19337966E+00x^2 - 1{,}53369867E+01x - 2{,}25565968E+01$	1,000
	2°	scarico	$y = 4{,}59894866E\text{-}02x^3 + 1{,}75312058E+00x^2 + 2{,}29609181E+01x + 1{,}03040512E+02$	0,999

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.19 – Ponteggio Cb – Prova CCB-PC-04: funzioni interpolanti le fasi di carico e di scarico (prove cicliche)

Ponteggio Cb – Prova CCB-PC-04				
Tipo di carico	***Ciclo***	***Fase***	***Funzione interpolante***	***R^2***
compressione	1°	carico	$y = 4{,}19102999E\text{-}02x^2 + 2{,}61969857E\text{-}01x - 5{,}71602248E\text{-}01$	0,999
	2°	scarico	$y = 1{,}83186183E\text{-}01x^2 - 9{,}34029263E\text{-}01x + 1{,}08386071E+00$	0,995
	1°	carico	$y = 1{,}18567516E\text{-}01x^2 - 3{,}65350892E\text{-}01x + 1{,}34228655E\text{-}01$	0,999
	2°	scarico	$y = 2{,}35583473E\text{-}01x^2 - 1{,}40719608E+00x + 2{,}02106669E+00$	0,999
	1°	carico	$y = 1{,}16496651E\text{-}01x^2 - 4{,}35620461E\text{-}01x + 2{,}92422760E\text{-}01$	0,998
	2°	scarico	$y = 1{,}45858063E\text{-}01x^2 - 6{,}28154649E\text{-}01x + 2{,}07440745E\text{-}01$	0,998
trazione	1°	carico	$y = 8{,}49595265E\text{-}03x^3 + 1{,}93763684E\text{-}01x^2 + 1{,}77432058E+00x + 6{,}02565581E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = 4{,}70612751E\text{-}02x^3 + 1{,}47548097E+00x^2 + 1{,}59338582E+01x + 5{,}88443234E+01$	0,998
	1°	carico	$y = 8{,}94417499E\text{-}03x^3 + 1{,}91482712E\text{-}01x^2 + 1{,}51667340E+00x + 4{,}40111366E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = 3{,}57320991E\text{-}02x^3 + 1{,}09345883E+00x^2 + 1{,}15836209E+01x + 4{,}22381019E+01$	0,998
	1°	carico	$y = 1{,}30835852E\text{-}02x^3 + 3{,}37330216E\text{-}01x^2 + 3{,}18302819E+00x + 1{,}06686743E+01$	0,999
	2°	scarico	$y = 4{,}99414294E\text{-}02x^3 + 1{,}64472700E+00x^2 + 1{,}86272147E+01x + 7{,}19931548E+01$	0,999

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.20 – Ponteggio Cb – Prova CCB-PC-05: funzioni interpolanti le fasi di carico e di scarico (prove cicliche)

Ponteggio Cb – Prova CCB-PC-05				
Tipo di carico	***Ciclo***	***Fase***	***Funzione interpolante***	***R^2***
compressione	1°	carico	$y = 4{,}78172462E\text{-}02x^2 - 9{,}02789389E\text{-}02x + 1{,}68259685E\text{-}03$	0,995
	2°	scarico	$y = 6{,}69151340E\text{-}02x^2 - 2{,}22518551E\text{-}01x - 3{,}24297647E\text{-}01$	0,998
	1°	carico	$y = 4{,}66624633E\text{-}02x^2 - 7{,}93262781E\text{-}02x - 4{,}81454356E\text{-}02$	0,997
	2°	scarico	$y = 6{,}00445591E\text{-}02x^2 - 1{,}30619901E\text{-}01x - 6{,}28012163E\text{-}01$	0,999
	1°	carico	$y = 2{,}07643761E\text{-}02x^2 + 2{,}67255210E\text{-}01x - 1{,}33389284E+00$	0,998
	2°	scarico	$y = 3{,}26731318E\text{-}02x^2 + 2{,}11781178E\text{-}01x - 1{,}82653309E+00$	1,000
trazione	1°	carico	$y = -9{,}78914778E\text{-}02x^2 - 1{,}02375528E+00x - 1{,}09615782E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = -1{,}94755027E\text{-}01x^2 - 3{,}04259987E+00x - 1{,}09944870E+01$	0,999
	1°	carico	$y = -9{,}03348939E\text{-}02x^2 - 8{,}72717269E\text{-}01x - 2{,}23821965E\text{-}01$	0,999
	2°	scarico	$y = -1{,}83002779E\text{-}01x^2 - 2{,}82263796E+00x - 9{,}89798532E+00$	0,999
	1°	carico	$y = -1{,}13191352E\text{-}01x^2 - 1{,}35725503E+00x - 2{,}75929103E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = -1{,}93971694E\text{-}01x^2 - 3{,}03825365E+00x - 1{,}09122582E+01$	0,999

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.21 – Ponteggio Cb – Prova CCB-PC-06: funzioni interpolanti le fasi di carico e di scarico (prove cicliche)

Ponteggio Cb – Prova CCB-PC-06				
Tipo di carico	***Ciclo***	***Fase***	***Funzione interpolante***	***R^2***
compressione	1°	carico	$y = 2{,}94715857E\text{-}02x^2 + 4{,}00466367E\text{-}01x - 7{,}89254171E\text{-}01$	0,997
	2°	scarico	$y = 2{,}68315747E\text{-}01x^2 - 1{,}66229892E+00x + 2{,}43278757E+00$	0,990
	1°	carico	$y = 6{,}16652852E\text{-}02x^2 + 9{,}87954992E\text{-}02x - 7{,}90354479E\text{-}01$	0,996
	2°	scarico	$y = 9{,}17711170E\text{-}01x - 4{,}18028720E+00$	0,999
	1°	carico	$y = 4{,}56514783E\text{-}02x^2 + 8{,}11913893E\text{-}02x - 5{,}52239030E\text{-}01$	0,999
	2°	scarico	$y = 7{,}35890364E\text{-}02x^3 - 1{,}36513430E+00x^2 + 9{,}19533337E+00x - 2{,}09511047E+01$	0,998
trazione	1°	carico	$y = -6{,}92271972E\text{-}02x^2 - 8{,}69865579E\text{-}01x - 2{,}72639921E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = 3{,}76466517E\text{-}02x^3 + 1{,}18750011E+00x^2 + 1{,}30706102E+01x + 4{,}95264890E+01$	0,999
	1°	carico	$y = -8{,}62962097E\text{-}02x^2 - 1{,}26498888E+00x - 4{,}63516923E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = 2{,}25887849E\text{-}02x^3 + 6{,}62207556E\text{-}01x^2 + 6{,}90856627E+00x + 2{,}53427291E+01$	0,999
	1°	carico	$y = -8{,}33100863E\text{-}02x^2 - 1{,}23935609E+00x - 4{,}59407982E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = 2{,}51305628E\text{-}02x^3 + 7{,}69001112E\text{-}01x^2 + 8{,}29452174E+00x + 3{,}11101598E+01$	0,999

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.22 – Ponteggio Cb – Prova CCB-PC-01: Legge semplificata multilineare

Ponteggio Cb – Prova CCB-PC-01							
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
compressione	1°	2,599	0,588	2,645	4°	12,641	4,255
	2°	3,172	0,545	2,630	5°	12,941	4,291
	3°	3,490	0,591	2,630	6°	13,216	4,278
	Valori medi	3,087	0,574	2,645	Valori medi	-10,559	1,025
	Equazione	3,087	y=0,574x-1,773		Equazione	y=0,312x+0,242	
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
trazione	1°	-10,337	0,978	-3,794	4°	-16,502	-6,792
	2°	-10,540	1,020	-3,867	5°	-16,796	-7,287
	3°	-10,798	1,077	-3,851	6°	-16,863	-7,007
	Valori medi	12,933	4,275	-3,838	Valori medi	-16,720	-7,029
	Equazione	12,933	y=1,025x+10,822		Equazione	y=1,320x+15,044	

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.23 – Ponteggio Cb – Prova CCB-PC-02: Legge semplificata multilineare

Ponteggio Cb – Prova CCB -PC-02							
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
compressione	1°	2,015	0,537	2,590	4°	11,717	4,306
	2°	3,219	0,656	2,484	5°	12,533	4,408
	3°	3,649	0,636	2,408	6°	12,511	4,292
	Valori medi	2,961	0,610	2,494	Valori medi	12,254	4,335
	Equazione	2,961	y=0,610x-1,805		Equazione	y=0,354x-0,002	
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
trazione	1°	-9,981	0,918	-4,359	4°	-17,116	-7,073
	2°	-10,243	0,957	-4,367	5°	-17,363	-7,090
	3°	-10,832	1,068	-4,386	6°	-17,701	-7,176
	Valori medi	-10,352	0,981	-4,371	Valori medi	-17,394	-7,113
	Equazione	-10,352	y=0,981x+10,153		Equazione	y=1,061x+11,335	

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.24 – Ponteggio Cb – Prova CCB-PC-03: Legge semplificata multilineare

Ponteggio Cb – Prova CCB -PC-03							
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
compressione	1°	1,825	0,580	2,620	4°	11,080	4,289
	2°	2,041	0,466	2,622	5°	11,285	4,297
	3°	2,254	0,609	2,665	6°	11,376	4,266
	Valori medi	2,040	0,552	2,636	Valori medi	11,247	4,284
	Equazione	2,040	y=0,552x-1,125		Equazione	y=0,372x+0,099	
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
trazione	1°	-11,343	0,935	-4,187	4°	-18,665	-7,138
	2°	-11,727	0,965	-4,033	5°	-19,094	-7,185
	3°	-11,916	0,978	-3,973	6°	-19,330	-7,176
	Valori medi	-11,662	0,959	-4,064	Valori medi	-19,030	-7,166
	Equazione	-11,662	y=0,959x+11,190		Equazione	y=0,991x+11,683	

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.25 – Ponteggio Cb – Prova CCB-PC-04: Legge semplificata multilineare

Ponteggio Cb – Prova CCB -PC-04							
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
compressione	1°	2,514	0,721	2,593	4°	10,668	4,326
	2°	3,112	0,805	2,635	5°	11,480	4,280
	3°	3,405	0,786	2,557	6°	11,638	4,272
	-	-	-	-	7°	11,865	4,297
	Valori medi	3,010	0,771	2,595	Valori medi	11,262	4,293
	Equazione	3,010	y=0,771x-2,320		Equazione	y=0,348x+0,379	
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
trazione	1°	-8,798	0,801	-4,187	4°	-17,298	-7,114
	2°	-8,845	0,766	-4,064	5°	-17,478	-7,122
	3°	-9,352	0,829	-4,078	6°	-17,590	-7,047
	Valori medi	-8,998	0,799	-4,109	Valori medi	-17,455	-7,094
	Equazione	-8,998	y=0,799x+7,185		Equazione	y=0,901x+8,640	

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.26 – Ponteggio Cb – Prova CCB-PC-05: Legge semplificata multilineare

Ponteggio Cb – Prova CCB -PC-05							
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
compressione	1°	3,145	0,503	2,707	4°	12,548	4,246
	2°	3,338	0,510	2,598	5°	13,119	4,321
	3°	4,376	0,594	2,668	6°	13,415	4,320
	-	-	-	-	7°	13,643	4,351
	Valori medi	3,620	0,536	2,658	Valori medi	13,027	4,295
	Equazione	3,620	y=0,536x-1,940		Equazione	y=0,368x-0,500	
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
trazione	1°	-9,597	1,250	-3,838	4°	-14,964	-6,476
	2°	-9,715	1,249	-3,840	5°	-15,123	-6,501
	3°	-9,741	1,282	-3,865	6°	-15,213	-6,425
	Valori medi	-9,685	1,260	-3,848	Valori medi	-15,100	-6,467
	Equazione	-9,685	y=1,260x+12,203		Equazione	y=1,109x+10,278	

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.27 – Ponteggio Cb – Prova CCB-PC-06: Legge semplificata multilineare

Ponteggio Cb – Prova CCB -PC-06							
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
compressione	1°	2,785	0,826	2,877	4°	11,840	4,912
	2°	3,711	0,891	2,998	5°	11,563	4,866
	3°	3,806	0,721	3,044	6°	11,838	4,941
	-	-	-	-	7°	12,019	4,952
	Valori medi	3,434	0,813	2,973	Valori medi	11,747	4,906
	Equazione	3,434	y=0,813x-2,790		Equazione	y=0,415x+0,027	
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
trazione	1°	-8,231	0,713	-4,104	4°	-16,836	-7,504
	2°	-8,591	0,727	-4,090	5°	-16,835	-7,428
	3°	-8,864	0,728	-4,039	6°	-16,968	-7,505
	Valori medi	-8,562	0,723	-4,078	Valori medi	-16,879	-7,479
	Equazione	-8,562	y=0,723x+6,187		Equazione	y=1,272x+13,986	

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

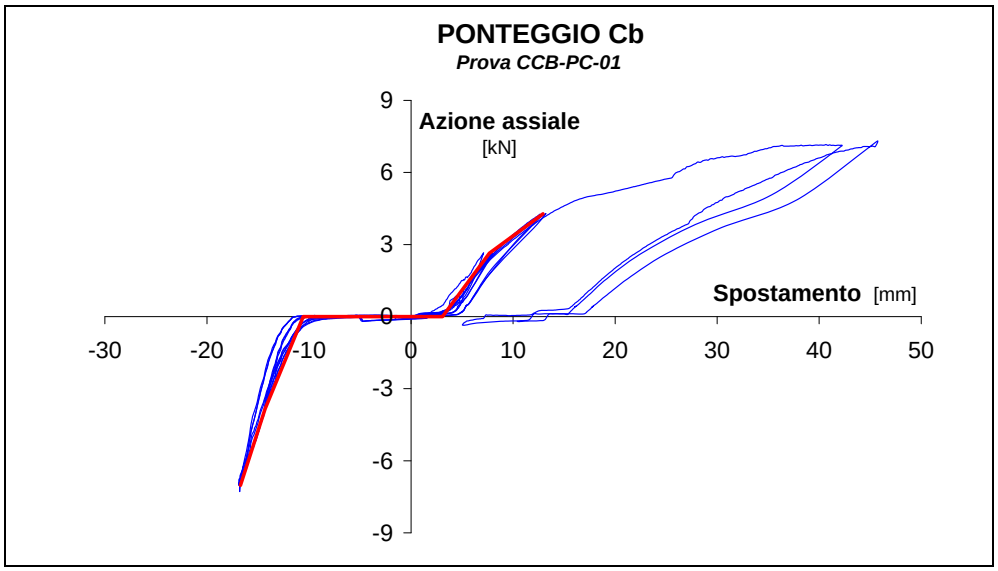


Figura A3.25 – Ponteggio Cb: confronto risposta sperimentale - legge semplificata

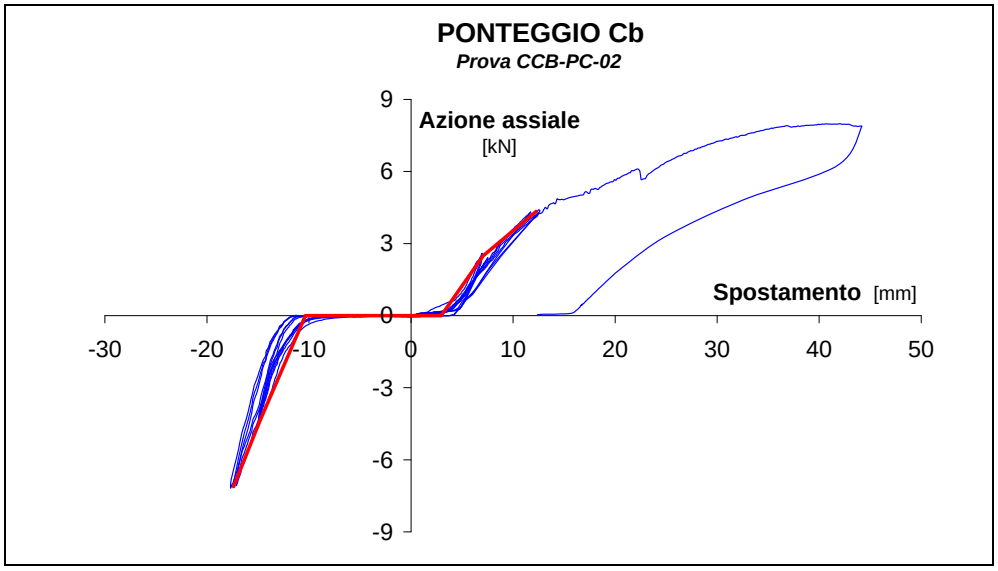


Figura A3.26 – Ponteggio Cb: confronto risposta sperimentale - legge semplificata

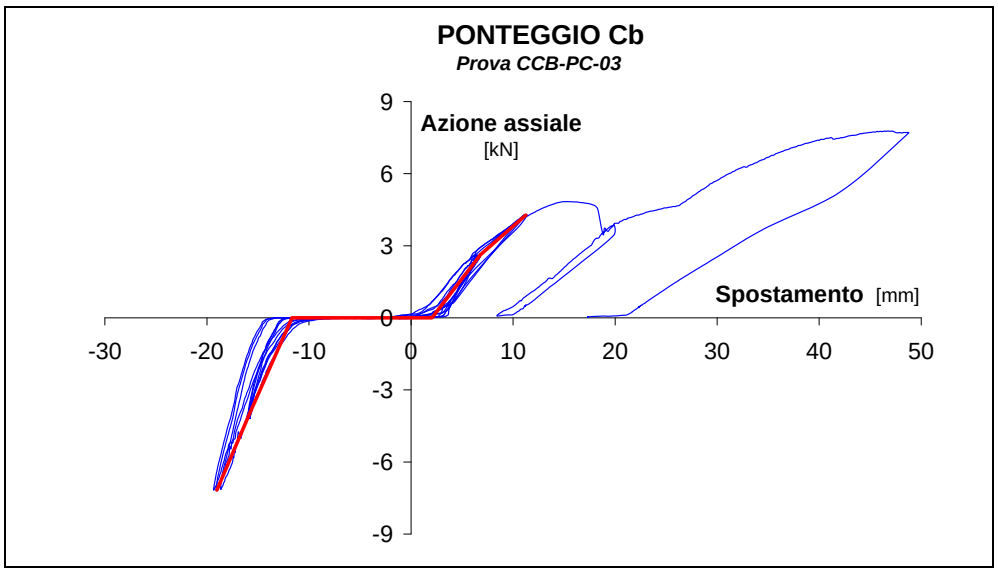


Figura A3.27 – Ponteggio Cb: confronto risposta sperimentale - legge semplificata

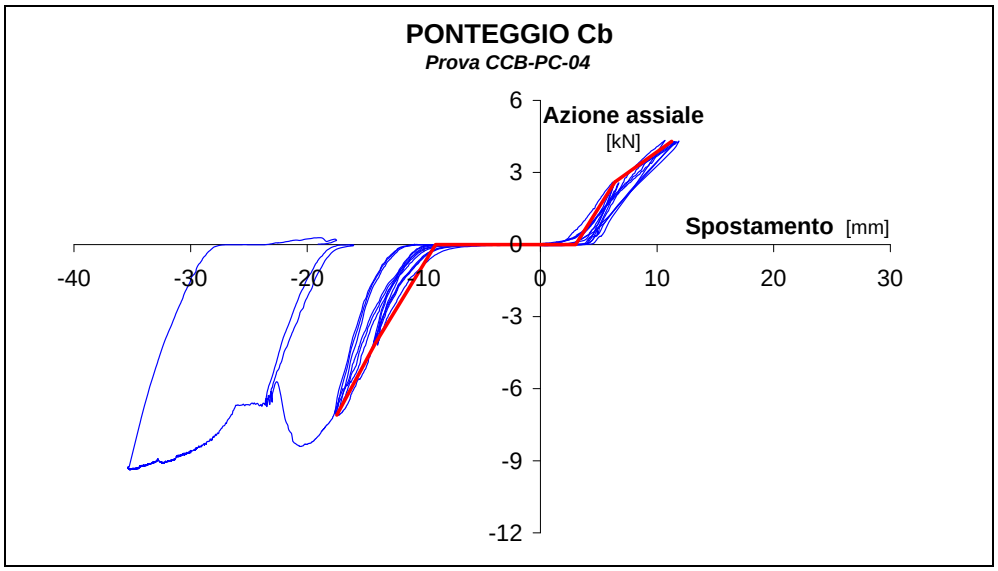


Figura A3.28 – Ponteggio Cb: confronto risposta sperimentale - legge semplificata

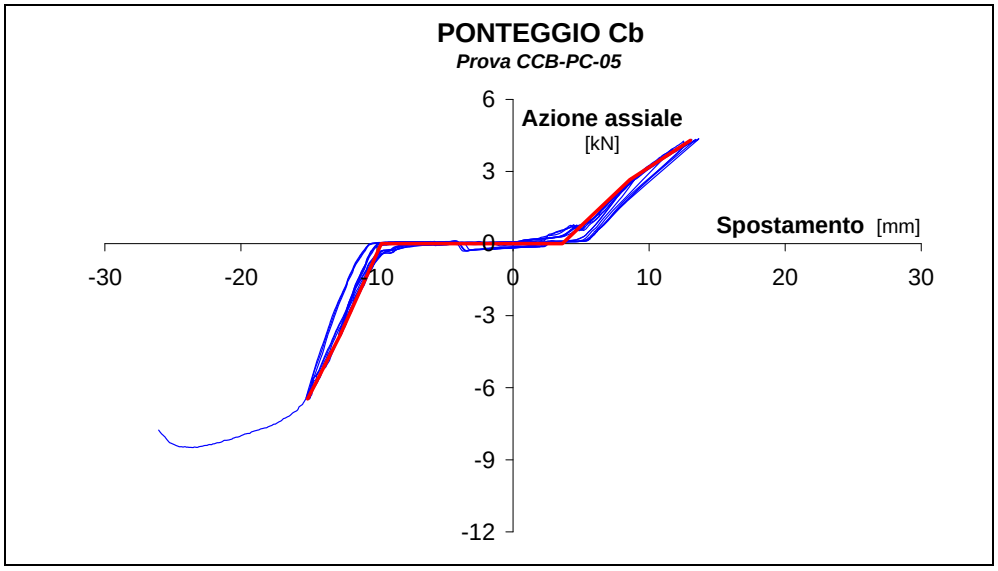


Figura A3.29 – Ponteggio Cb: confronto risposta sperimentale - legge semplificata

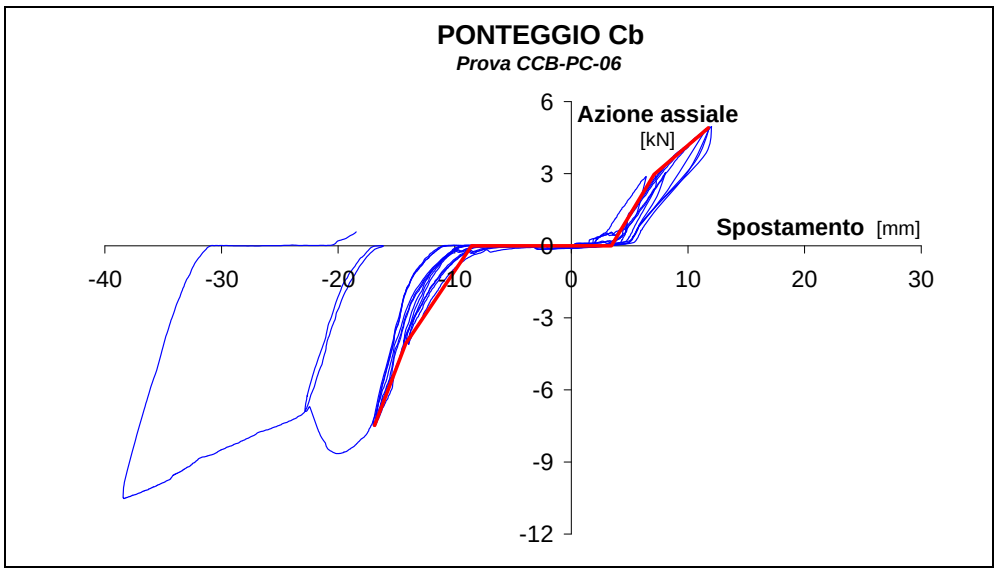


Figura A3.30 – Ponteggio Cb: confronto risposta sperimentale - legge semplificata

Tabella A3.28 – Ponteggio Cb: legge globale spostamento-azione assiale

Ponteggio Cb						
Carico	Prova	$\overline{d_0^+}$ [mm]	$\overline{k_{Rd}^+}$ [kN/mm]	$\overline{R_d^+}$ [kN]	$\overline{s_{Rk}^+}$ [mm]	$\overline{R_k^+}$ [kN]
compressione	CCB-PC-01	3,087	0,574	2,635	12,933	4,275
	CCB-PC-02	2,961	0,610	2,494	12,254	4,335
	CCB-PC-03	2,040	0,552	2,636	11,247	4,284
	CCB-PC-04	3,010	0,771	2,595	11,262	4,293
	CCB-PC-05	3,620	0,536	2,658	13,027	4,295
	CCB-PC-06	3,434	0,813	2,973	11,747	4,906
	Valori medi	$\overline{\overline{d_0^+}}$ [mm]	$\overline{\overline{k_{Rd}^+}}$ [kN/mm]	$\overline{\overline{R_d^+}}$ [kN]	$\overline{\overline{s_{Rk}^+}}$ [mm]	$\overline{\overline{R_k^+}}$ [kN]
		3,025	0,626	2,665	12,036	4,398
Carico	Prova	$\overline{d_0^-}$ [mm]	$\overline{k_{Rd}^-}$ [kN/mm]	$\overline{R_d^-}$ [kN]	$\overline{s_{Rk}^-}$ [mm]	$\overline{R_k^-}$ [kN]
trazione	CCB-PC-01	-10,559	1,025	-3,838	-16,720	-7,029
	CCB-PC-02	-10,352	0,981	-4,371	-17,394	-7,113
	CCB-PC-03	-11,662	0,959	-4,064	-19,030	-7,166
	CCB-PC-04	-8,998	0,799	-4,109	-17,455	-7,094
	CCB-PC-05	-9,685	1,260	-3,848	-15,100	-6,467
	CCB-PC-06	-8,562	0,723	-4,078	-16,879	-7,479
	Valori medi	$\overline{\overline{d_0^-}}$ [mm]	$\overline{\overline{k_{Rd}^-}}$ [kN/mm]	$\overline{\overline{R_d^-}}$ [kN]	$\overline{\overline{s_{Rk}^-}}$ [mm]	$\overline{\overline{R_k^-}}$ [kN]
		-9,970	0,928	-4,051	-17,016	-7,058

Tabella A3.29 – Ponteggio Cb: test sulla rigidezza nell'intervallo 0-R_d

$\overline{\overline{k_{Rd}^+}}$ [kN/mm]	$\overline{\overline{k_{Rd}^-}}$ [kN/mm]	$\left\lvert\frac{\lvert\overline{\overline{k_{Rd}^+}}\rvert - \lvert\overline{\overline{k_{Rd}^-}}\rvert}{\lvert\overline{\overline{k_{Rd}^+}}\rvert + \lvert\overline{\overline{k_{Rd}^-}}\rvert}\right\rvert \cdot 100$	Test
0,626	0,928	19,437	Rigidezze distinte

Tabella A3.30 – Equazione legge globale

Ponteggio Cb	
Spostamento [mm]	Carico [kN]
-17,016	-7,058
-14,336	-4,051
-9,970	0,000
0,000	0,000
3,025	0,000
7,284	2,665
12,036	4,398

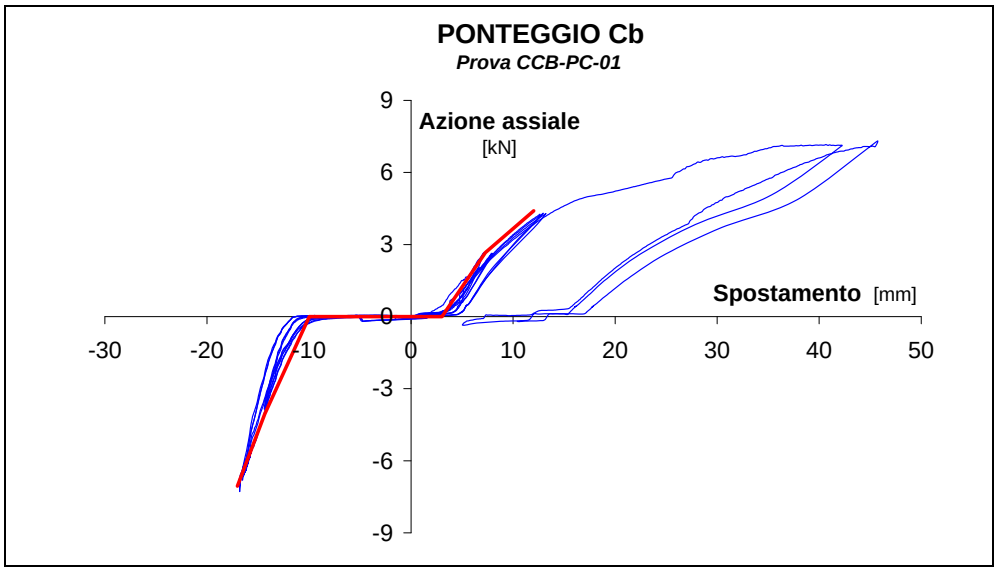


Figura A3.31 – Ponteggio Cb: confronto risposta sperimentale - legge semplificata media

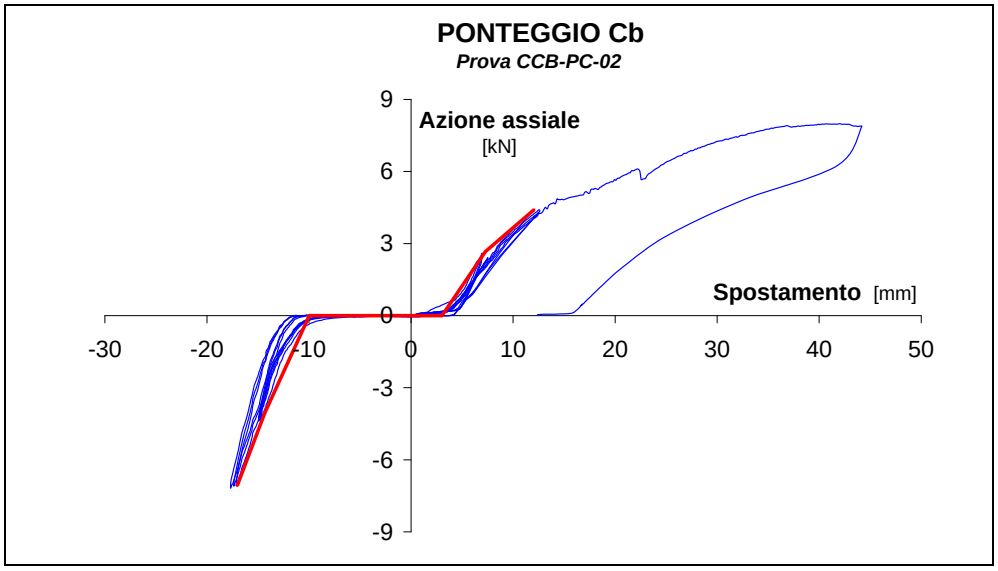


Figura A3.32 – Ponteggio Cb: confronto risposta sperimentale - legge semplificata media

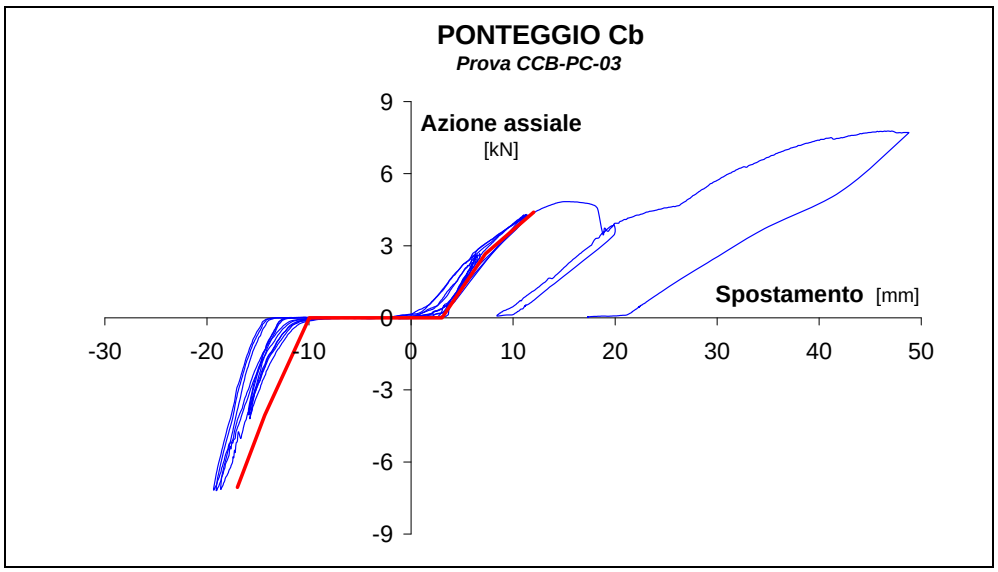


Figura A3.33 – Ponteggio Cb: confronto risposta sperimentale - legge semplificata media

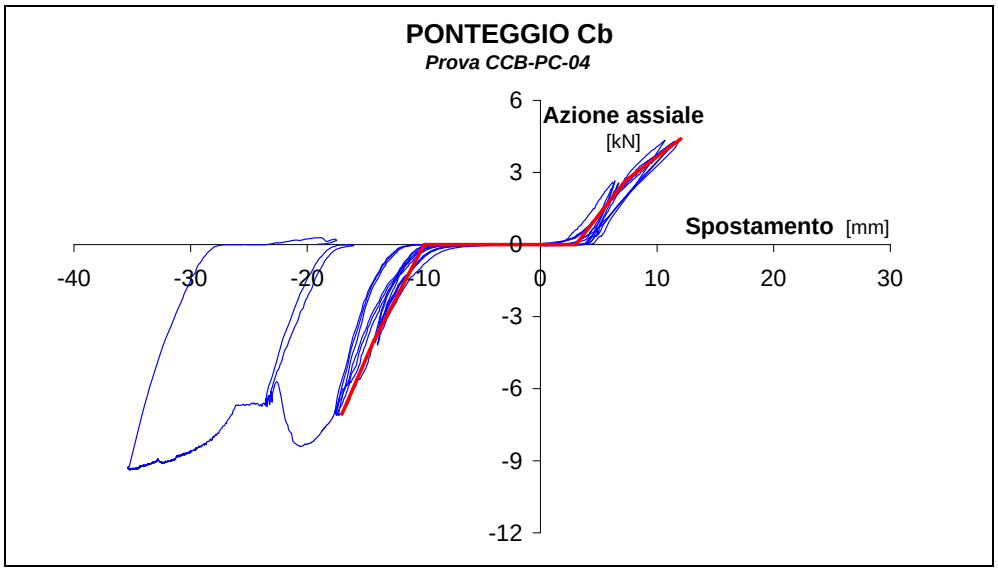


Figura A3.34 – Ponteggio Cb: confronto risposta sperimentale - legge semplificata media

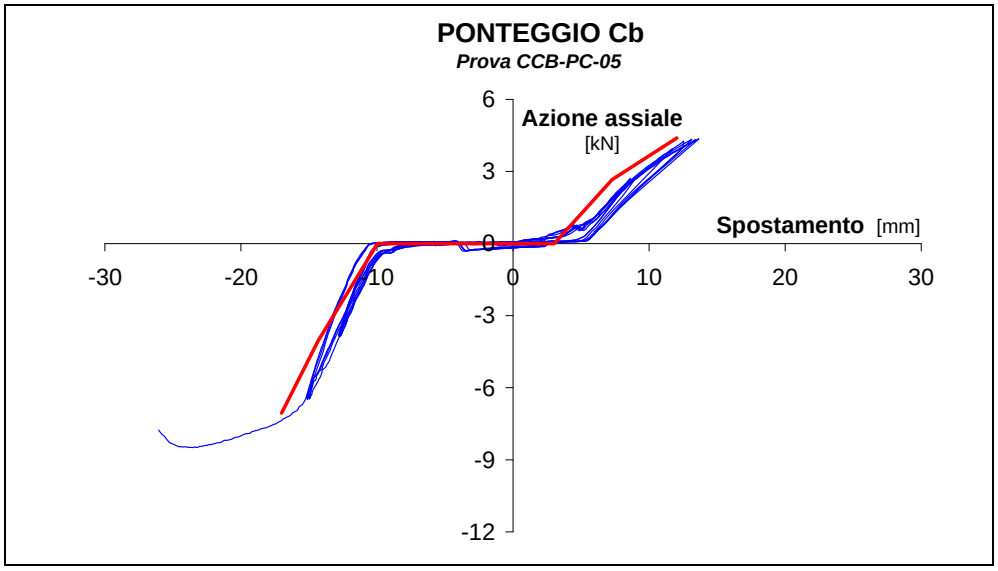


Figura A3.35 – Ponteggio Cb: confronto risposta sperimentale - legge semplificata media

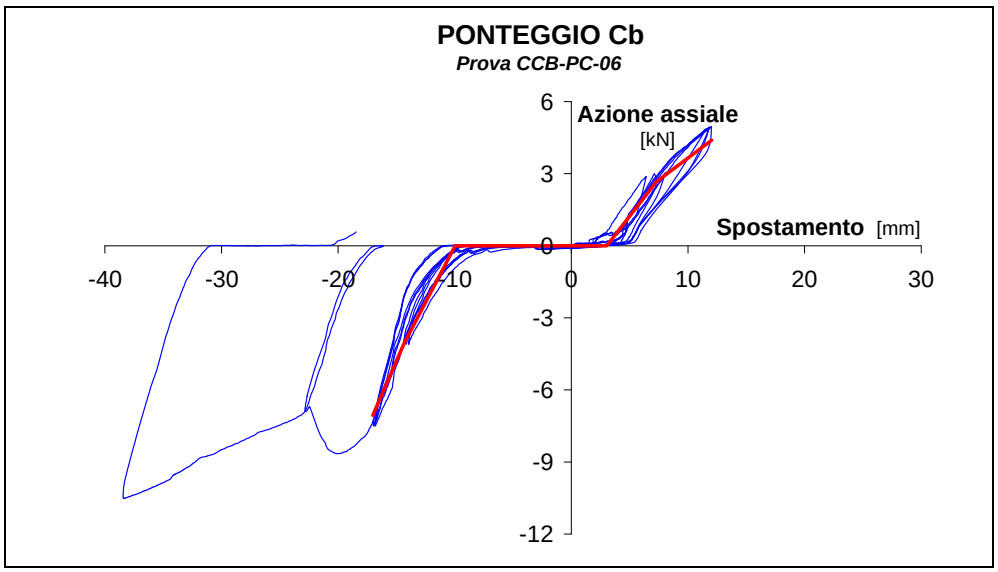


Figura A3.36 – Ponteggio Cb: confronto risposta sperimentale - legge semplificata media

PONTEGGIO D

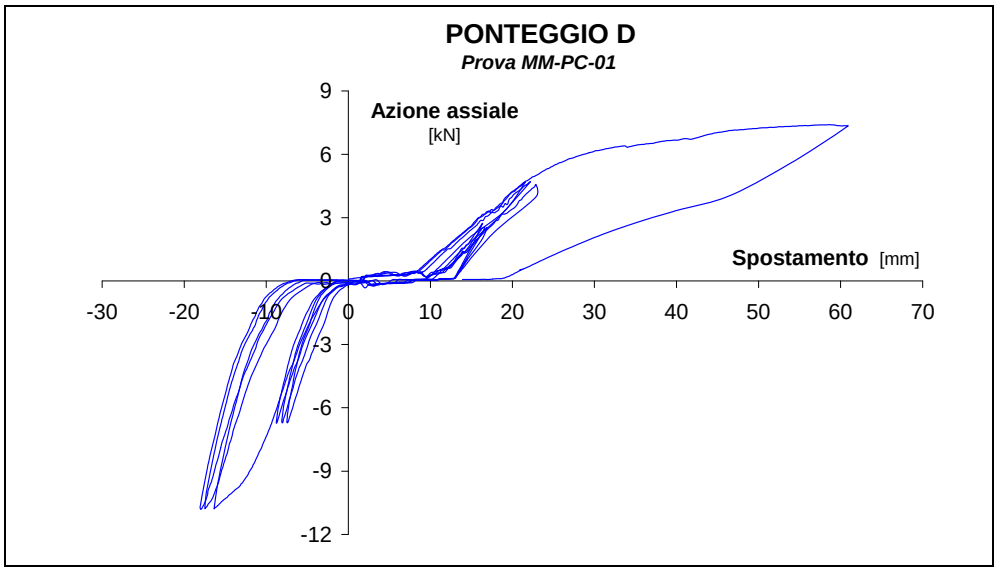


Figura A3.37 – Ponteggio D: riposta sperimentale relativa al campione MM-PC-01

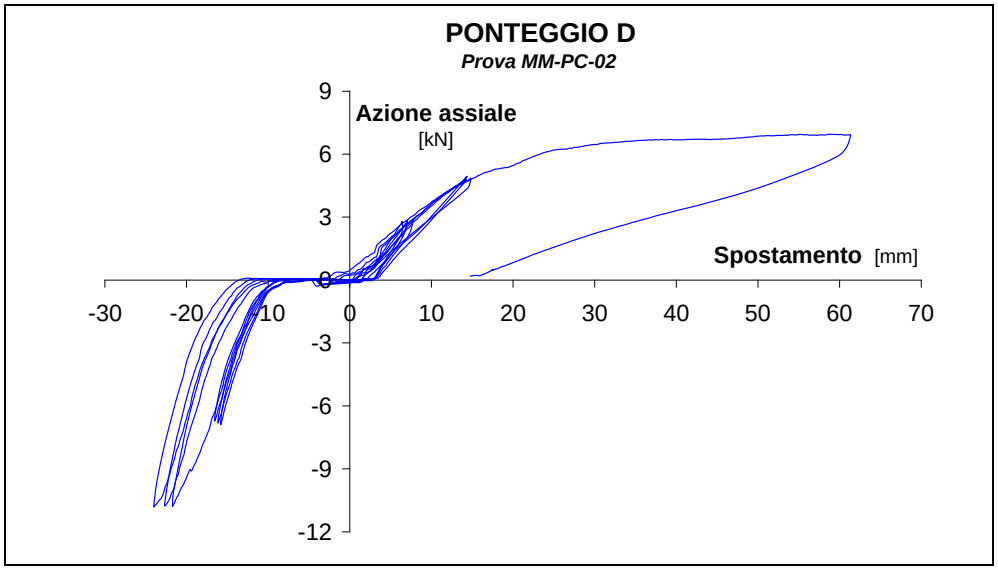


Figura A3.38 – Ponteggio D: riposta sperimentale relativa al campione MM-PC-02

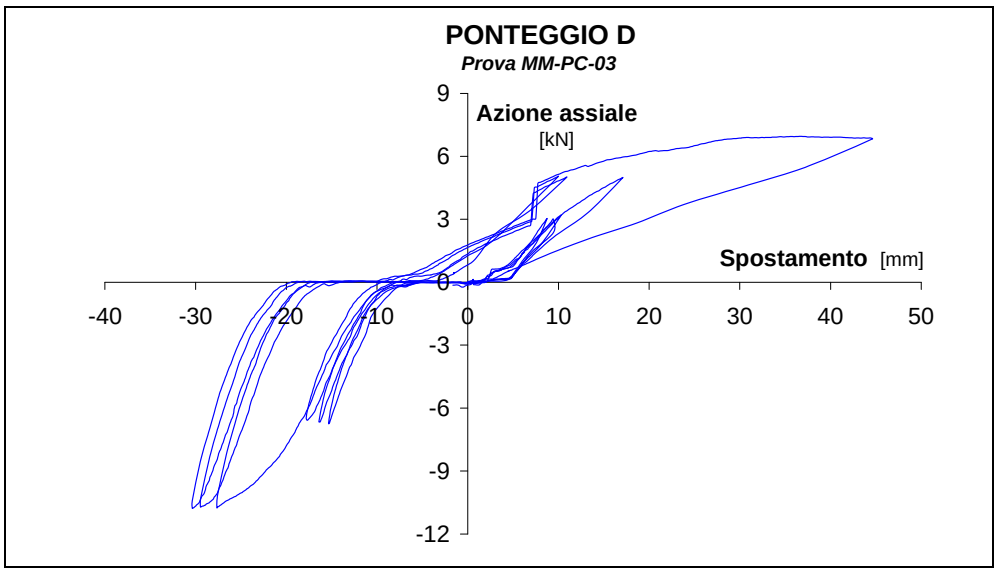


Figura A3.39 – Ponteggio D: riposta sperimentale relativa al MM-PC-03

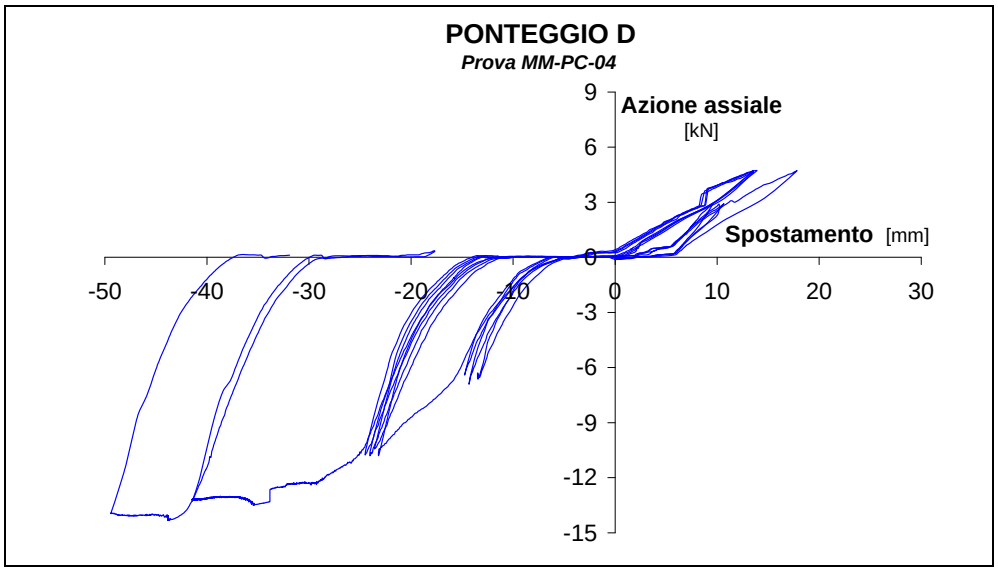


Figura A3.40 – Ponteggio D: riposta sperimentale relativa al campione MM-PC-04

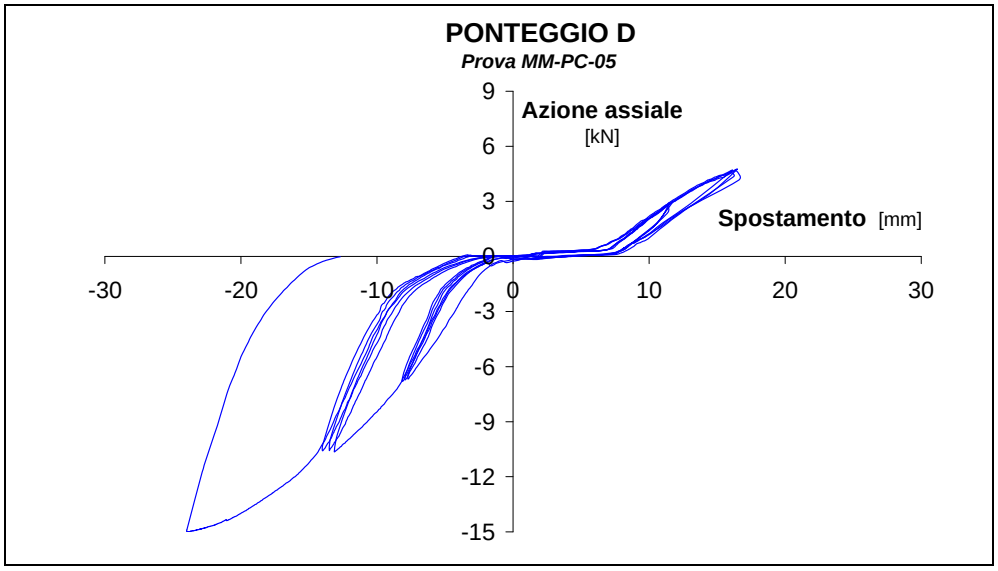


Figura A3.41 – Ponteggio D: riposta sperimentale relativa al campione MM-PC-05

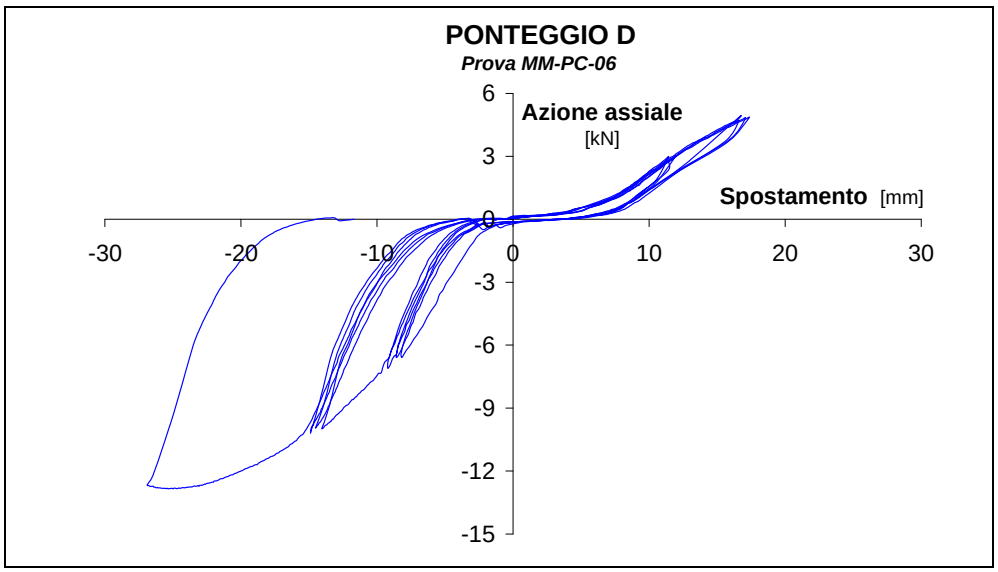


Figura A3.42 – Ponteggio D: riposta sperimentale relativa al campione MM-PC-06

Tabella A3.31 – Ponteggio D – Prova MM-PC-01: funzioni interpolanti le fasi di carico e di scarico (prove cicliche)

Ponteggio D – Prova MM-PC-01				
Tipo di carico	***Ciclo***	***Fase***	***Funzione interpolante***	***R^2***
compressione	1°	carico	$y = 4{,}66957789E\text{-}02x^3 + 5{,}46614558E\text{-}01x^2 + 3{,}03100982E+00x + 5{,}08051338E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = 7{,}38982220E\text{-}01x - 9{,}42664533E+00$	0,998
	1°	carico	$y = -1{,}78937109E\text{-}03x^4 + 9{,}16475782E\text{-}02x^3 - 1{,}70221147E+00x^2 + 1{,}38716032E+01x - 4{,}19691891E+01$	0,994
	2°	scarico	$y = 6{,}36629176E\text{-}01x - 8{,}09405999E+00$	0,998
	1°	carico	$y = 2{,}33666298E\text{-}02x^2 - 2{,}84356364E\text{-}01x + 6{,}65620620E\text{-}01$	0,997
	2°	scarico	$y = 3{,}58560531E\text{-}01x - 3{,}68344822E+00$	0,983
trazione	1°	carico	$y = -3{,}72467293E\text{-}02x^2 + 6{,}94559749E\text{-}01x + 4{,}52937176E\text{-}01$	0,999
	2°	scarico	$y = 4{,}66957789E\text{-}02x^3 + 5{,}46614558E\text{-}01x^2 + 3{,}03100982E+00x + 5{,}08051338E+00$	0,999
	1°	carico	$y = -6{,}03019378E\text{-}02x^2 + 4{,}33395037E\text{-}01x + 6{,}00595783E\text{-}01$	0,999
	2°	scarico	$y = 2{,}06711238E\text{-}02x^3 + 2{,}01313847E\text{-}01x^2 + 1{,}39581211E+00x + 2{,}67269295E+00$	0,999
	1°	carico	$y = -6{,}03019378E\text{-}02x^2 + 4{,}33395037E\text{-}01x + 6{,}00595783E\text{-}01$	0,999
	2°	scarico	$y = 1{,}01640404E\text{-}02x^3 + 3{,}97048457E\text{-}02x^2 + 3{,}92534082E\text{-}01x + 7{,}80376623E\text{-}01$	1,000

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.32 – Ponteggio D – Prova MM-PC-02: funzioni interpolanti le fasi di carico e di scarico (prove cicliche)

Ponteggio D – Prova MM-PC-02				
Tipo di carico	***Ciclo***	***Fase***	***Funzione interpolante***	***R^2***
compressione	1°	carico	y = 5,81332633E-01x - 9,84033417E-01	0,998
	2°	scarico	y = 6,39283399E-01x - 1,82709078E+00	0,999
	1°	carico	y = 4,67904620E-01x - 6,04150088E-01	0,981
	2°	scarico	y = 5,67693895E-01x - 1,63782609E+00	0,997
	1°	carico	y = 4,33113541E-01x - 5,92769110E-01	0,994
	2°	scarico	y = 5,12358322E-01x - 1,55108856E+00	0,998
trazione	1°	carico	$y = 2{,}45739696E\text{-}03x^3 + 3{,}20558900E\text{-}02x^2 + 6{,}68962717E\text{-}01x + 5{,}40400696E+00$	1,000
	2°	scarico	$y = -1{,}11080574E\text{-}01x^2 - 1{,}80671665E+00x - 7{,}19546244E+00$	0,998
	1°	carico	$y = 3{,}17907071E\text{-}04x^5 + 2{,}32528443E\text{-}02x^4 + 6{,}70447485E\text{-}01x^3 + 9{,}46879492E+00x^2 + 6{,}62424918E+01x + 1{,}84830756E+02$	1,000
	2°	scarico	$y = 3{,}88728769E\text{-}03x^3 + 3{,}55389783E\text{-}02x^2 - 8{,}56674052E\text{-}02x - 7{,}85238882E\text{-}01$	9,992
	1°	carico	$y = 5{,}61005388E\text{-}03x^4 + 3{,}04282594E\text{-}01x^3 + 6{,}06267873E+00x^2 + 5{,}35167291E+01x + 1{,}76877545E+02$	1,000
	2°	scarico	$y = 3{,}88728769E\text{-}03x^3 + 3{,}55389783E\text{-}02x^2 - 8{,}56674052E\text{-}02x - 7{,}85238882E\text{-}01$	0,999

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.33 – Ponteggio D – Prova MM-PC-03: funzioni interpolanti le fasi di carico e di scarico (prove cicliche)

Ponteggio D – Prova MM-PC-03				
Tipo di carico	***Ciclo***	***Fase***	***Funzione interpolante***	***R^2***
compressione	1°	carico	$y = 2{,}29386693E\text{-}02x^2 + 2{,}93402504E\text{-}01x - 1{,}24600214E+00$	0,998
	2°	scarico	$y = 5{,}79853131E\text{-}01x - 2{,}50658517E+00$	0,998
	1°	carico	$y = 2{,}45500668E\text{-}02x^2 + 1{,}10765577E\text{-}01x - 1{,}92974368E\text{-}01$	0,997
	2°	scarico	$y = 4{,}73495332E\text{-}01x - 2{,}02103451E+00$	0,990
	1°	carico	$y = 1{,}07714692E\text{-}02x^2 + 2{,}67110735E\text{-}01x - 6{,}51398278E\text{-}01$	0,996
	2°	scarico	$y = 5{,}27424696E\text{-}01x - 2{,}32130677E+00$	0,996
trazione	1°	carico	$y = 5{,}93247473E\text{-}04x^5 + 3{,}28639696E\text{-}02x^4 + 7{,}10198494E\text{-}01x^3 + 7{,}40032963E+00x^2 + 3{,}74613070E+01x + 7{,}41742529E+01$	0,999
	2°	scarico	$y = 8{,}30477186E\text{-}03x^3 + 1{,}98049788E\text{-}01x^2 + 2{,}03619530E+00x + 8{,}17948546E+00$	0,999
	1°	carico	$y = 5{,}18925997E\text{-}04x^5 + 3{,}01401041E\text{-}02x^4 + 6{,}83483120E\text{-}01x^3 + 7{,}48152002E+00x^2 + 3{,}96980638E+01x + 8{,}20017536E+01$	0,999
	2°	scarico	$y = -7{,}91164962E\text{-}02x^2 - 1{,}18026277E+00x - 4{,}26328467E+00$	0,997
	1°	carico	$y = 7{,}62893901E\text{-}04x^4 + 3{,}45590983E\text{-}02x^3 + 5{,}16428284E\text{-}01x^2 + 3{,}42683371E+00x + 8{,}92294387E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = 1{,}12764735E\text{-}02x^3 + 4{,}11492833E\text{-}01x^2 + 5{,}62171900E+00x + 2{,}69562160E+01$	0,999

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.34 – Ponteggio D – Prova MM-PC-04: funzioni interpolanti le fasi di carico e di scarico (prove cicliche)

Ponteggio D – Prova MM-PC-04				
Tipo di carico	***Ciclo***	***Fase***	***Funzione interpolante***	***R^2***
compressione	1°	carico	$y = 1{,}27973882E\text{-}02x^2 + 4{,}07399647E\text{-}01x - 2{,}08075708E+00$	0,995
	2°	scarico	$y = 7{,}09316872E\text{-}01x - 3{,}98381370E+00$	0,994
	1°	carico	$y = -2{,}63587939E\text{-}03x^2 + 5{,}20618716E\text{-}01x - 2{,}10871747E+00$	0,996
	2°	scarico	$y = 5{,}17201764E\text{-}01x - 2{,}82281208E+00$	0,994
	1°	carico	$y = -1{,}89115765E\text{-}03x^2 + 4{,}64491850E\text{-}01x - 1{,}77611078E+00$	0,991
	2°	scarico	$y = 5{,}05948430E\text{-}01x - 2{,}67825101E+00$	0,998
trazione	1°	carico	$y = 2{,}87901246E\text{-}03x^3 + 2{,}13935877E\text{-}03x^2 + 5{,}52173498E\text{-}02x + 6{,}13911699E\text{-}01$	1,000
	2°	scarico	$y = 1{,}52095124E\text{-}02x^3 + 3{,}37535048E\text{-}01x^2 + 3{,}00941979E+00x + 9{,}73229107E+00$	0,998
	1°	carico	$y = 2{,}95834698E\text{-}03x^3 + 8{,}91865162E\text{-}03x^2 + 1{,}45374414E\text{-}02x + 2{,}91562855E\text{-}01$	0,999
	2°	scarico	$y = 1{,}78553782E\text{-}02x^3 + 4{,}62414045E\text{-}01x^2 + 4{,}49542443E+00x + 1{,}52036775E+01$	0,998
	1°	carico	$y = 4{,}40568559E\text{-}03x^3 + 6{,}65210780E\text{-}02x^2 + 5{,}89670019E\text{-}01x + 2{,}04048007E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = 2{,}04955833E\text{-}02x^3 + 6{,}08595270E\text{-}01x^2 + 6{,}58604475E+00x + 2{,}42510554E+01$	0,998

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.35 – Ponteggio D – Prova MM-PC-05: funzioni interpolanti le fasi di carico e di scarico (prove cicliche)

Ponteggio D – Prova MM-PC-05				
Tipo di carico	***Ciclo***	***Fase***	***Funzione interpolante***	***R^2***
compressione	1°	carico	$y = -8{,}44700516E\text{-}03x^2 + 7{,}55190622E\text{-}01x - 4{,}65090965E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = 5{,}82485634E\text{-}01x - 4{,}30291528E+00$	0,995
	1°	carico	$y = 5{,}13354891E\text{-}03x^2 + 4{,}72930415E\text{-}01x - 3{,}18553969E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = 6{,}10217122E\text{-}02x^3 - 1{,}65021881E+00x^2 + 1{,}53167690E+01x - 4{,}77806702E+01$	0,999
	1°	carico	$y = 6{,}04777421E\text{-}03x^2 + 4{,}45580868E\text{-}01x - 3{,}04756230E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = 2{,}56884151E\text{-}02x^3 - 6{,}60964475E\text{-}01x^2 + 6{,}14159305E+00x - 1{,}96018972E+01$	0,999
trazione	1°	carico	$y = 1{,}08668023E+00x + 1{,}64040026E+00$	0,998
	2°	scarico	$y = 2{,}40075150E\text{-}02x^4 + 4{,}96605658E\text{-}01x^3 + 3{,}50981861E+00x^2 + 1{,}09547268E+01x + 1{,}22016779E+01$	0,999
	1°	carico	$y = 1{,}20050687E\text{-}02x^4 + 2{,}15011429E\text{-}01x^3 + 1{,}19530899E+00x^2 + 3{,}11738975E+00x + 2{,}66227406E+00$	1,000
	2°	scarico	$y = 1{,}53751390E\text{-}02x^4 + 3{,}26750025E\text{-}01x^3 + 2{,}30338822E+00x^2 + 7{,}20550488E+00x + 7{,}94838611E+00$	0,999
	1°	carico	$y = -8{,}91220032E\text{-}04x^5 - 1{,}26948959E\text{-}02x^4 - 3{,}58270689E\text{-}02x^3 + 1{,}88875739E\text{-}02x^2 + 4{,}79014009E\text{-}01x + 4{,}29747381E\text{-}01$	1,000
	2°	scarico	$y = 3{,}14873999E\text{-}02x^4 + 6{,}71550646E\text{-}01x^3 + 4{,}99920152E+00x^2 + 1{,}62456963E+01x + 1{,}89860216E+01$	0,999

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.36 – Ponteggio D – Prova MM-PC-06: funzioni interpolanti le fasi di carico e di scarico (prove cicliche)

Ponteggio D – Prova MM-PC-06				
Tipo di carico	***Ciclo***	***Fase***	***Funzione interpolante***	***R^2***
compressione	1°	carico	$y = -1{,}87391974E\text{-}03x^4 + 5{,}92732004E\text{-}02x^3 - 6{,}52117712E\text{-}01x^2 + 3{,}26870241E+00x - 5{,}73992429E+00$	0,999
	2°	scarico	$y = 1{,}33760390E\text{-}02x^3 - 2{,}57743875E\text{-}01x^2 + 1{,}84471793E+00x - 4{,}45352650E+00$	0,997
	1°	carico	$y = -2{,}18032437E\text{-}03x^4 + 6{,}99910968E\text{-}02x^3 - 7{,}88502735E\text{-}01x^2 + 4{,}01311159E+00x - 7{,}33325737E+00$	1,000
	2°	scarico	$y = -3{,}09666363E\text{-}03x^4 + 9{,}96595231E\text{-}02x^3 - 1{,}12011247E+00x^2 + 5{,}46275841E+00x - 9{,}71975235E+00$	1,001
	1°	carico	$y = -1{,}63120705E\text{-}03x^4 + 5{,}30834462E\text{-}02x^3 - 5{,}97206759E\text{-}01x^2 + 3{,}05872890E+00x - 5{,}58128590E+00$	1,000
	2°	scarico	$y = -8{,}39059707E\text{-}03x^4 + 2{,}73929948E\text{-}01x^3 - 3{,}24936048E+00x^2 + 1{,}68897775E+01x - 3{,}24690667E+01$	0,990
trazione	1°	carico	$y = -1{,}89490737E\text{-}02x^2 + 8{,}44422676E\text{-}01x + 1{,}47551280E+00$	0,998
	2°	scarico	$y = -1{,}71887138E\text{-}01x^2 - 7{,}15432341E\text{-}01x - 6{,}00094120E\text{-}01$	0,998
	1°	carico	$y = -9{,}65615464E\text{-}02x^2 + 5{,}79840157E\text{-}02x + 8{,}29601297E\text{-}01$	0,998
	2°	scarico	$y = -1{,}58937241E\text{-}01x^2 - 7{,}10447729E\text{-}01x - 7{,}14604746E\text{-}01$	0,998
	1°	carico	$y = 2{,}88921027E\text{-}03x^4 + 5{,}84241413E\text{-}02x^3 + 2{,}83828960E\text{-}01x^2 + 7{,}63209094E\text{-}01x + 6{,}44977079E\text{-}01$	1,000
	2°	scarico	$y = 5{,}10148867E\text{-}03x^5 + 1{,}71139783E\text{-}01x^4 + 2{,}25784295E+00x^3 + 1{,}44657117E+01x^2 + 4{,}55896952E+01x + 5{,}66218430E+01$	0,981

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.37 – Ponteggio D – Prova MM-PC-01: Legge semplificata multilineare

Ponteggio D – Prova MM-PC-01							
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
compressione	1°	11,538	0,560	2,716	4°	22,892	4,561
	2°	10,748	0,444	2,520	5°	22,194	4,697
	3°	9,640	0,348	2,522	6°	21,310	4,594
	Valori medi	10,642	0,451	2,586	Valori medi	22,132	4,617
	Equazione	10,642	y=0,451x-4,795		Equazione	y=0,353x-3,200	
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
trazione	1°	-1,648	1,169	-6,706	4°	-16,353	-10,781
	2°	-1,921	1,106	-6,717	5°	-17,478	-10,775
	3°	-1,696	1,067	-6,727	6°	-17,987	-10,816
	Valori medi	-1,755	1,114	-6,717	Valori medi	-17,272	-10,791
	Equazione		y=1,114x+1,955		Equazione	y=0,429x-3,375	

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.38 – Ponteggio D – Prova MM-PC-02: Legge semplificata multilineare

Ponteggio D – Prova MM -PC-02							
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
compressione	1°	2,275	0,662	2,782	4°	14,290	4,766
	2°	2,088	0,540	2,804	5°	14,335	4,935
	3°	2,198	0,495	2,893	6°	14,826	4,839
	Valori medi	2,187	0,565	2,827	Valori medi	14,484	4,847
	Equazione	2,187	y=0,565x-1,237		Equazione	y=0,277x+0,837	
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
trazione	1°	-9,285	1,053	-6,882	4°	-21,740	-10,776
	2°	-9,344	1,004	-6,811	5°	-22,656	-10,765
	3°	-9,480	0,948	-6,710	6°	-24,022	-10,806
	Valori medi	-9,370	1,002	-6,801	Valori medi	-22,806	-10,782
	Equazione	-9,370	y=1,002x+9,388		Equazione	y=0,599x+2,875	

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.39 – Ponteggio D – Prova MM-PC-03: Legge semplificata multilineare

Ponteggio D – Prova MM -PC-03							
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
compressione	1°	3,843	0,626	3,022	4°	17,094	4,985
	2°	2,805	0,457	3,000	5°	*	*
	3°	3,319	0,464	3,185	6°	*	*
	Valori medi	3,322	0,516	3,069	Valori medi	17,094	4,985
	Equazione	3,322	y=0,516x-1,713		Equazione	y=0,245x+0,797	
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
trazione	1°	-7,683	0,887	-6,730	4°	-27,664	-10,751
	2°	-7,779	0,788	-6,654	5°	-29,470	-10,718
	3°	-9,404	0,809	-6,579	6°	-30,367	-10,774
	Valori medi	-8,289	0,828	-6,654	Valori medi	-29,167	-10,747
	Equazione	-8,289	y=0,828x+6,863		Equazione	y=0,319x-1,451	

* anomalie dei cicli hanno consigliato la loro esclusione dall'elaborazione (Fig. A3.39)
y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.40 – Ponteggio D – Prova MM-PC-04: Legge semplificata multilineare

Ponteggio D – Prova MM -PC-04							
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
compressione	1°	5,047	0,661	2,909	4°	17,807	4,696
	2°	4,797	0,543	2,876	5°	*	*
	3°	4,589	0,489	2,910	6°	*	*
	-	-	-	-	7°	*	*
	Valori medi	4,811	0,565	2,898	Valori medi	17,807	4,696
	Equazione	4,811	y=0,565x-2,716		Equazione	y=0,229x+0,624	
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
trazione	1°	-6,051	0,904	-6,612	4°	-23,163	-10,772
	2°	-6,441	0,867	-6,901	5°	-23,599	-10,425
	3°	-6,909	0,812	-6,411	6°	-24,043	-10,799
	Valori medi	-6,467	0,861	-6,641	Valori medi	-23,601	-10,665
	Equazione	-6,467	y=0,861x+5,568		Equazione	y=0,427x-0,584	

* anomalie dei cicli hanno consigliato la loro esclusione dall'elaborazione (Fig. A3.40)
y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.41 – Ponteggio D – Prova MM-PC-05: Legge semplificata multilineare

Ponteggio D – Prova MM -PC-05							
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
compressione	1°	7,020	0,655	2,811	4°	16,084	4,553
	2°	6,894	0,637	2,905	5°	16,104	4,688
	3°	6,799	0,611	3,003	6°	16,462	4,742
	-	-	-	-	7°	16,439	4,649
	Valori medi	6,904	0,634	2,906	Valori medi	16,272	4,658
	Equazione	6,904	y=0,634x-4,379		Equazione	y=0,366x-1,298	
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
trazione	1°	-1,977	1,176	-6,682	4°	-13,136	-10,633
	2°	-1,914	1,109	-6,540	5°	-13,515	-10,562
	3°	-1,849	1,077	-6,792	6°	-14,006	-10,577
	Valori medi	-1,913	1,121	-6,671	Valori medi	-13,552	-10,591
	Equazione	-1,913	y=1,121x+2,144		Equazione	y=0,689x-1,249	

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

Tabella A3.42 – Ponteggio D – Prova MM-PC-06: Legge semplificata multilineare

Ponteggio D – Prova MM -PC-06							
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
compressione	1°	4,278	0,413	2,970	4°	16,592	4,682
	2°	4,239	0,393	2,808	5°	16,724	4,924
	3°	4,627	0,411	3,031	6°	17,083	4,822
	-	-	-	-	7°	17,374	4,857
	Valori medi	4,382	0,405	2,936	Valori medi	16,943	4,821
	Equazione	4,382	y=0,405x-1,776		Equazione	y=0,354x-1,183	
Carico	Ciclo	d_0 [mm]	k_{Rd} [kN/mm]	R_d [kN]	ciclo	s_{Rk} [mm]	R_k [kN]
trazione	1°	-2,341	1,147	-6,588	4°	-14,053	-9,986
	2°	-2,794	1,161	-6,585	5°	-14,522	-9,942
	3°	-2,578	1,078	-7,098	6°	-14,880	-10,162
	Valori medi	-2,571	1,129	-6,757	Valori medi	-14,485	-10,030
	Equazione	-2,571	y=1,129x+2,901		Equazione	y=0,552x-2,032	

y valore dell'ordinata, nel caso specifico il carico espresso in kN;
x valore dell'ascissa, nel caso specifico l'accorciamento/allungamento espresso in mm.

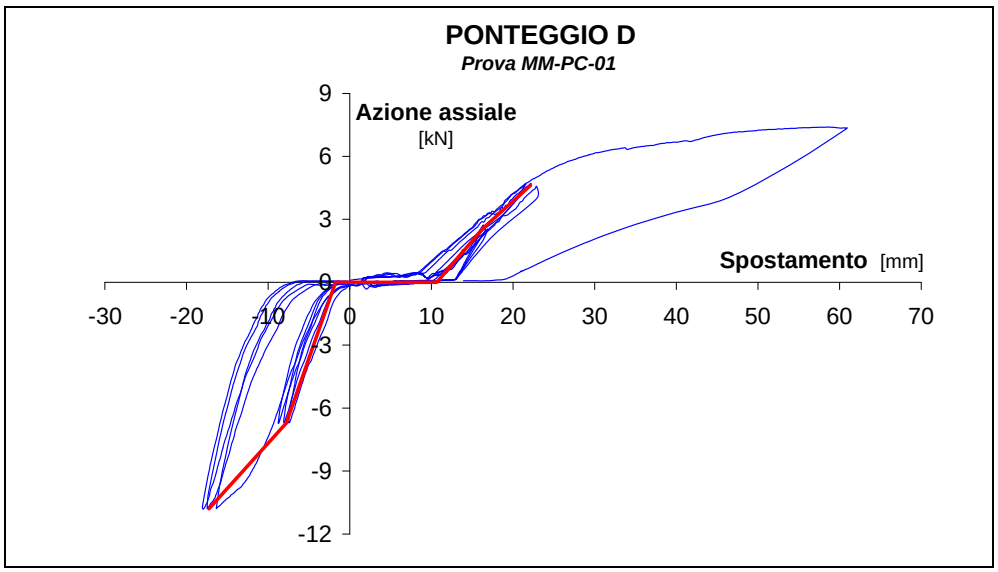


Figura A3.43 – Ponteggio D: confronto risposta sperimentale - legge semplificata

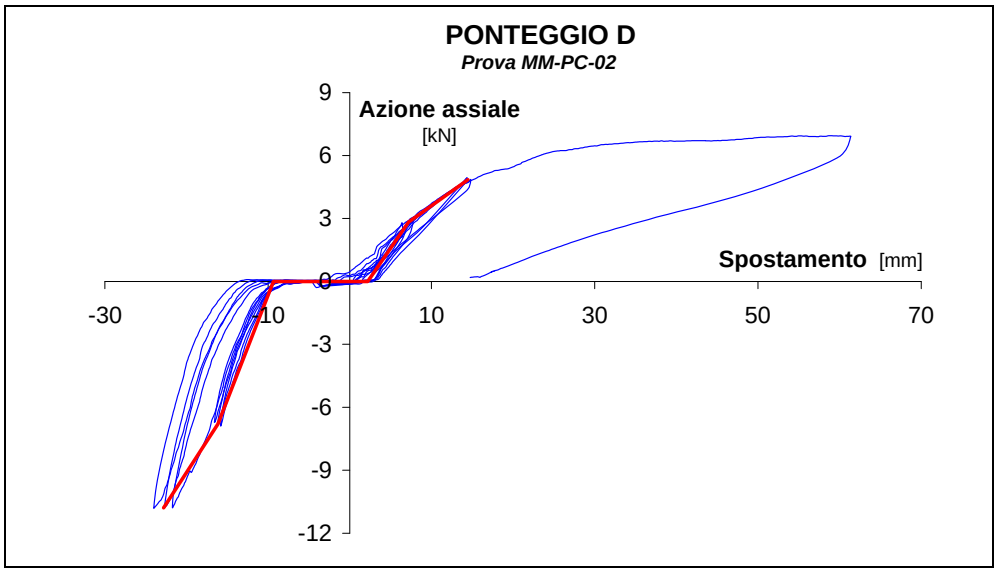


Figura A3.44 – Ponteggio D: confronto risposta sperimentale - legge semplificata

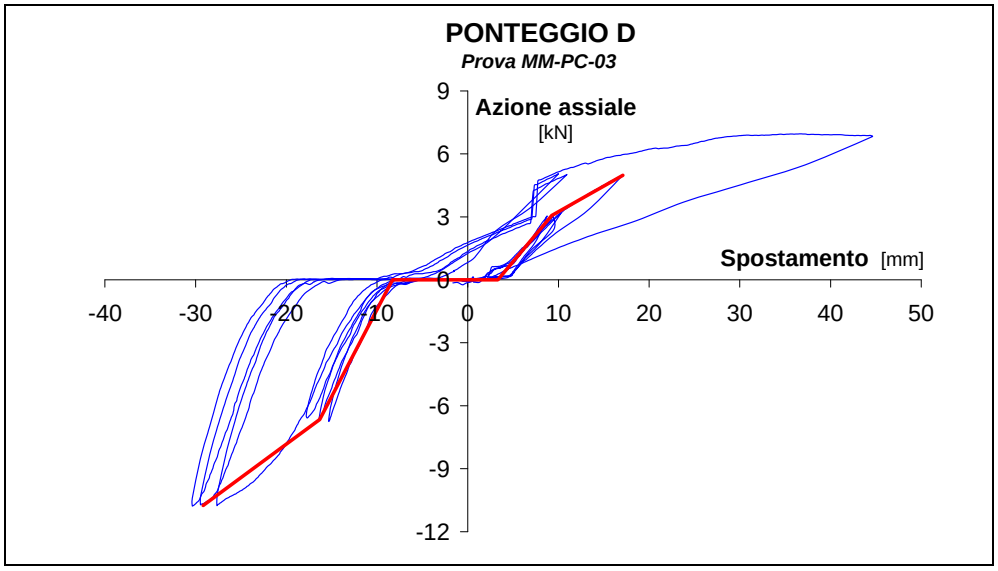


Figura A3.45 – Ponteggio D: confronto risposta sperimentale - legge semplificata

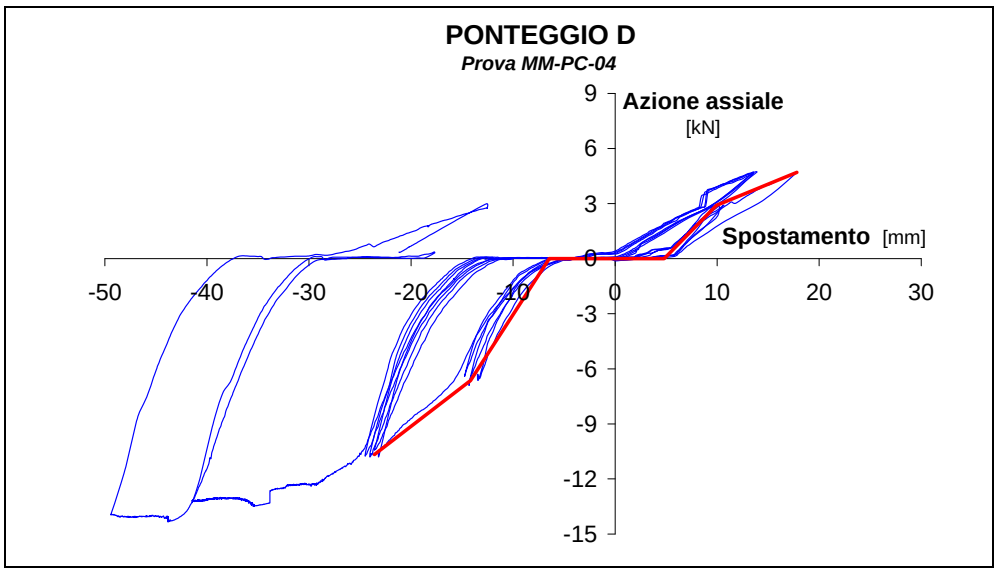


Figura A3.46 – Ponteggio D: confronto risposta sperimentale - legge semplificata

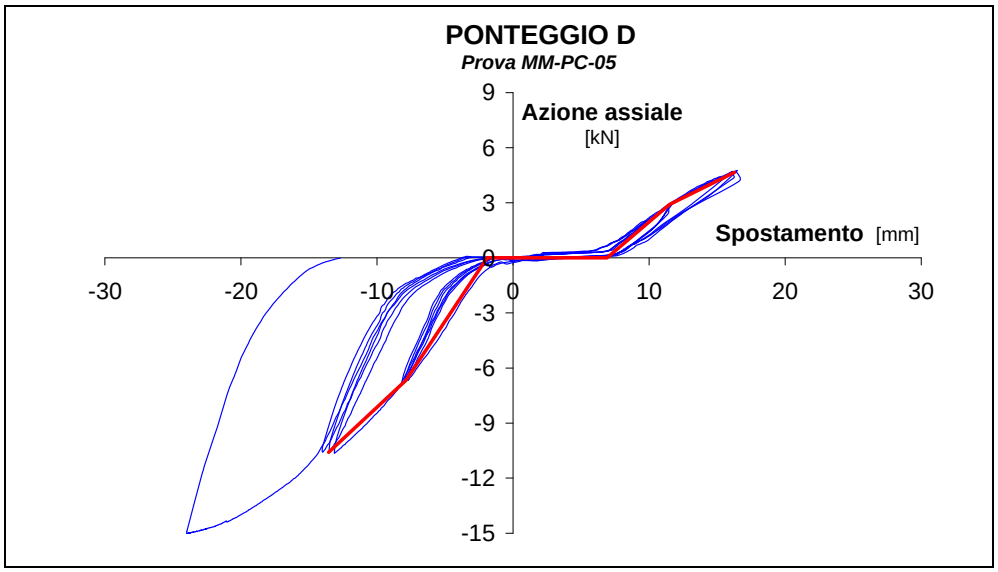


Figura A3.47 – Ponteggio D: confronto risposta sperimentale - legge semplificata

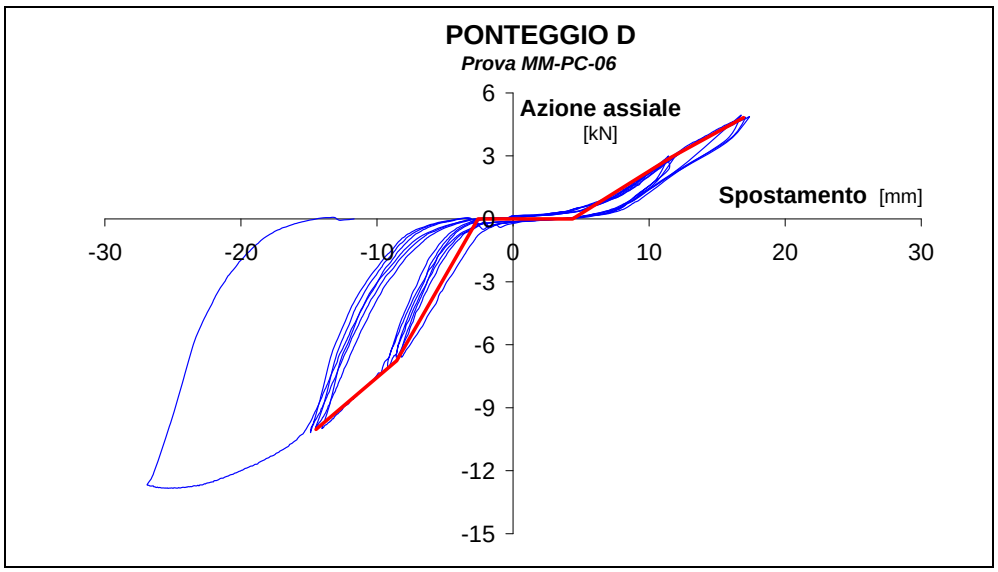


Figura A3.48 – Ponteggio D: confronto risposta sperimentale - legge semplificata

Tabella A3.43 – Ponteggio D: legge globale spostamento-azione assiale

Ponteggio D						
Carico	Prova	$\overline{d_0^+}$ [mm]	$\overline{k_{Rd}^+}$ [kN/mm]	$\overline{R_d^+}$ [kN]	$\overline{s_{Rk}^+}$ [mm]	$\overline{R_k^+}$ [kN]
compressione	MM-PC-01	10,642	0,451	2,586	22,132	4,617
	MM-PC-02	2,187	0,565	2,827	14,484	4,847
	MM-PC-03	3,322	0,516	3,069	17,094	4,985
	MM-PC-04	4,811	0,565	2,898	17,807	4,696
	MM-PC-05	6,904	0,634	2,906	16,272	4,658
	MM-PC-06	4,382	0,405	2,936	16,943	4,821
	Valori medi	$\overline{\overline{d_0^+}}$ [mm]	$\overline{\overline{k_{Rd}^+}}$ [kN/mm]	$\overline{\overline{R_d^+}}$ [kN]	$\overline{\overline{s_{Rk}^+}}$ [mm]	$\overline{\overline{R_k^+}}$ [kN]
		5,375	0,511	2,870	17,174	4,771
Carico	Prova	$\overline{d_0^-}$ [mm]	$\overline{k_{Rd}^-}$ [kN/mm]	$\overline{R_d^-}$ [kN]	$\overline{s_{Rk}^-}$ [mm]	$\overline{R_k^-}$ [kN]
trazione	MM-PC-01	-1,755	1,114	-6,717	-17,272	-10,791
	MM-PC-02	-9,370	1,002	-6,801	-22,806	-10,782
	MM-PC-03	-8,289	0,828	-6,654	-29,167	-10,747
	MM-PC-04	-6,467	0,861	-6,641	-23,601	-10,665
	MM-PC-05	-1,913	1,121	-6,671	-13,552	-10,591
	MM-PC-06	-2,571	1,129	-6,757	-14,485	-10,030
	Valori medi	$\overline{\overline{d_0^-}}$ [mm]	$\overline{\overline{k_{Rd}^-}}$ [kN/mm]	$\overline{\overline{R_d^-}}$ [kN]	$\overline{\overline{s_{Rk}^-}}$ [mm]	$\overline{\overline{R_k^-}}$ [kN]
		-5,061	0,993	-6,707	-18,678	-10,601

Tabella A3.44 – Ponteggio D: test sulla rigidezza nell'intervallo 0-R_d

$\overline{\overline{k_{Rd}^+}}$ [kN/mm]	$\overline{\overline{k_{Rd}^-}}$ [kN/mm]	$\left\lvert\frac{\lvert\overline{\overline{k_{Rd}^+}}\rvert - \lvert\overline{\overline{k_{Rd}^-}}\rvert}{\lvert\overline{\overline{k_{Rd}^+}}\rvert + \lvert\overline{\overline{k_{Rd}^-}}\rvert}\right\rvert \cdot 100$	Test
0,511	0,993	32,041	Rigidezze distinte

Tabella A3.45 – Equazione legge globale

Ponteggio D	
Spostamento [mm]	Carico [kN]
-18,678	-10,601
-11,816	-6,707
-5,061	0,000
0,000	0,000
5,375	0,000
10,992	2,870
17,174	4,771

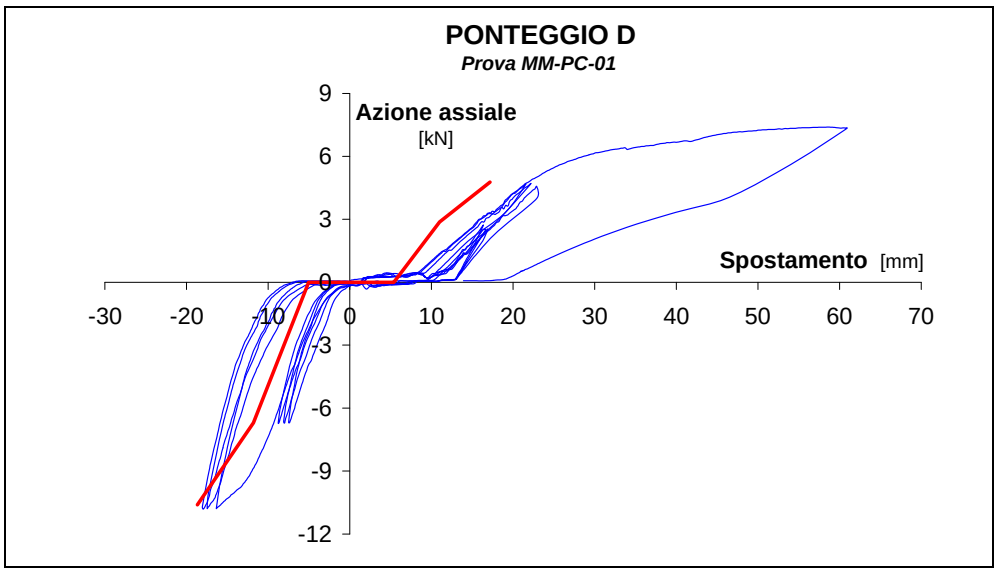


Figura A3.49 – Ponteggio D: confronto risposta sperimentale - legge semplificata media

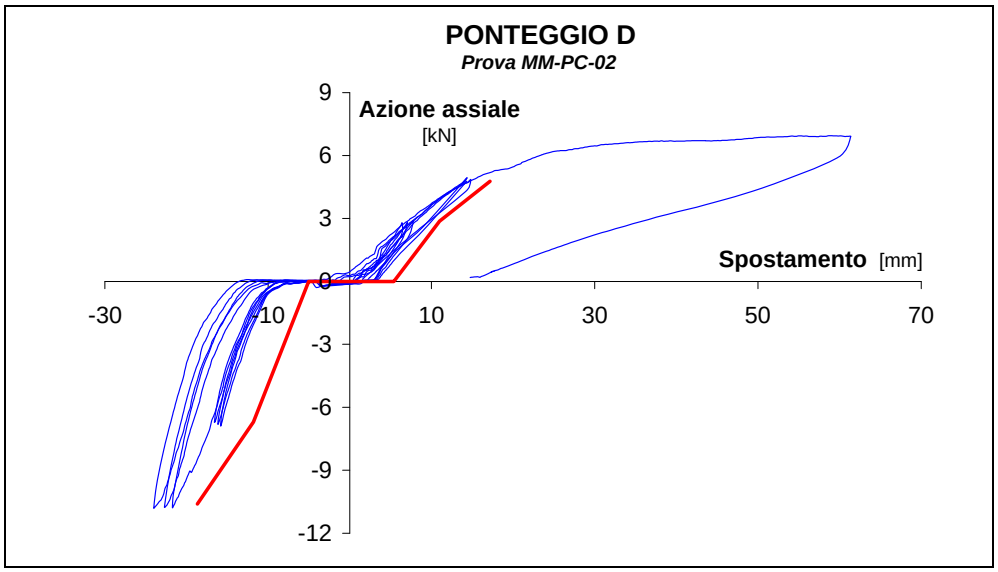


Figura A3.50 – Ponteggio D: confronto risposta sperimentale - legge semplificata media

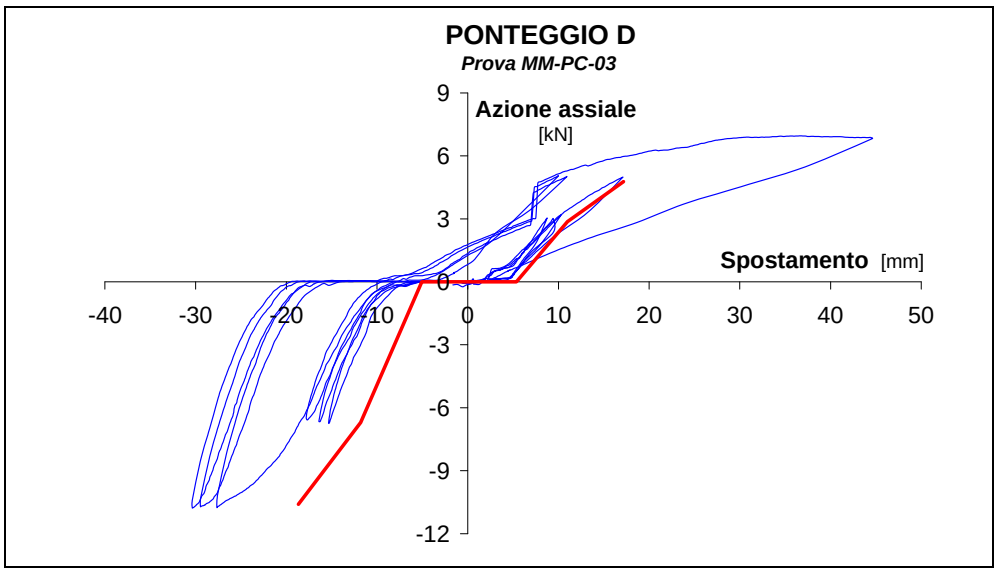


Figura A3.51 – Ponteggio D: confronto risposta sperimentale - legge semplificata media

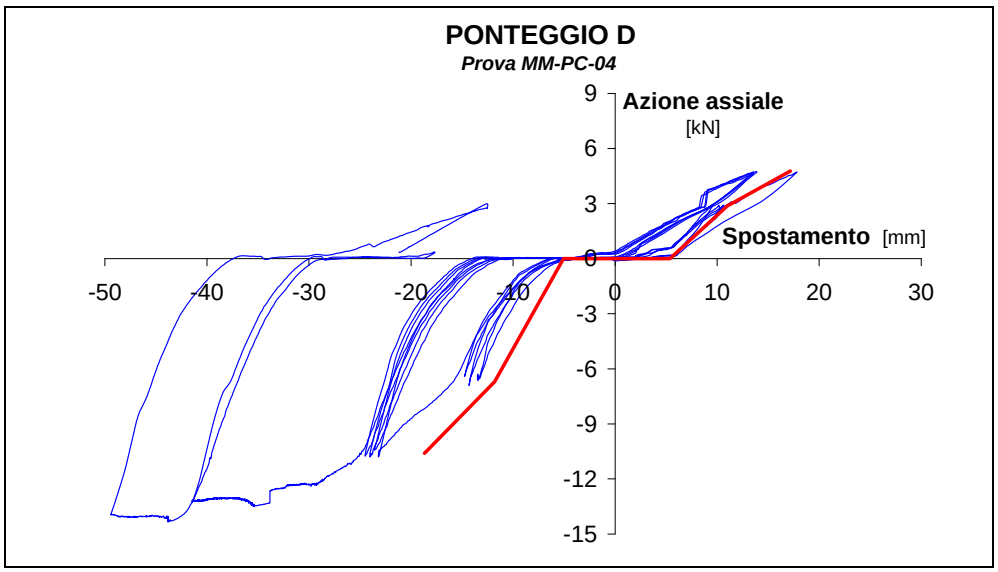


Figura A3.52 – Ponteggio D: confronto risposta sperimentale - legge semplificata media

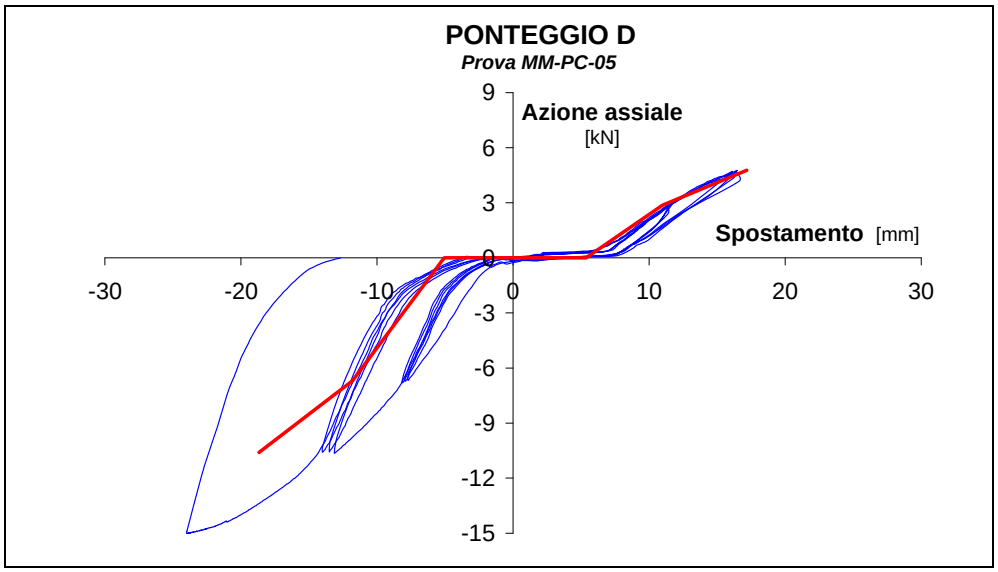


Figura A3.53 – Ponteggio D: confronto risposta sperimentale - legge semplificata media

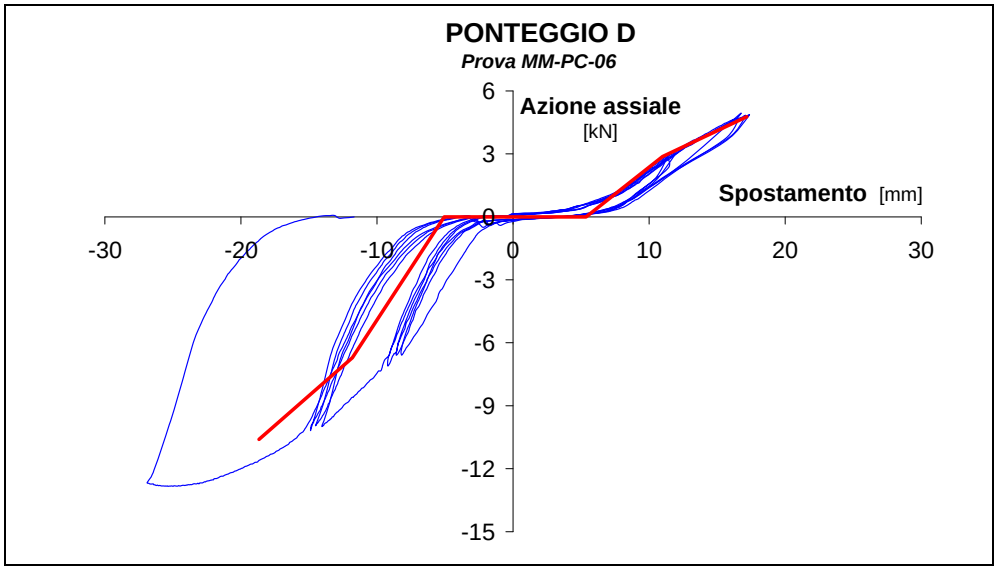


Figura A3.54 – Ponteggio D: confronto risposta sperimentale - legge semplificata media

B1-5/DTS/05

I ponteggi metallici di facciata utilizzati nei cantieri temporanei o mobili.
Le nuove norme di prodotto: aspetti tecnici e legislativi

Relazione finale – Allegato 4

Autori: N. Baldassino, R. Zandonini

Affiliazione: Università degli Studi di Trento
Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale

Ricerca finanziata da:

Dipartimento Tecnologie di Sicurezza

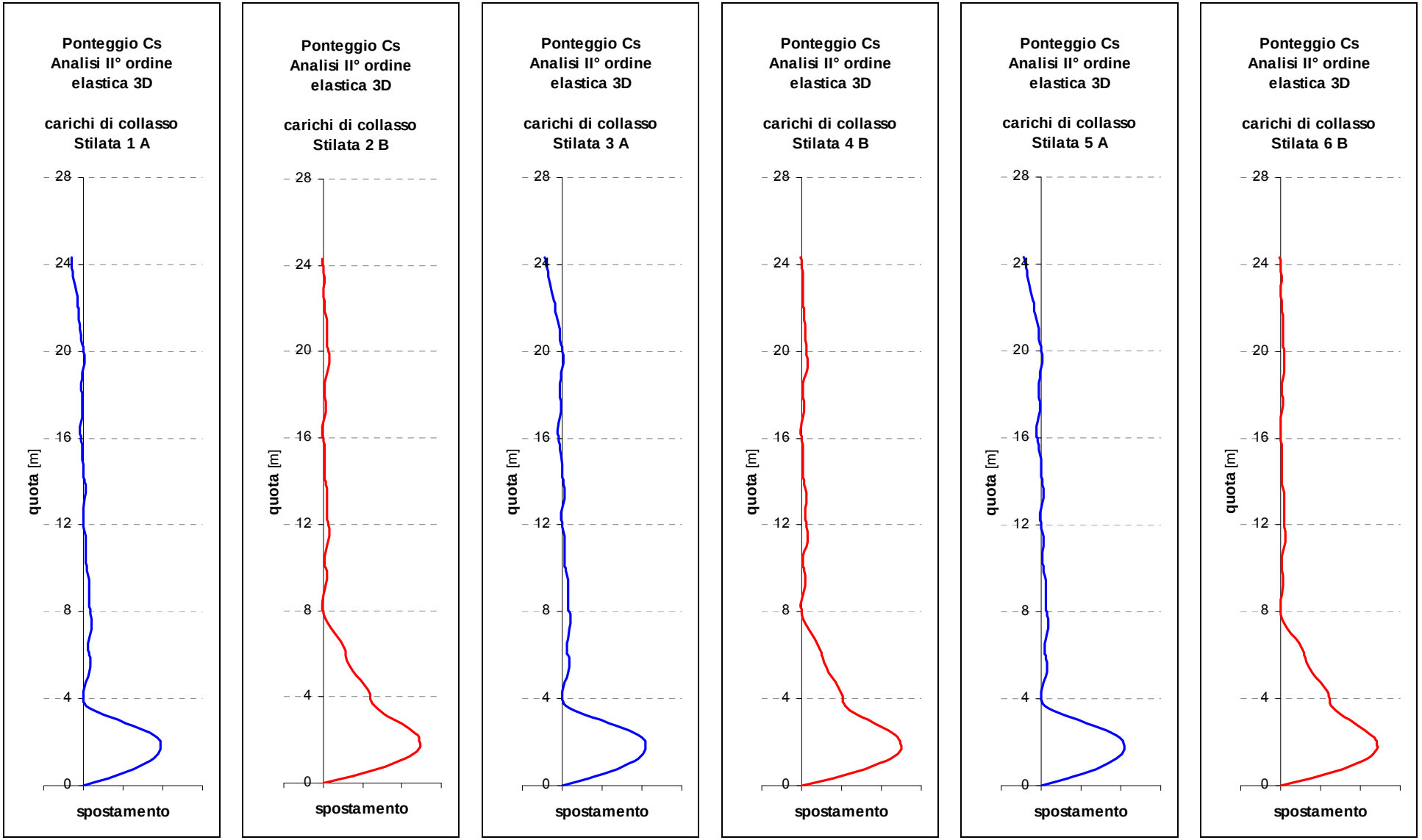
10/02/2009

PONTEGGIO Cs

Deformate Modello 3D - Analisi del II° ordine

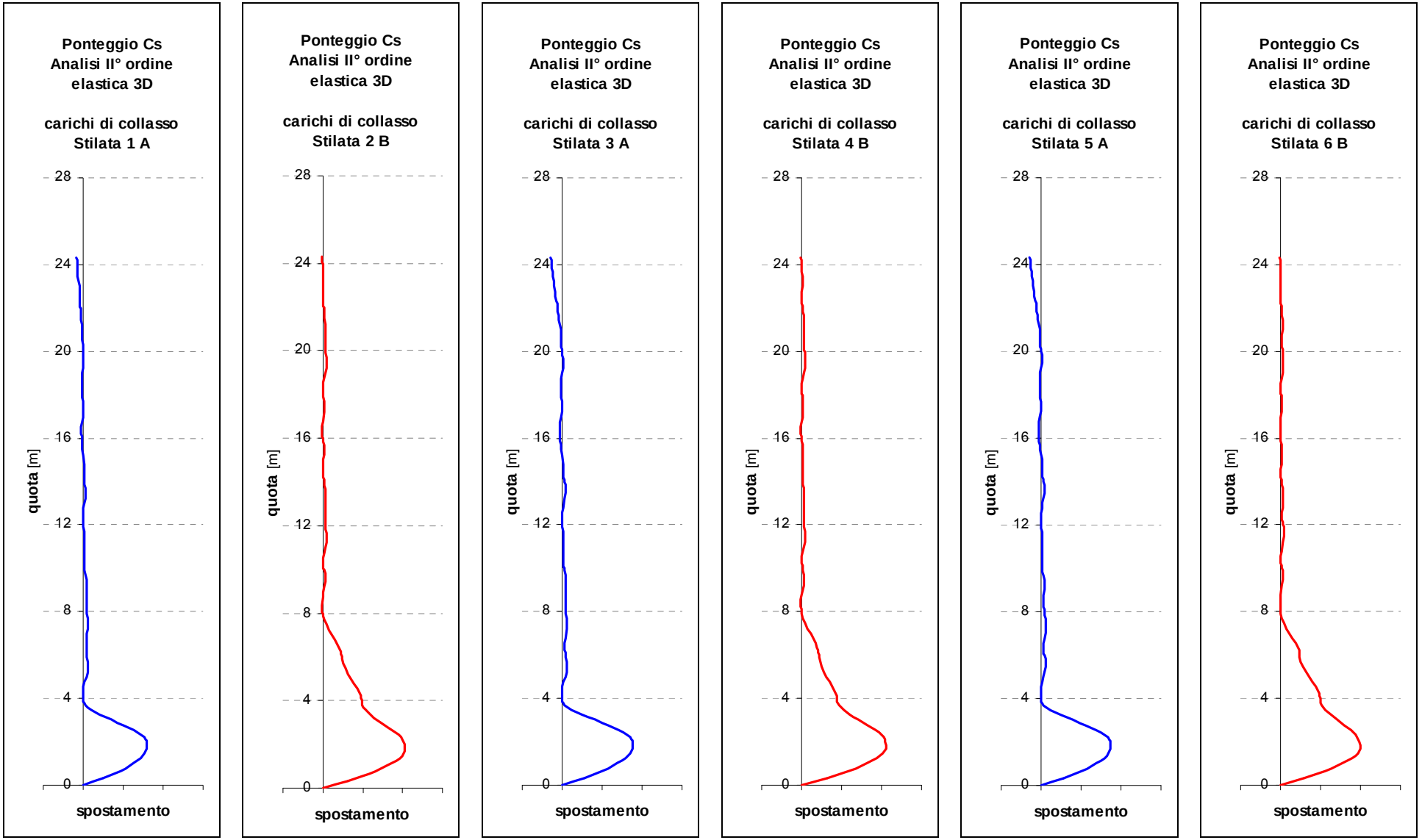
$d_0 \neq 0$ - k_{Rd}=sper - k_{Rk}=sper

e



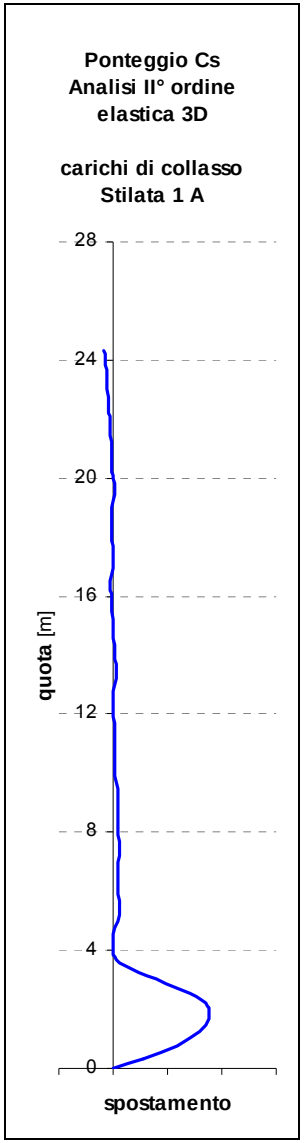
Deformate Modello 3D - Analisi del II° ordine

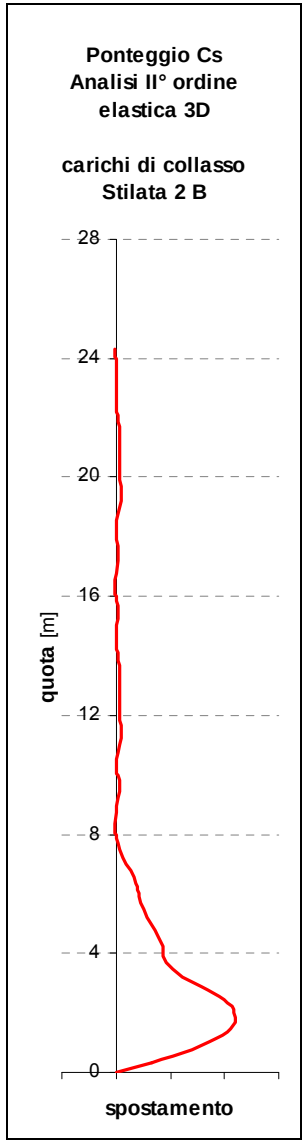
d_0=0 - k_{Rd}=sper - k_{Rk}=sper

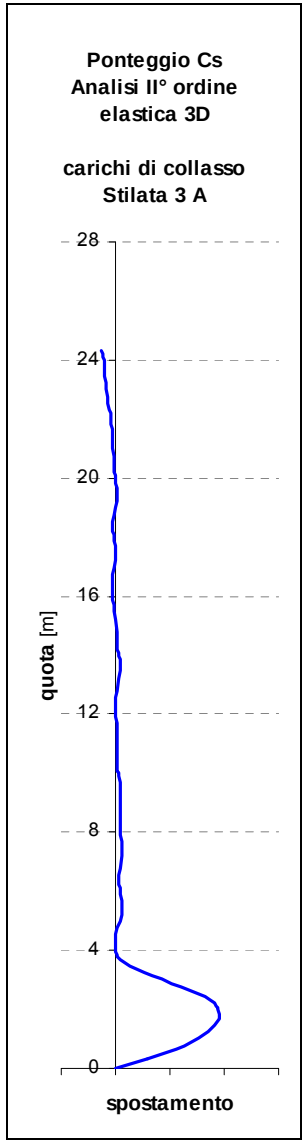


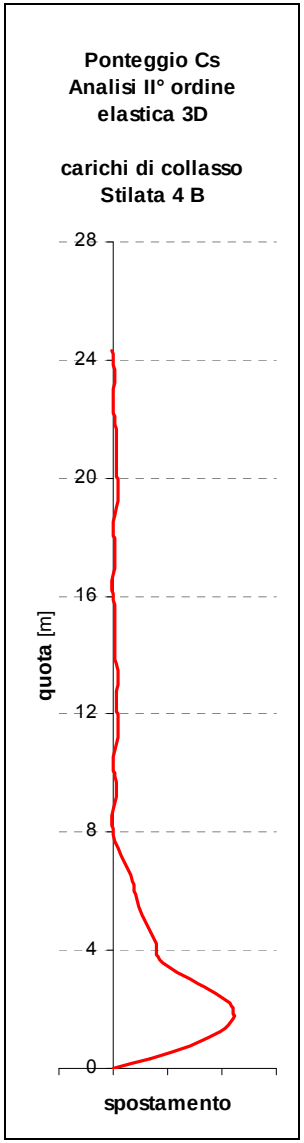
Deformate Modello 3D - Analisi del II° ordine

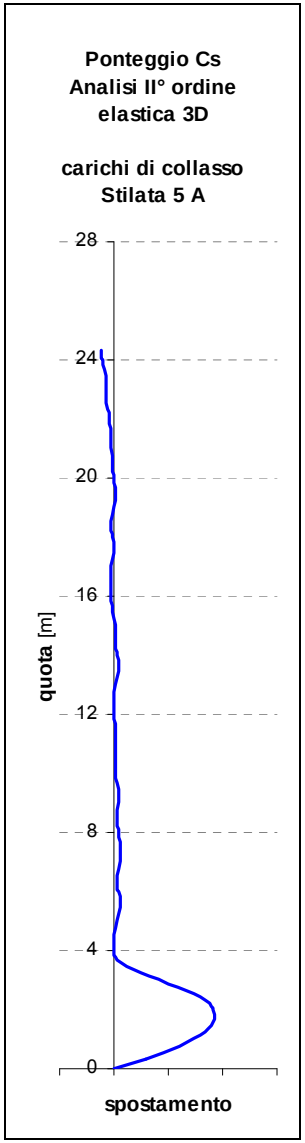
d_0=0 - k_{Rd}=sper - k_{Rk}= k_{Rd}

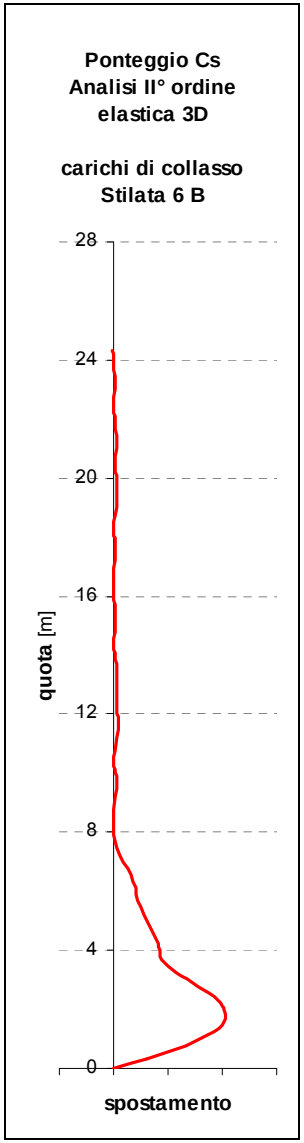






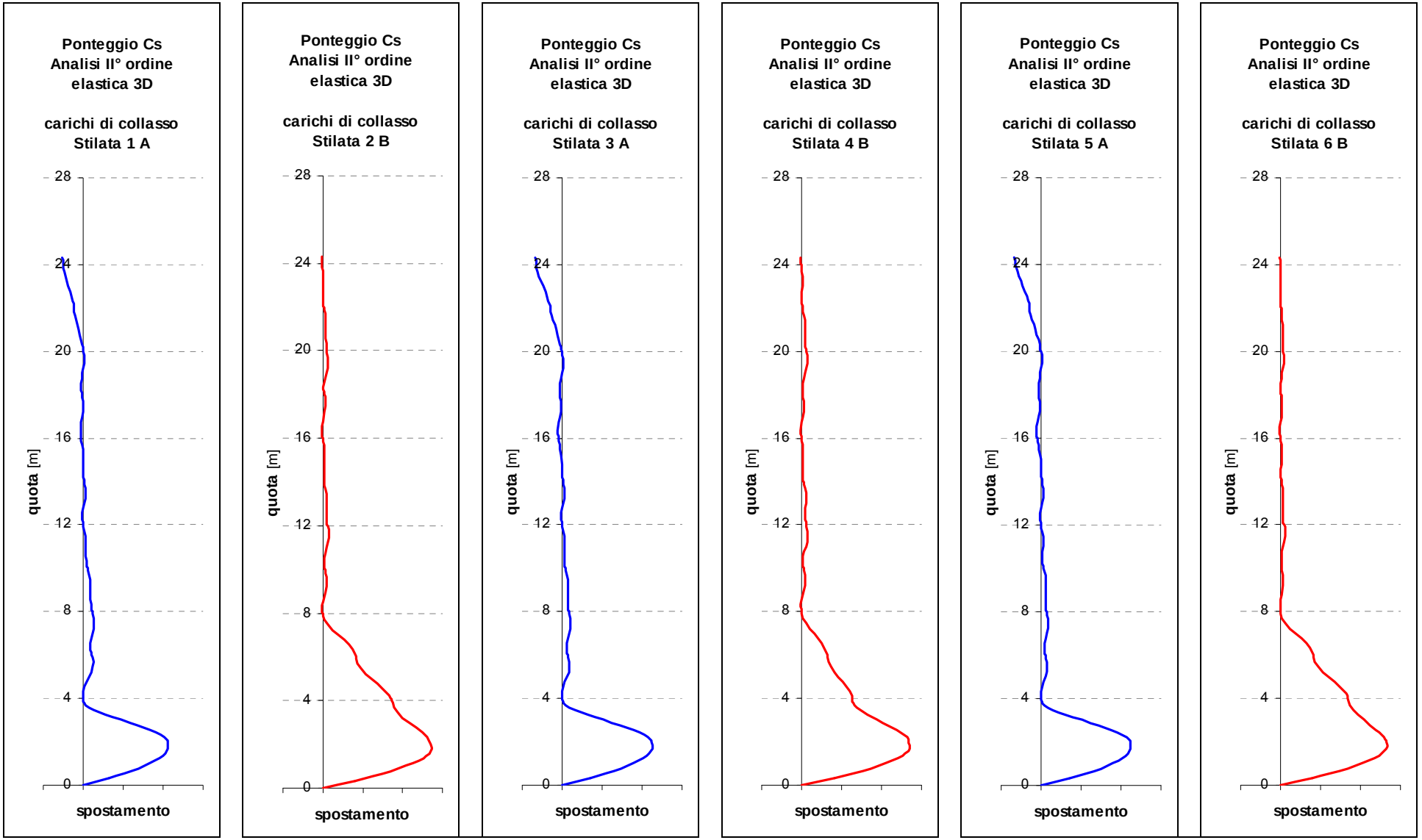






Deformate Modello 3D - Analisi del II° ordine

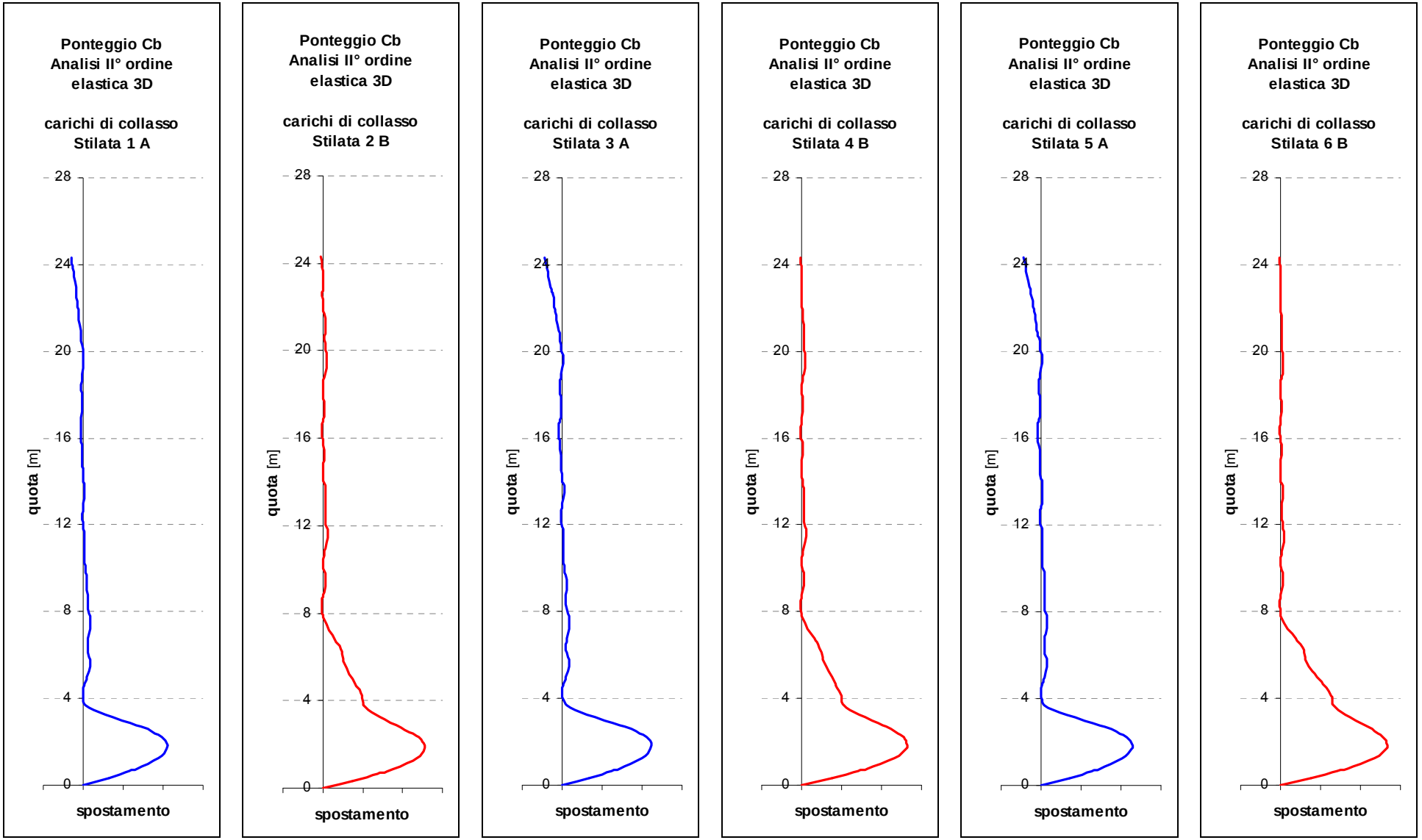
d_0=0 - k_{Rd}=0 - k_{Rk}=0



PONTEGGIO Cb

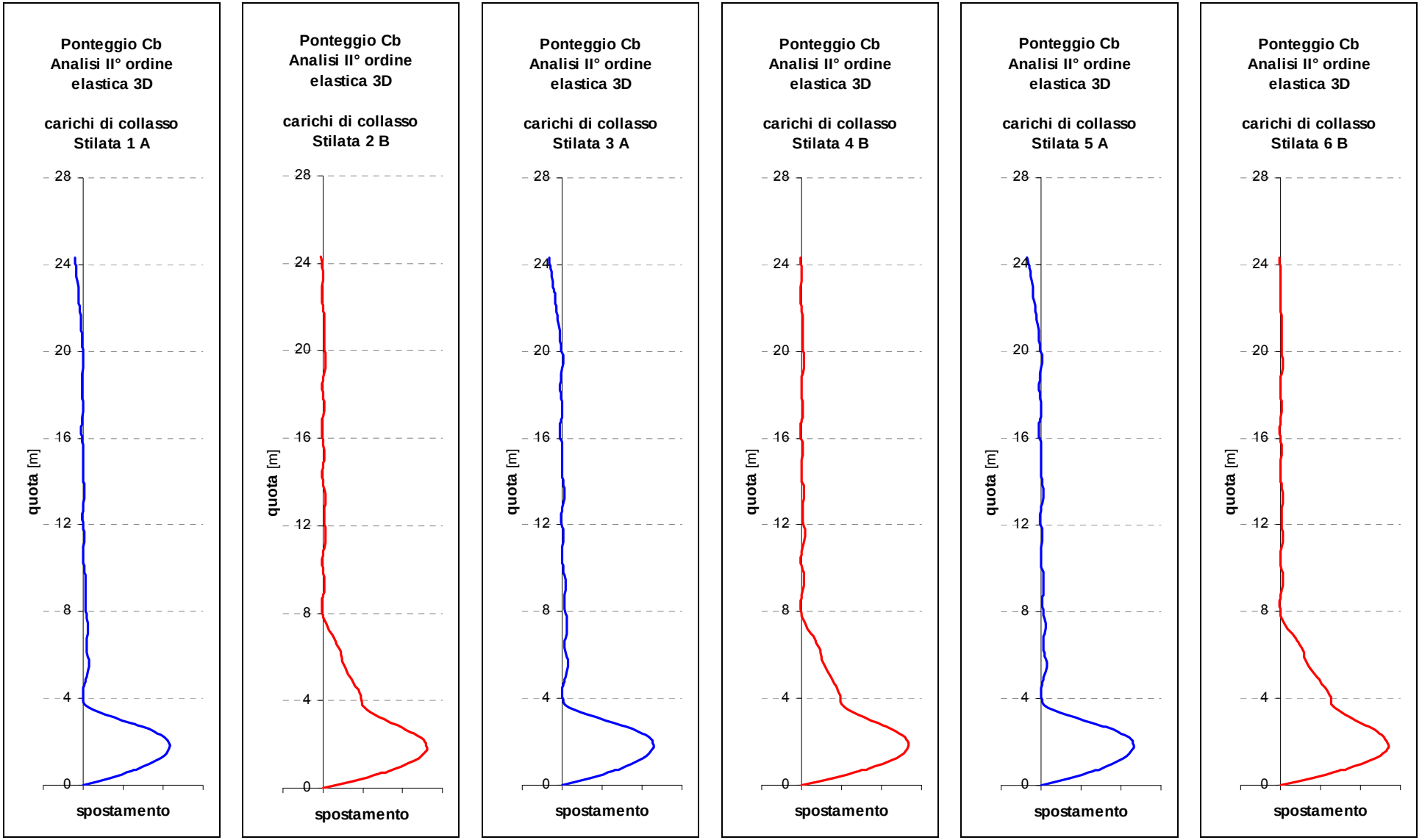
Deformate Modello 3D - Analisi del II° ordine

$d_0 \neq 0$ - k_{Rd}=sper - k_{Rk}=sper



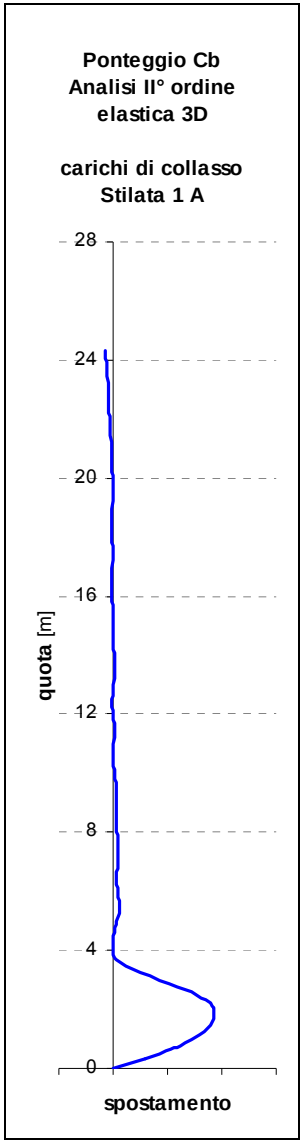
Deformate Modello 3D - Analisi del II° ordine

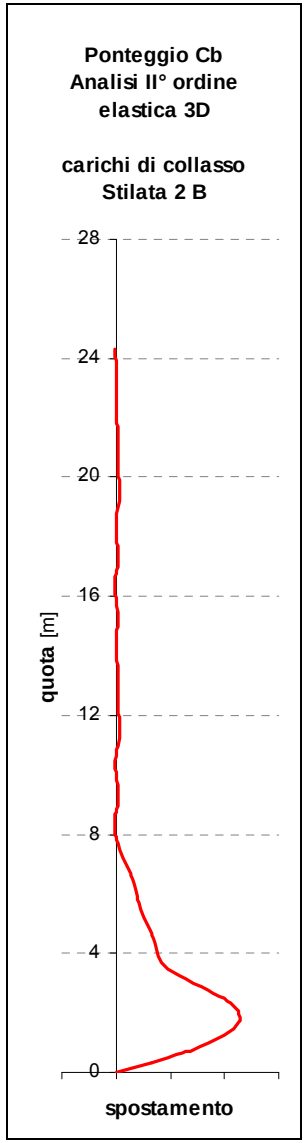
d_0=0 - k_{Rd}=sper - k_{Rk}=sper

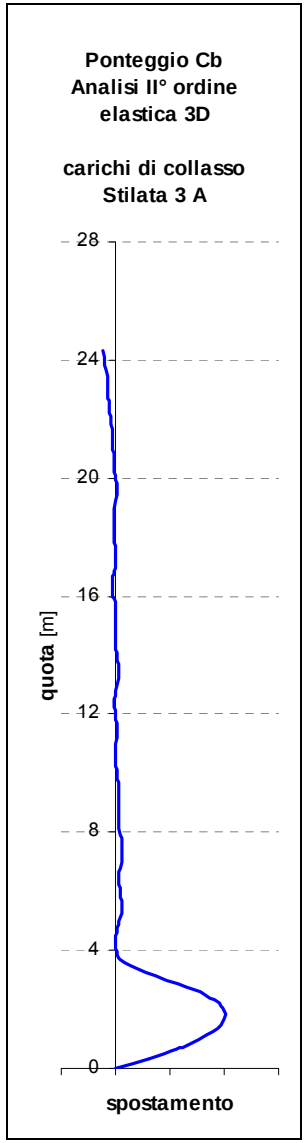


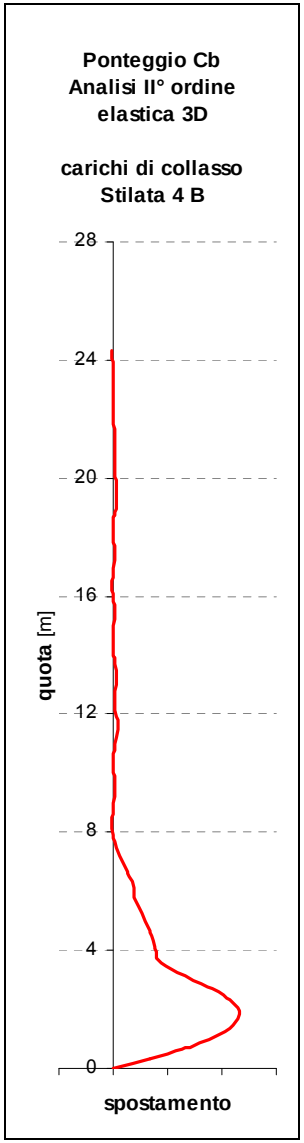
Deformate Modello 3D - Analisi del II° ordine

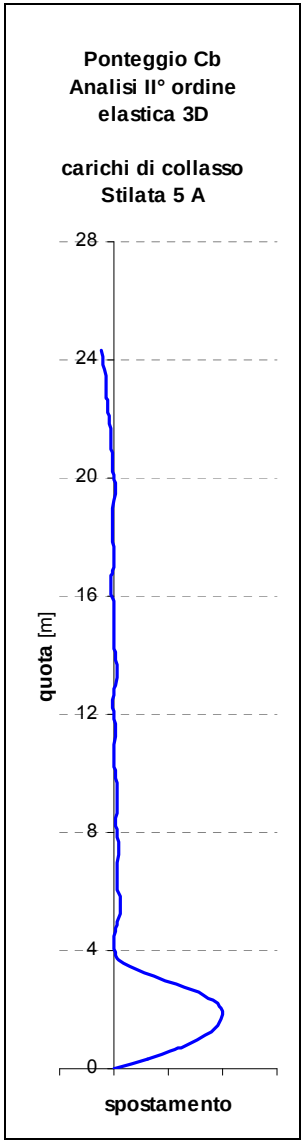
d_0=0 - k_{Rd}=sper - k_{Rk}= k_{Rd}

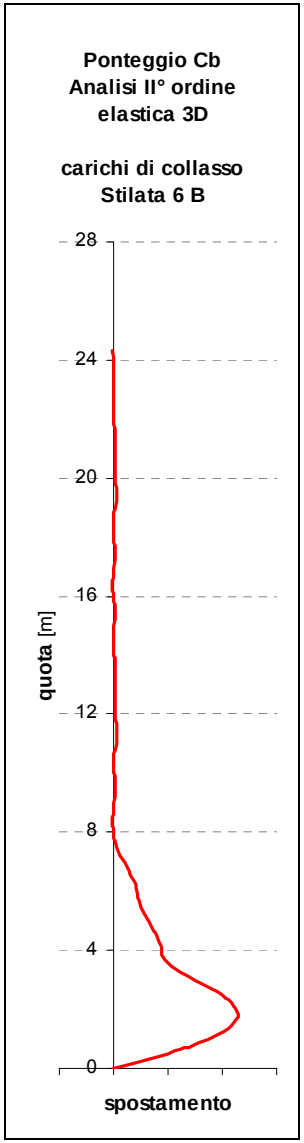






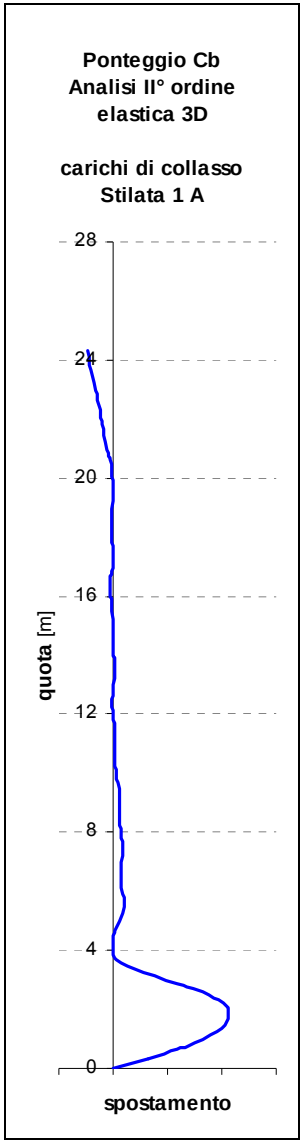


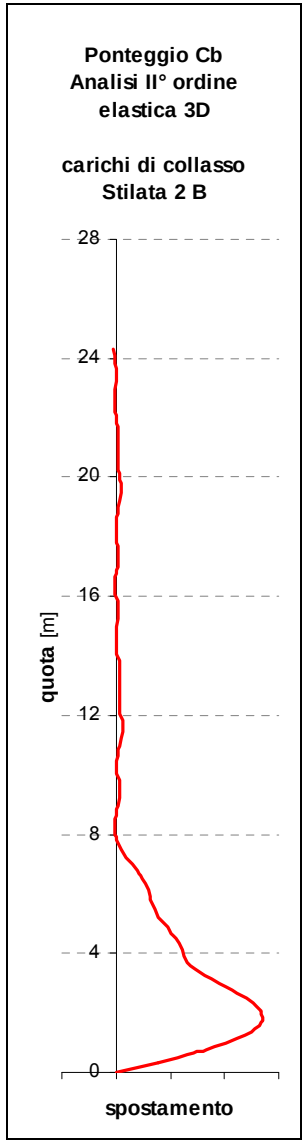


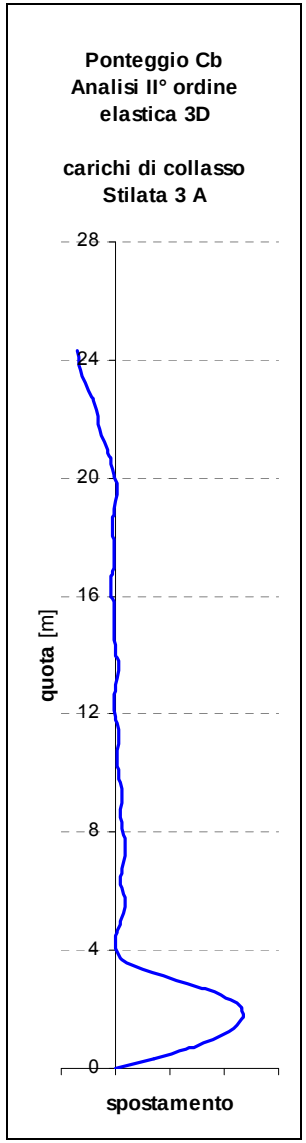


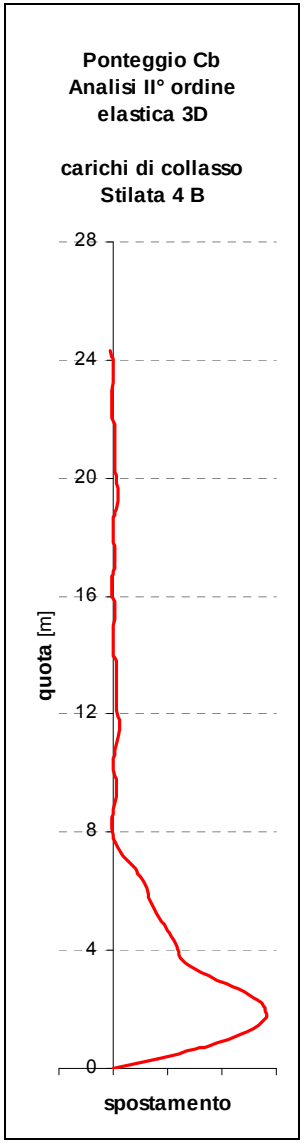
Deformate Modello 3D - Analisi del II° ordine

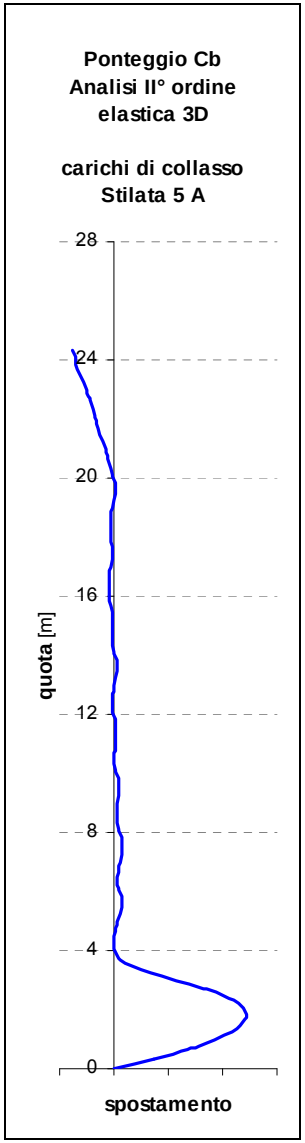
$d_0=0$ - $k_{Rd}=0$ - $k_{Rk}=0$

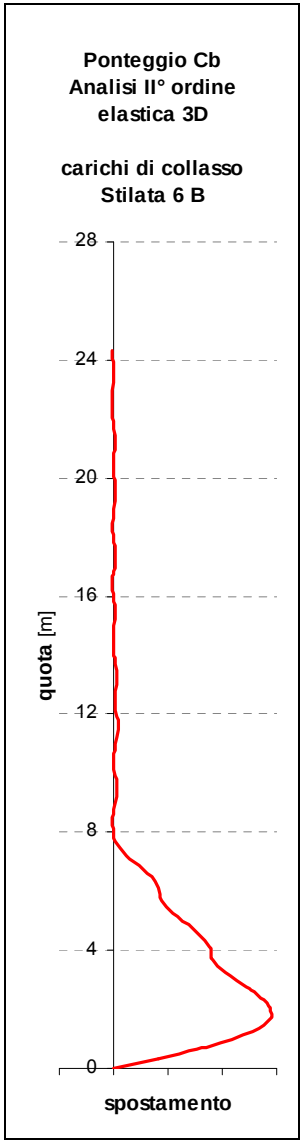








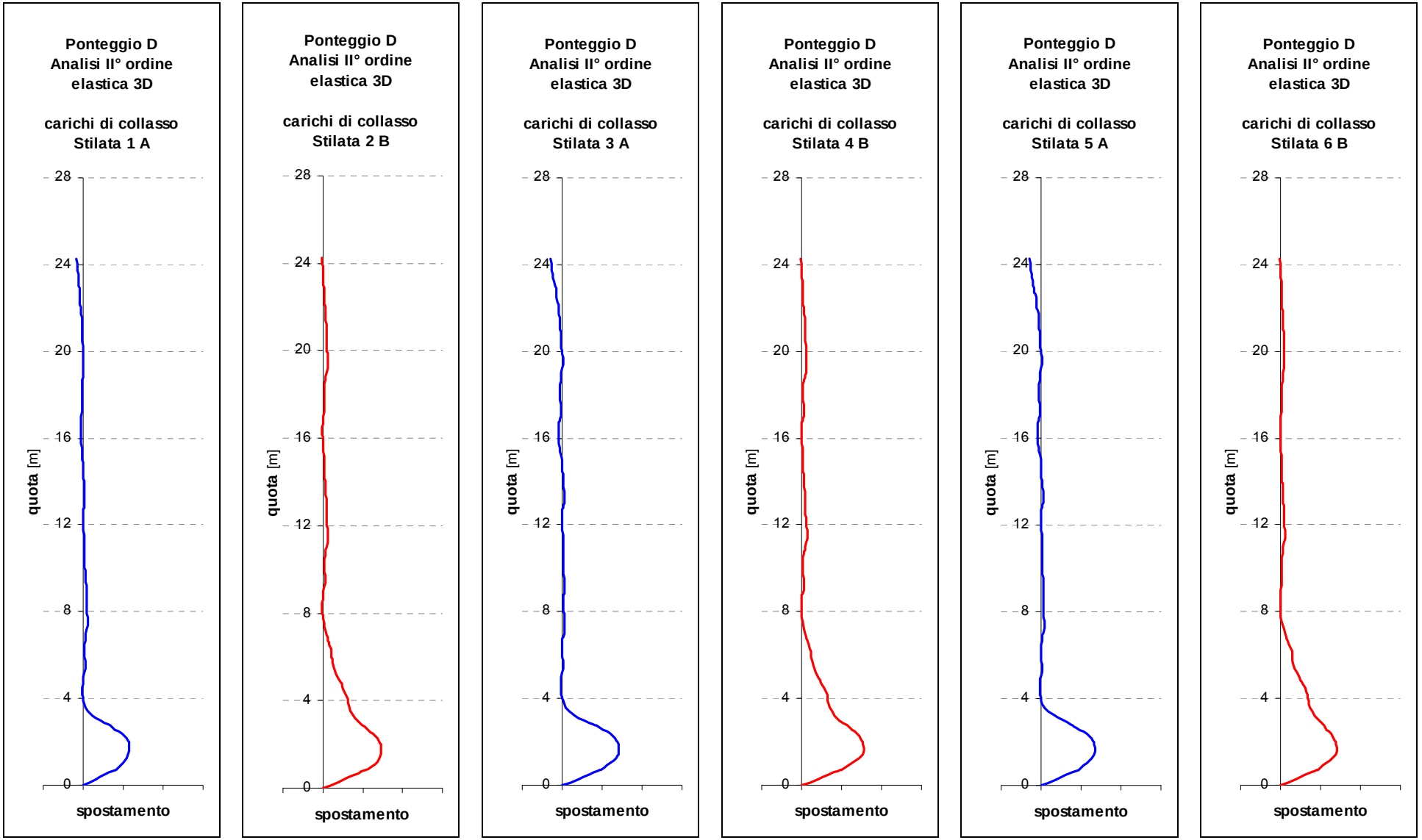




PONTEGGIO D

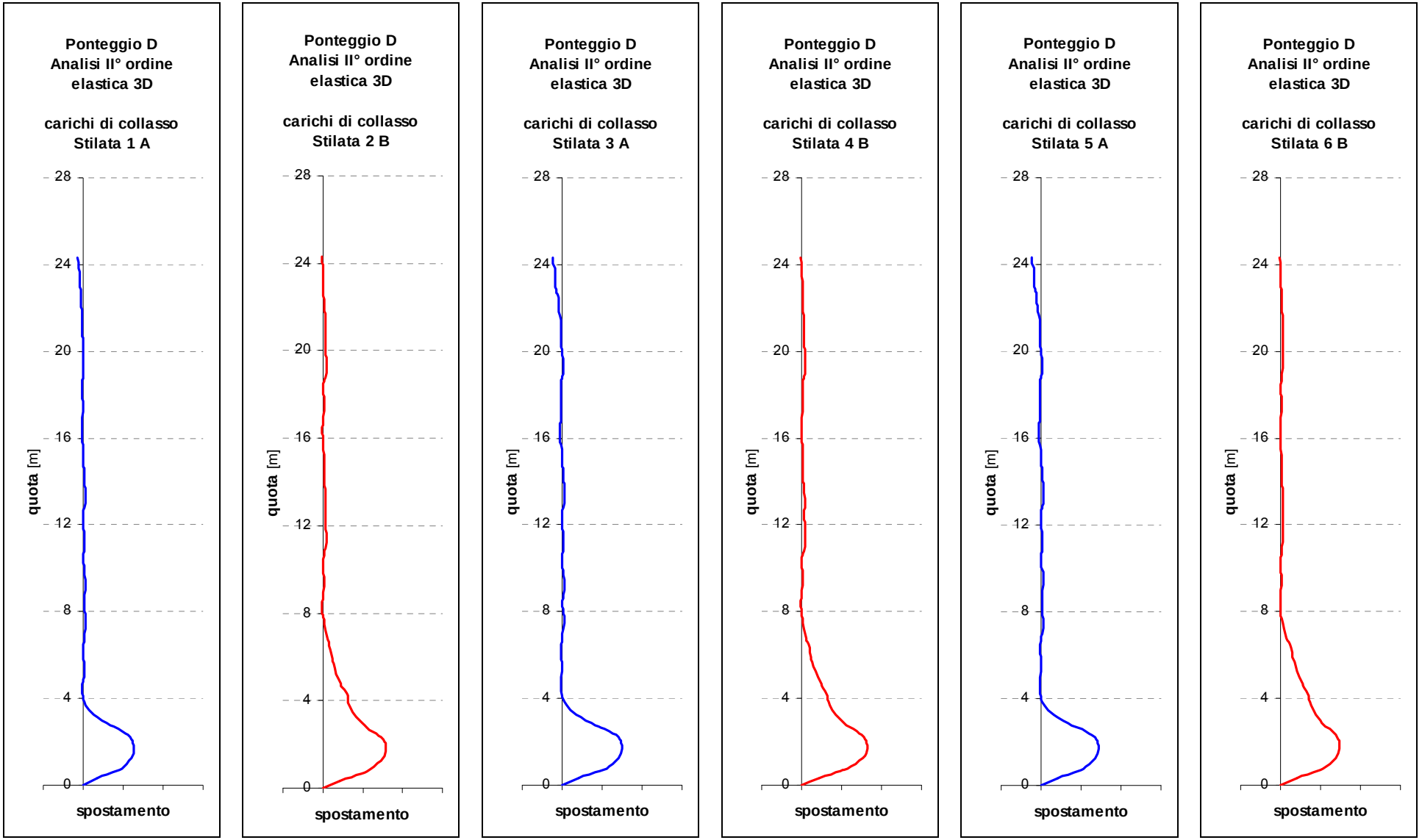
Deformate Modello 3D - Analisi del II° ordine

$d_0 \neq 0$ - k_{Rd}=sper - k_{Rk}=sper



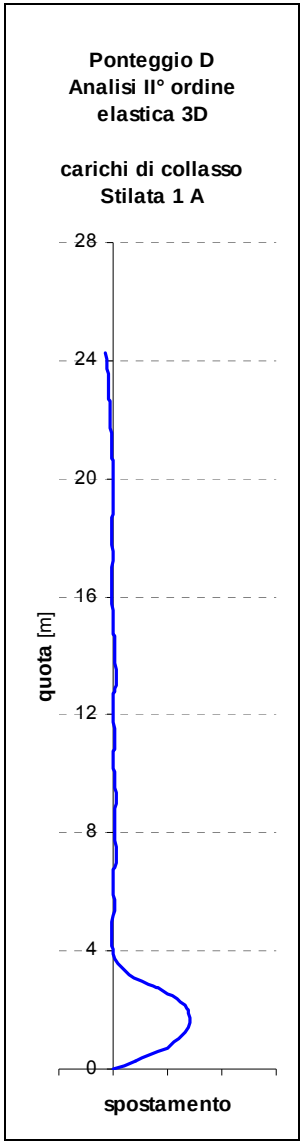
Deformate Modello 3D - Analisi del II° ordine

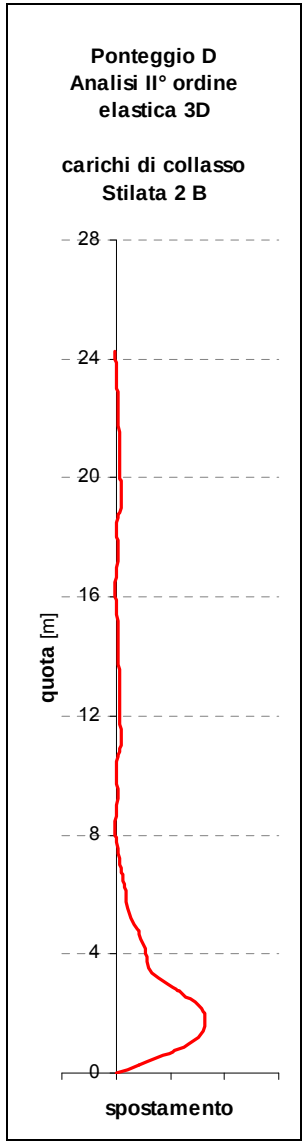
d_0=0 - k_{Rd}=sper - k_{Rk}=sper

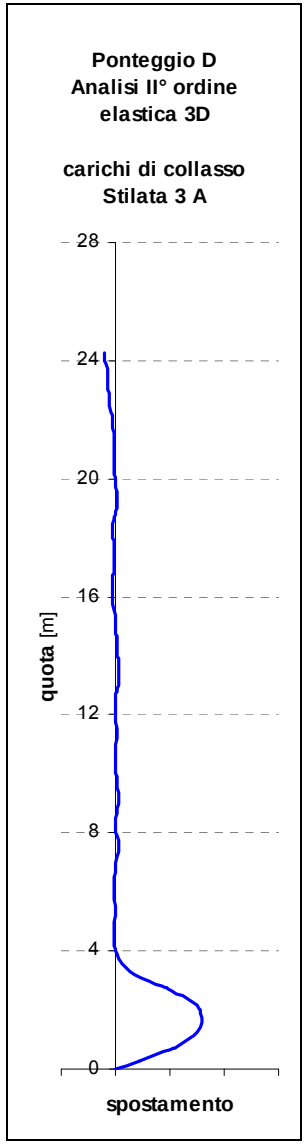


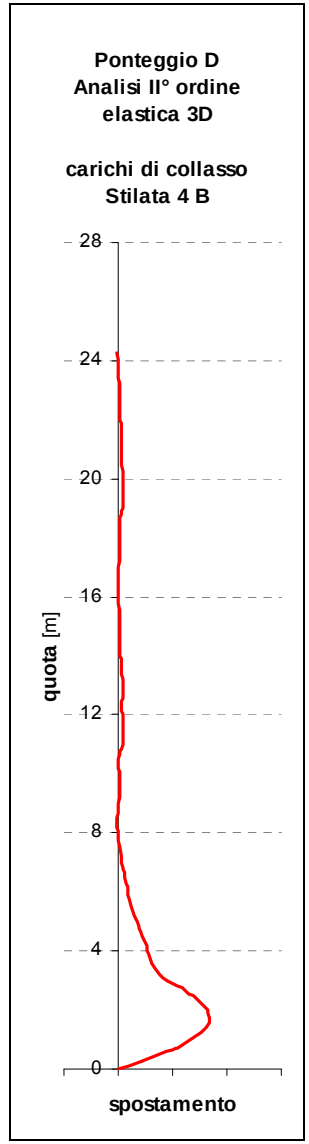
Deformate Modello 3D - Analisi del II° ordine

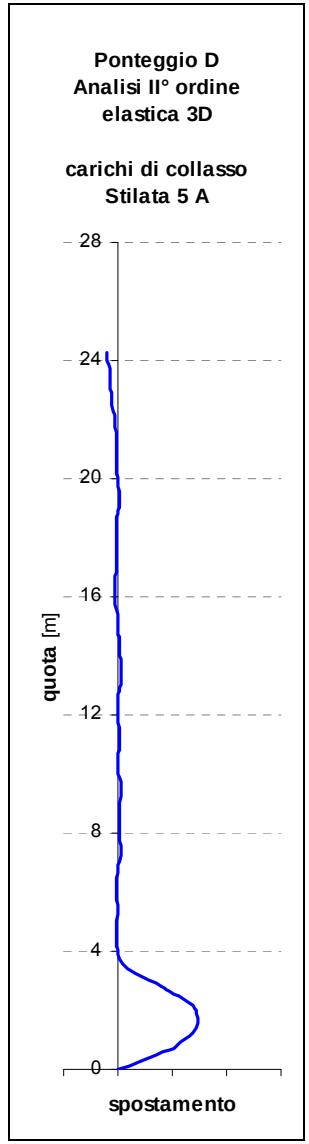
d_0=0 - k_{Rd}=sper - k_{Rk}= k_{Rd}

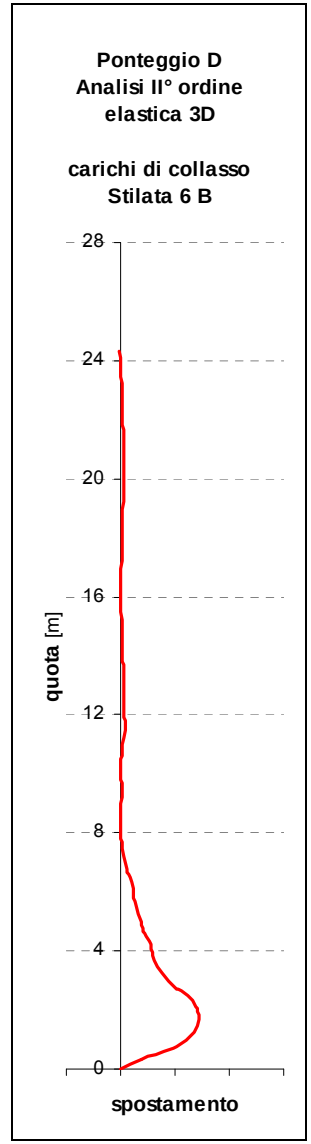






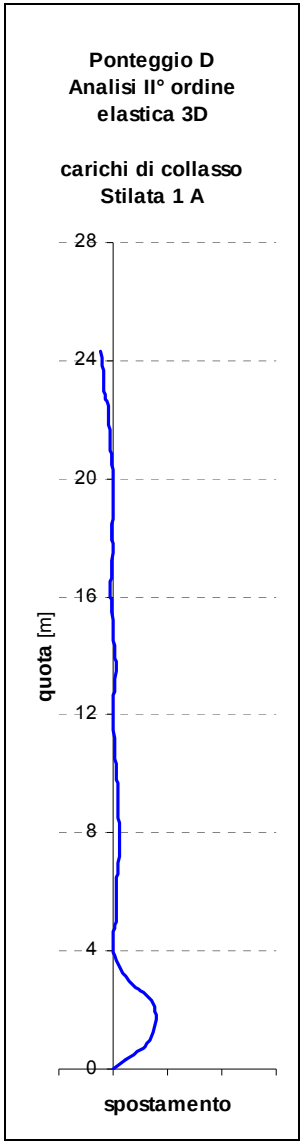


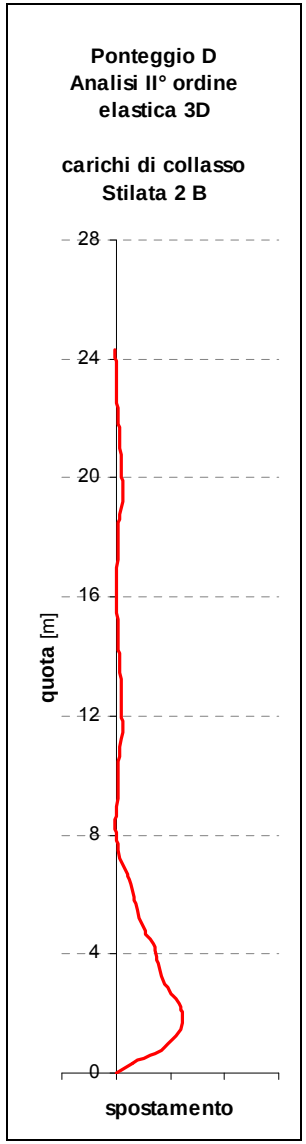


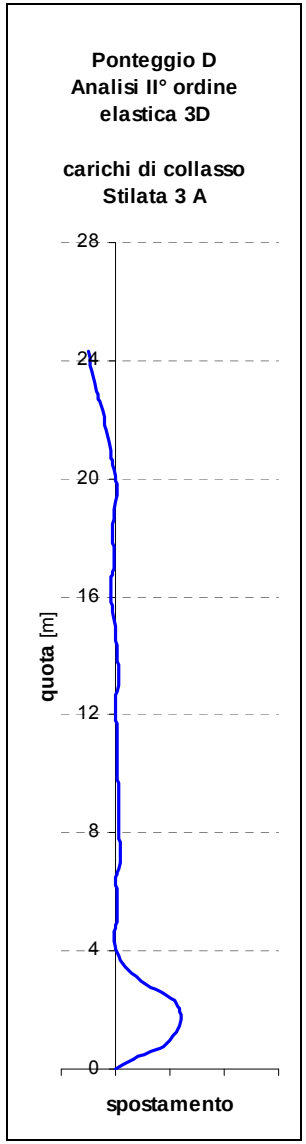


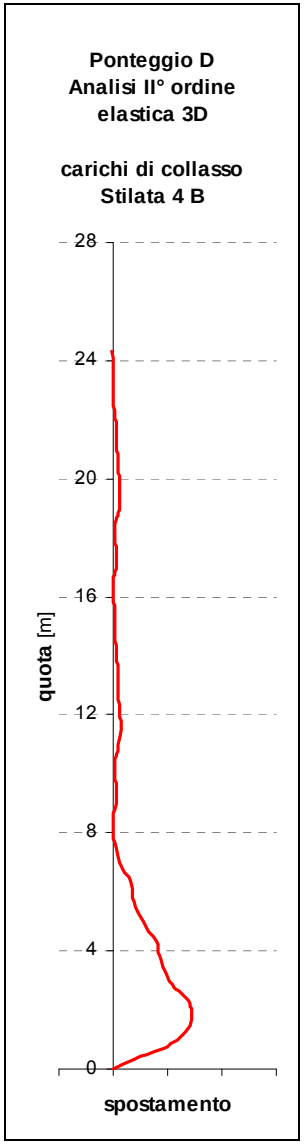
Deformate Modello 3D - Analisi del II° ordine

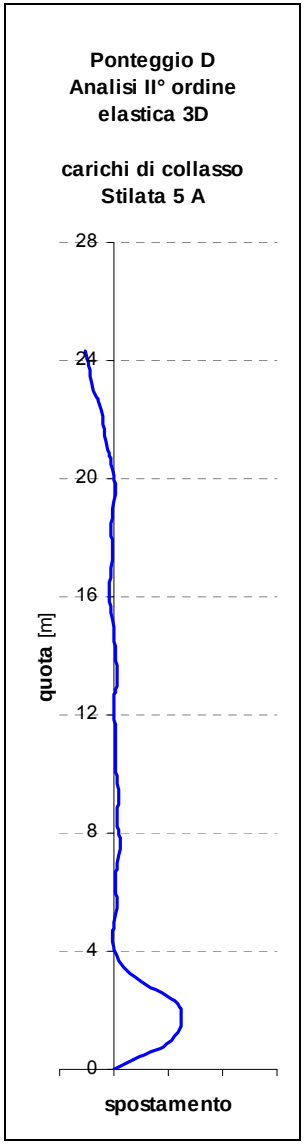
$d_0=0$ - $k_{Rd}=0$ - $k_{Rk}=0$

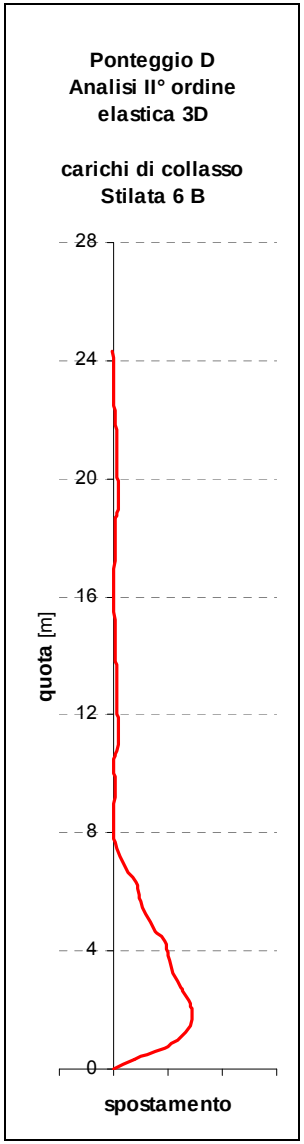












B1-5/DTS/05

I ponteggi metallici di facciata utilizzati nei cantieri temporanei o mobili.
Le nuove norme di prodotto: aspetti tecnici e legislativi

Relazione finale – Allegato 5

Autori: N. Baldassino, R. Zandonini

Affiliazione: Università degli Studi di Trento
Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale

Ricerca finanziata da:

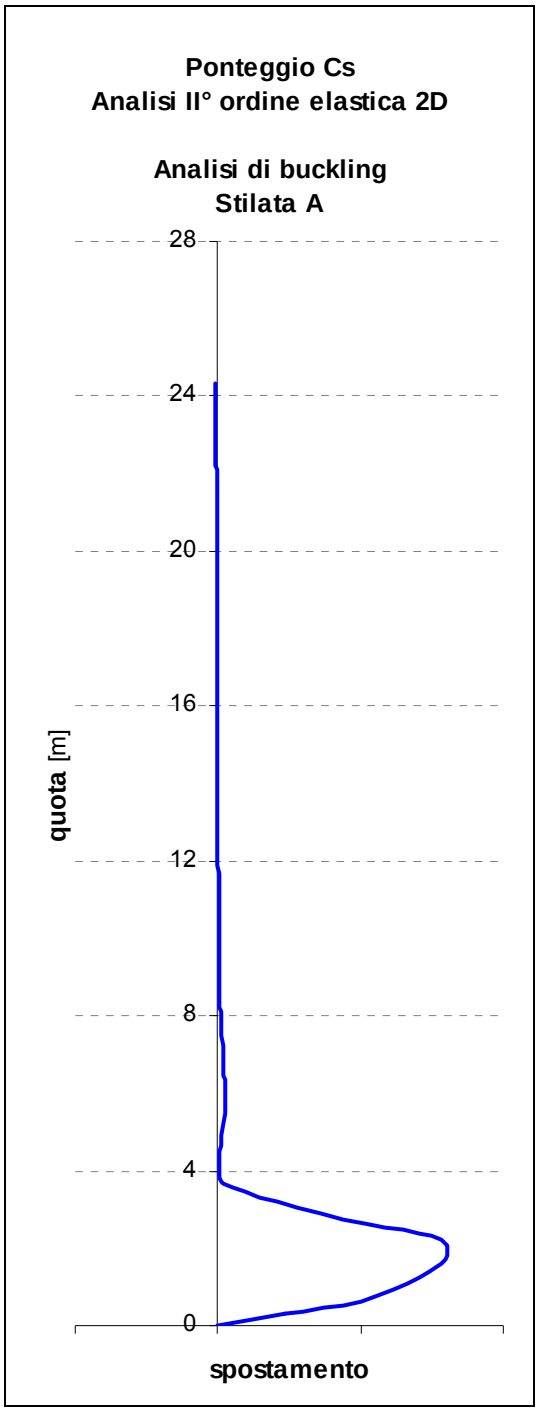
Dipartimento Tecnologie di Sicurezza

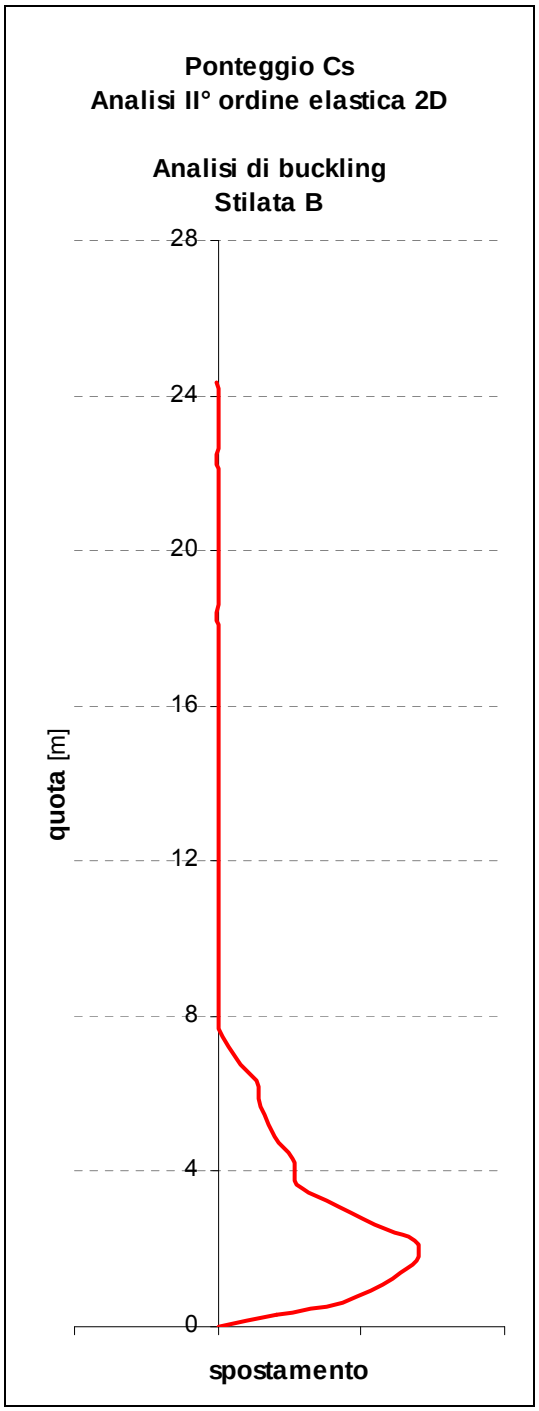
10/02/2009

PONTEGGIO Cs

Deformate Modello 2D - Analisi di buckling

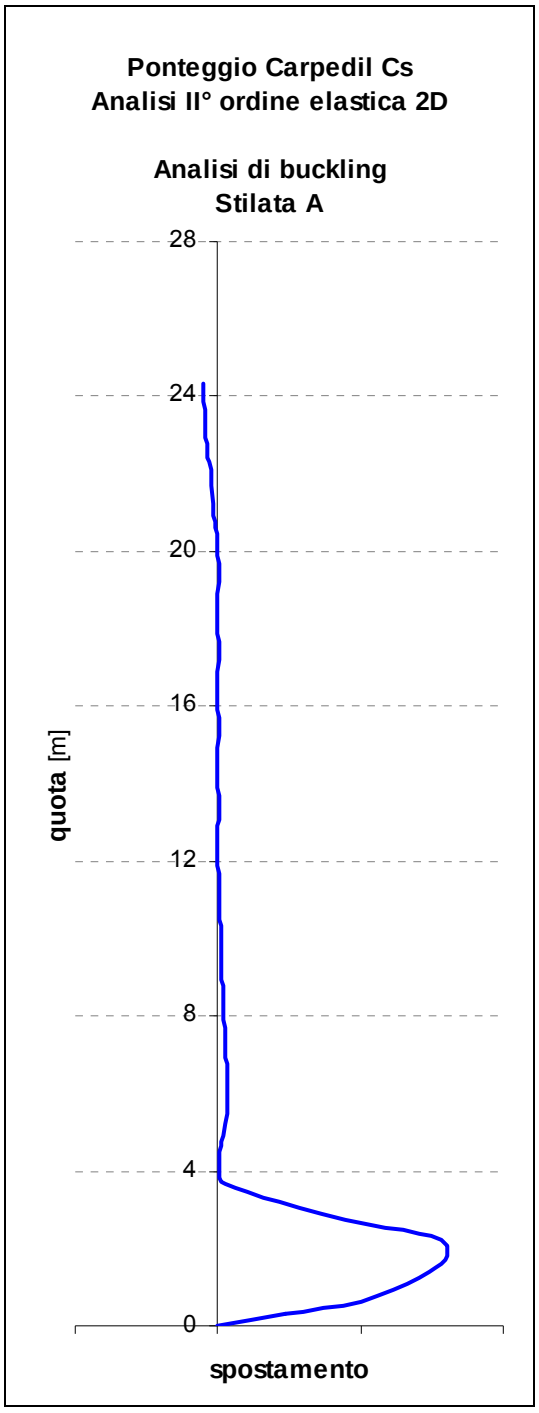
d_0=0 - k_{Rd}=sper - k_{Rk}= k_{Rd}

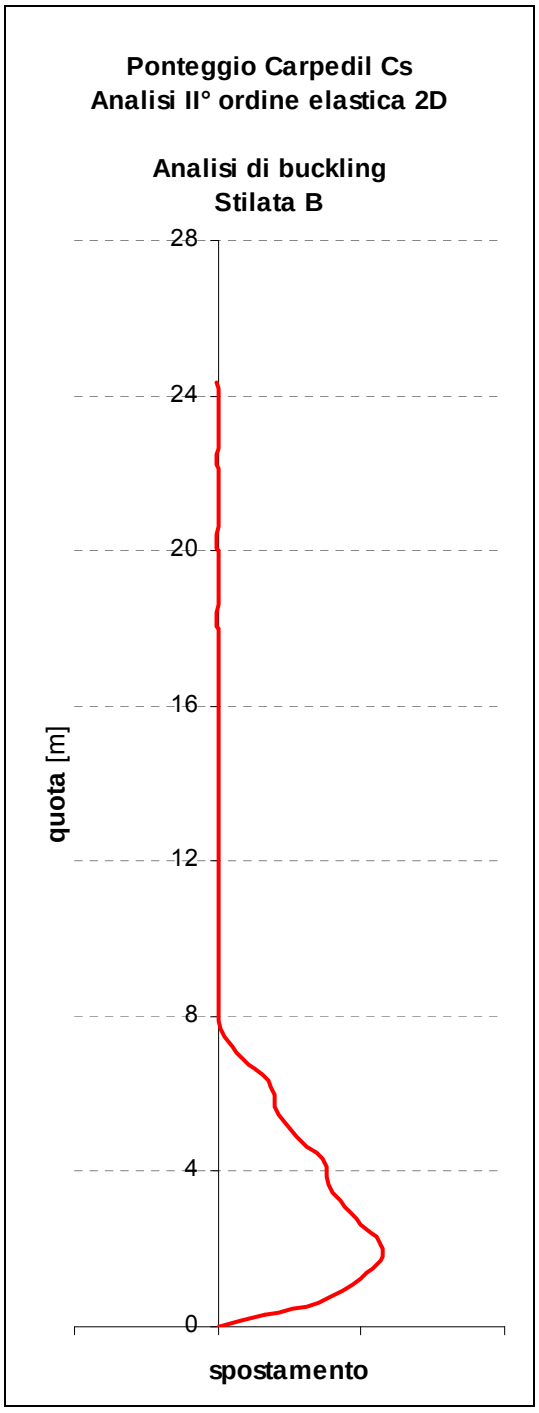




Deformate Modello 2D - Analisi di buckling

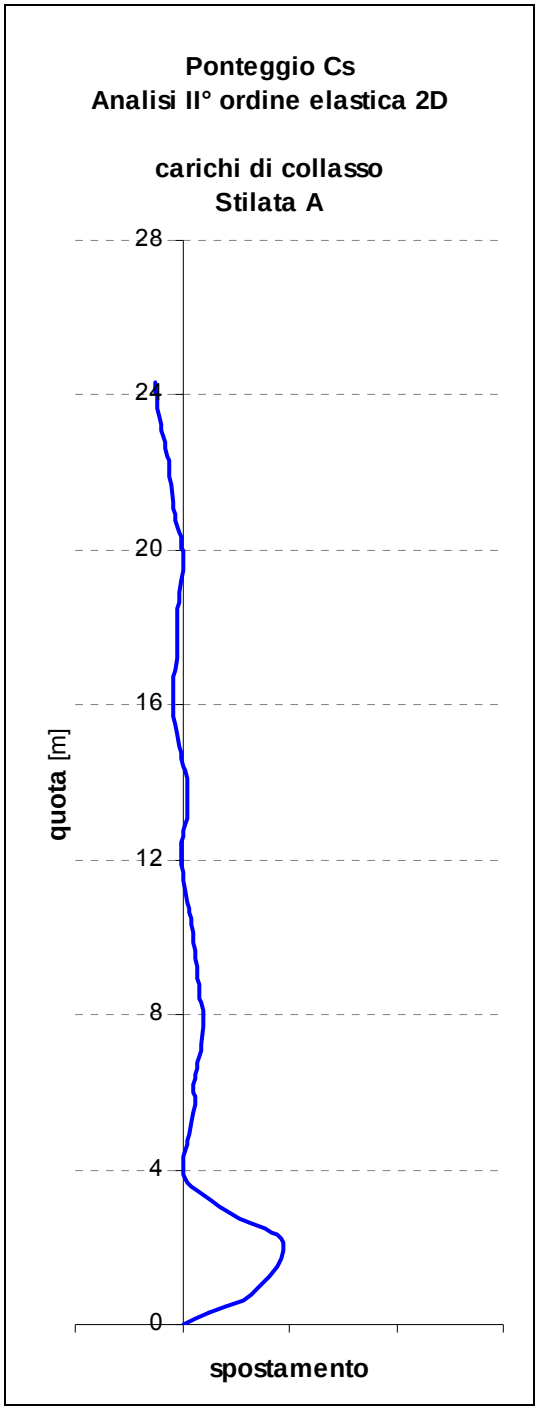
$d_0=0$ - $k_{Rd}=0$ - $k_{Rk}=0$

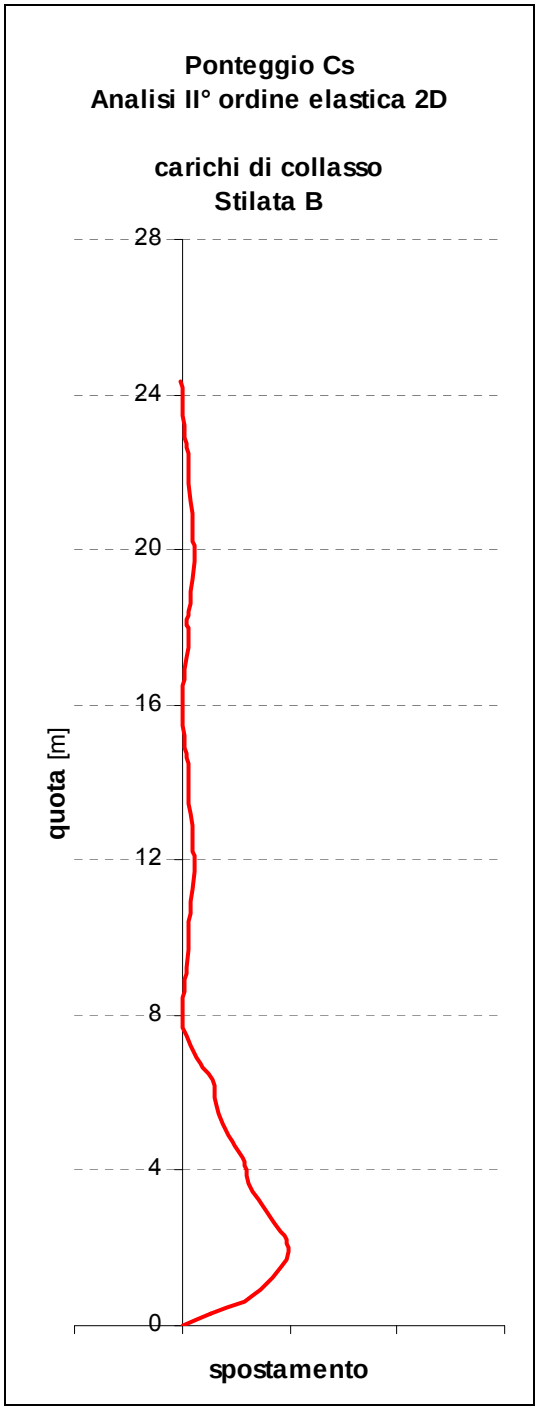




Deformate Modello 2D - Analisi del II° ordine

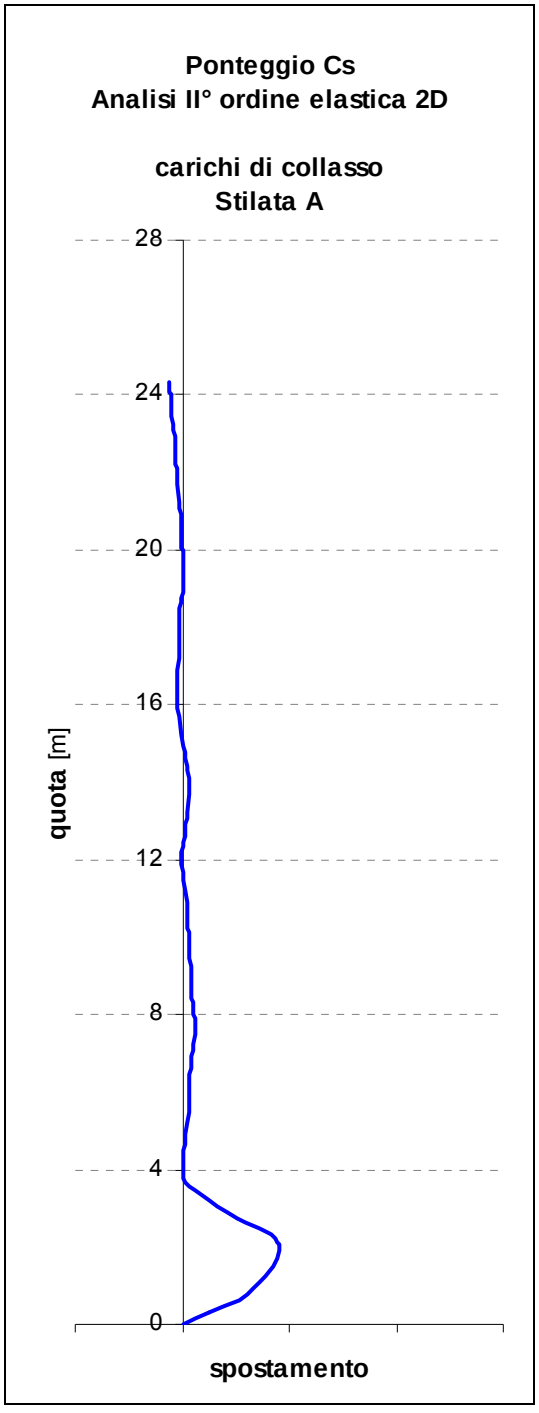
$d_0 \neq 0$ - k_{Rd}=sper - k_{Rk}=sper

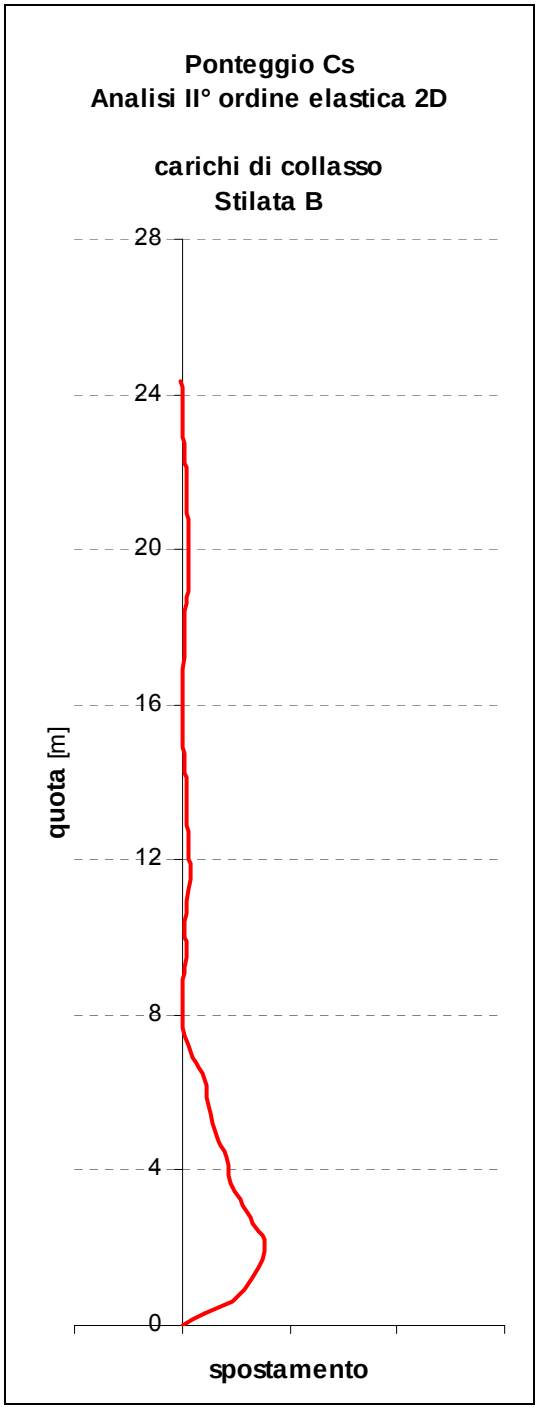




Deformate Modello 2D - Analisi del II° ordine

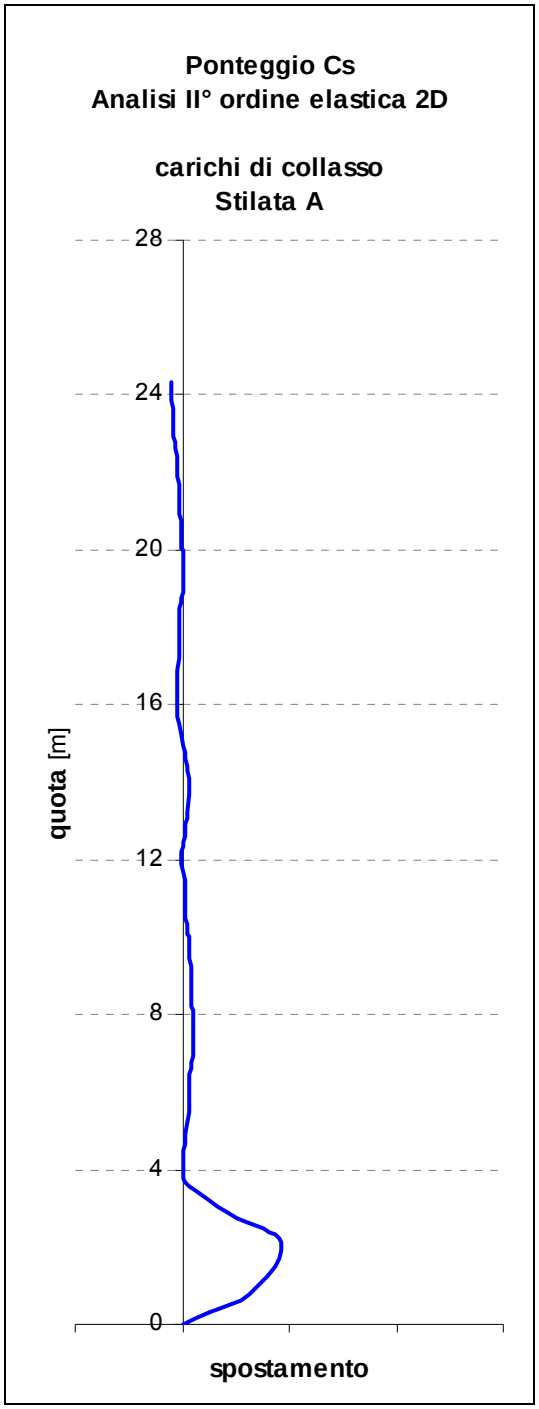
d_0=0 - k_{Rd}=sper - k_{Rk}=sper

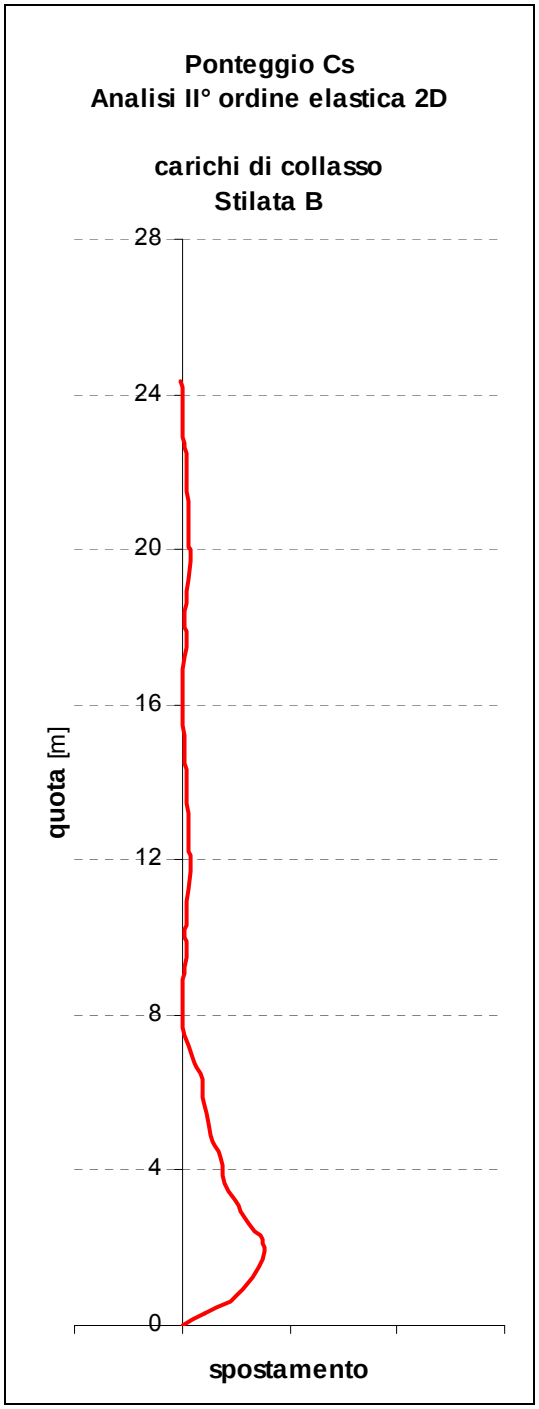




Deformate Modello 2D - Analisi del II° ordine

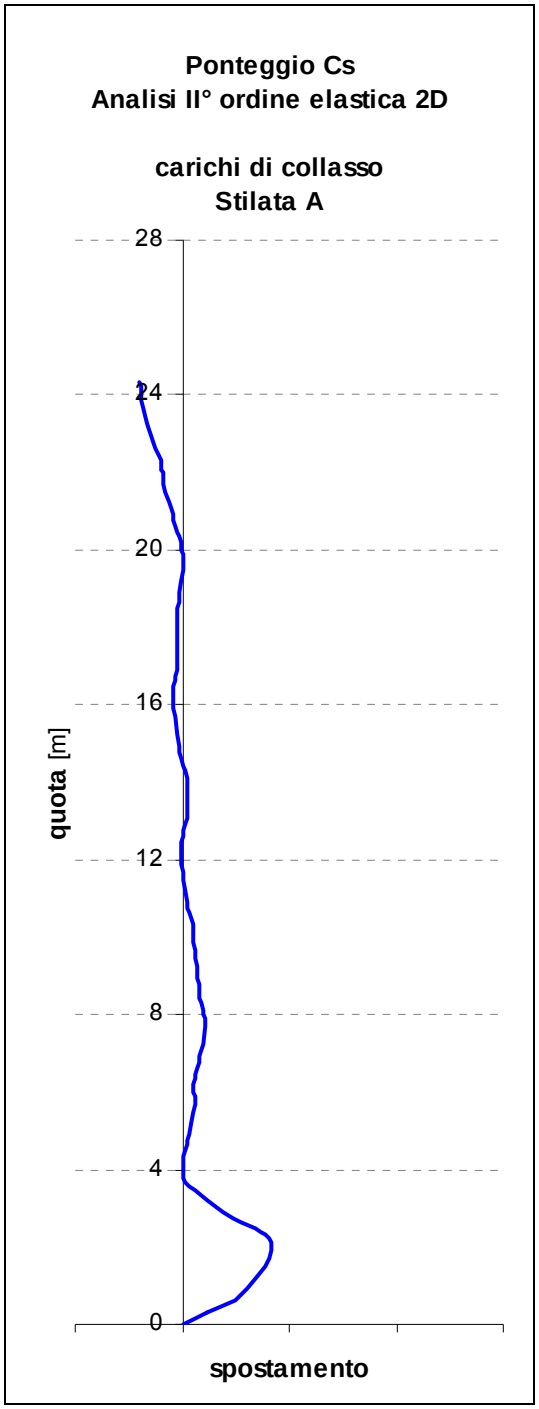
d_0=0 - k_{Rd}=sper - k_{Rk}= k_{Rd}

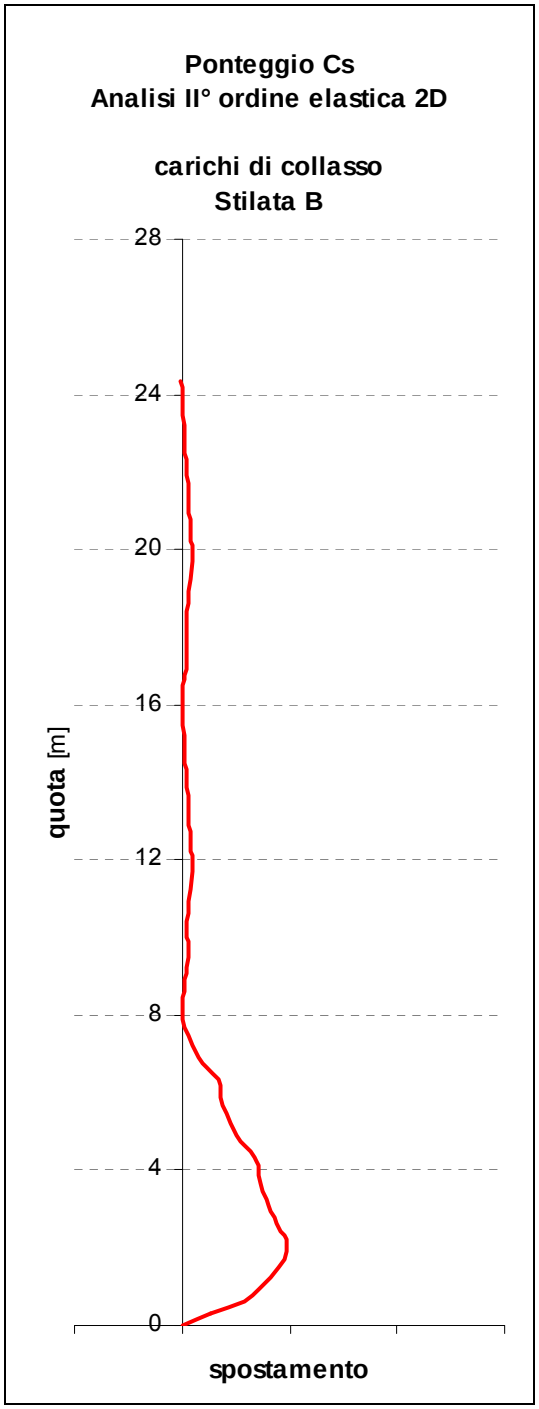




Deformate Modello 2D - Analisi del II° ordine

$d_0=0$ - $k_{Rd}=0$ - $k_{Rk}=0$

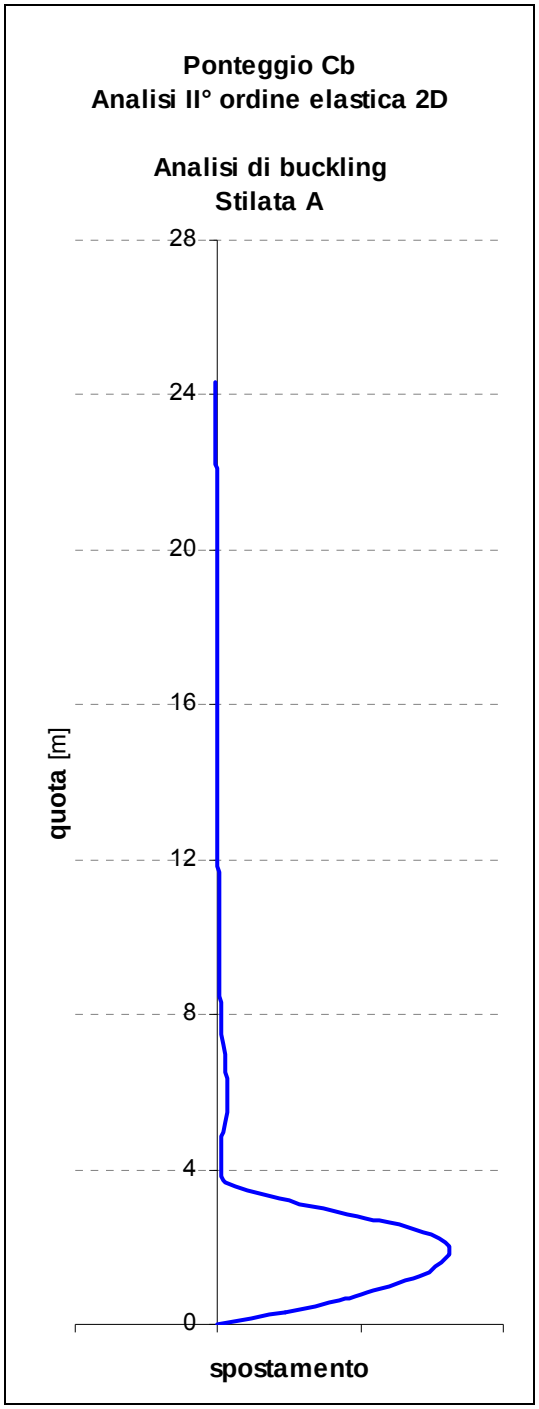


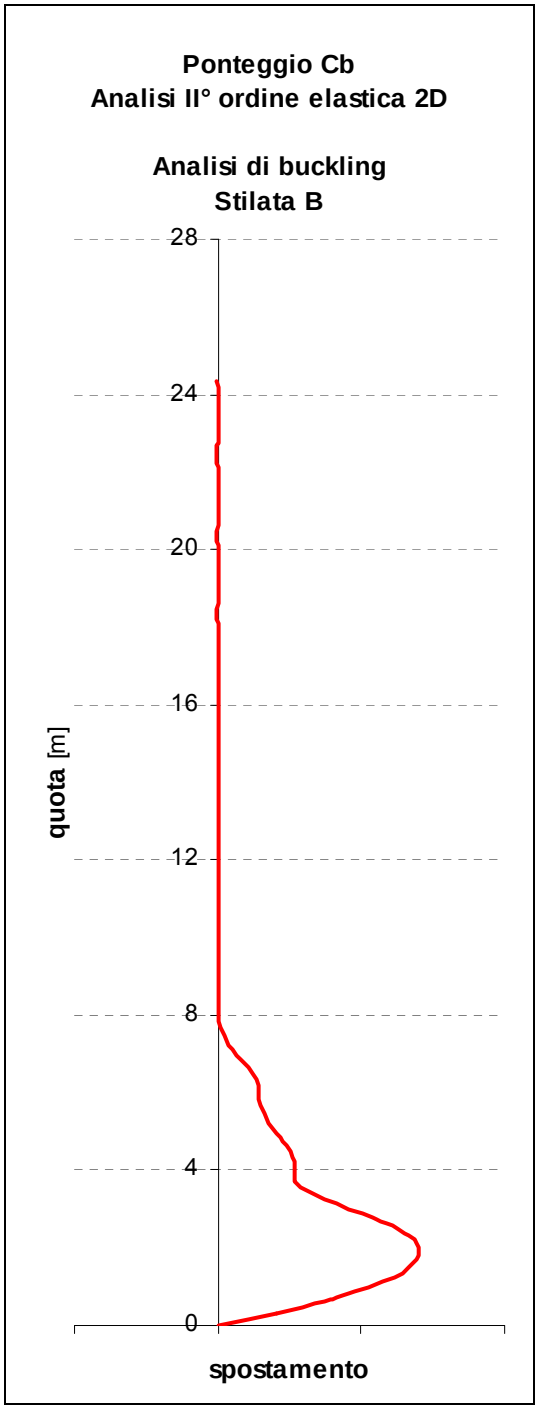


PONTEGGIO Cb

Deformate Modello 2D - Analisi di buckling

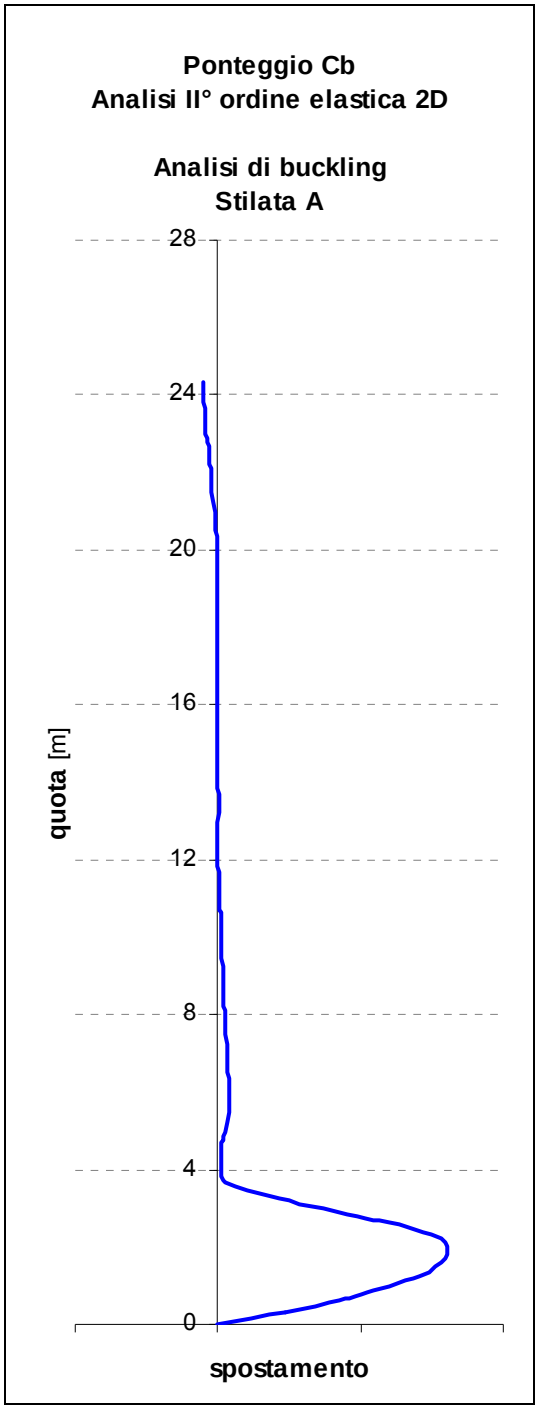
d_0=0 - k_{Rd}=sper - k_{Rk}= k_{Rd}

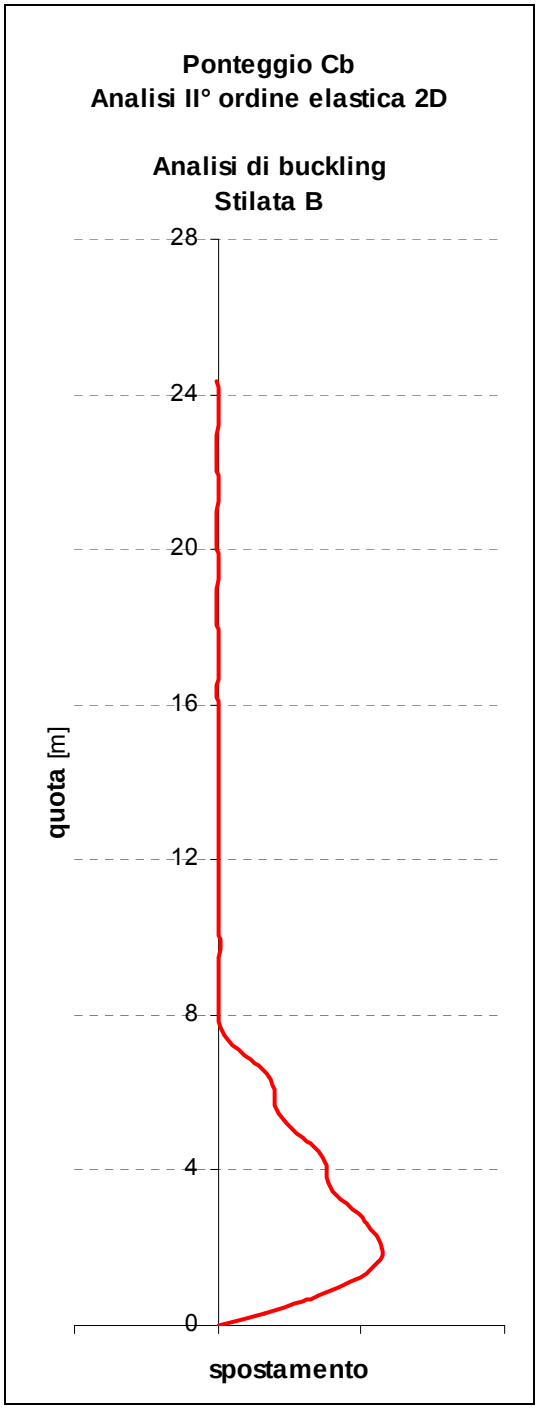




Deformate Modello 2D - Analisi di buckling

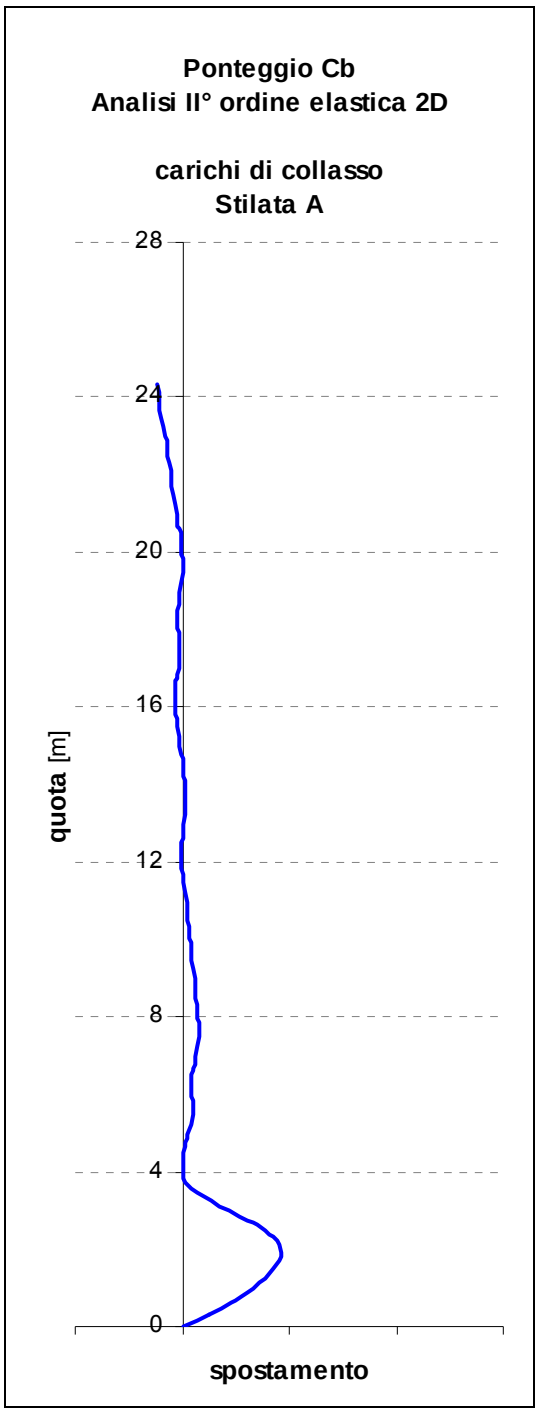
$d_0=0$ - $k_{Rd}=0$ - $k_{Rk}=0$

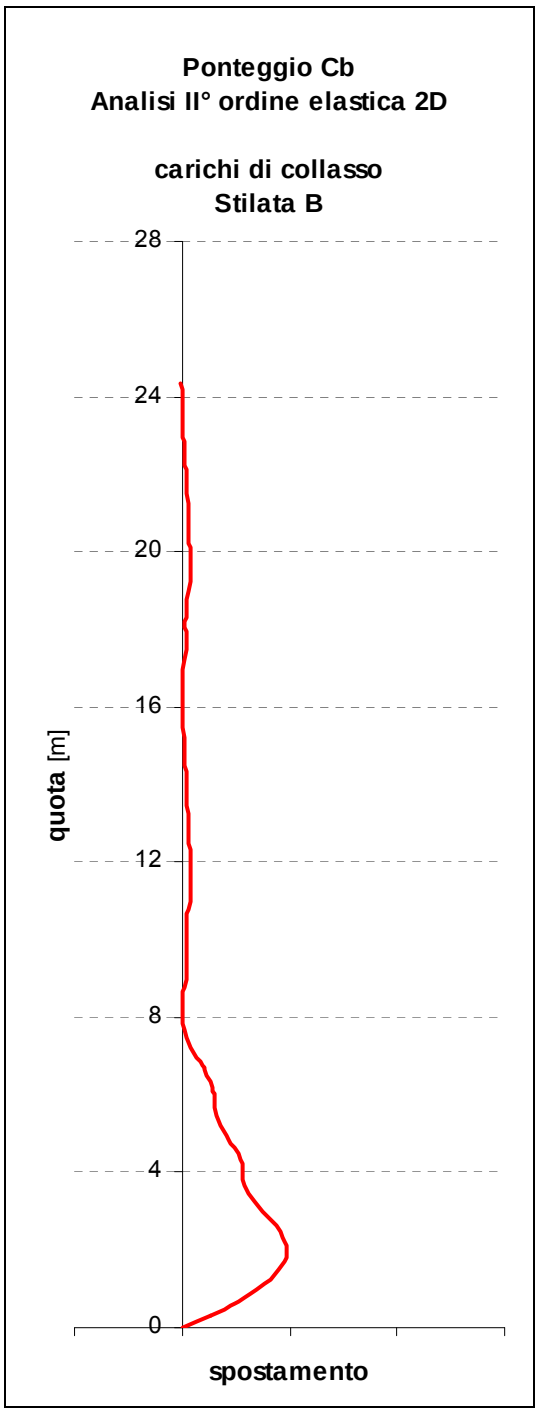




Deformate Modello 2D - Analisi del II° ordine

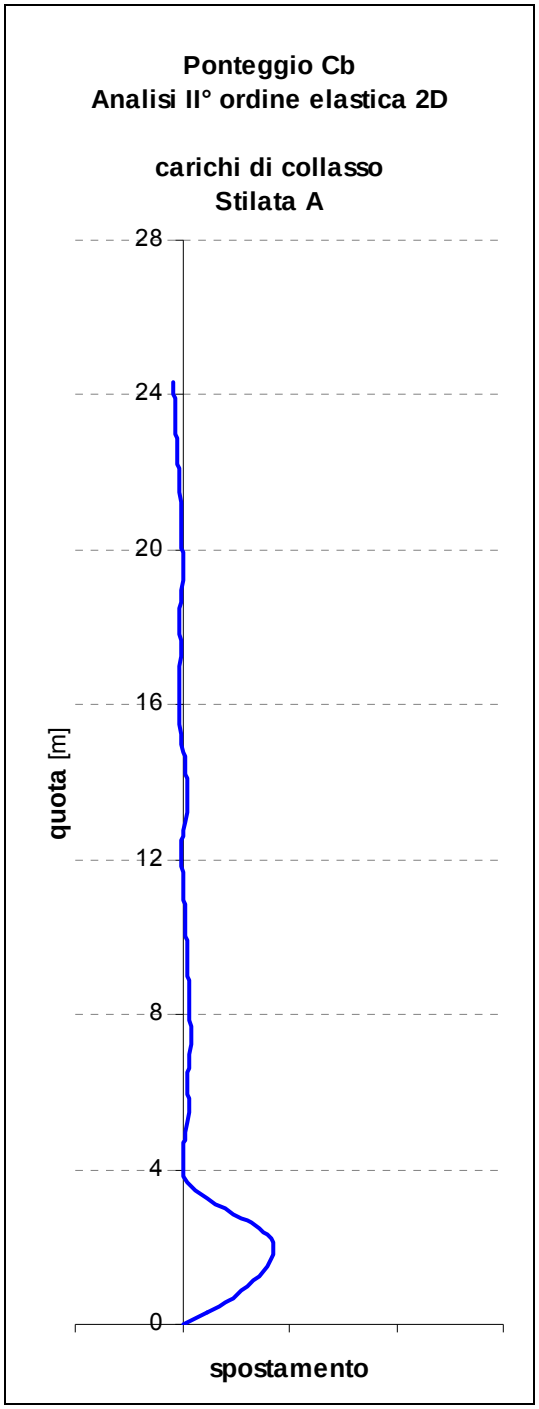
$d_0 \neq 0$ - k_{Rd}=sper - k_{Rk}=sper

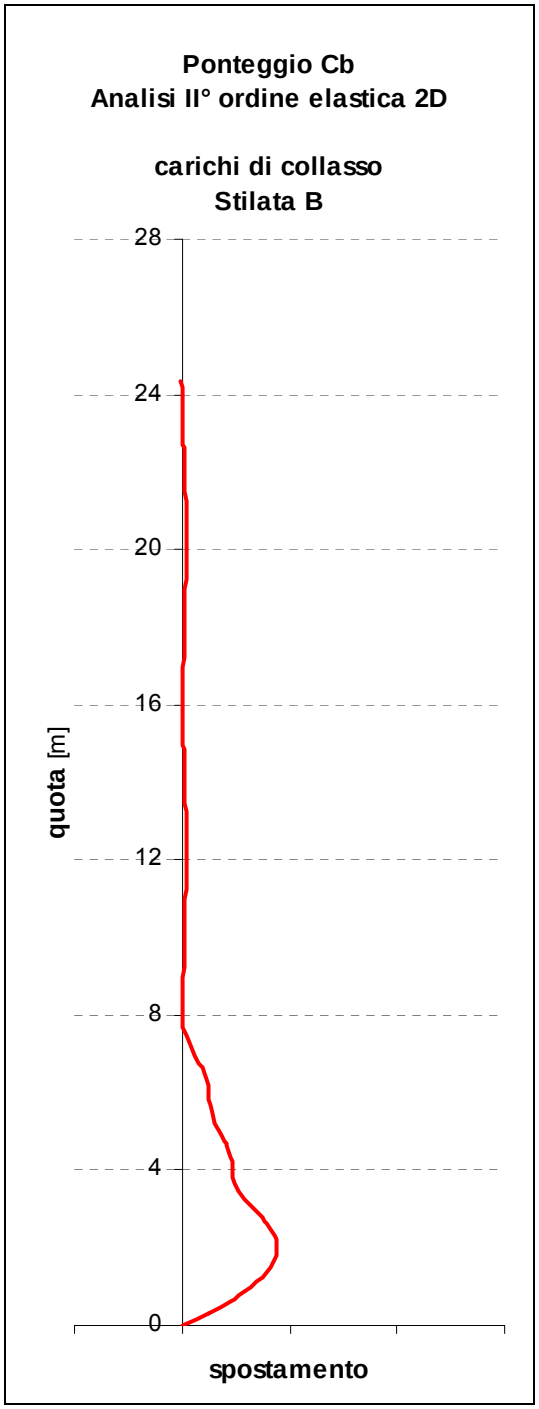




Deformate Modello 2D - Analisi del II° ordine

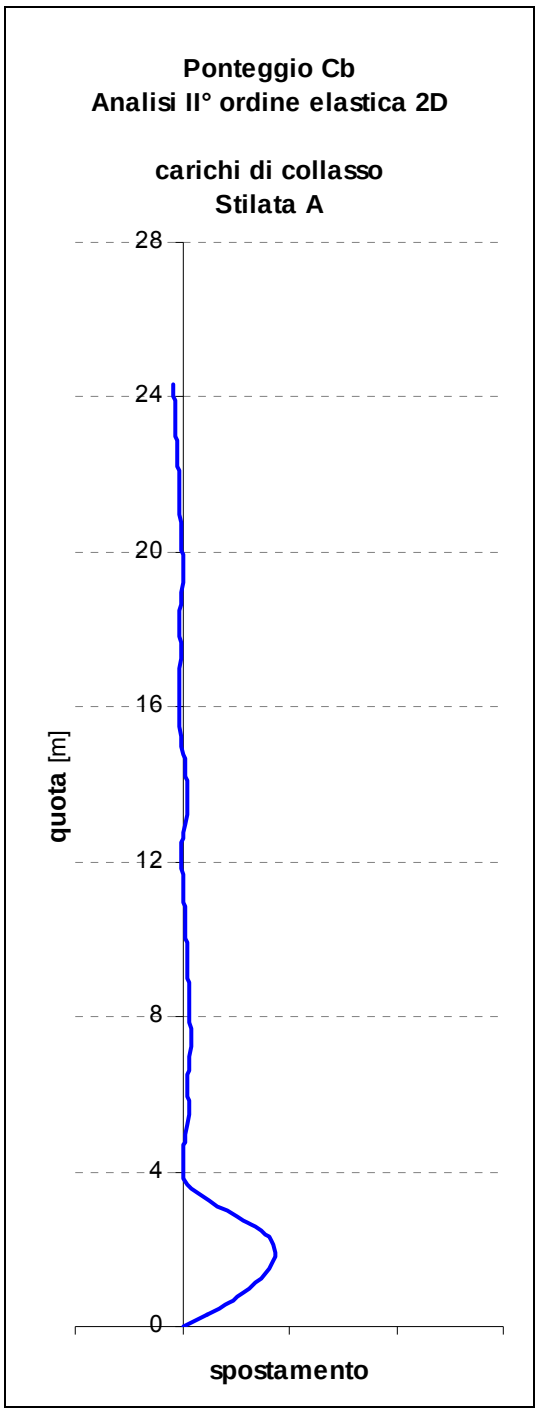
d_0=0 - k_{Rd}=sper - k_{Rk}=sper

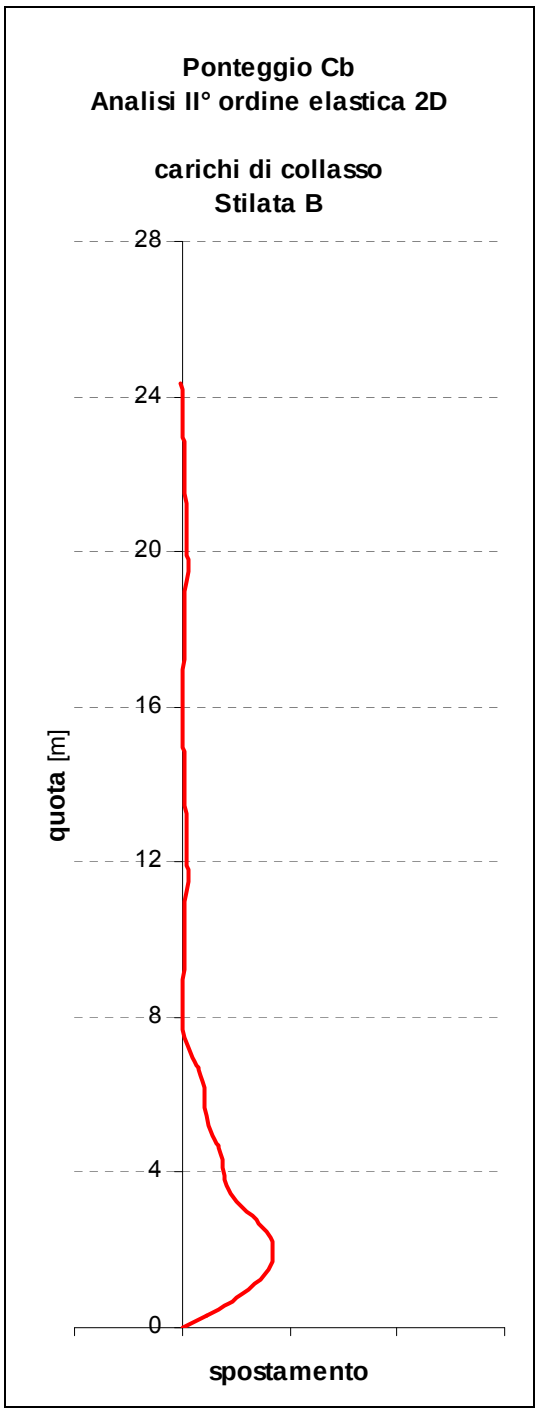




Deformate Modello 2D - Analisi del II° ordine

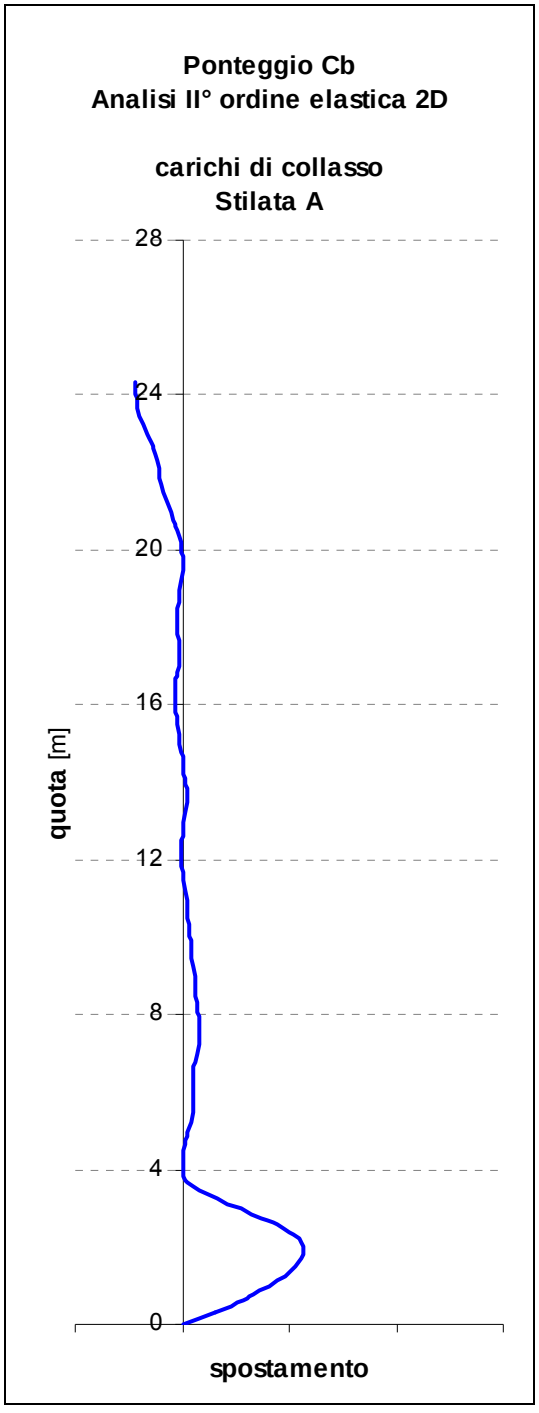
d_0=0 - k_{Rd}=sper - k_{Rk}= k_{Rd}

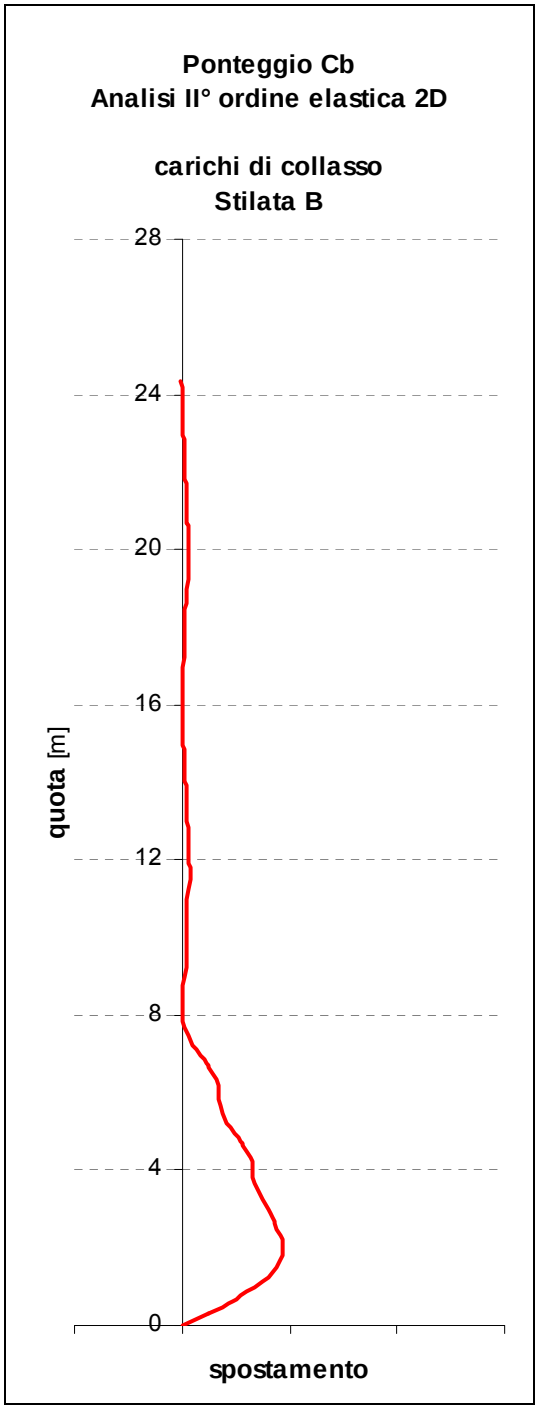




Deformate Modello 2D - Analisi del II° ordine

d_0=0 - k_{Rd}=0 - k_{Rk}= 0

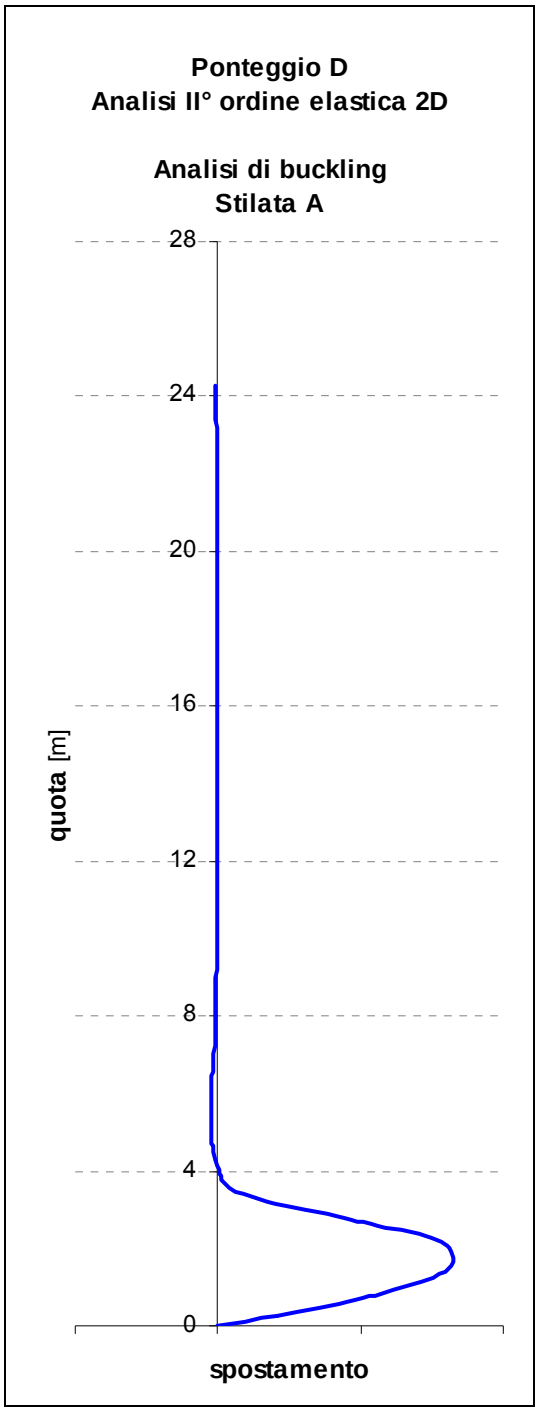


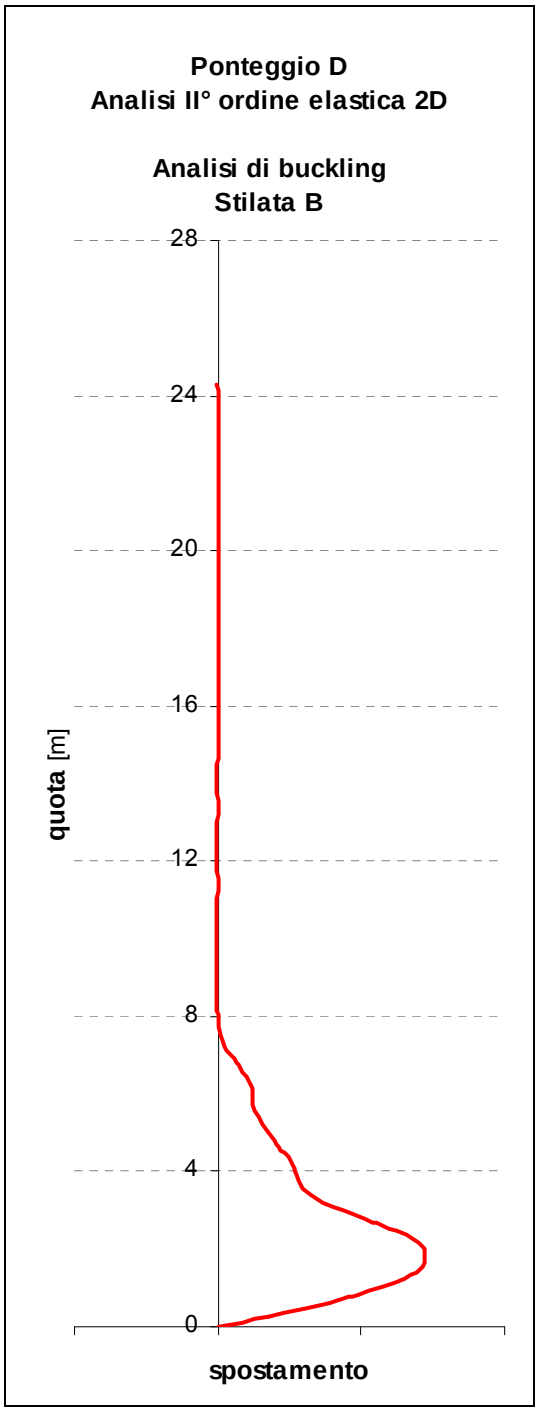


PONTEGGIO D

Deformate Modello 2D - Analisi di buckling

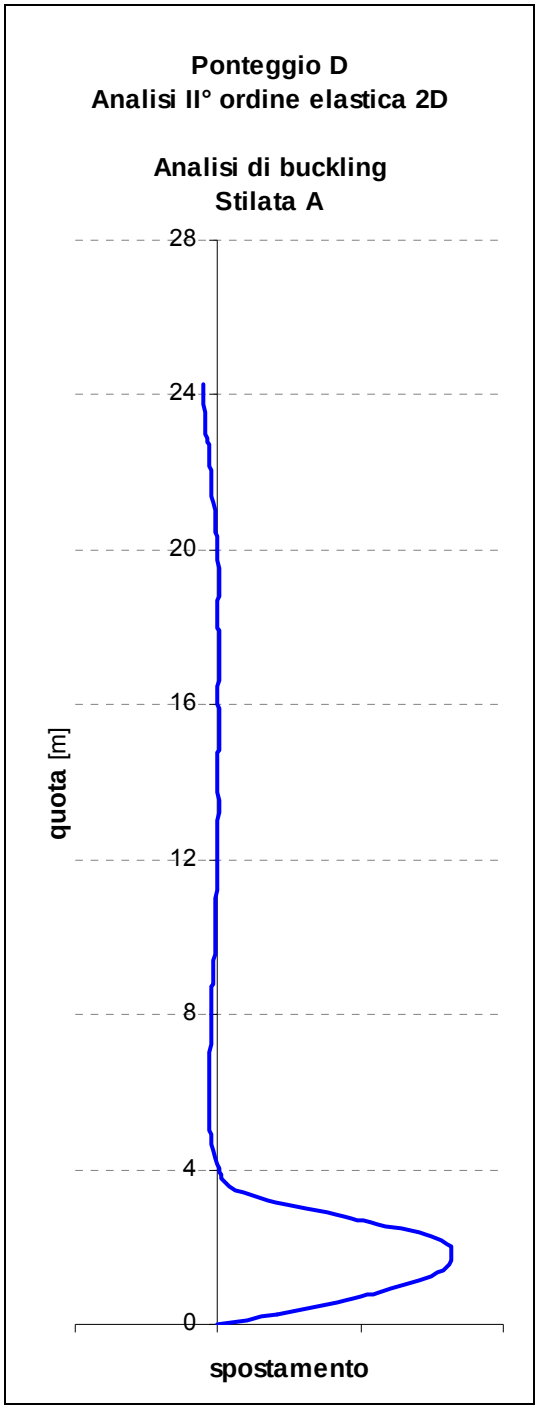
d_0=0 - k_{Rd}=sper - k_{Rk}= k_{Rd}

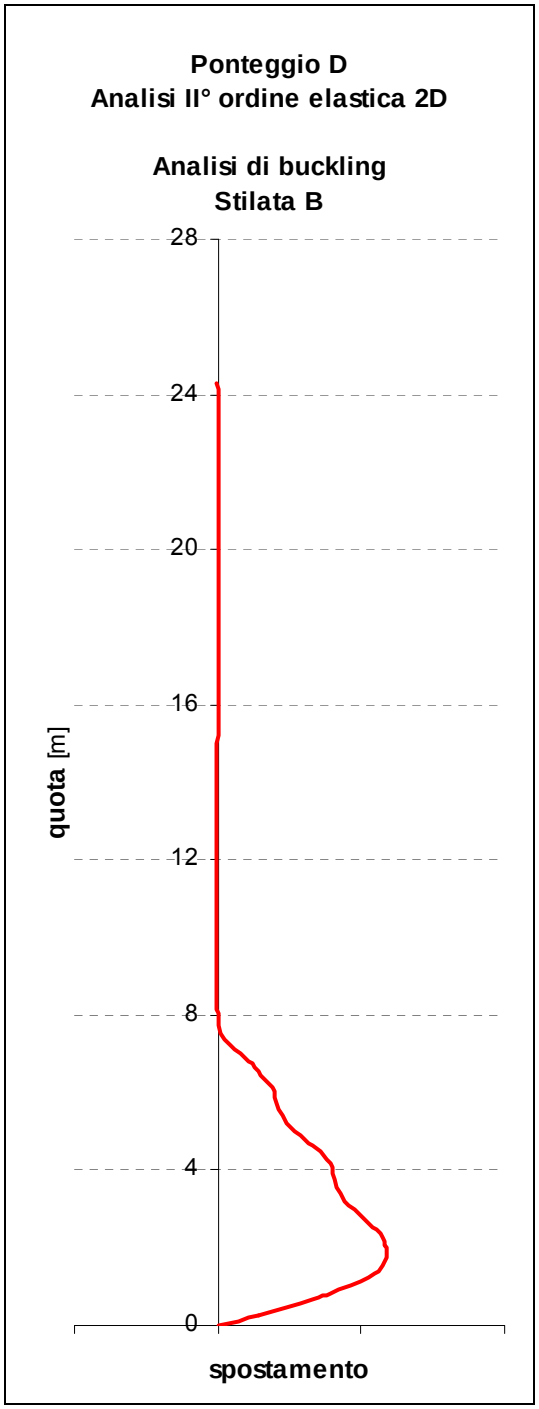




Deformate Modello 2D - Analisi di buckling

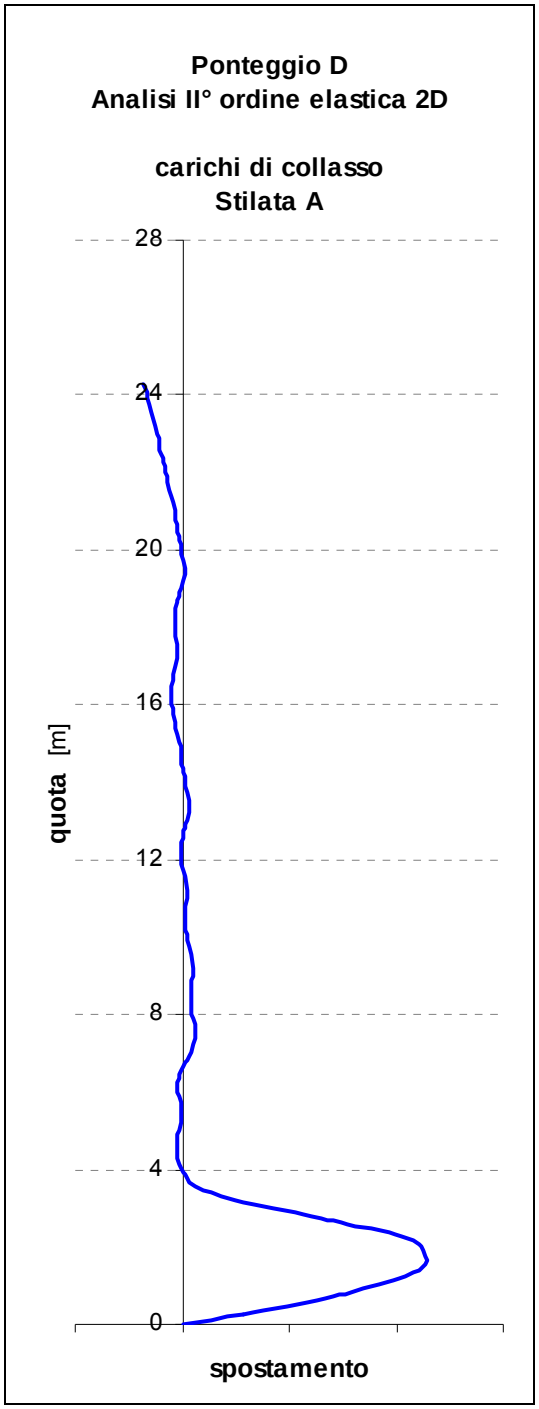
d_0=0 - k_{Rd}=0 - k_{Rk}= 0

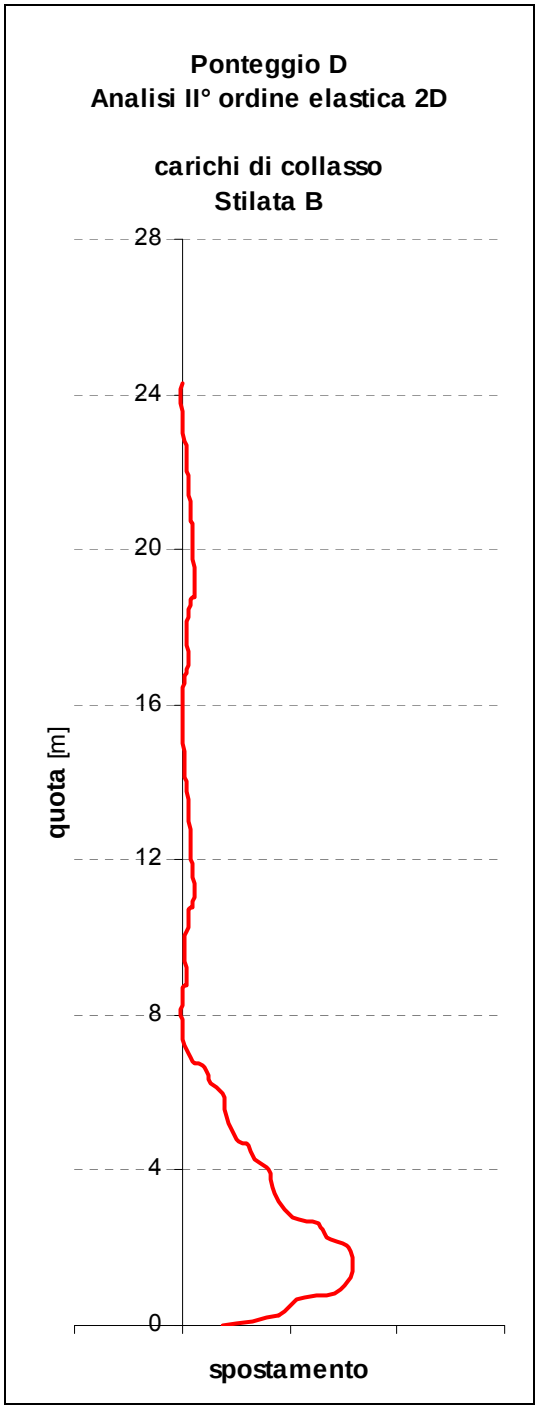




Deformate Modello 2D - Analisi del II° ordine

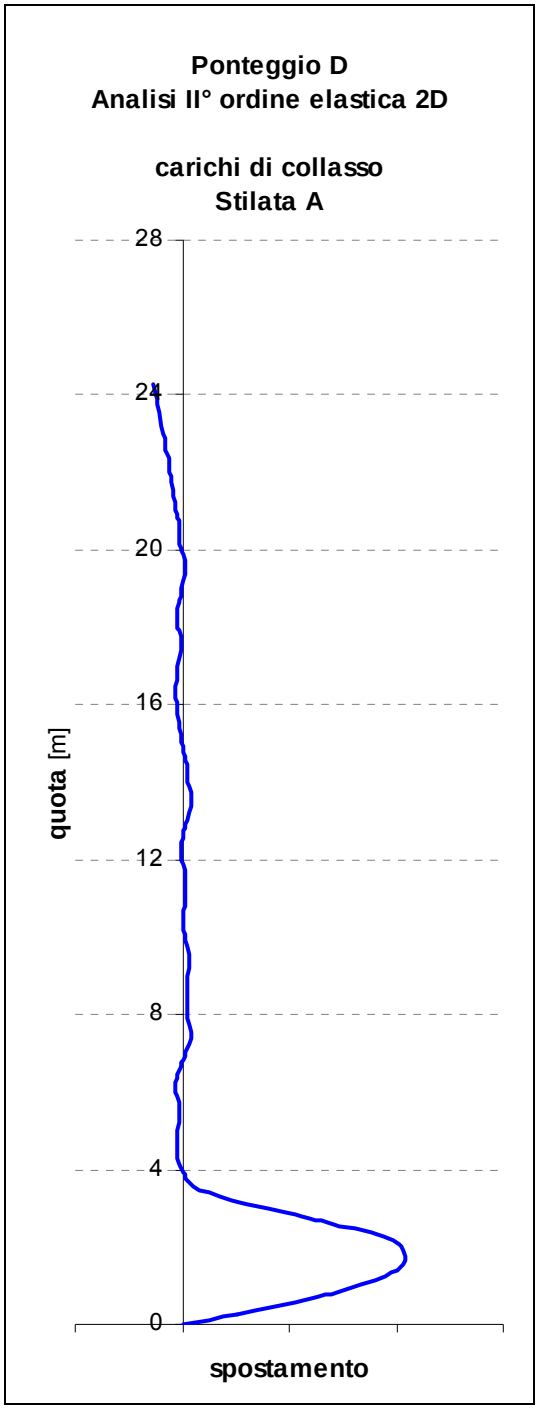
$d_0 \neq 0$ - k_{Rd}=sper - k_{Rk}= sper

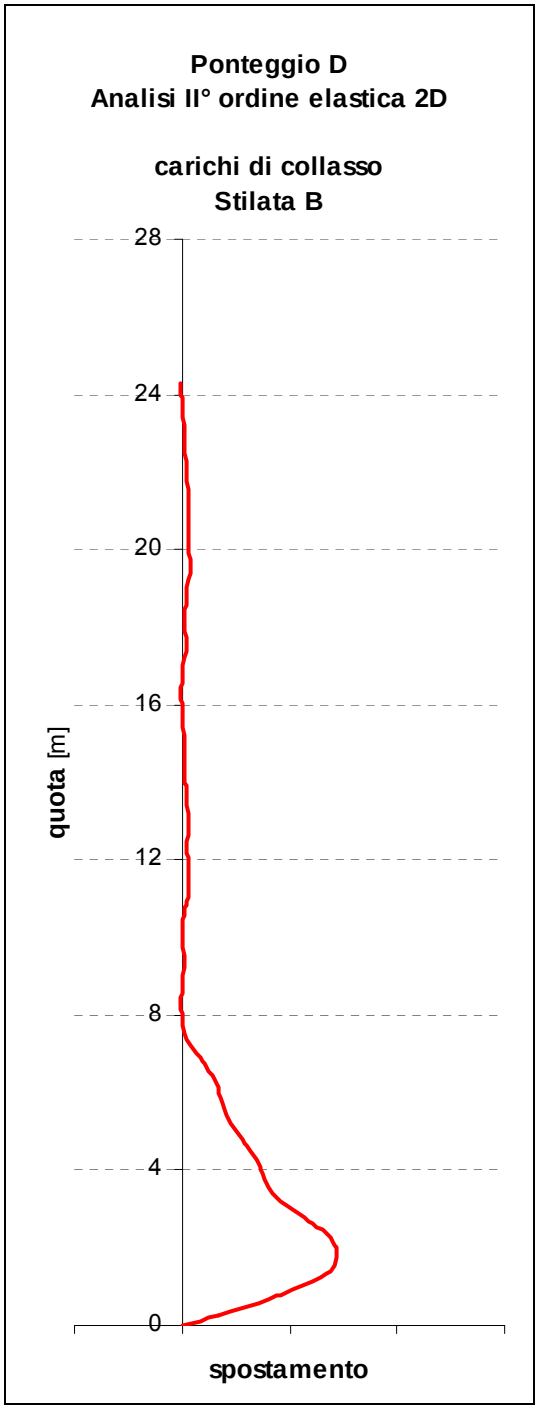




Deformate Modello 2D - Analisi del II° ordine

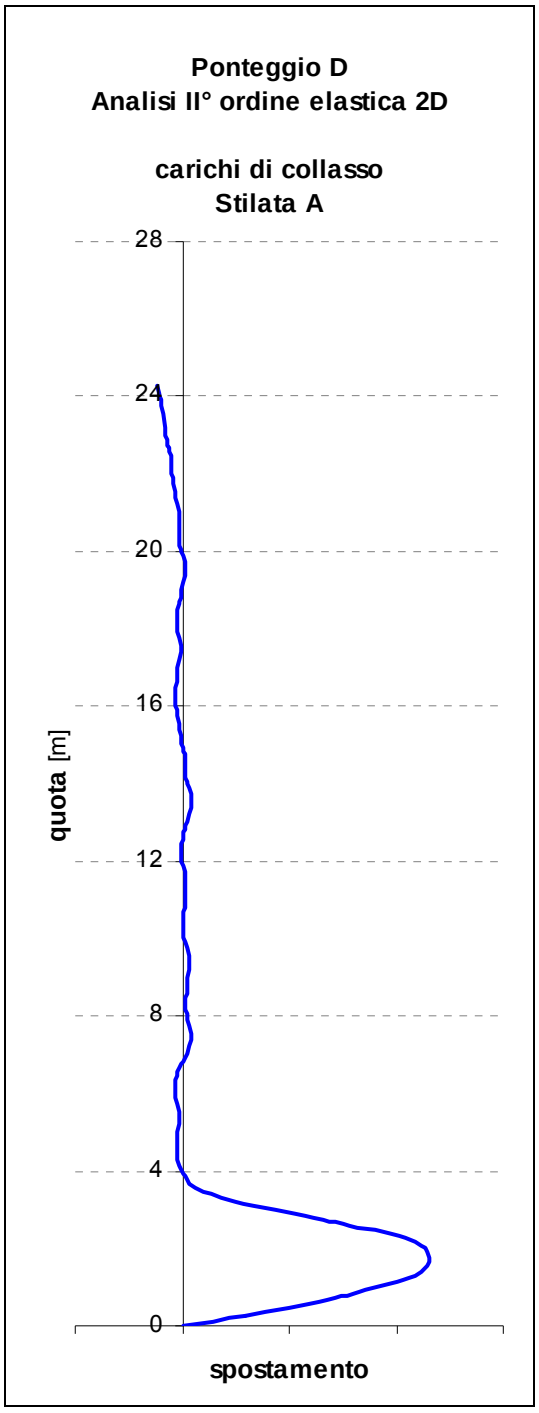
d_0=0 - k_{Rd}=sper - k_{Rk}= sper

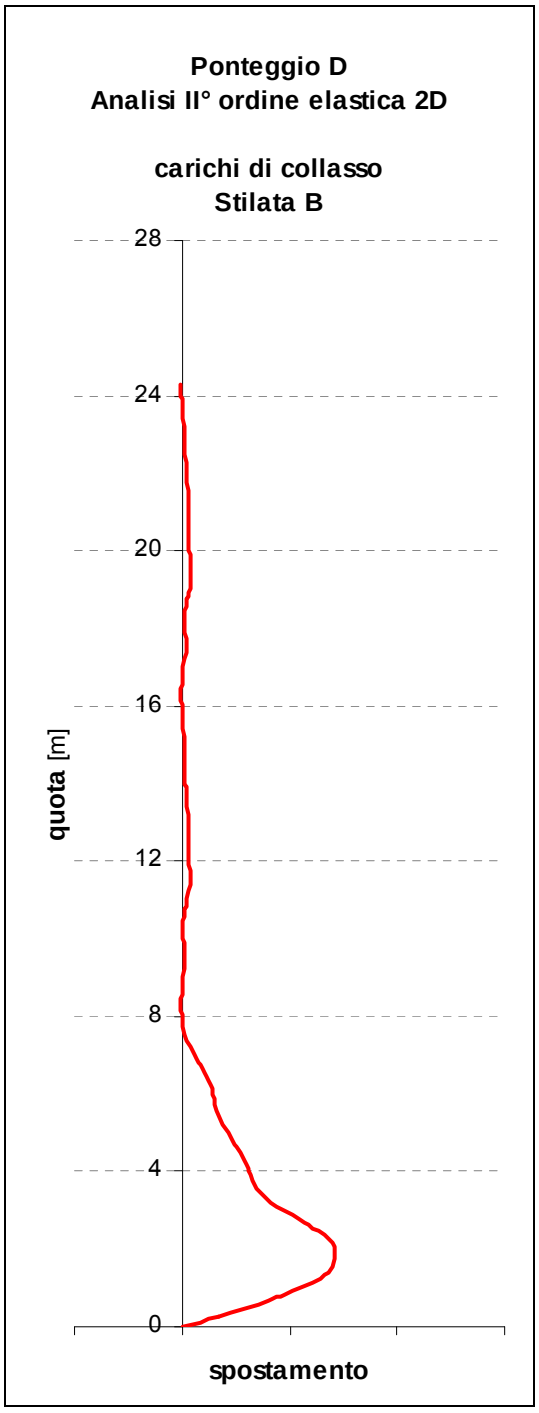




Deformate Modello 2D - Analisi del II° ordine

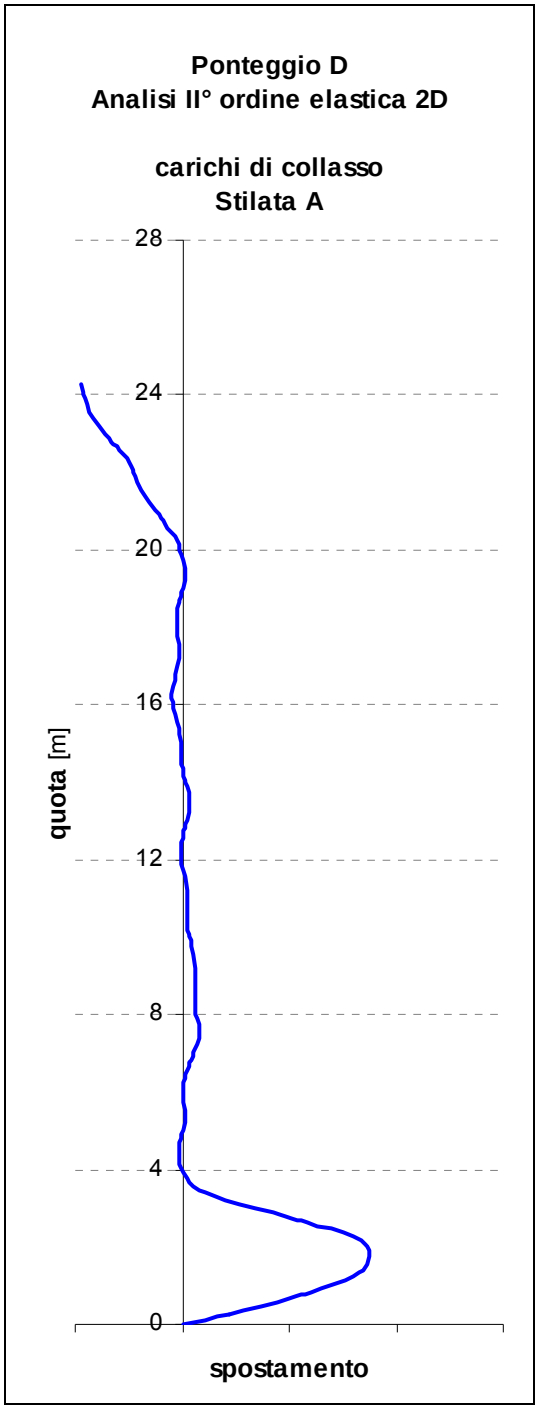
d_0=0 - k_{Rd}=sper - k_{Rk}= k_{Rd}

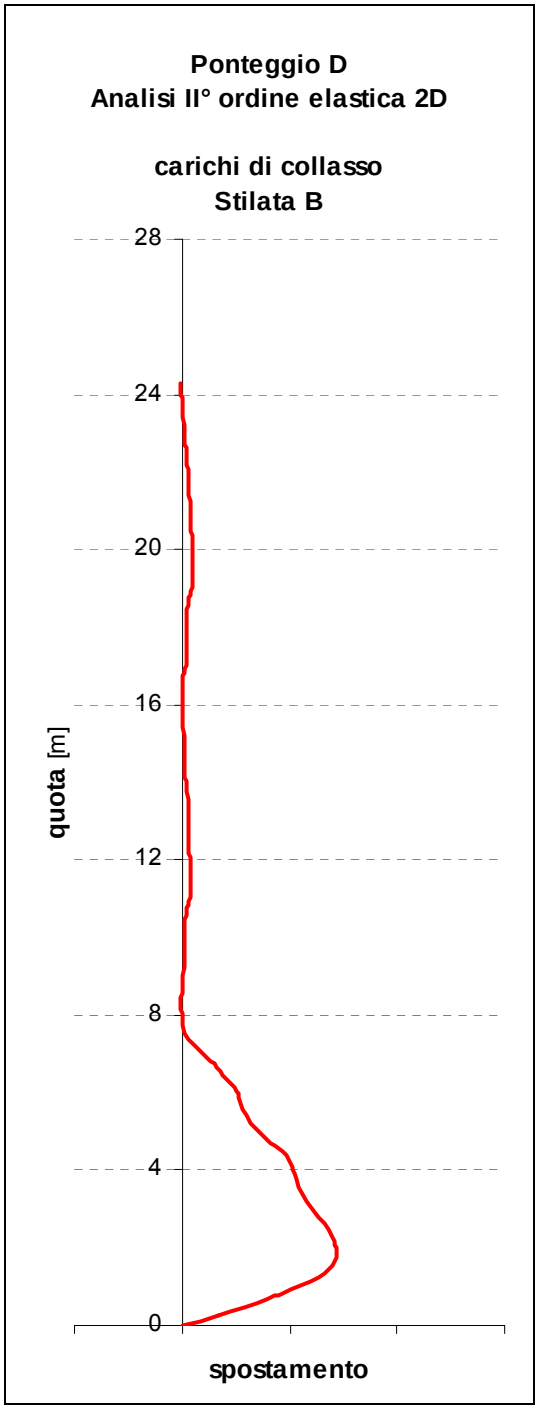




Deformate Modello 2D - Analisi del II° ordine

d_0=0 - k_{Rd}=0 - k_{Rk}= 0





B1-5/DTS/05

I ponteggi metallici fissi di facciata utilizzati nei cantieri temporanei o mobili.
Le nuove norme di prodotto: aspetti tecnici e legislativi

RELAZIONE FINALE - ALLEGATO 6

Autori: N. Baldassino, R. Zandonini

Affiliazione: Università degli Studi di Trento
Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale

Ricerca finanziata da:

Dipartimento Tecnologie di Sicurezza

10/02/2009

PROCEDURA PER LA GESTIONE DATI DI ANALISI 3D

A6.1 REQUISITI DI SISTEMA E DI INSTALLAZIONE

La procedura, dal punto di vista hardware e software, richiede una dotazione minima costituita da:

- processore tipo Pentium IV;
- memoria RAM da 512MB;
- sistema operativo Windows XP o successivi;
- pacchetto Microsoft© Office 2003 o successivi.

A6.2 PROCEDURA DI INSTALLAZIONE

Il CD "PROCEDURE" riguardante la procedura automatizzata ed allegato alla parte principale del documento (relazione finale del progetto di ricerca)contiene quattro files destinati alle seguenti applicazioni:

1- procedura SAP20003D, per l'analisi agli elementi finiti di modelli tridimensionali tramite il software SAP;
2- procedura ANSYS3D, per l'analisi agli elementi finiti di modelli tridimensionali tramite il software ANSYS;
3- procedura SAP20002D, per l'analisi agli elementi finiti di modelli bidimensionali relativi al piano di stilata tramite il software SAP;
4- VERIFICA SEZIONI.xls, per la verifica delle sezioni in accordo alle norme UNI EN 1933-1-1:2005 [8] e UNI EN 12811-3:2005 [7].

Per velocizzare le operazioni connesse alle procedure di cui sopra, é consigliabile copiare i files in una cartella di destinazione residente sul disco fisso. E' possibile quindi procedere con l'esecuzione del file relativo alla procedura desiderata.

Relativamente alle procedure elencate ai punti 1-2-3 all'avvio, laddove si utilizzi un pacchetto Microsoft© Office 2007, appare un messaggio con la richiesta di attivazione delle macro a cui l'utente deve ottemperare selezionando l'opzione "Attiva macro".

Qualora si utilizzi una versione precedente al pacchetto Microsoft© Office 2007, nel caso in cui non sia già stato fatto per altre ragioni, è necessario procedere all'attivazione delle macro. A tal fine è necessario seguire la seguente procedura:
dal menù "Strumenti" di Excel selezionare >Protezione e successivamente l'opzione "Proteggi foglio". Successivamente sempre dal menù "Strumenti", >Macro, >Protezione, selezionare l'opzione "Livello di protezione Basso". Premere OK e chiudere salvando il file. E' necessario quindi riaprire il file e seguire nuovamente la procedura dal menu Strumenti, >Protezione e riattivare "Proteggi foglio". A questo punto la procedura presente nella macro è pronta per generare il file di listato.

In quanto segue sono fornite le istruzioni necessarie all'inserimento dei dati di input relative alle procedure 3D (punti 1 e 2 dell'elenco precedente). Le istruzioni sono fornite separatamente per il livello di operatività 1 e 2.

A6.3 NOTE

Per il corretto funzionamento delle procedure è indispensabile che l'utente non alteri o elimini i fogli di lavoro presenti al momento dell'installazione.

Ulteriormente, per la procedura relativa ad ANSYS, è necessario configurare le impostazioni internazionali del pannello di controllo di Windows in modo che la separazione decimale sia caratterizzata con il punto anziché con la virgola.

A6.4 LIVELLO DI OPERATIVITÀ 1

PASSO 1

All'apertura del file desiderato (procedura SAP20003D o procedura ANSYS3D) all'utente appare il foglio di lavoro tramite il quale può iniziare l'immissione dei dati attraverso il livello di operatività 1 (Figura A6.1). L'attribuzione dei dati principali relativi al sistema intelaiato, quali le dimensioni del telaio, la tipologia di ponteggio (boccole o spinotti), la distanza tra le stilate deve avere luogo al livello 1. Solamente a valle della procedura al livello 1, l'utente può passare al livello di operatività 2.

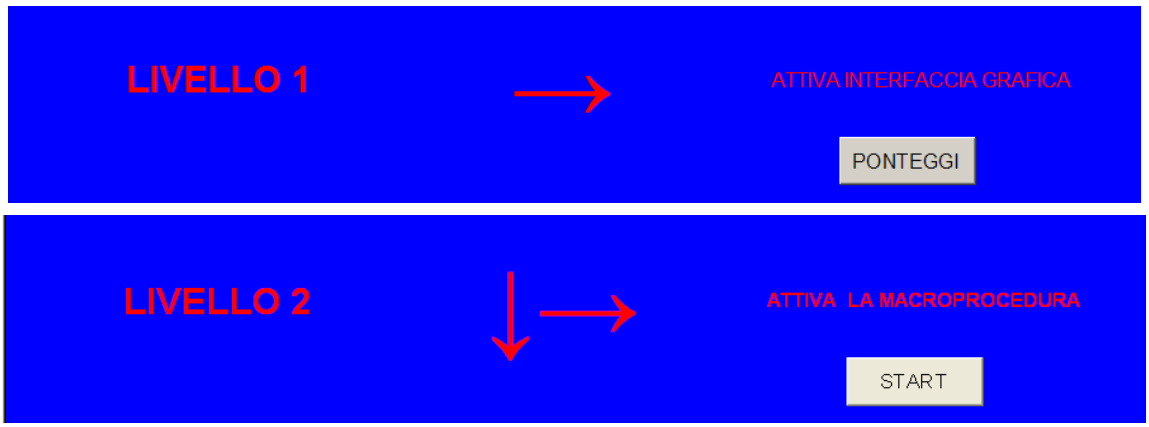


Figura A6.1 - Attivazione della procedura di immissione dati

L'utente deve attivare il pulsante "PONTEGGI" associata alla dicitura "ATTIVA INTERFACCIA GRAFICA".

PASSO 2

La prima finestra di dialogo che si presenta all'utente (figura A6.2) permette di gestire il database dei ponteggi scegliendo tra le opzioni:

- SCEGLI DAL DATABASE: l'utente può scegliere una casistica tra quelle presenti nella libreria. All'atto della prima esecuzione sono presenti due tipologie base predefinite e non eliminabili dal database (PONTEGGIO CON BOCCOLE e PONTEGGIO CON SPINOTTI). La loro rimozione potrebbe comportare il mancato funzionamento della macroprocedura. La scelta dal database di una fra le casistiche già presenti fa passar automaticamente al PASSO 4 della procedura di inserimento dati;
- CREA NUOVO PONTEGGIO: l'utente è invitato a digitare il nome del nuovo ponteggio scegliendo fra le opzioni "PONTEGGIO BOCCOLE" e "PONTEGGIO SPINOTTI"
- ELIMINA PONTEGGIO: l'utente può eliminare dal database un ponteggio già definito cancellando permanentemente il foglio di lavoro che lo identifica.

Premere OK

PASSO 3

Nel caso al PASSO 2 si sia scelto di creare un nuovo ponteggio all'utente appare la finestra di dialogo di figura A6.3 nella quale è invitato ad inserire le principali caratteristiche geometriche del telaio di stilata quali la larghezza e l'altezza del telaio, l'altezza della basetta e la quota di posizionamento del traverso di irrigidimento orizzontale (se presente) rispetto all'asse di riferimento x. All'utente è chiesto anche di inserire le quote progressive rispetto all'asse x dei nodi attraverso i quali vuole discretizzare i montanti e la posizione dei nodi 109 e 119 di intersezione del traverso con gli irrigidimenti obliqui. Il nodo 110 è generato in automatico alla metà del traverso. Non è ammessa la presenza di nodi posti a distanza minore di 1 mm.
I nodi 102-112-106-116 (indicati in rosso nel disegno) e i nodi 107 e 117 (indicati in blu nel disegno) sono riservati ai nodi in corrispondenza dei quali si realizza il collegamento tra diagonali di facciata e montanti e tra correnti di facciata e montanti, rispettivamente. La schematizzazione adottata dall'utente deve pertanto essere scelta nel rispetto di questi vincoli geometrici.
Nel caso in cui l'utente al passo precedente (PASSO 1- Fig. A6.2) abbia attivato l'opzione "PONTEGGIO BOCCOLE" è richiesto l'inserimento dell'eccentricità nel piano di facciata tra asse del montante e centro della boccola. Qualora l'utente al passo precedente (PASSO 1 - Fig. A6.2) abbia attivato l'opzione "PONTEGGIO SPINOTTI" questa informazione non viene richiesta.
Premere OK

Figura A6.2 – Finestra di dialogo per la gestione database ponteggi

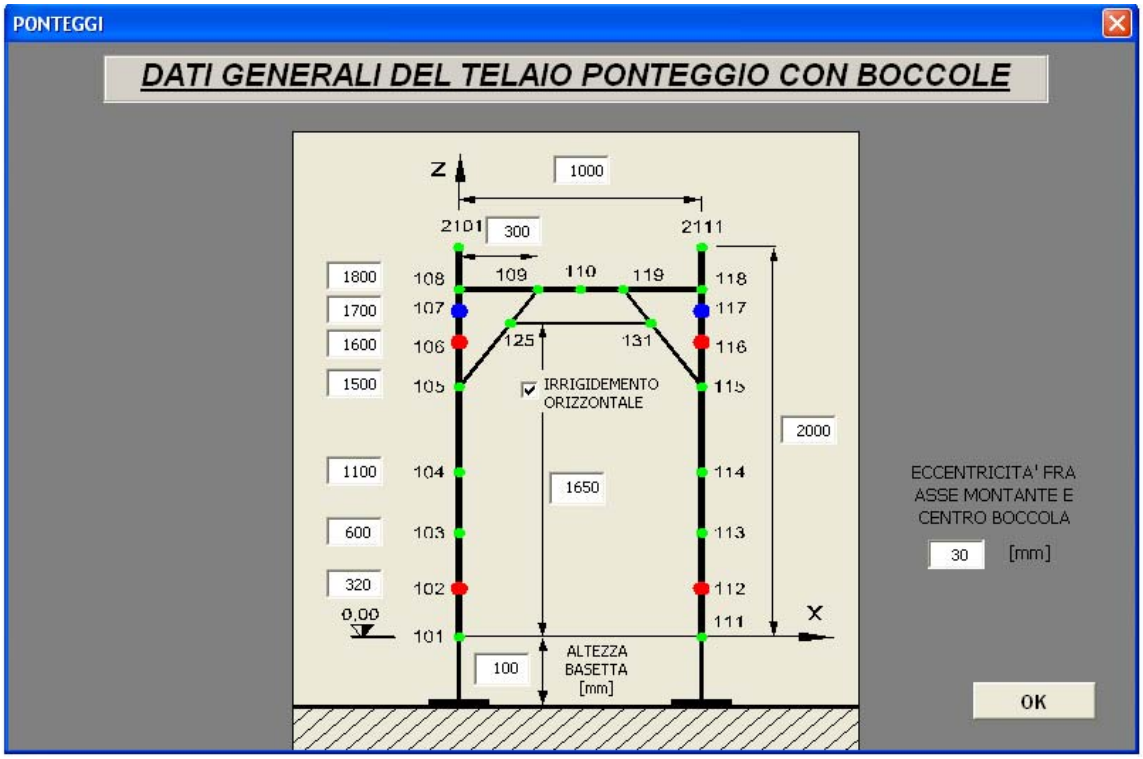


Figura A6.3 – Inserimento dei dati geometrici del telaio

PASSO 4

All'utente appare la finestra di dialogo di figura A6.4 che richiede l'inserimento dei seguenti dati:

- NUMERO CAMPATE: numero di campate di cui si compone il ponteggio. E' necessario inserire un numero intero che può variare da 1 a 18;
- NUMERO LIVELLI: numero di livelli di cui si compone il ponteggio. E' un numero intero che può variare tra 1 e 15;

- INTERASSE FRA LE STILATE: distanza tra due stilate successive. Questo valore è conservato costante all'interno di tutto il ponteggio è può essere scelto nelle due opzioni 1800 mm e 2500 mm;
- ALTEZZA BASETTA: definisce la lunghezza dell'elemento che collega il ponteggio al suolo. Nel caso in cui l'utente sta generando un nuovo ponteggio la casella di testo è inattiva in quanto il dato è già stato inserito al passo precedente (Fig. A6.3). La casella di testo è modificabile solamente nel caso in cui l'utente al PASSO 2 abbia scelto un ponteggio dal database;
- DISPOSIZIONE DIAGONALI: è una casella a scorrimento combinata che prevede la possibilità di scegliere fra quattro possibili disposizioni degli elementi diagonali sulla facciata del ponteggio (Fig. A6.27-A6.30). La tipologia di disposizione dei diagonali scelta dall'utente è raffigurata a fianco della casella a scorrimento. Per le quattro differenti disposizioni al momento implementate, la macroprocedura provvede all'inserimento automatico dei diagonali di facciata. L'utente ha comunque la possibilità di scegliere altre disposizioni operando al livello di operatività 2 attraverso la quinta opzione del menù a tendina "UTENTE"
- IMPERFEZIONE TRA TELAI SUCCESSIVI: valore dell'imperfezione geometrica localizzata dovuta ai giochi tra telai successivi. In assenza di indicazioni al riguardo, questa può essere valutata in accordo al alla normativa UNI EN 12811-1:2004 [5];
- IMPERFEZIONE DELLA BASETTA: valore dell'imperfezione geometrica localizzata alla base dovuta ai giochi della basetta estensibile. In assenza di indicazioni al riguardo, questa può essere valutata in accordo alla normativa UNI EN 12811-1:2004 [5];
- FUORI PIOMBO IN FACCIATA: valore del fuori piombo globale del telaio nel piano di facciata;
- LOCAL BOW: definisce l'imperfezione dei montanti rispetto alla condizione di rettilineità. Questa è assunta in accordo a quanto previsto dalla normativa UNI EN 1993-1-1:2005 [8] con andamento parabolico con massima "freccia" in corrispondenza della metà altezza dell'elemento. L'imperfezione locale è implementata sui soli montanti.

Premere OK

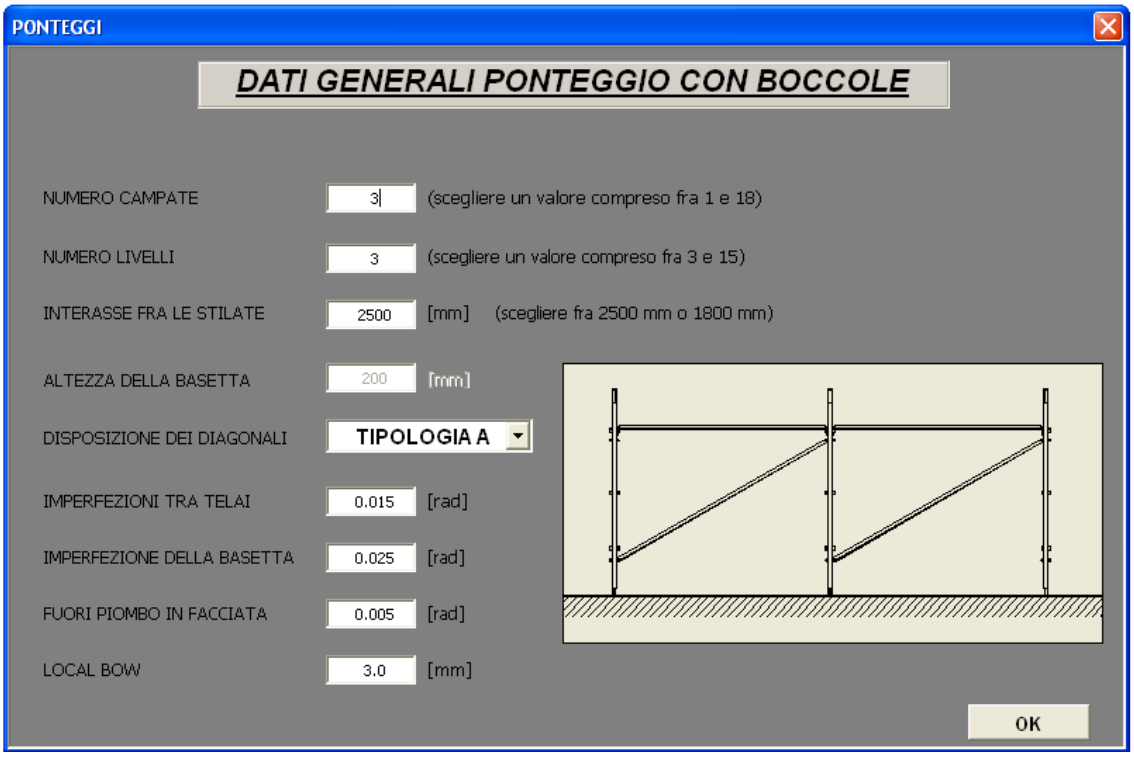


Figura A6.4 – Inserimento dei dati relativi alla facciata ed alle imperfezioni

PASSO 5

All'utente appare la finestra di dialogo presentata nella figura A6.5 che richiede l'inserimento delle caratteristiche meccaniche dei materiali distinguendo tra gli elementi dei telai, i diagonali e i correnti, gli irrigidimenti del telaio e le basette. I materiali ipotizzati elastici, omogenei ed isotropi sono caratterizzati dal modulo di elasticità (E) e dal coefficiente di Poisson (ν), nell'ottica dello svolgimento delle analisi del secondo ordine elastiche. La finestra di dialogo è stata predisposta per un successivo sviluppo della macroprocedura al caso delle analisi del secondo ordine elasto-plastiche (caselle di testo disattivate associate alla tensione di snervamento (f_y) e alla tensione ultima (f_u)). E' prevista, benché al momento non attivata, la possibilità di

attribuire caratteristiche meccaniche diverse agli spinotti. Questa opzione potrà assumere significato nel caso in cui la macroprocedura fosse implementata per considerare anche l'eccentricità dei diagonali e dei correnti nel piano di facciata.
Premere OK

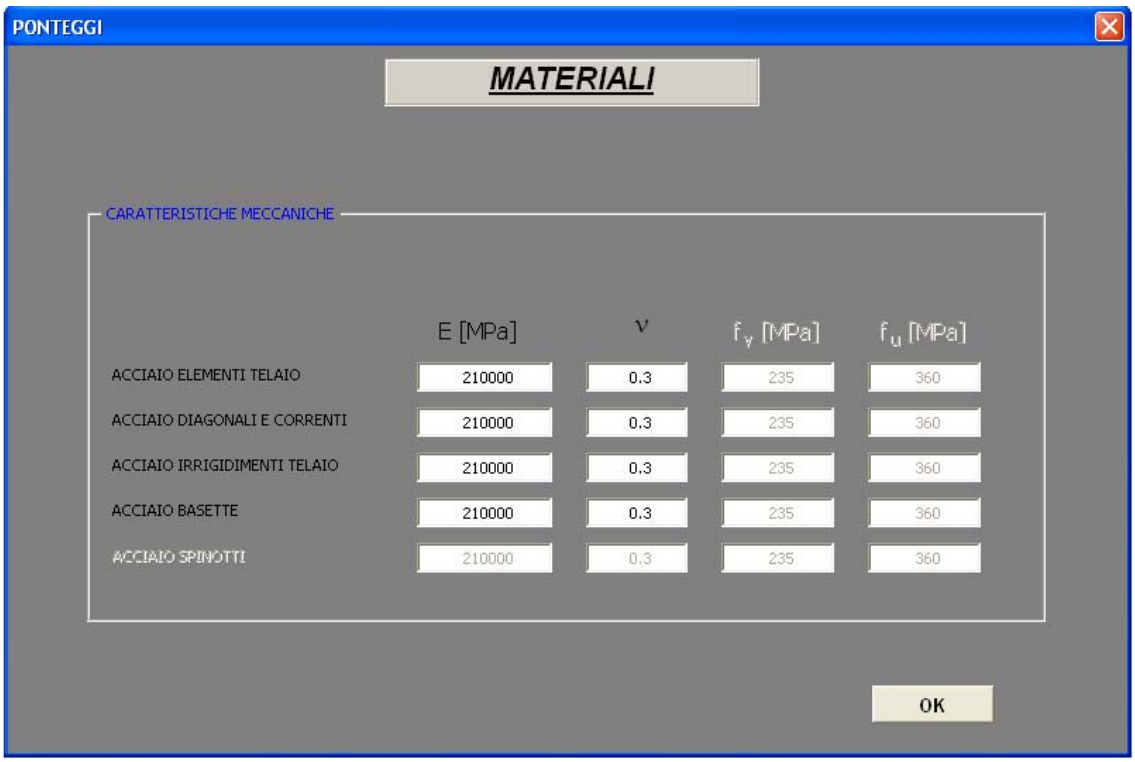


Figura A6.5 – Definizione delle proprietà dei materiali

PASSO 6
All'utente appare la finestra di dialogo presentata nella figura A6.6 dedicata all'inserimento delle caratteristiche geometriche degli elementi.

Figura A6.6 – Definizione della geometria delle sezioni

Per tutte le sezioni si è ipotizzato un profilo tubolare. Viene richiesto di inserire il valore del diametro esterno e dello spessore dei tubi in mm. Le geometrie dei profili sono divise in quattro gruppi: montanti, diagonali e correnti, irrigidimenti e basette. La finestra di dialogo è inoltre predisposta per l'inserimento del diametro degli spinotti, per i quali si è ipotizzata una sezione circolare piena. La casella di testo pertinente è al momento disattivata.
Premere OK

PASSO 7

All'utente appare la finestra di dialogo dedicata alla definizione delle leggi carico-spostamento associate ai vincoli elastici che riproducono il comportamento delle tavole di impalcato (Fig. A6.7). L'utente deve specificare se intende tener conto o meno delle tavole di impalcato nella fase di analisi attraverso l'attivazione della casella "ATTIVARE IMPALCATI". Se la casella non viene attivata, i vincoli elastici non vengono considerati, alternativamente è necessario definire le leggi di comportamento dei vincoli nelle direzioni parallela ed ortogonale al piano dell'opera servita. Le leggi sono definite attraverso 9 punti in modo da rappresentare la risposta dei vincoli per carichi positivi e carichi negativi. I primi quattro punti devono assumere valori negativi per quanto riguarda sia il carico sia lo spostamento, il 5° punto deve coincidere con l'origine degli assi mentre i punti tra il 6° ed il 9° devono assumere valori positivi sia per i carichi sia per gli spostamenti. Contestualmente alla definizione dei vincoli elastici, in questo passo, è richiesto all'utente di indicare la procedura secondo la quale voglia procedere all'attribuzione della disposizione degli ancoraggi all'opera servita e dei vincoli elastici equivalenti al sistema di piano ("AUTOMATIZZATA" (PASSO 8) o "DEFINITA DALL'UTENTE" (PASSO 9)). Sempre in questo contesto, attraverso una casella di modifica, è richiesta la definizione della lunghezza degli ancoraggi all'opera servita.
La procedura è stata predisposta anche per l'inserimento dei vincoli elastici equivalenti ai diagonali di facciata. L'opzione al momento non è stata attivata.
Premere OK

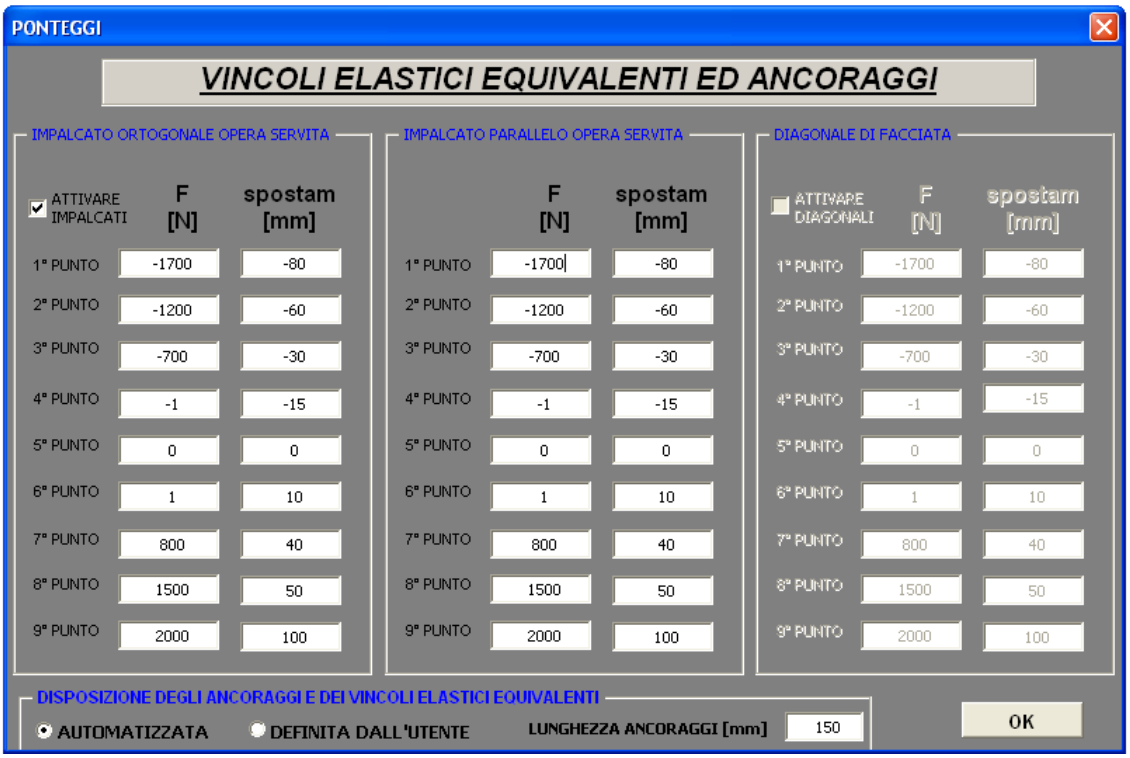


Figura A6.7 – Definizione delle proprietà degli impalcati e del criterio di attribuzione dei vincoli all'opera servita

PASSO 8

Qualora l'utente al PASSO 7 abbia scelto la disposizione dei vincoli "AUTOMATIZZATA", appare la finestra di dialogo di figura A6.8.
Secondo la procedura automatizzata i vincoli all'opera servita e i vincoli elastici equivalenti agli impalcati sono attribuiti in maniera tale che questi si susseguano a partire dal secondo livello, ad intervalli costanti, pari a due livelli. In base a questo criterio le stilate possono essere vincolate secondo due schemi denominati rispettivamente "stilata A" e "stilata B". La stilata A prevede un ancoraggio all'opera servita alla quota del secondo livello di carico, a cui segue, dopo due livelli, il vincolo elastico associato alle tavole di

impalcato e così a seguire fino al raggiungimento della sommità del ponteggio (Fig. 3.18). La stilata tipo B è caratterizzata da un vincolo elastico corrispondente alle tavole di impalcato alla quota del secondo livello, a cui segue, dopo due livelli, un vincolo all'opera servita e così a seguire fino alla sommità del ponteggio (Fig. 3.18). Il ponteggio nella sua globalità sarà costituito da una successione di stilate tipo A e tipo B. All'utente è richiesto di identificare la disposizione dei vincoli sulla stilata più esterna del ponteggio (stilata tipo A o tipo B). Sulla base di questa scelta, la procedura assegna i vincoli all'opera servita e i vincoli di tipo elastico su tutta la facciata del ponteggio. La gestione automatizzata dispone anche i vincoli equivalenti all'impalcato nel piano parallelo all'opera servita, che vengono disposti partendo dal secondo livello ogni due livelli. La disposizione degli ancoraggi all'opera servita determina automaticamente la generazione delle imperfezioni nel piano di stilata e di facciata. Per le modalità secondo le quali queste vengono generate si rimanda al paragrafo 7.1.1.6 della relazione principale.
Premere OK
La procedura attiva il PASSO 11.

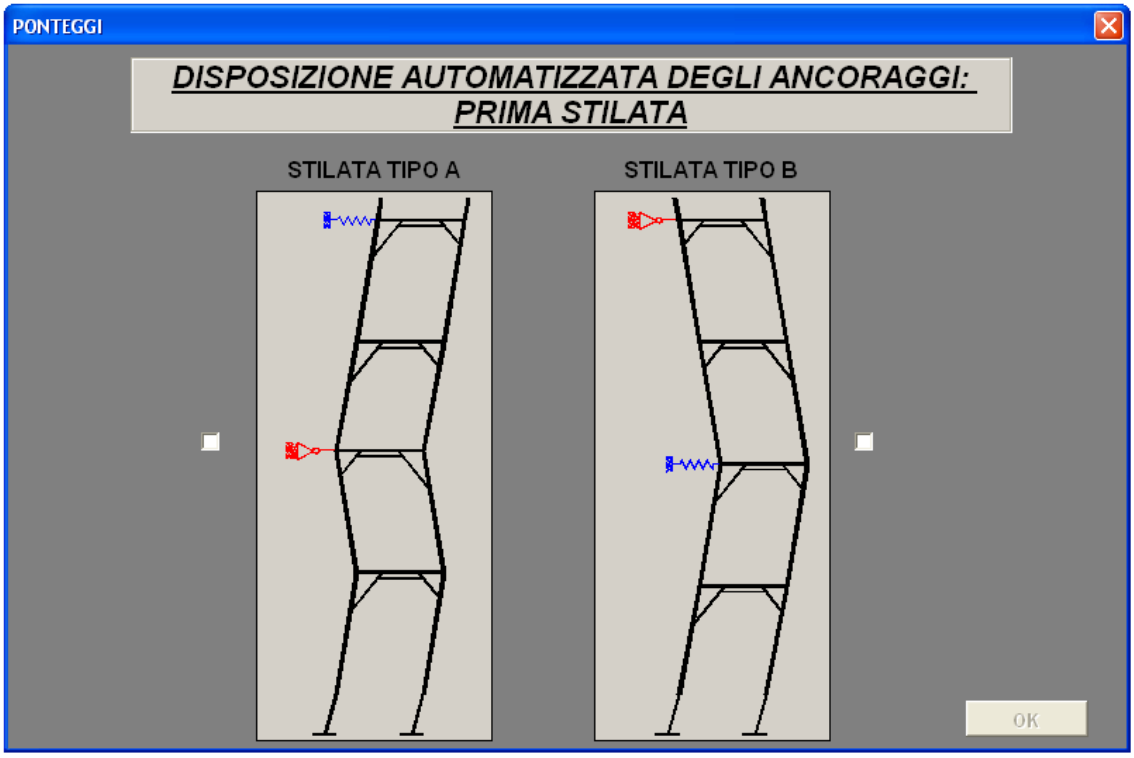


Figura A6.8 – Definizione dei vincoli all'opera servita secondo la procedura automatizzata

PASSO 9

Qualora l'utente al PASSO 7 abbia deciso per una autonoma attribuzione dei vincoli all'opera servita e dei vincoli elastici (attribuzione "DEFINITA DALL'UTENTE") si presentano due possibilità:

- se il ponteggio presenta un numero di livelli e campate minore o uguali a 6 e 8, rispettivamente, sarà possibile mediante l'interfaccia grafica attribuire la disposizione dei vincoli (finestre di dialogo delle figure A.6.9 o A.6.10);
- se il ponteggio supera le limitazioni di cui al punto precedente, compare un messaggio che invita l'utente ad agire direttamente al livello di operatività 2. La procedura attiva il PASSO 11.

Nel caso in cui siano soddisfatte le limitazioni sul numero di livelli e campate (≤6, ≤8, rispettivamente) ed in relazione alla scelta del sistema di vincolo di piano effettuata al PASSO 7 possono presentarsi due possibili finestre di dialogo:

- finestra di figura A.6.9, nel caso in cui si sia considerato efficace il sistema di vincolo di piano;
- finestra di figura A.6.10, nel caso in cui non si sia considerata l'azione di controventamento del sistema di piano.

La finestra di dialogo di figura A6.9, aggiornata in relazione al numero di livelli e di campate di cui il ponteggio è composto, consente l'assegnazione sia dei vincoli all'opera servita sia dei vincoli equivalenti al sistema di impalcato attraverso una griglia caratterizzata dalla presenza di due pulsanti opzionali in corrispondenza ad ogni nodo. Ciascun nodo rappresenta il punto ideale di intersezione tra l'impalcato ed il montante. Il pulsante con cornice di color grigio chiaro deve essere selezionato qualora si intenda attribuire un vincolo elastico equivalente al sistema di impalcato, mentre il pulsante privo di cornice deve essere

attivato nel caso in cui si intenda introdurre un ancoraggio all'opera servita. La procedura controlla che in corrispondenza di ciascun nodo sia attivato uno solo dei due pulsanti. Qualora si intenda lasciare il nodo libero da vincoli nessuna delle due caselle deve essere attivata.

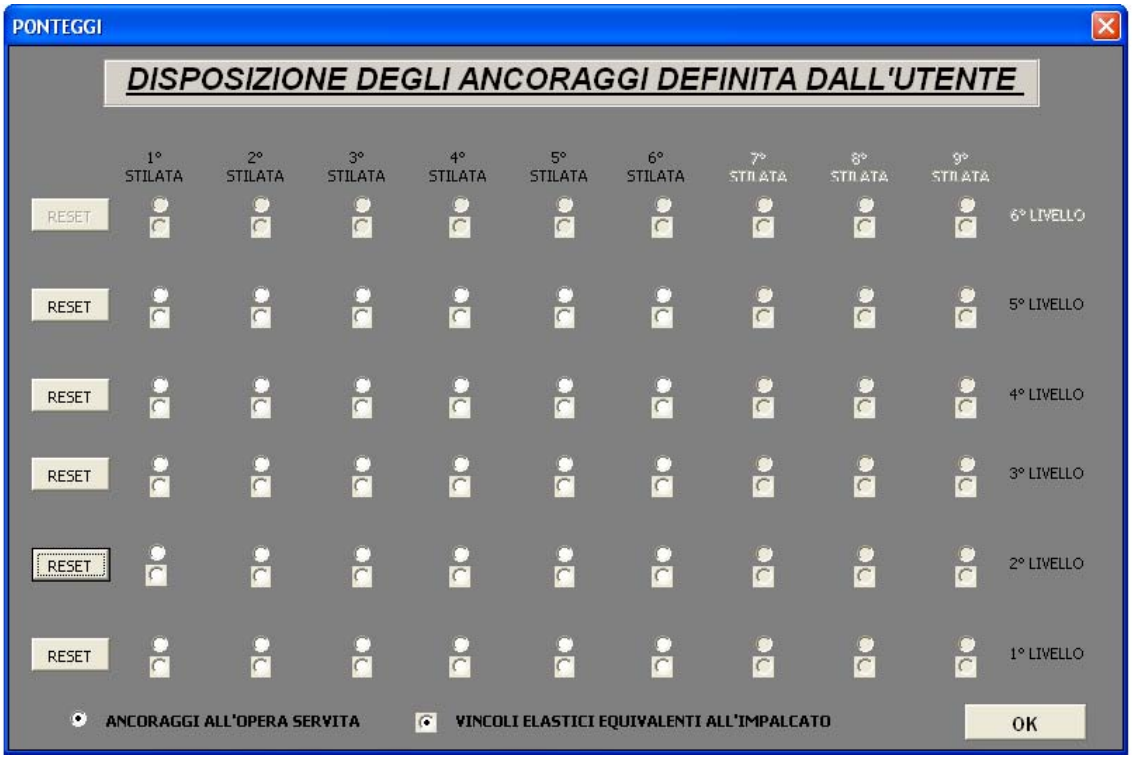


Figura A6.9 – Definizione dei vincoli all'opera servita definita dall'utente

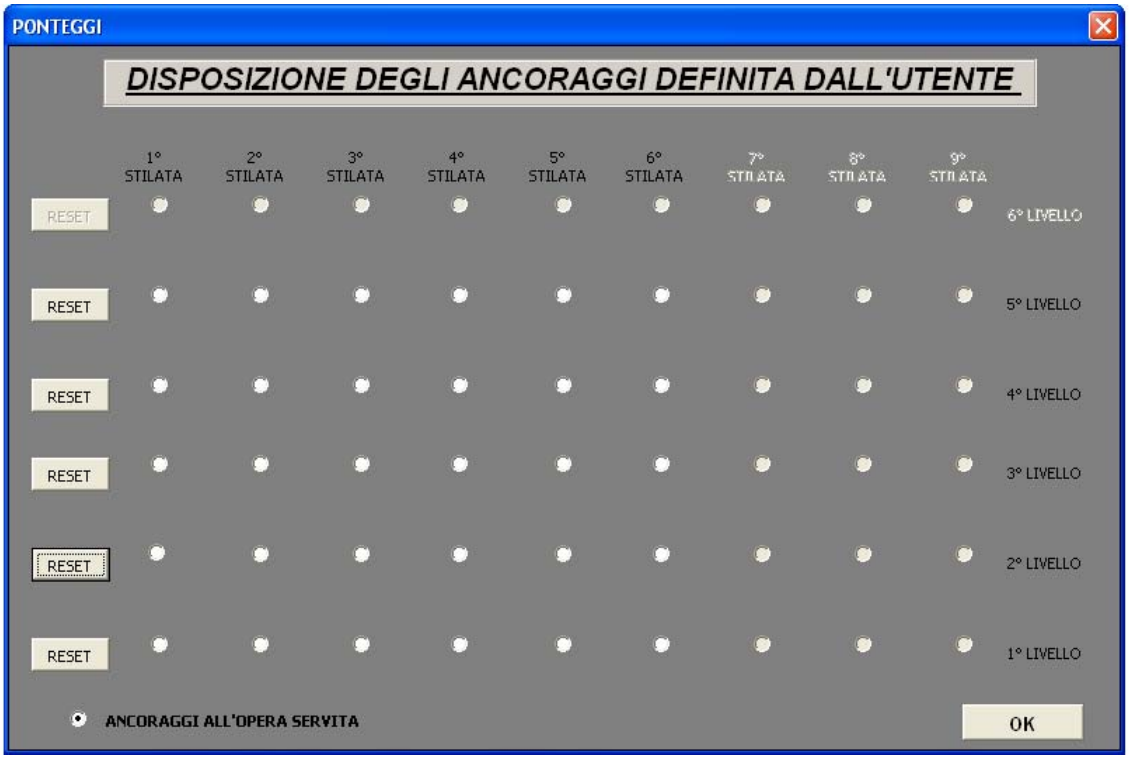


Figura A6.10 – Definizione dei vincoli all'opera servita definita dall'utente (contributo nullo del sistema di impalcato)

I pulsanti "RESET" posti a fianco di ciascun livello permettono una nuova assegnazione dei vincoli, qualora questi fossero stati erroneamente predisposti.
Nel caso in cui al PASSO 7 (Fig. A6.7) l'utente non abbia attivato la casella "ATTIVA IMPALCATI" e abbia scelto per una libera disposizione dei vincoli, compare la finestra di dialogo di figura A6.10, analoga a quella

di figura A6.9 ma priva dei pulsanti corrispondenti ai vincoli elastici associati all'impalcato. L'utente è in questo caso chiamato a disporre solamente i vincoli all'opera servita.
La disposizione degli ancoraggi all'opera servita determina automaticamente la generazione delle imperfezioni nel piano di stilata e di facciata. Riguardo alle modalità secondo le quali queste vengono generate si rimanda al paragrafo 7.1.1.6 della relazione principale.
Premere OK
Se al PASSO 7 è stata attivata la casella "ATTIVA IMPALCATI" la procedura attiva il PASSO 10 viceversa attiva il PASSO 11.

PASSO 10
All'utente compare la finestra di dialogo di figura A6.11 che permette, nel caso in cui il numero di livelli sia minore od uguale a 6, di attribuire mediante le caselle opzionali i vincoli elastici nel piano parallelo all'opera servita. I pulsanti di RESET a fianco a ciascun livello permettono la rimozione dei vincoli qualora questi siano stati erroneamente introdotti.
Premere OK

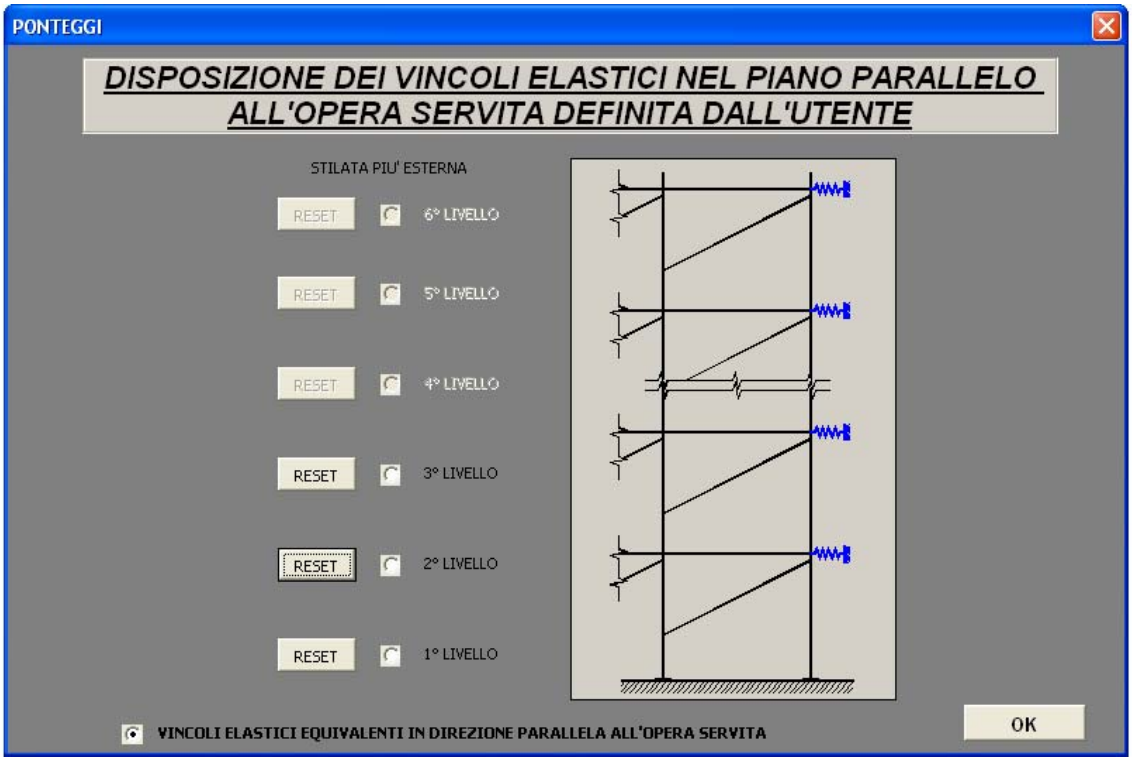


Figura A6.11 – Definizione dei vincoli equivalenti all'impalcato nel piano parallelo all'opera servita

PASSO 11
All'utente compare la finestra di dialogo di figura A6.12, che riguarda la tipologia di analisi e l'assegnazione dei carichi. Anche in questo caso possono essere seguite due procedure: "AUTOMATIZZATA" o "UTENTE".
Nel caso in cui l'utente scelga la procedura automatizzata e scelga dal menù a tendina "CONDIZIONI DI CARICO" una delle opzioni "SERVIZIO" o "FUORI SERVIZIO" vengono attivate le caselle contenute nel box "CARICHI VERTICALI" che consentono l'attribuzione del peso proprio dell'impalcato, del carico variabile sull'impalcato, e del peso del fermapiede presente sulla facciata esterna. Non viene invece attivata la casella "CARICHI SUL MONTANTE A COLLASSO" che riguarda invece le analisi elastiche del secondo ordine a collasso. La macroprocedura genera autonomamente i carichi verticali in accordo alla normativa UNI EN 12811-1:2004 [5] utilizzando il coefficiente di amplificazione dei carichi indicato dall'utente nella pertinente casella. La procedura attiva il PASSO 13 che riguarda l'attribuzione dei carichi dovuti al vento.
Nel caso in cui l'utente scelga di svolgere una analisi del secondo ordine elastica fino a collasso del sistema (opzione "II ORDINE A COLLASSO" del menù a tendina "CONDIZIONI DI CARICO") nel box "CARICHI VERTICALI" viene attivata la sola casella "CARICHI SUL MONTANTE A COLLASSO". All'utente è chiesto di attribuire una stima del valore del massimo carico agente sul montante nelle condizioni di collasso del sistema. La macroprocedura automaticamente applica carichi verticali alla sommità di ogni montante di entità pari all'indicazione fornita dall'utente. Per tenere conto degli effetti di bordo ai montanti delle stilate esterne viene applicato un carico pari al 68% rispetto a quello dei montanti delle stilate interne. E' comunque

possibile modificare l'aliquota di carico agente sui montanti delle stilate esterne agendo al livello di operatività 2. La procedura attiva il PASSO 15.
Nel caso in cui l'utente selezioni dal box "CARICHI VERTICALI" la casella "UTENTE" la procedura attiva il PASSO 12 che permette l'inserimento dei carichi verticali agenti sul sistema.
Premere OK

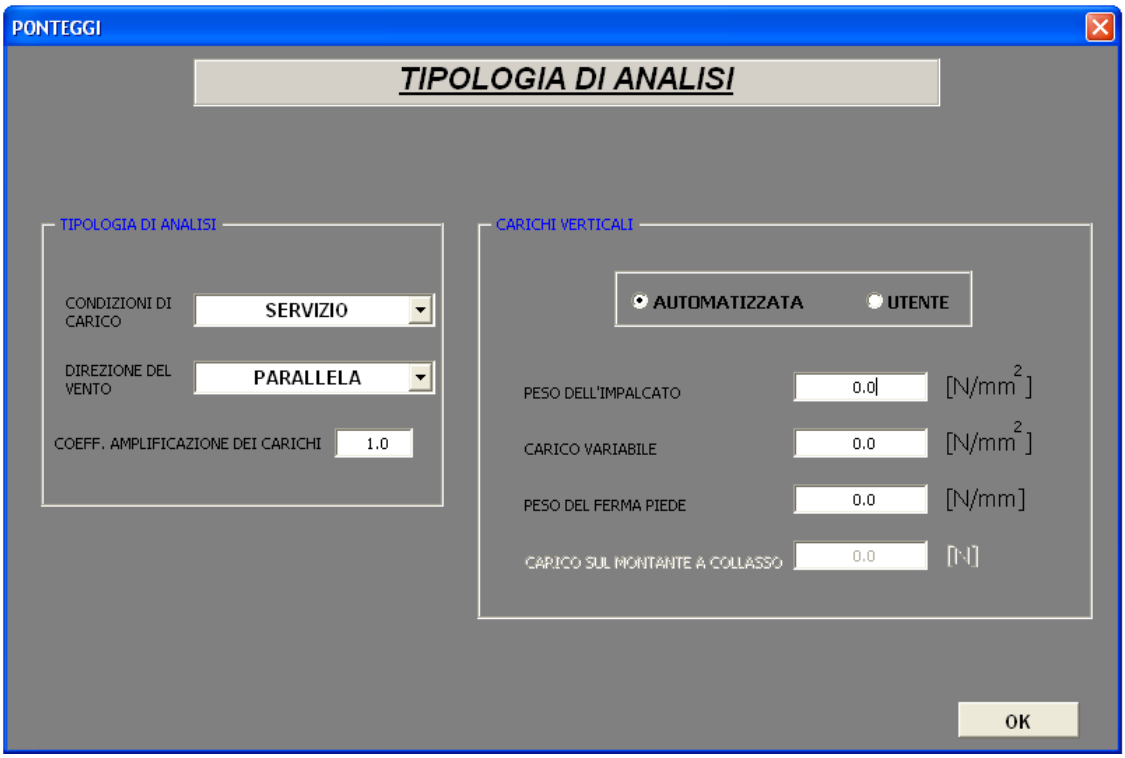


Figura A6.12 – Scelta del tipo di analisi

PASSO 12
Nel caso l'utente al PASSO 11 abbia selezionato dal box "CARICHI VERTICALI" la casella "UTENTE" appaiono in successione le finestre di dialogo presentate nelle figure A6.13 - A6.16 destinate all'attribuzione dei carichi verticali da applicare ai montanti ai vari livelli.
All'utente, in questa fase, è richiesto di inserire nelle apposite caselle i valori dei carichi verticali agenti sui montanti delle stilate esterne (Fig. A6.13 e A6.14) ed interne (Fig. A6.15 e A6.16) distinguendo tra i montanti verso l'opera servita (Fig. A6.13 e A6.15), e quelli della facciata esterna (Fig. A6.14 e A6.16). Nelle finestre di dialogo delle figure A6.13-A6.16 sono attivate le sole caselle di attribuzione associate ai livelli dei quali il ponteggio si compone.
Premere OK
Nel caso in cui l'utente, al PASSO 11, abbia selezionato dal menù a tendina "DIREZIONE DEL VENTO" del box "TIPOLOGIA DI ANALISI" l'opzione "ORTOGONALE" la procedura attiva il PASSO 13. Nel caso in cui invece l'utente abbia attivato l'opzione "PARALLELO" la procedura attiva il PASSO 14.

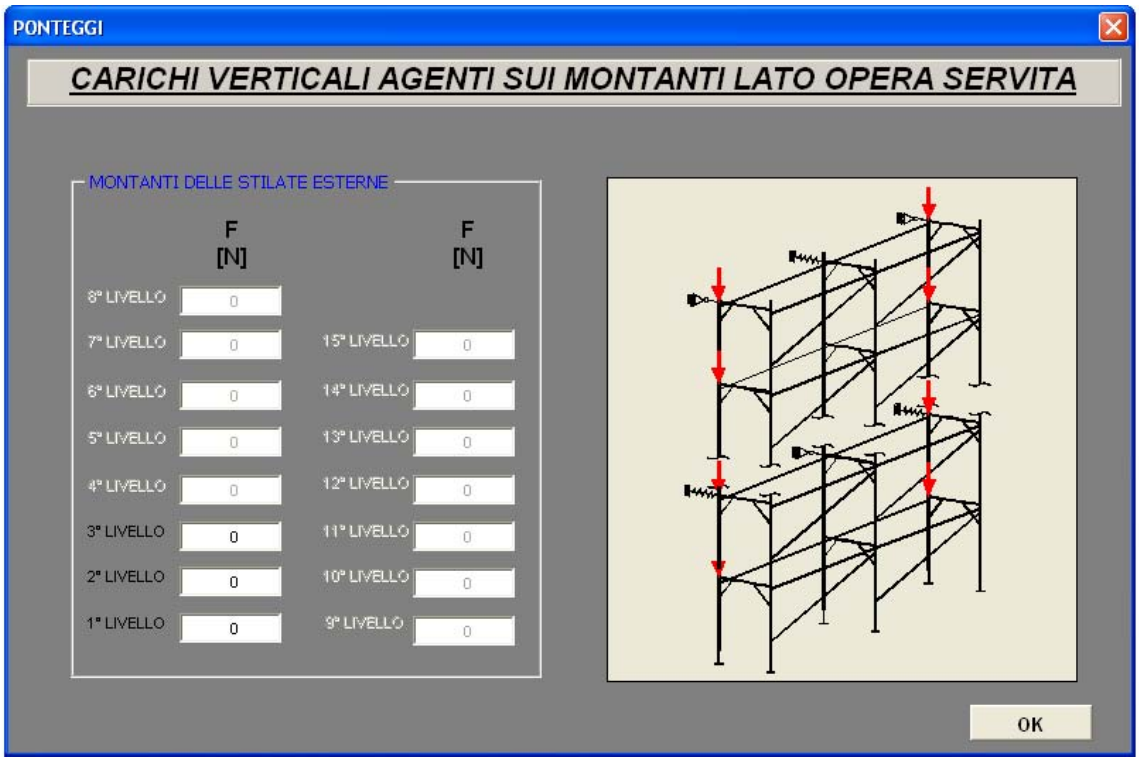


Figura A6.13 – Attribuzione dei carichi verticali

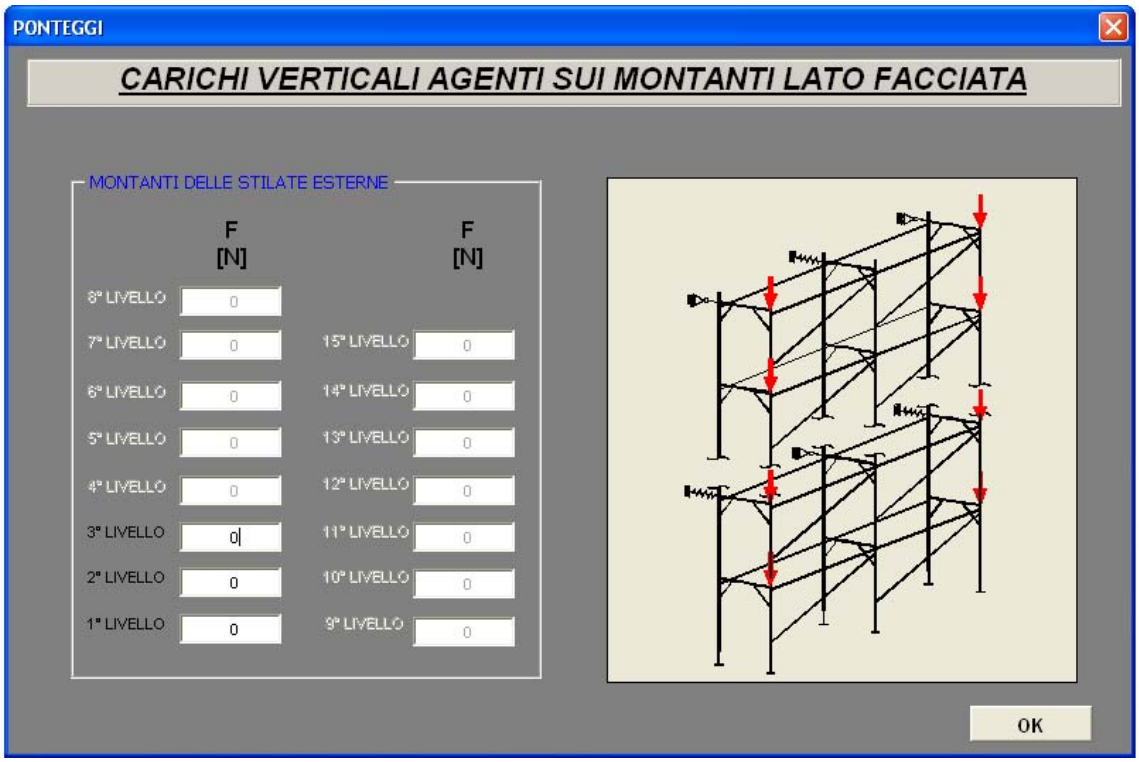


Figura A6.14 – Attribuzione dei carichi verticali

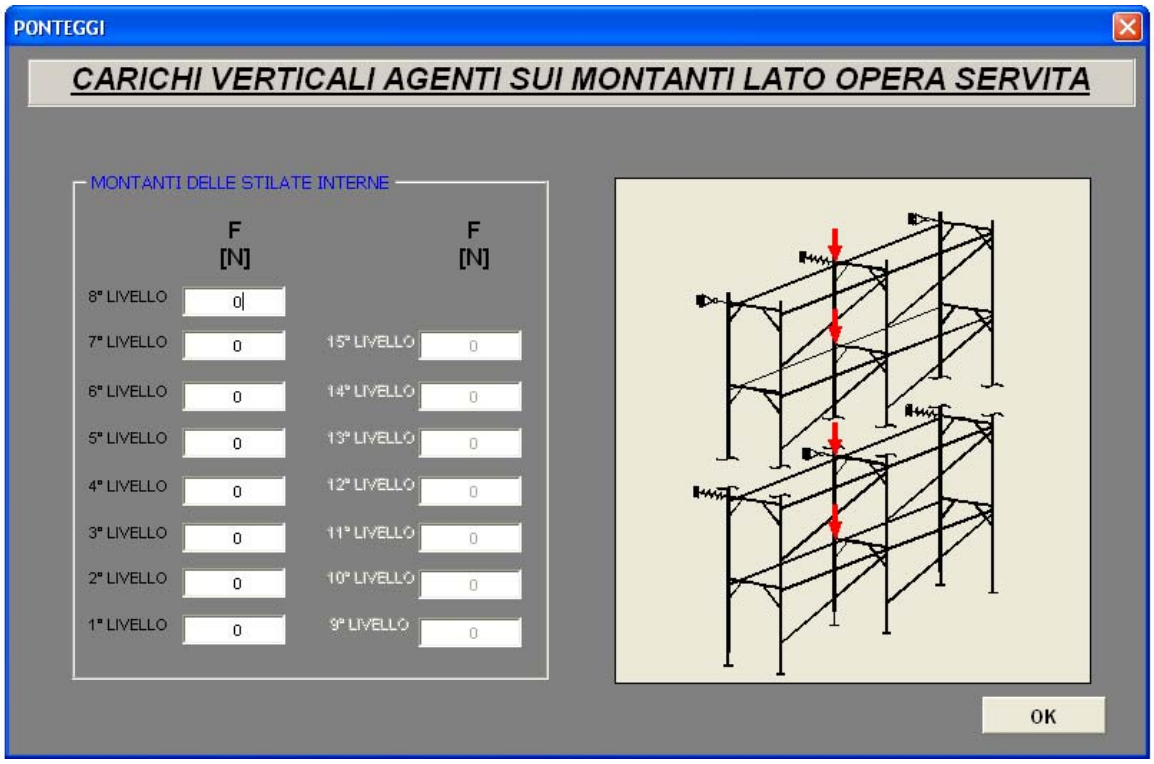


Figura A6.15 – Attribuzione dei carichi verticali

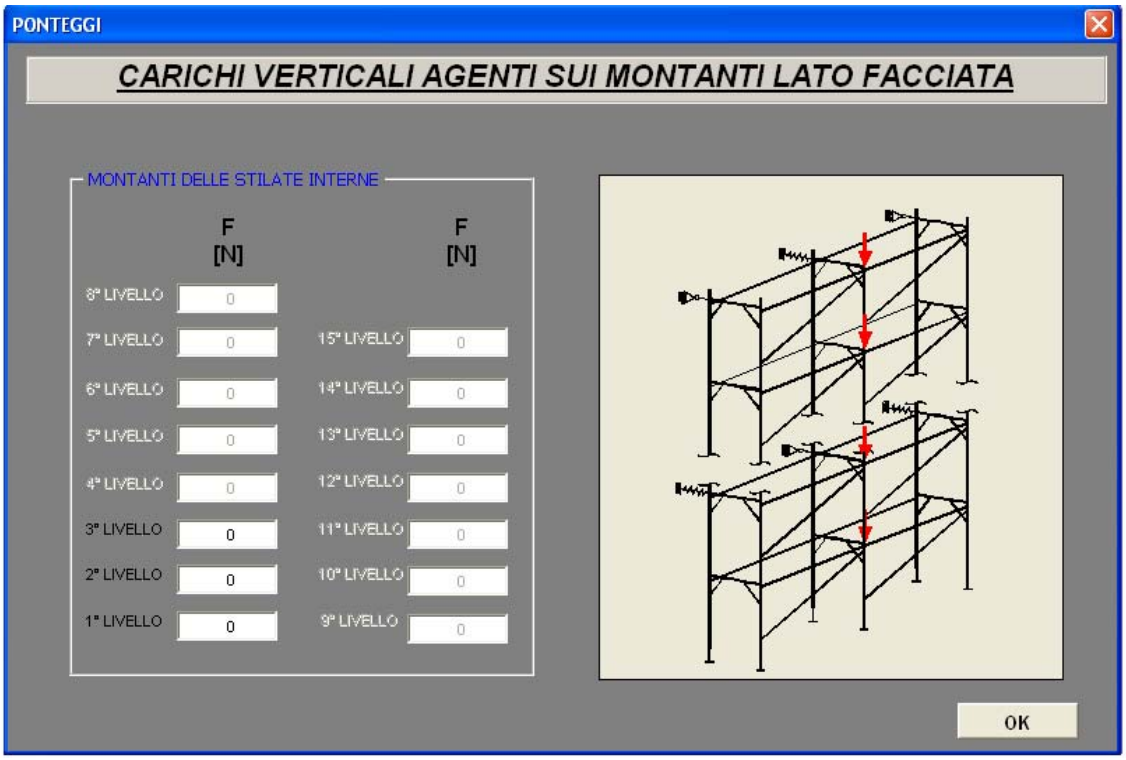


Figura A6.16 – Attribuzione dei carichi verticali

PASSO 13

All'utente appaiono in successione le finestre di dialogo delle figure A6.17 e A6.18 che permettono l'attribuzione dei carichi del vento agenti in direzione ortogonale all'opera servita distinguendo fra i montanti delle stilate esterne (Fig. A6.17) e i montanti delle stilate interne (Fig. A6.18).

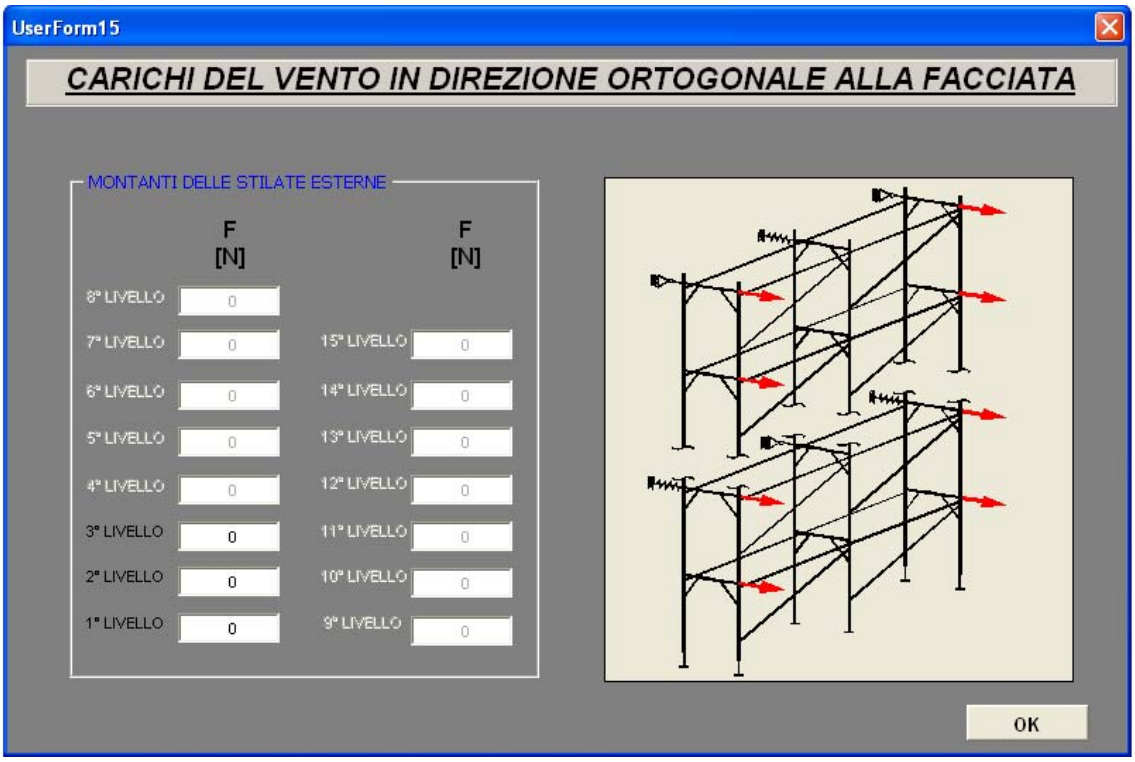


Figura A6.17 – Attribuzione dei carichi dovuti al vento agente in direzione ortogonale all'opera servita

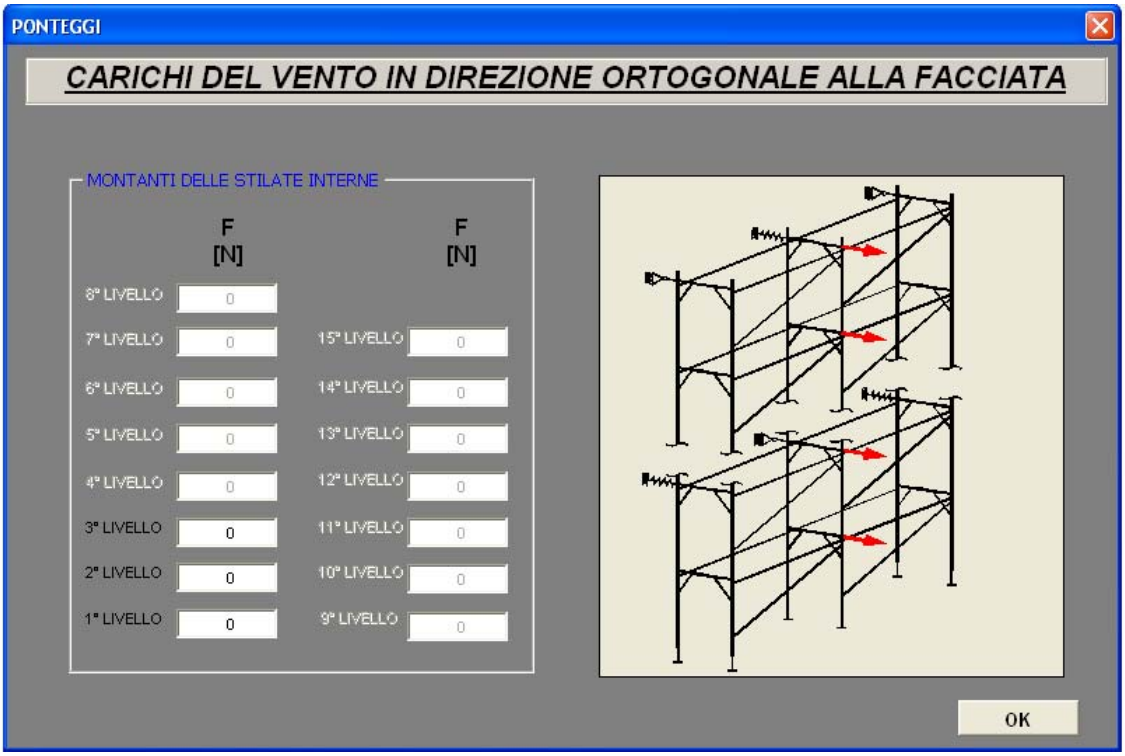


Figura A6.18 – Attribuzione dei carichi dovuti al vento agente in direzione ortogonale all'opera servita

Nelle finestre di dialogo delle figure A6.17-A6.18 sono attivate le sole caselle di attribuzione associate ai livelli dei quali il ponteggio si compone.
Premere OK
La procedura attiva il PASSO 15.

PASSO 14
All'utente appare la finestre di dialogo della figura A6.19 che permette l'attribuzione dei carichi del vento agenti in direzione parallela all'opera servita.

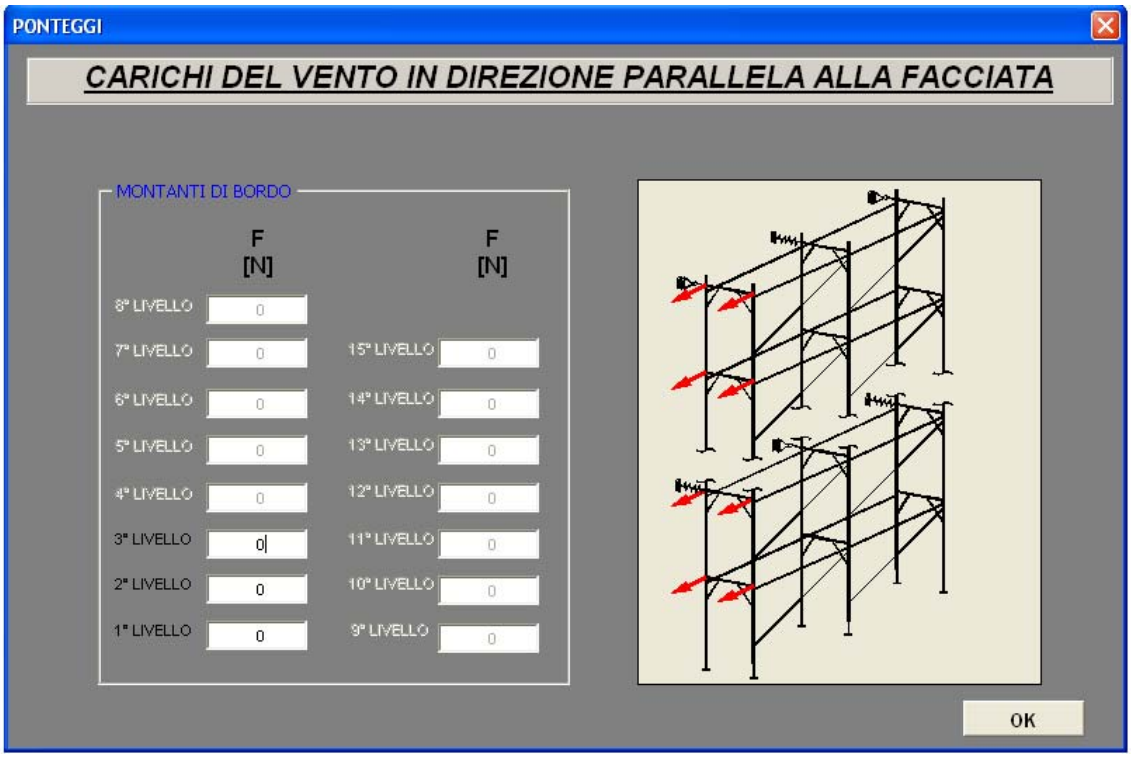


Figura A6.19 – Attribuzione dei carichi dovuti al vento agente in direzione parallela all'opera servita

Nella finestra di dialogo sono attivate le sole caselle di attribuzione associate ai livelli dei quali il ponteggio si compone.
Premere OK

PASSO 15

Il livello di operatività 1 ha termine e l'utente visualizza nuovamente il foglio "DATI" (Fig. A6.20). Qualora l'utente debba operare al livello 2, ad esempio per modificare lo schema dei vincoli, o i valori dei carichi per le analisi del secondo ordine, dovrà agire nel rispetto delle indicazioni fornite nella successiva sezione. Se invece ha completato l'inserimento dei dati attraverso l'interfaccia grafica, egli dovrà attivare la macroprocedura agendo sul pulsante di avvio (START). L'output della macroprocedura è il listato del programma necessario per lo svolgimento delle analisi mediante SAP, qualora si sia scelta la procedura SAP20003D, e mediante ANSYS qualora invece si sia optato per la procedura ANSYS3D. Il listato è generato su un foglio di lavoro appartenente alla cartella di lavoro nella quale l'utente sta operando. Il foglio è denominato in automatico "TESTO SAP2000" e "TESTO ANSYS" per i due programmi SAP e ANSYS rispettivamente. Il foglio di lavoro dovrà essere esportato in formato testo (tipo Unicode (denominato rispettivamente "TESTO SAP2000" e "TESTO ANSYS" nelle due procedure). Questo file costituisce la fase di preprocessing dei dati scambiati con i codici di calcolo.

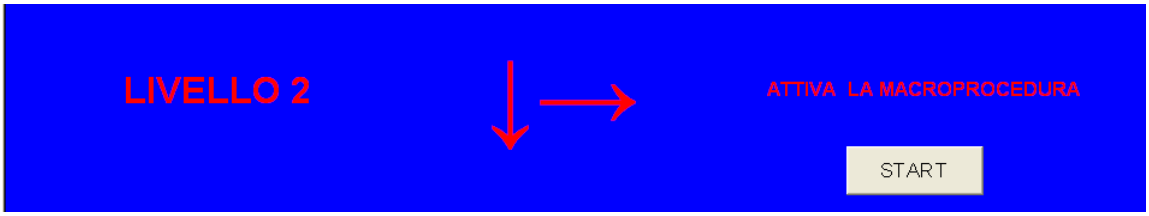


Figura A6.20– Termine procedura al livello di interazione 1

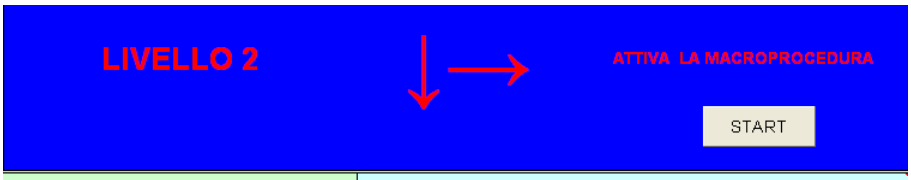
A6.5 LIVELLO DI OPERATIVITA' 2

Qualora scelga di operare al livello 2, l'utente si trova ad interagire direttamente con il foglio "DATI". Per limitare la possibilità di errori, questo è stato strutturato in sezioni, ciascuna delle quali destinate al trattamento di una specifica categoria di dati. All'interno di ciascuna sezione i dati sono elencati sequenzialmente e chiaramente identificati mediante commenti.

L'utente potrà interagire con il foglio "DATI" modificando il contenuto delle sole celle con sfondo azzurro e scritte blu. Eventuali modifiche apportate ad altre celle potranno tradursi in un malfunzionamento della procedura. Si osserva che ciascuna delle caselle "modificabili" è provvista di commenti che possono essere visionati dall'utente e che forniscono le opzioni (laddove possibili) a supporto di una corretta compilazione del foglio "DATI".

SEZIONE 1

La prima sezione (Fig. A6.21) è dedicata alla modifica dei dati generali del sistema intelaiato già attribuiti al livello 1.



TITOLO	SAP2000 3D PONTEGGIO CON BOCCOLE 3 CAMPATE 3 LIVELLI SERVIZIO
NOME DEL PONTEGGIO	PONTEGGIO CON BOCCOLE
NUMERO CAMPATE	3
NUMERO DI LIVELLI	3
INTERASSI FRA LE STILATE [mm]	2500
ALTEZZA DEL TELAIO PREFABBRICATO [mm]	2000
ALTEZZA DELLA BASETTA [mm]	100
CONNESSIONE DIAGONALE-MONTANTE	BOCCOLE
DISTANZA DELLA BOCCOLA DAL MONTANTE [mm]	30
IRRIGIDIMENTO ORIZZONTALE	SI
IMPERFEZIONI FRA TELAI [rad]	0,0150
IMPERFEZIONI DELLA BASETTA [rad]	0,0250
FUORI PIOMBO IN FACCIA [rad]	0,0050
LOCAL BOW [mm]	3,0

Figura A6.21 – Assegnazione delle caratteristiche generali del ponteggio

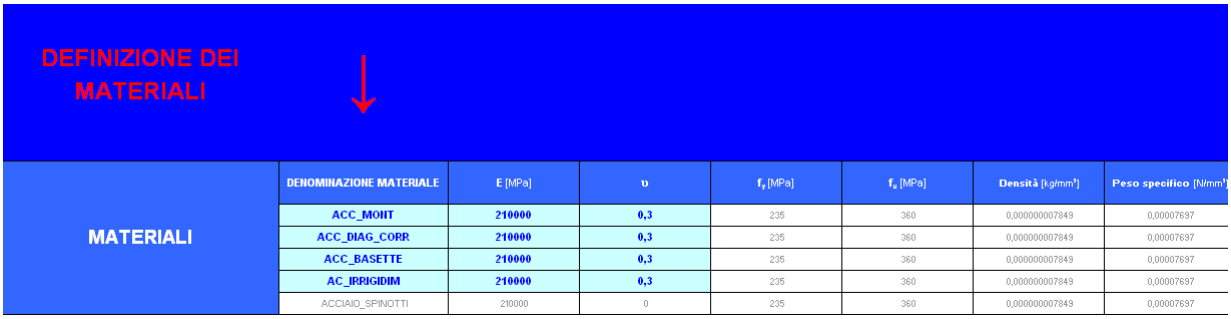
Nell'ordine l'utente può operare su:

- **Titolo:** in questa casella di testo può essere inserita una breve descrizione del problema investigato. Questo titolo entrerà a fare parte del listato di input come commento iniziale e faciliterà il riconoscimento del problema al quale il file è associato. La procedura assegna un titolo di default che può essere modificato dall'utente. Il titolo dovrà essere composto da un numero massimo di caratteri tale da non superare lo spazio a disposizione nella casella di testo predisposta;
- **Nome del ponteggio:** nella cella appare la denominazione assegnata al passo 2 del livello di operatività 1 (Fig. A6.2). La denominazione coincide con la denominazione assegnata al ponteggio nel database. L'utente non può modificare la denominazione qualora intenda proseguire con l'analisi del problema ma può scegliere un ponteggio già contenuto nel database. Ciò significa modificare il problema in analisi;
- **Numero di campate:** nella cella appare il numero di campate attribuito dall'utente al livello 1. Agendo su questa casella l'utente può modificare le scelte operate. Il valore attribuito deve essere un numero intero scelto nell'intervallo 1-18;
- **Numero di livelli**: nella cella appare il numero di livelli attribuito dall'utente al PASSO 4 del livello 1. Agendo su questa casella l'utente può modificare le scelte operate. Il valore attribuito deve essere un numero intero scelto nell'intervallo 3-15;
- **Interasse fra le stilate**: nella cella appare l'interasse attribuito dall'utente al PASSO 4 del livello 1. Agendo su questa casella l'utente può modificare le scelte operate al livello 1. E' possibile scegliere tra due possibili opzioni ovvero 2500 mm e 1800 mm. Va osservato che la scelta di una diversa distanza tra le stilate comporta necessariamente la ridefinizione dei carichi (verticali ed orizzontali). Va inoltre precisato che allo stato attuale la procedura è sviluppata in modo tale che la lunghezza delle campate sia conservata costante lungo tutto il ponteggio;
- **Altezza del telaio prefabbricato**: dimensione espressa in mm che è conservata tale all'interno dell'intero sistema intelaiato. La casella non è attiva in quanto il dato è parte integrante della geometria assegnata al livello di operatività 1;

- **Altezza della basetta** espressa in mm. Agendo su questa casella l'utente può modificare le scelte operate al livello 1;
- **Connessione diagonale-montante**: permette di distinguere tra ponteggi a boccole e a spinotti. La casella non è attiva, poiché la scelta è stata effettuata al livello di operatività 1;
- **Eccentricità boccola-montante:** definisce la distanza in mm tra il centro della boccola e l'asse del montante. Questa informazione è necessaria solo nel caso in cui il ponteggio sia del tipo a boccole. L'utente agendo su questa casella può modificare la scelta operate al PASSO 3 del livello 1. Nel caso di ponteggio a spinotti questo parametro non è significativo e indipendentemente dal valore inserito, la procedura non ne terrà conto. Si fa presente che nel caso di ponteggio a boccole l'eccentricità non potrà mai essere inferiore a 1mm.
- **Irrigidimento orizzontale:** l'utente può scegliere tra le due opzioni "SI'" oppure "NO" . Nel primo caso si indica che il telaio è dotato di un irrigidimento orizzontale, nel secondo caso il telaio prefabbricato ne è privo. Agendo su questa opzione l'utente può inserire un irrigidimento non considerato al livello 1 nella definizione del telaio o, in alternativa, può rimuoverlo se precedentemente inserito. L'irrigidimento, qualora inserito a questo livello, è posizionato automaticamente dalla macroprocedura a metà altezza tra i nodi 105 (115) e 109 (119) di figura A6.3;
- **Imperfezioni tra telai:** indica l'imperfezione localizzata tra telai sovrapposti che, in assenza di indicazioni più precise, questa può essere assunta in accordo a quanto prescritto dalla norma UNI EN 12811-1:2004 [5] Agendo su questa casella l'utente può modificare la scelta operate al PASSO 4 del livello 1;
- **Imperfezioni della basetta:** indica l'imperfezione localizzata alla base in caso di basetta estensibile. In assenza di indicazioni più precise, questa può essere assunta in accordo a quanto prescritto dalla norma UNI EN 12811-1:2004 [5] Agendo su questa casella l'utente può modificare la scelte operata al PASSO 4 del livello 1;
- **Fuori piombo in facciata**: definisce l'imperfezione globale del telaio definita come angolo di fuori piombo espresso in radianti da applicare nel piano di facciata. Agendo su questa casella l'utente può modificare la scelte operata al PASSO 4 del livello 1;
- **Local bow**: definisce l'imperfezione dei montanti rispetto alla condizione di rettilineità. Questa è assunta in accordo a quanto previsto dall'Eurocodice 3 [8] con andamento parabolico con massima "freccia" in corrispondenza della metà altezza dell'elemento. La procedura definisce automaticamente l'imperfezione in funzione della massima "freccia" che deve essere attribuita dall'utente espressa in mm. L'imperfezione locale è implementata sui soli montanti. Agendo su questa casella l'utente può modificare la scelta del livello 1 operata al PASSO 4 del livello 1;

SEZIONE 2: DEFINIZIONE DEI MATERIALI

La seconda sezione (Fig. A6.22) è dedicata all'inserimento delle proprietà meccaniche dei materiali. Nell'ottica delle analisi elastiche del secondo ordine implementate nella procedura, l'utente può agire esclusivamente sui valori del modulo di elasticità e del coefficiente di Poisson.



DENOMINAZIONE MATERIALE	E [MPa]	υ	f_y [MPa]	f_u [MPa]	Densità [kg/mm³]	Peso specifico [N/mm³]
ACC_MONT	210000	0,3	235	360	0,000000007849	0,00007697
ACC_DIAG_CORR	210000	0,3	235	360	0,000000007849	0,00007697
ACC_BASETTE	210000	0,3	235	360	0,000000007849	0,00007697
AC_IRRIGIDIM	210000	0,3	235	360	0,000000007849	0,00007697
ACCIAIO_SPINOTTI	210000	0	235	360	0,000000007849	0,00007697

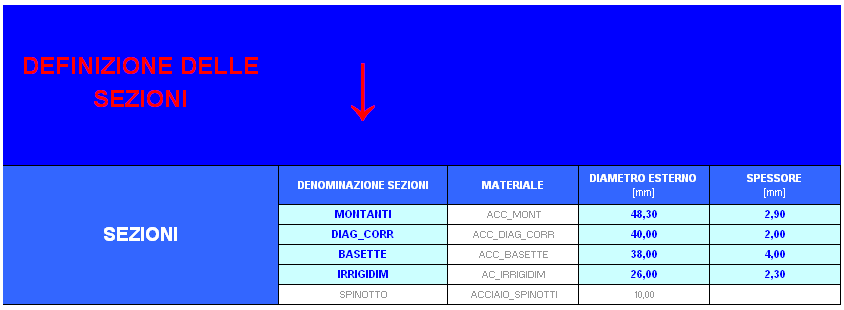
Figura A6.22- Assegnazione delle proprietà meccaniche del materiale

E' possibile anche modificare la denominazione del materiale associato agli elementi strutturali componenti il ponteggio. Va però precisato che, indipendentemente dalle denominazioni utilizzate, la procedura assegnerà le proprietà del primo materiale dell'elenco a tutti gli elementi del telaio ad eccezione degli irrigidimenti, le proprietà del secondo materiale ai diagonali ed ai correnti di facciata, quelle del terzo alle basette, quelle del quarto agli irrigidimenti del telaio.
Il foglio "DATI" è predisposto per l'espansione della procedura anche al caso delle analisi elasto-plastiche del secondo ordine per le quali sarà necessario l'inserimento della tensione di snervamento (f_y) e della tensione ultima (f_u) dei materiali. Le celle al momento non sono attive.

Nelle ultime due colonne di questa sezione sono indicati i valori della densità e del peso specifico. Questi valori, non modificabili dall'utente, sono utilizzati dalla macroprocedura per la determinazione del peso proprio del ponteggio.
Si osserva inoltre che il foglio "DATI" è predisposto anche per l'inserimento delle proprietà meccaniche degli spinotti. Al momento la casella non è attiva.

SEZIONE 3: DEFINIZIONE DELLE SEZIONI

La terza sezione (Fig. A6.23) è dedicata all'inserimento delle caratteristiche geometriche delle sezioni degli elementi. Per tutti gli elementi si è supposta una sezione tubolare per la cui caratterizzazione è necessario attribuire il diametro esterno e lo spessore del profilo.
Così come visto per i materiali, anche in questo caso è possibile modificare a piacere la denominazione delle sezioni. Nonostante ciò la macroprocedura, in sede di elaborazione dei dati, attribuirà le proprietà indicate nella prima riga dell'elenco ai montanti, quelle della seconda riga ai diagonali ed ai correnti e così via.
Accanto alla colonna della denominazione della sezione, nella tabella compare, in celle non attivate, la denominazione del materiale corrispondente al componente, utile ai fini di un controllo delle attribuzioni effettuate. Eventuali errate attribuzioni possono essere modificate agendo sulla SEZIONE 2.
La tabella è predisposta per un'attribuzione separata delle caratteristiche degli spinotti per i quali si è ipotizzata una sezione circolare piena. Questa opzione, allo stato attuale, non è attivata.



SEZIONI	DENOMINAZIONE SEZIONI	MATERIALE	DIAMETRO ESTERNO [mm]	SPESSORE [mm]
	MONTANTI	ACC_MONT	48,30	2,90
	DIAG_CORR	ACC_DIAG_CORR	40,00	2,00
	BASETTE	ACC_BASETTE	38,00	4,00
	IRRIGIDIM	AC_IRRIGIDIM	26,00	2,30
	SPINOTTO	ACCIAIO_SPINOTTI	10,00	

Figura A6.23 – Assegnazione delle proprietà geometriche delle sezioni

SEZIONE 4: DISPOSIZIONE DEI DIAGONALI

In questa sezione può essere assegnata o modificata la disposizione dei diagonali attribuita al livello 1 (Fig. A6.24).

DISPOSIZIONE DEI DIAGONALI	TIPOLOGIA A					
	1° CAMP.	2° CAMP.	3° CAMP.	4° CAMP.	5° CAMP.	6° CAMP.
SEQUENZA DEI CODICI PER I DIAGONALI	1	1	1	1	1	1
LARGHEZZA SINGOLE CAMPATE	2500	2500	2500	2500	2500	2500
DISTANZA PROGRESSIVA	0	2500	5000	7500	10000	12500

Figura A6.24 – Definizione della disposizione dei diagonali

Nella cella "DISPOSIZIONE DEI DIAGONALI" compare l'indicazione sul tipo di scelta effettuata al livello 1. Qualora l'utente desideri apportare delle modifiche deve agire sui contenuti delle celle associate alla riga "SEQUENZA DEI CODICI PER I DIAGONALI". Il contenuto di ciascuna cella identifica la disposizione dei diagonali nella singola campata.
Nelle celle devono essere digitati esclusivamente i codici 1 o 2. Il codice 1 identifica la disposizione del diagonale secondo quanto indicato nella figura A6.25, mentre il codice 2 identifica la disposizione di figura A6.26. La sequenza dei codici nelle diverse campiture del ponteggio permette di "costruire" le quattro tipologie base implementate nella procedura: Tipologia A (Fig. A6.27), Tipologia B (Fig. A6.28), Tipologia C (Fig. A6.29) e Tipologia D (Fig. A6.30). A titolo esplicativo, se l'utente al livello 1 avesse scelto la tipologia C per un ponteggio a sei campate, nelle celle associate alla "SEQUENZA DEI CODICI PER I DIAGONALI" comparirebbe la sequenza: 1-2-1-2-1-2.
Modificare la scelta operata al livello 1 o attribuire una nuova disposizione dei diagonali, significa inserire i codici 1 e 2 secondo al sequenza voluta nelle celle di pertinenza. Sarà poi la macroprocedura ad "attribuire" le aste in modo tale da costruire la disposizione voluta dei diagonali estesa a tutto il ponteggio. Nel caso in

cui venga inserito un codice diverso dai codici ammessi (1 o 2) la macroprocedura si bloccherà impedendo la creazione della mesh.
Le righe sottostanti alla “SEQUENZA DEI CODICI PER I DIAGONALI” contengono le dimensioni della campata e le distanze progressive delle stilate, rispettivamente. Le celle non sono attivate ma permettono un rapido controllo delle assegnazioni. La modifica della lunghezza delle campate, e quindi sulla distanza progressiva, può essere fatta agendo sulla sezione 1.

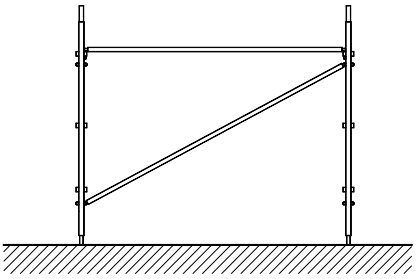


Figura A6.25 – Disposizione base dei diagonali: codice identificativo 1

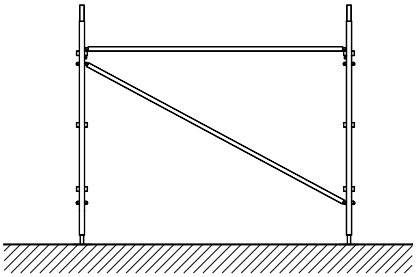


Figura A6.26 – Disposizione base dei diagonali: codice identificativo 2

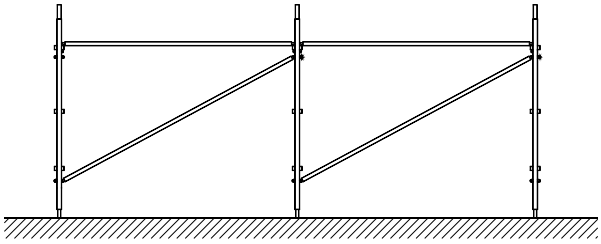


Figura A6.27 – Disposizione dei diagonali: tipologia A

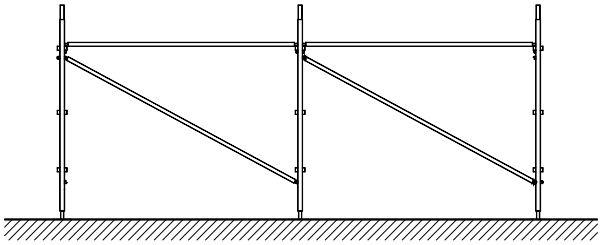


Figura A6.28 – Disposizione dei diagonali: tipologia B

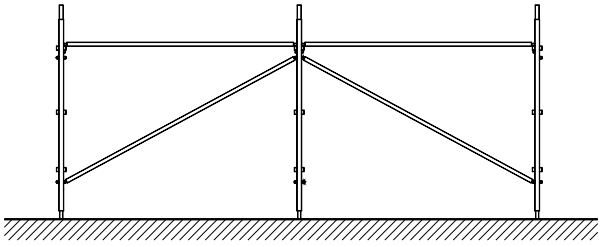


Figura A6.29 – Disposizione dei diagonali: tipologia C

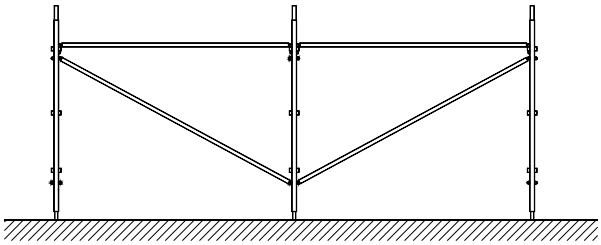


Figura A6.30 – Disposizione dei diagonali: tipologia D

SEZIONE 5: SCELTA DEI VINCOLI ELASTICI EQUIVALENTI

In questa sezione possono essere assegnate le leggi carico-spostamento relative alla risposta degli impalcati nei piani perpendicolare e parallelo all'opera servita (Fig. A6.31).
L'utente può modificare la scelta operata al livello 1 agendo sulla casella "VINCOLI ELASTICI CHE SIMULANO L'IMPALCATO". Le possibili opzioni sono "SI" o "NO". Qualora l'utente al livello 1 avesse previsto la presenza dell'impalcato e volesse escludere il loro contributo è sufficiente digitare NO. Questo fa sì che in sede di elaborazioni non vengano generati i vincoli equivalenti all'impalcato benché ad essi siano state attribuite leggi carico-spostamento. Se invece l'utente non avesse considerato gli impalcati al livello 1 e volesse viceversa inserirli, deve digitare SI nella casella "VINCOLI ELASTICI CHE SIMULANO L'IMPALCATO" e deve attribuire le pertinenti leggi carico-spostamento. Questo può essere fatto agendo sulle tabelle contenute nelle righe 72-80 del foglio "DATI" corrispondente al ponteggio che si sta analizzando. Questo foglio di lavoro si trova all'interno della medesima cartella di lavoro entro la quale l'utente sta operando ed è denominato con la "DENOMINAZIONE DEL PONTEGGIO" scelta dall'utente nella sezione 1 (Fig. A6.21 riga 2).
Nelle righe 72-80 del foglio di lavoro associato al ponteggio, compaiono le tabelle presentate in figura A6.32 che permettono di inserire le leggi carico-spostamento.

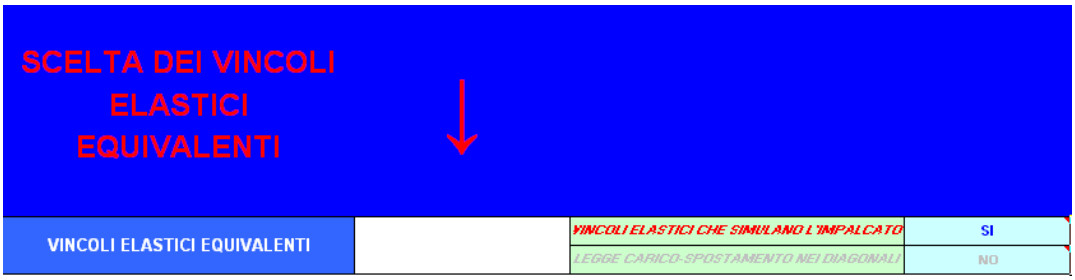


Figura A6.31 – Definizione dei vincoli elastici associati agli impalcati

DEFINIZIONI DELLE LEGGI CARICO-SPOSTAMENTO PER I VINCOLI ELASTICI

Vincoli elastici equivalenti nel piano ortogonale all'impalcato		
	Forza [N]	Spostam. [mm]
1	-1700,000	-80,000
2	-1200,000	-60,000
3	-700,000	-30,000
4	-1,000	-15,000
5	0,000	0,000
6	1,000	10,000
7	800,000	40,000
8	1500,000	50,000
9	2000,000	100,000

Vincoli elastici equivalenti nel piano parallelo all'impalcato		
	Forza [N]	Spostamento [mm]
1	-1700,000	-80,000
2	-1200,000	-60,000
3	-700,000	-30,000
4	-1,000	-15,000
5	0,000	0,000
6	1,000	10,000
7	800,000	40,000
8	1500,000	50,000
9	2000,000	100,000

Relazione spostamento-sforzo assiale del diagonale		
	Forza [N]	Spostamento [mm]
1	-1700,000	-80,000
2	-1200,000	-60,000
3	-700,000	-30,000
4	-1,000	-15,000
5	0,000	0,000
6	1,000	10,000
7	800,000	40,000
8	1500,000	50,000
9	2000,000	100,000

Figura A6.32 – Definizione leggi carico-spostamento dei vincoli elastici associati agli impalcati

Queste devono essere definite mediante 9 punti in modo da rappresentare la risposta per carichi positivi e carichi negativi. I primi quattro punti devono essere identificati mediante valori numerici negativi per quanto riguarda sia il carico sia lo spostamento, il 5° punto deve coincidere con l'origine degli assi mentre i punti tra il 6° ed il 9° devono essere identificati da valori positivi sia dei carichi e sia degli spostamenti.

Si osserva inoltre che la procedura è già predisposta per l'inserimento nel modello dei vincoli elastici corrispondenti ai diagonali di facciata. Allo stato attuale è possibile inserire la legge spostamento-azione assiale dei diagonali ma questa non sarà presa in conto in sede di analisi. Terminato l'inserimento dei dati, l'utente deve passare nuovamente alla sezione 5 del foglio "DATI".

SEZIONE 6: DISPOSIZIONE DEGLI ANCORAGGI E DEI VINCOLI EQUIVALENTI

La sezione 6 è dedicata all'assegnazione della posizione degli ancoraggi all'opera servita e degli eventuali vincoli elastici equivalenti all'impalcato, sia in direzione parallela sia in direzione ortogonale all'opera servita (Fig. A6.33).

DISPOSIZIONE DEGLI ANCORAGGI E DEI VINCOLI EQUIVALENTI

Inserimento ancoraggi:
1- ancoraggio
2-vincolo elastico equivalente di impalcato 0-nodo libero.
Non immettere altri valori o lasciare celle vuote.

LUNGHEZZA DEGLI ANCORAGGI [mm]	150
DISPOSIZIONE DEGLI ANCORAGGI	STILATA TIPO B

VINCOLI ELASTICI IN DIREZIONE PARALLELA ALL'IMPALCATO	POSIZIONE DEGLI ANCORAGGI O DEI VINCOLI EQUIVALENTI						
	LIVELLI	1ª STILATA	2ª STILATA	3ª STILATA	4ª STILATA	5ª STILATA	6ª STILATA
0	15° Livello	0	0	0	0	0	0
0	14° Livello	0	0	0	0	0	0
0	13° Livello	0	0	0	0	0	0
0	12° Livello	0	0	0	0	0	0
0	11° Livello	0	0	0	0	0	0
0	10° Livello	0	0	0	0	0	0
0	9° Livello	0	0	0	0	0	0
0	8° Livello	0	0	0	0	0	0
0	7° Livello	0	0	0	0	0	0
0	6° Livello	0	0	0	0	0	0
0	5° Livello	0	0	0	0	0	0
0	4° Livello	0	0	0	0	0	0
0	3° Livello	0	0	0	0	0	0
0	2° Livello	0	0	0	0	0	0
0	1° Livello	0	0	0	0	0	0
	TERRENO						
VINCOLI ELASTICI IN DIREZIONE PARALLELA ALL'IMPALCATO	Nº PIANO	1ª STILATA	2ª STILATA	3ª STILATA	4ª STILATA	5ª STILATA	6ª STILATA

Figura A6.33 – Definizione dei vincoli all'opera servita e dei vincoli elastici

In questa sezione l'utente, agendo sulla casella "LUNGHEZZA DEGLI ANCORAGGI", può scegliere se modificare o conservare la scelta attribuita al PASSO 7 del livello 1
Nella casella "DISPOSIZIONE DEGLI ANCORAGGI" compare l'indicazione della scelta operata dall'utente al PASSO 7 del livello operativo 1: l'utente può decidere di modificare o di conservare la sua scelta. Qualora decida di modificarla, non è sufficiente la semplice modifica della denominazione, ma egli deve operare direttamente sulla tabella denominata "SPOSIZIONE DEGLI ANCORAGGI E DEI VINCOLI ELASTICI".
La tabella individua una griglia caratterizzata nelle righe dai livelli e nelle colonne dalla stilate. La cella corrispondente all'incrocio tra la m^{esima} riga e la n^{esima} colonna individua un nodo del ponteggio. L'utente deve inserire nelle celle uno dei seguenti codici:

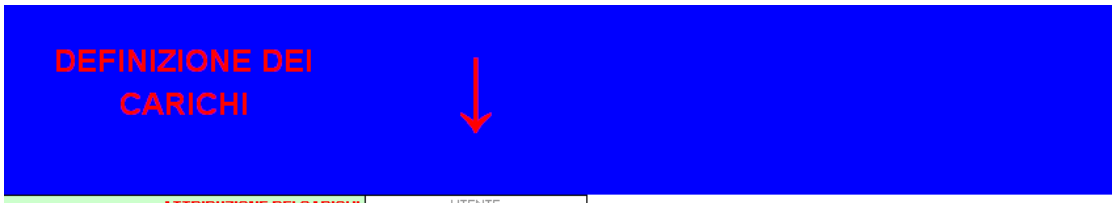
- 0 qualora nel nodo non voglia inserire alcun vincolo;
- 1 qualora voglia inserire un vincolo all'opera servita;
- 2 qualora voglia inserire un vincolo elastico corrispondente all'impalcato.

Le celle devono comunque sempre contenere un valore numerico tra i tre indicati.
La prima colonna denominata "VINCOLI ELASTICI IN DIREZIONE PARALLELA ALL'IMPALCATO" permette di attribuire i vincoli elastici equivalenti all'impalcato nel piano parallelo all'opera servita. I vincoli saranno disposti sul montante esterno dell'ultima stilata (Fig. 3.14-3.16 della relazione principale). L'attivazione del vincolo elastico avviene digitando nella cella corrispondente al livello voluto il codice 2. Se invece il vincolo non è presente nella cella dovrà essere digitato il codice 0.
Si fa presente che la procedura è predisposta in modo tale che gli ancoraggi all'opera servita non siano disposti a distanze superiori ai sei livelli. Se erroneamente questa evenienza dovesse verificarsi, la macroprocedura non genererà correttamente il file di input.
La disposizione degli ancoraggi all'opera servita determina automaticamente la generazione delle imperfezioni nel piano di stilata e di facciata. Riguardo alle modalità secondo le quali queste vengono generate si rimanda al paragrafo 7.1.1.6 della relazione principale.

SEZIONE 7: DEFINIZIONE DEI CARICHI

Questa sezione è dedicata alla definizione dei carichi e del tipo di analisi. Nella prime celle non attivate della tabella all'utente è presentato un riepilogo delle scelte operate al livello 1.

L'utente può apportare delle modifiche aggiornando manualmente le tabelle riguardanti i carichi applicati al ponteggio. Queste risultano infatti compilate nel rispetto delle scelte operate al livello 1. Qualora l'utente non introducesse alcuna modifica, l'analisi sarà svolta nel rispetto delle indicazioni della tabella.
Il coefficiente di amplificazione dei carichi può essere invece modificato. Il nuovo valore sarà utilizzato dalla macroprocedura per amplificare tutti i carichi sia verticali sia orizzontali utilizzati in sede di analisi.
Si precisa che il coefficiente di amplificazione non è considerato nel caso in cui si eseguano analisi del secondo ordine elastiche a collasso.



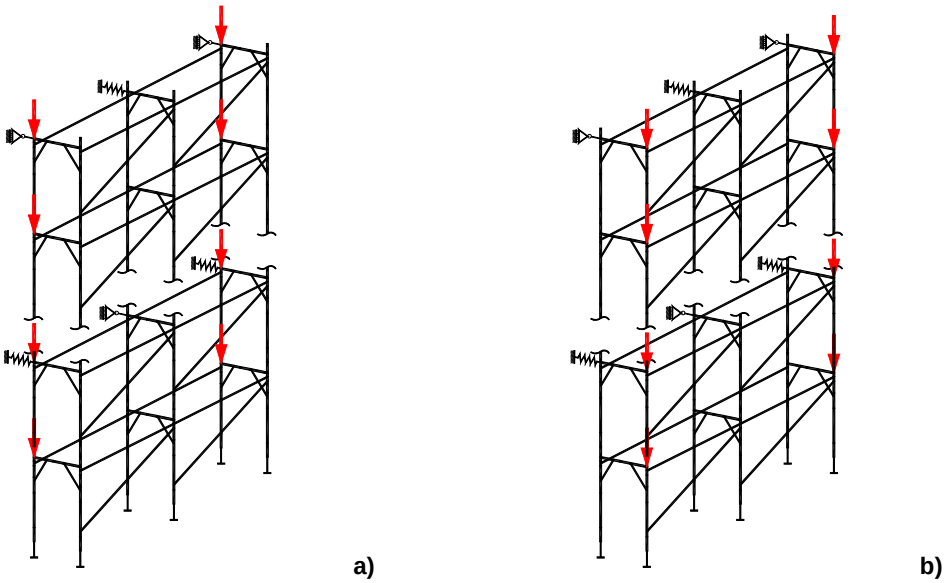
ATTRIBUZIONE DEI CARICHI	UTENTE
TIPOLOGIA DI ANALISI	SERVIZIO
DIREZIONE DEL VENTO RISPETTO ALLA FACCIATA	PARALLELA
CARICO ACCIDENTALE [N/mm^2]	0,00000
CARICO DEL TAVOLATO [N/mm^2]	0,00000
CARICO FERMAPIEDE E PROTEZIONI [N/mm]	0,00000
CARICO DI COLLASSO PER MONTANTE [N]	0
COEF. AMPLIFICAZIONE CARICHI	1,0

Figura A6.34 – Definizione dei carichi

Per attribuire i carichi l'utente dovrà "compilare" le tabelle relative ai carichi (Fig. A6.35 e Fig. A6.38).
La tabella di figura A6.35 consente di attribuire i carichi verticali. E' bene precisare che la tabella considera il massimo numero di livello ammessi dalla procedura (15). Le celle dovranno essere compilate limitatamente al numero di livello effettivamente presenti nel ponteggio. Qualora i carichi fossero disposti a livelli superiori rispetto al livello massimo del ponteggio, questi non saranno considerati in sede di analisi.
Qualora l'utente al PASSO 11 avesse scelto di attivare una analisi elastica del secondo ordine a collasso i carichi verticali sono disposti sui montanti in corrispondenza del livello superiore del ponteggio. In particolare sui montanti delle stilate interne è applicato un carico pari a quello assegnato nella cella "CARICO PER MONTANTE A COLLASSO" (Fig. A6.12), mentre sui montanti delle stilate esterne è applicato il 68% del carico indicato dall'utente. Qualora l'utente volesse modificare tale valore dovrà provvedere all'inserimento manuale dei nuovi valori dei carichi. Resta inteso che agendo su questa tabella possono essere inseriti carichi verticali aii montanti in corrispondenza di qualsivoglia livello di carico. Le figure A6.36 e A6.37 chiariscono le denominazione utilizzate nella tabella relativa all'attribuzione dei carichi verticali.

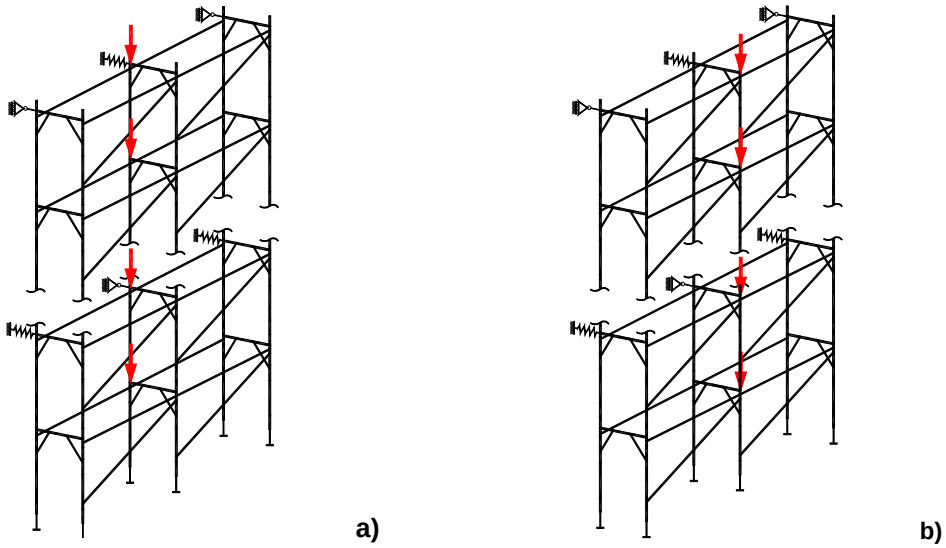
CARICHI VERTICALI				
LIVELLI	STILATE ESTERNE		STILATE INTERNE	
	MONTANTI LATO OPERA SERVITA	MONTANTI ESTERNI	MONTANTI LATO OPERA SERVITA	MONTANTI ESTERNI
	[N]	[N]	[N]	[N]
15° Livello	0,00	0,00	0,00	0,00
14° Livello	0,00	0,00	0,00	0,00
13° Livello	0,00	0,00	0,00	0,00
12° Livello	0,00	0,00	0,00	0,00
11° Livello	0,00	0,00	0,00	0,00
10° Livello	0,00	0,00	0,00	0,00
9° Livello	0,00	0,00	0,00	0,00
8° Livello	0,00	0,00	0,00	0,00
7° Livello	0,00	0,00	0,00	0,00
6° Livello	0,00	0,00	0,00	0,00
5° Livello	0,00	0,00	0,00	0,00
4° Livello	0,00	0,00	0,00	0,00
3° Livello	0,00	0,00	0,00	0,00
2° Livello	0,00	0,00	0,00	0,00
1° Livello	0,00	0,00	0,00	0,00

Figura A6.35 – Attribuzione dei carichi verticali



a) b)

Figura A6.36 – Carichi verticali sulle stilate esterne: a) montanti lato opera servita; b)montanti esterni



a) b)

Figura A6.37 – Carichi verticali sulle stilate interne: a) montanti lato opera servita; b)montanti esterni

In modo analogo ai carichi verticali, la tabella di figura A6.38 consente l'inserimento/aggiornamento dei carichi orizzontali dovuti al vento.

CARICHI ORIZZONTALI DA VENTO			
LIVELLI	CARICHI ORTOGONALI ALLA FACCIATA		CARICHI PARALLELI ALLA FACCIATA
	MONTANTI ESTERNI	MONTANTI INTERNI	MONTANTI ULTIMA STILATA
	[N]	[N]	[N]
15° Livello	0,00	0,00	0,00
14° Livello	0,00	0,00	0,00
13° Livello	0,00	0,00	0,00
12° Livello	0,00	0,00	0,00
11° Livello	0,00	0,00	0,00
10° Livello	0,00	0,00	0,00
9° Livello	0,00	0,00	0,00
8° Livello	0,00	0,00	0,00
7° Livello	0,00	0,00	0,00
6° Livello	0,00	0,00	0,00
5° Livello	0,00	0,00	0,00
4° Livello	0,00	0,00	0,00
3° Livello	0,00	0,00	0,00
2° Livello	0,00	0,00	0,00
1° Livello	0,00	0,00	0,00

Figura A6.38 – Attribuzione dei carichi orizzontali

I criteri secondo cui i carichi sono applicati sono indicati nelle figure A6.39 e A6.40.

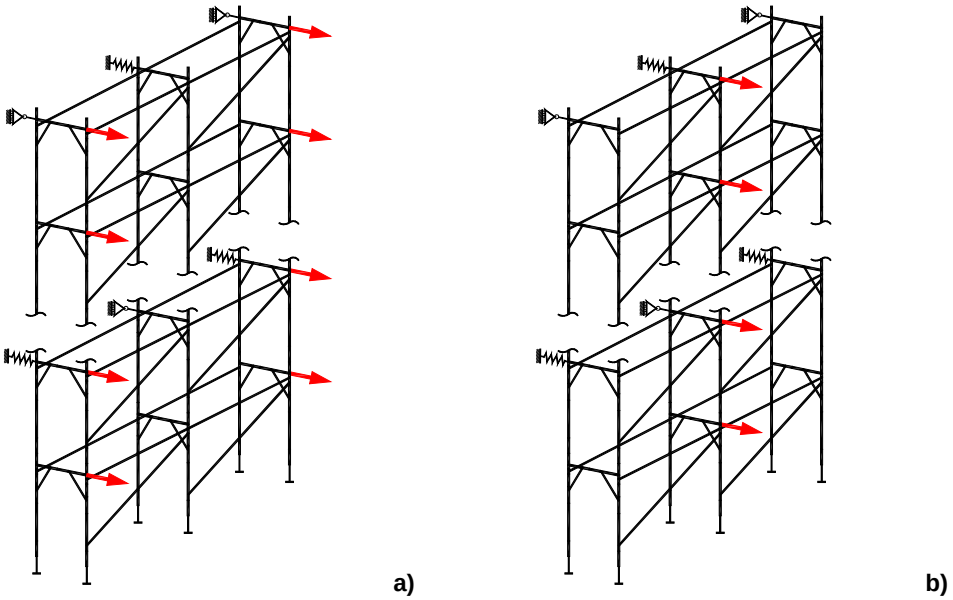


Figura A6.39 – Carichi orizzontali ortogonali alla facciata a) montanti esterni ; b) montanti interni

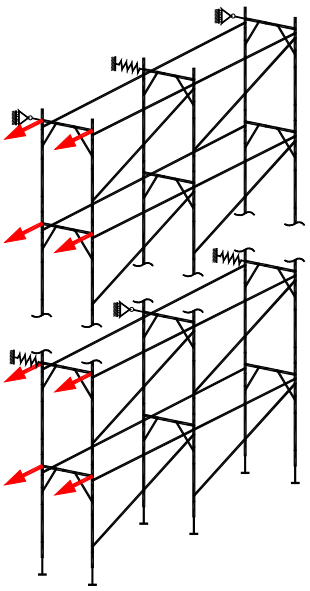


Figura A6.40 – Carichi orizzontali paralleli alla facciata

SEZIONE 8: FINE DATI INPUT

L'utente dopo aver completato l'inserimento dei dati può attivare la macroprocedura attivando il pulsante "START" (Fig. A6.41). L'output della macroprocedura è il listato del programma necessario per lo svolgimento delle analisi mediante SAP, qualora si sia scelta procedura SAP20003D, e mediante ANSYS qualora invece si sia optato per la procedura ANSYS3D. Il listato è generato su un foglio di lavoro appartenente alla cartella di lavoro nella quale l'utente sta operando. Il foglio è denominato in automatico "TESTO SAP2000" e "TESTO ANSYS" per i due programmi SAP e ANSYS rispettivamente. Il foglio di lavoro dovrà essere esportato in formato testo (tipo Unicode (denominato rispettivamente "TESTO SAP2000" e "TESTO ANSYS" nelle due procedure). Questo file costituisce la fase di preprocessing dei dati scambiati con i codici di calcolo.

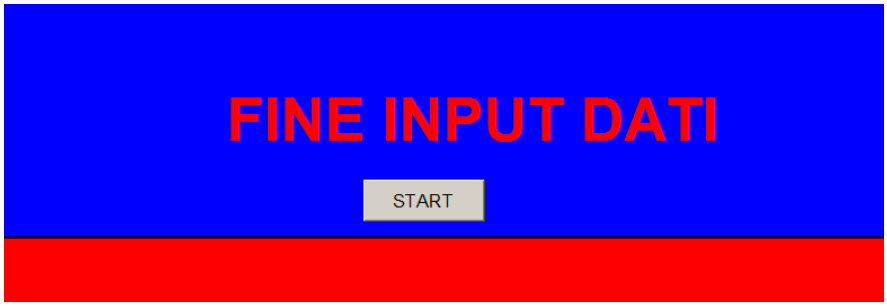


Figura A6.41 – Comando di attivazione della macroprocedura

B1-5/DTS/05

I ponteggi metallici fissi di facciata utilizzati nei cantieri temporanei o mobili.
Le nuove norme di prodotto: aspetti tecnici e legislativi –

RELAZIONE FINALE - ALLEGATO 7

Autori: N. Baldassino, R. Zandonini

Affiliazione: Università degli Studi di Trento
Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale

Ricerca finanziata da:

Dipartimento Tecnologie di Sicurezza

10/02/2009

PROCEDURA PER LA GESTIONE DATI DI ANALISI 2D

A7.1 REQUISITI DI SISTEMA E DI INSTALLAZIONE

La procedura, dal punto di vista hardware e software, richiede una dotazione minima costituita da:

- processore tipo Pentium IV;
- memoria RAM da 512MB;
- sistema operativo Windows XP o successivi;
- pacchetto Microsoft© Office 2003 o successivi.

A7.2 PROCEDURA DI INSTALLAZIONE

Il CD "PROCEDURE" riguardante la procedura automatizzata ed allegato alla parte principale del documento (relazione finale del progetto di ricerca)contiene quattro files destinati alle seguenti applicazioni:

1- procedura SAP20003D, per l'analisi agli elementi finiti di modelli tridimensionali tramite il software SAP;
2- procedura ANSYS3D, per l'analisi agli elementi finiti di modelli tridimensionali tramite il software ANSYS;
3- procedura SAP20002D, per l'analisi agli elementi finiti di modelli bidimensionali relativi al piano di stilata tramite il software SAP;
4- VERIFICA SEZIONI.xls, per la verifica delle sezioni in accordo alle norme UNI EN 1933-1-1:2005 [8] e UNI EN 12811-3:2005 [7].

Per velocizzare le operazioni connesse alle procedure di cui sopra, é consigliabile copiare i files in una cartella di destinazione residente sul disco fisso. E' possibile quindi procedere con l'esecuzione del file relativo alla procedura desiderata.

Relativamente alle procedure elencate ai punti 1-2-3 all'avvio, laddove si utilizzi un pacchetto Microsoft© Office 2007, appare un messaggio con la richiesta di attivazione delle macro a cui l'utente deve ottemperare selezionando l'opzione "Attiva macro".

Qualora si utilizzi una versione precedente al pacchetto Microsoft© Office 2007, nel caso in cui non sia già stato fatto per altre ragioni, è necessario procedere all'attivazione delle macro. A tal fine è necessario seguire la seguente procedura:
dal menù "Strumenti" di Excel selezionare >Protezione e successivamente l'opzione "Proteggi foglio". Successivamente sempre dal menù "Strumenti", >Macro, >Protezione, selezionare l'opzione "Livello di protezione Basso". Premere OK e chiudere salvando il file. E' necessario quindi riaprire il file e seguire nuovamente la procedura dal menu Strumenti, >Protezione e riattivare "Proteggi foglio". A questo punto la procedura presente nella macro è pronta per generare il file di listato.

In quanto segue sono fornite le istruzioni necessarie all'inserimento dei dati di input relative alle procedura 2D (punto 3 dell'elenco precedente). Le istruzioni sono fornite separatamente per il livello di operatività 1 e 2.

A7.3 NOTE

Per il corretto funzionamento delle procedure è indispensabile che l'utente non alteri o elimini i fogli di lavoro presenti al momento dell'installazione.

A7.4 LIVELLO DI OPERATIVITA' 1

PASSO 1

All'apertura del file (procedura SAP20002D) all'utente appare il foglio di lavoro tramite il quale può iniziare l'immissione dei dati attraverso il livello di operatività 1 (Figura A7.1). L'attribuzione dei dati principali relativi al sistema intelaiato, quali le dimensioni del telaio, la tipologia di ponteggio (boccole o spinotti), la distanza tra le stilate deve avere luogo al livello 1. Solamente a valle della procedura al livello 1, l'utente può passare al livello di operatività 2.

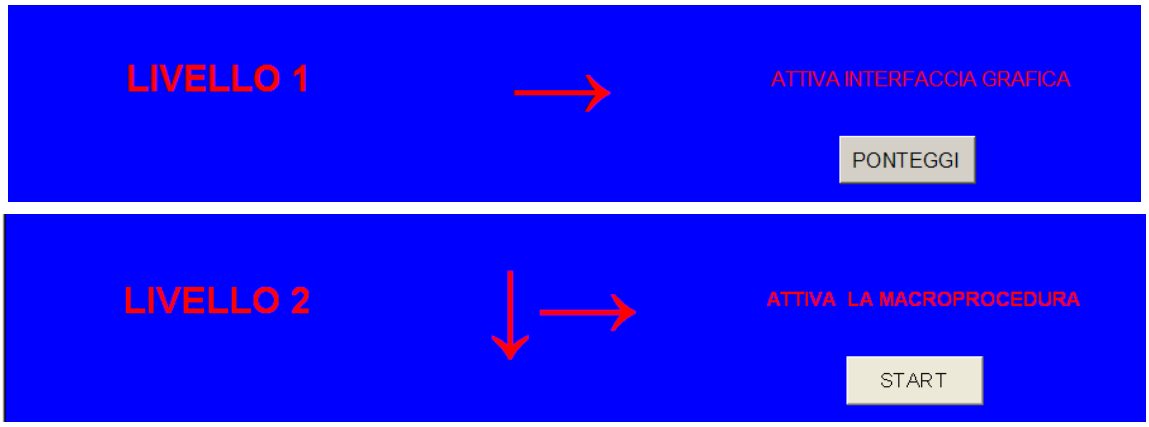


Figura A7.1 - Attivazione della procedura di immissione dati

L'utente deve attivare il pulsante "PONTEGGI" associata alla dicitura "ATTIVA INTERFACCIA GRAFICA".

PASSO 2

La prima finestra di dialogo che si presenta all'utente (figura A7.2) permette di gestire il database dei ponteggi scegliendo tra le opzioni:

- SCEGLI DAL DATABASE: l'utente può scegliere una casistica tra quelle presenti nella libreria. All'atto della prima esecuzione sono presenti due tipologie base predefinite e non eliminabili dal database (PONTEGGIO CON BOCCOLE e PONTEGGIO CON SPINOTTI). La loro rimozione potrebbe comportare il mancato funzionamento della macroprocedura. La scelta dal database di una fra le casistiche già presenti fa passar automaticamente al PASSO 4 della procedura di inserimento dati;
- CREA NUOVO PONTEGGIO: l'utente è invitato a digitare il nome del nuovo ponteggio scegliendo fra le opzioni "PONTEGGIO BOCCOLE" e "PONTEGGIO SPINOTTI"
- ELIMINA PONTEGGIO: l'utente può eliminare dal database un ponteggio già definito cancellando permanentemente il foglio di lavoro che lo identifica.

Premere OK

PASSO 3

Nel caso in cui si sia scelto di creare un nuovo ponteggio, all'utente appare la finestra di dialogo di figura A7.3 nella quale è invitato ad inserire le principali caratteristiche geometriche del telaio di stilata quali la larghezza e l'altezza del telaio, l'altezza della basetta e la quota di posizionamento del traverso di irrigidimento orizzontale (se presente) rispetto all'asse di riferimento x. All'utente è chiesto anche di inserire le quote progressive rispetto all'asse x dei nodi attraverso i quali vuole discretizzare i montanti e la posizione dei nodi 109 e 119 di intersezione del traverso con gli irrigidimenti obliqui. Il nodo 110 è generato in automatico alla metà del traverso. Non è ammessa la presenza di nodi posti a distanza minore di 1 mm.
I nodi 102-112-106-116 (indicati in rosso nel disegno) e i nodi 107 e 117 (indicati in blu nel disegno) sono riservati ai nodi in corrispondenza dei quali si realizza il collegamento tra diagonali di facciata e montanti e tra correnti di facciata e montanti, rispettivamente. La schematizzazione adottata dall'utente deve pertanto essere scelta nel rispetto di questi vincoli geometrici.
Nel caso in cui l'utente al passo precedente (PASSO 1- Fig. A7.2) abbia attivato l'opzione "PONTEGGIO BOCCOLE" è richiesto l'inserimento dell'eccentricità nel piano di facciata tra asse del montante e centro della boccola. Qualora l'utente al passo precedente (PASSO 1 - Fig. A7.2) abbia attivato l'opzione "PONTEGGIO SPINOTTI" questa informazione non viene richiesta.
Premere OK

Figura A7.2 – Gestione database ponteggi

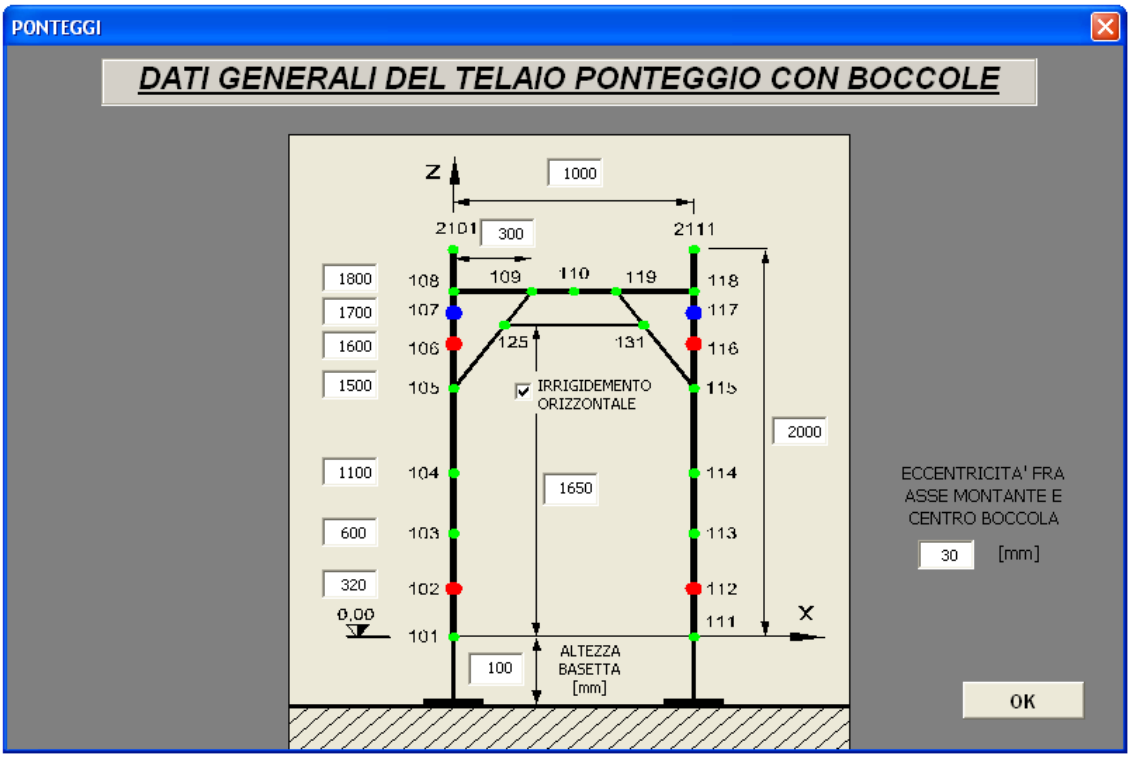


Figura A7.3 – Inserimento dati geometrici del telaio

PASSO 4

All'utente appare la finestra di dialogo di figura A7.4 che richiede l'inserimento dei seguenti dati:

- NUMERO LIVELLI: numero di livelli di cui si compone il ponteggio. E' un numero intero che può variare tra 1 e 15;
- ALTEZZA BASETTA: definisce la lunghezza dell'elemento che collega il ponteggio al suolo. Nel caso in cui l'utente sta generando un nuovo ponteggio la casella di testo è inattiva in quanto il dato è già stato

inserito al passo precedente (Fig. A7.3). La casella di testo è modificabile solamente nel caso in cui l'utente al PASSO 2 abbia scelto un ponteggio dal database;

- IMPERFEZIONE FRA TELAI SUCCESSIVI: valore dell'imperfezione geometrica localizzata dovuta ai giochi tra telai successivi. In assenza di indicazioni al riguardo, questa può essere valutata in accordo al alla normativa UNI EN 12811-1:2004 [5];
- IMPERFEZIONE DELLA BASETTA: valore dell'imperfezione geometrica localizzata alla base dovuta ai giochi della basetta estensibile. In assenza di indicazioni al riguardo, questa può essere valutata in accordo alla normativa UNI EN 12811-1:2004 [5];
- LOCAL BOW: definisce l'imperfezione dei montanti rispetto alla condizione di rettilineità. Questa è assunta in accordo a quanto previsto dalla normativa UNI EN 1993-1-1:2005 [8] con andamento parabolico con massima "freccia" in corrispondenza della metà altezza dell'elemento. L'imperfezione locale è implementata sui soli montanti.

Premere OK

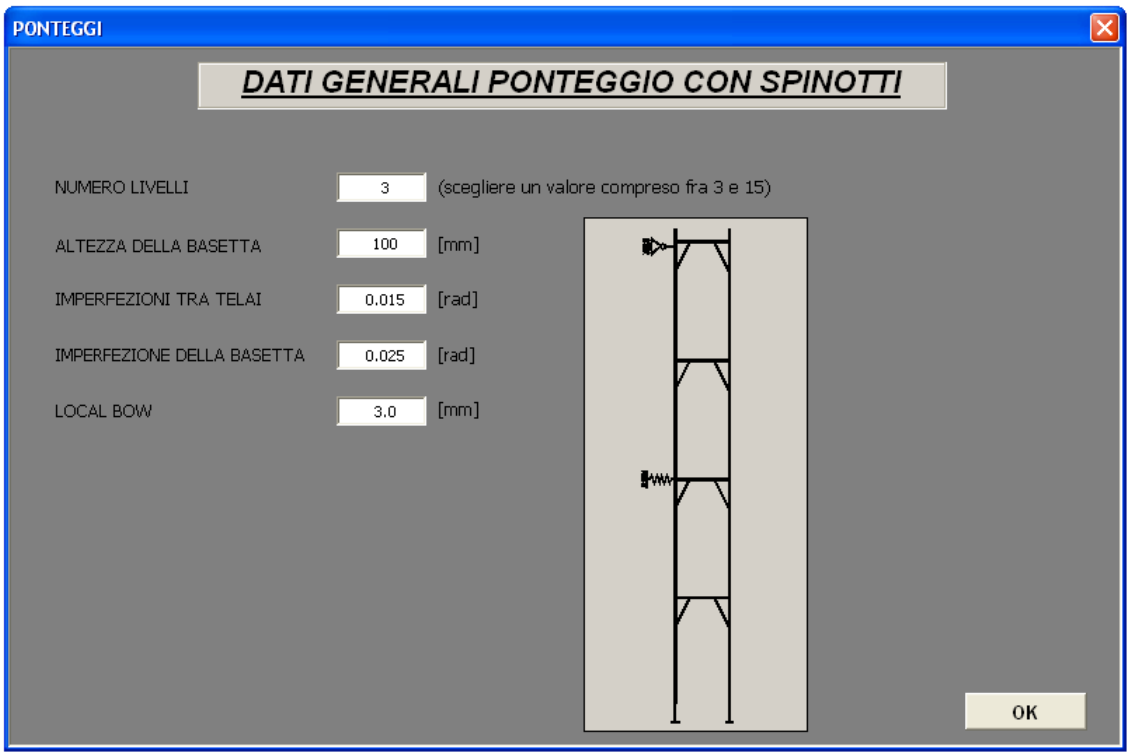


Figura A7.4 – Inserimento dei dati relativi alla stilata

PASSO 5

All'utente appare la finestra di dialogo presentata nella figura A7.5 che richiede l'inserimento delle caratteristiche meccaniche dei materiali distinguendo tra gli elementi dei telai, gli irrigidimenti del telaio e le basette. I materiali ipotizzati elastici, omogenei ed isotropi sono caratterizzati dal modulo di elasticità (E) e dal coefficiente di Poisson (ν), nell'ottica dello svolgimento delle analisi delle secondo ordine elastiche. La finestra di dialogo è stata predisposta per un successivo sviluppo della macroprocedura al caso delle analisi del secondo ordine elasto-plastiche (caselle di testo disattivate associate alla tensione di snervamento (f_y) e alla tensione ultima (f_u)). E' prevista, benché al momento non attivata, la possibilità di attribuire caratteristiche meccaniche diverse agli spinotti.

Premere OK

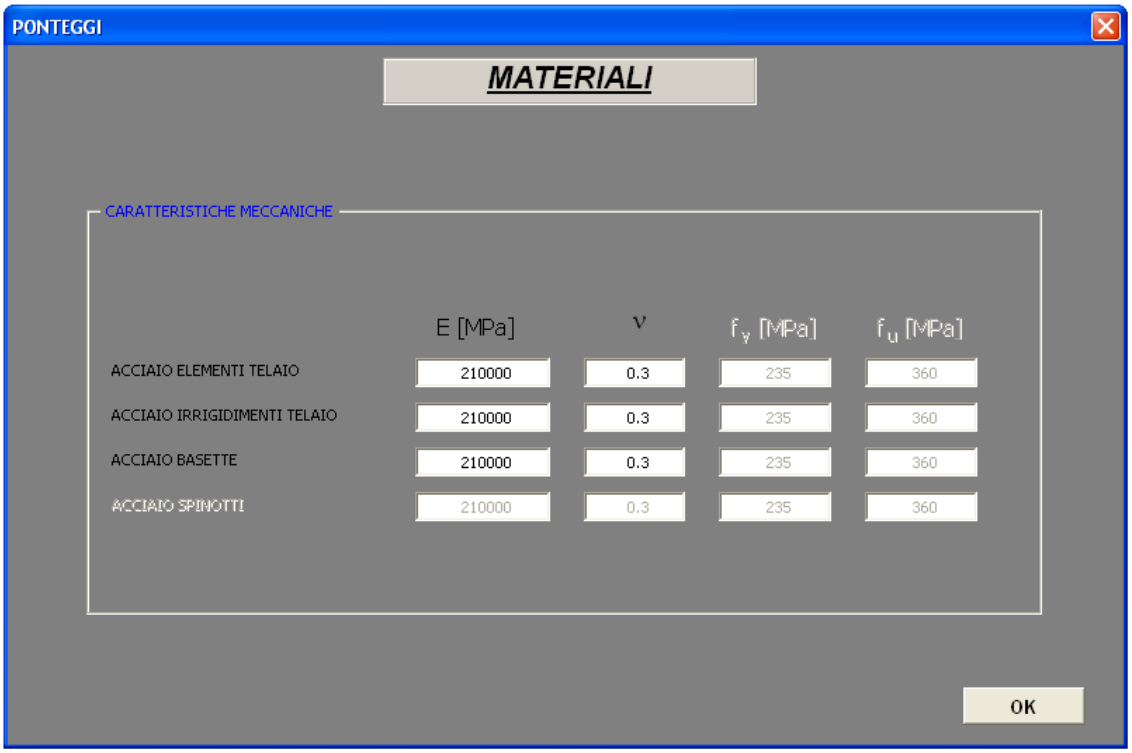


Figura A7.5 – Definizione delle proprietà dei materiali

PASSO 6

All'utente appare la finestra di dialogo presentata nella figura A7.6 dedicata all'inserimento delle caratteristiche geometriche degli elementi.

Figura A7.6 – Definizione della geometria delle sezioni

Per tutte le sezioni si è ipotizzato il profilo tubolare. Viene richiesto di inserire il valore del diametro esterno e dello spessore dei tubi in mm. Le geometrie dei profili sono divise in tre gruppi: montanti, irrigidimenti e

basette. La finestra di dialogo è inoltre predisposta per l'inserimento del diametro degli spinotti, per i quali si è ipotizzata una sezione circolare piena. La casella di testo pertinente è al momento disattivata.
Premere OK

PASSO 7

All'utente appare la finestra di dialogo dedicata alla definizione della legge carico-spostamento associata ai vincoli elastici che riproducono il comportamento delle tavole di impalcato (Fig. A7.7). L'utente deve specificare se intende tener conto o meno delle tavole di impalcato nella fase di analisi attraverso l'attivazione della casella "ATTIVARE IMPALCATI". Se la casella non viene attivata, i vincoli elastici non vengono considerati, alternativamente è necessario definire la legge di comportamento dei vincoli in direzione ortogonale al piano dell'opera servita. La legge è definita attraverso 9 punti in modo da rappresentare la risposta dei vincoli per carichi positivi e carichi negativi. I primi quattro punti devono assumere valori negativi per quanto riguarda sia il carico sia lo spostamento, il 5° punto deve coincidere con l'origine degli assi mentre i punti tra il 6° ed il 9° devono assumere valori positivi sia per i carichi sia per gli spostamenti. Contestualmente alla definizione dei vincoli elastici, in questo passo, è richiesto all'utente di indicare la procedura secondo la quale voglia procedere all'attribuzione della disposizione degli ancoraggi all'opera servita e dei vincoli elastici equivalenti al sistema di piano ("AUTOMATIZZATA" (PASSO 8) o "DEFINITA DALL'UTENTE" (PASSO 9)). Sempre in questo contesto, attraverso una casella di modifica, è richiesta la definizione della lunghezza degli ancoraggi all'opera servita.
Premere OK

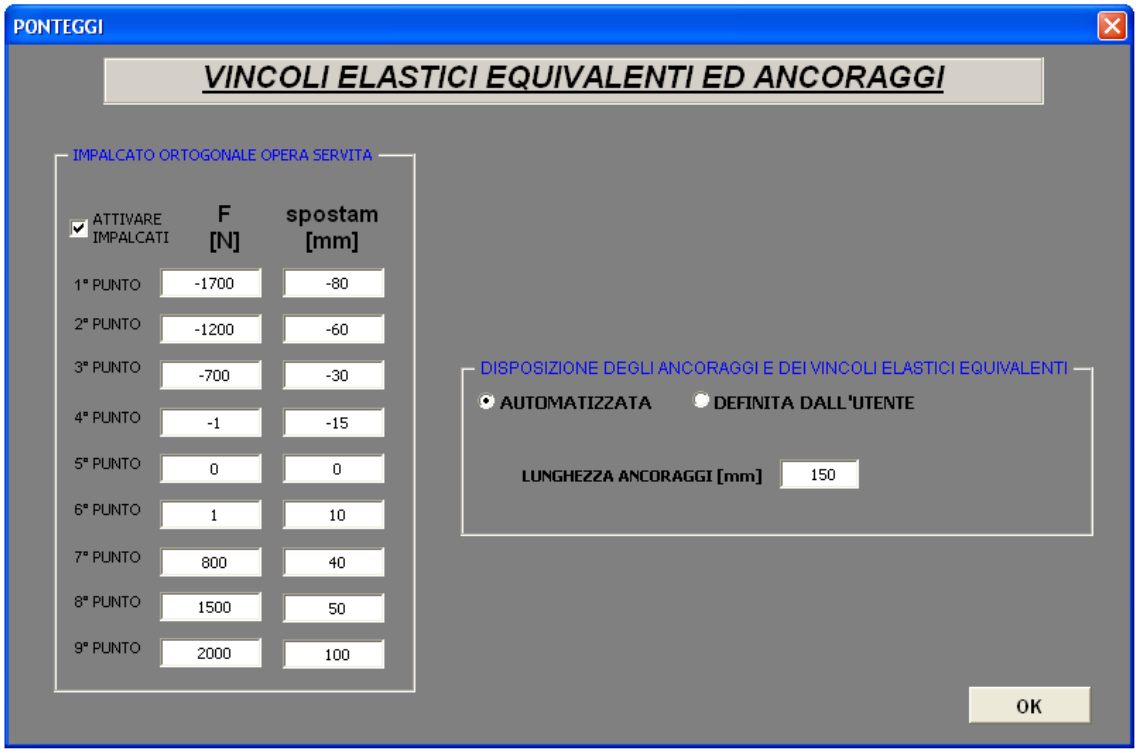


Figura A7.7 – Definizione delle proprietà degli impalcati e del criterio di attribuzione dei vincoli all'opera servita

PASSO 8

Qualora l'utente al PASSO 7 abbia scelto la disposizione dei vincoli "AUTOMATIZZATA", appare la finestra di dialogo di figura A7.8.
Secondo la procedura automatizzata i vincoli all'opera servita e i vincoli elastici equivalenti agli impalcati sono attribuiti in maniera tale che questi si susseguano a partire dal secondo livello, ad intervalli costanti, pari a due livelli. In base a questo criterio le stilate possono essere vincolate secondo due schemi denominati rispettivamente "stilata A" e "stilata B". La stilata A prevede un ancoraggio all'opera servita alla quota del secondo livello di carico, a cui segue, dopo due livelli, il vincolo elastico associato alle tavole di implacato e così a seguire fino al raggiungimento della sommità del ponteggio (Fig. 3.18). La stilata tipo B è caratterizzata da un vincolo elastico corrispondente alle tavole di impalcato alla quota del secondo livello, a cui segue, dopo due livelli, un vincolo all'opera servita e così a seguire fino alla sommità del ponteggio (Fig. 3.18). Sulla base di questa assegnazione la procedura assegna i vincoli all'opera servita e i vincoli di tipo elastico su tutta la stilata del ponteggio. La disposizione degli ancoraggi all'opera servita determina

automaticamente la generazione delle imperfezioni nel piano di stilata. Per le modalità secondo le quali queste vengono generate si rimanda al paragrafo 7.1.1.6 della relazione principale.
Premere OK
La procedura attiva il PASSO 10.

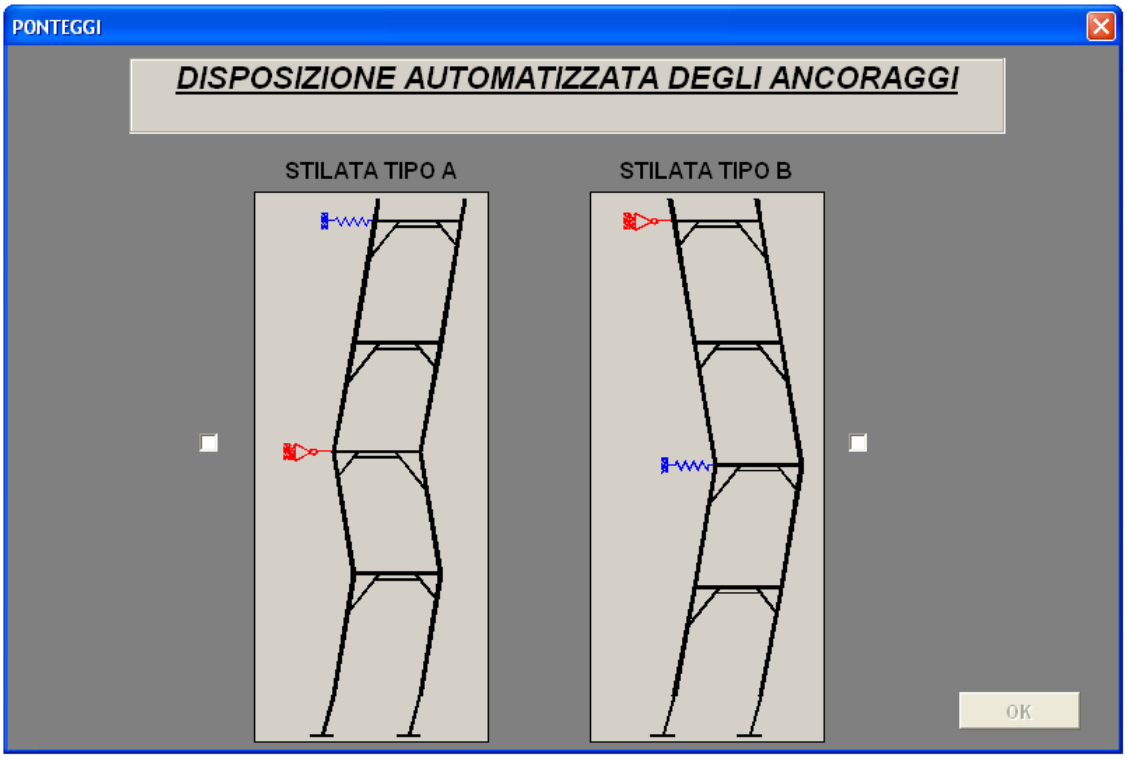


Figura A7.8 – Definizione dei vincoli all'opera servita secondo la procedura automatizzata

PASSO 9

Qualora l'utente al passo 7 abbia deciso per una autonoma attribuzione dei vincoli all'opera servita e dei vincoli elastici in modo autonomo (attribuzione "DEFINITA DALL'UTENTE") si presentano due possibilità:

- se il ponteggio presenta un numero di livelli minore od uguale a 6 sarà possibile mediante l'interfaccia grafica attribuire la disposizione dei vincoli (finestre di dialogo delle figure A.7.9 o A.7.10);
- se il ponteggio supera le limitazioni di cui al punto precedente; la procedura invia un messaggio che invita l'utente ad agire direttamente al livello di interazione 2. La procedura attiva il PASSO 10.

Nel caso in cui siano soddisfatte le limitazioni sul numero di livelli ed in relazione alla scelta del sistema di vincolo di piano effettuata al PASSO 7 (Fig. A7.7) possono presentarsi due possibili finestre di dialogo:

- finestra di figura A.7.9 nel caso in cui si sia considerato efficace il sistema di vincolo di piano;
- finestra di figura A.7.10 nel caso in cui non si sia considerato l'azione di controventamento del sistema di piano.

La finestra di dialogo di figura A7.9, aggiornata in relazione al numero di livelli di cui la stilata è composta, consente l'assegnazione sia dei vincoli all'opera servita sia dei vincoli equivalenti al sistema di impalcato attraverso una griglia caratterizzata dalla presenza di due pulsanti opzionali in corrispondenza ad ogni livello. Il pulsante con cornice di color grigio chiaro deve essere selezionato qualora si intenda attribuire un vincolo elastico equivalente al sistema di impalcato, mentre il pulsante privo di cornice deve essere attivato nel caso in cui si intenda introdurre un ancoraggio all'opera servita. La procedura controlla che in corrispondenza di ciascun livello sia attivato uno solo dei due pulsanti. Qualora si intenda lasciare un livello privo di vincolo nessuna delle due caselle deve essere attivata.
I pulsanti "RESET" posti a fianco di ciascun livello permettono una nuova assegnazione dei vincoli qualora questi fossero stati erroneamente predisposti.
Nel caso in cui al PASSO 7 (Fig. A7.7) l'utente non abbia attivato la casella "ATTIVA IMPALCATI" e abbia optato per una libera disposizione dei vincoli, compare la finestra di dialogo di figura A7.10, analoga a quella di figura A7.9 ma priva dei pulsanti corrispondenti ai vincoli elastici associati all'impalcato. L'utente è in questo caso chiamato a disporre solamente i vincoli all'opera servita.

La disposizione degli ancoraggi all'opera servita determina automaticamente la generazione delle imperfezioni nel piano di stilata. Riguardo alle modalità secondo le quali queste vengono generate si rimanda al paragrafo 7.1.1.6 della relazione principale.
Premere OK

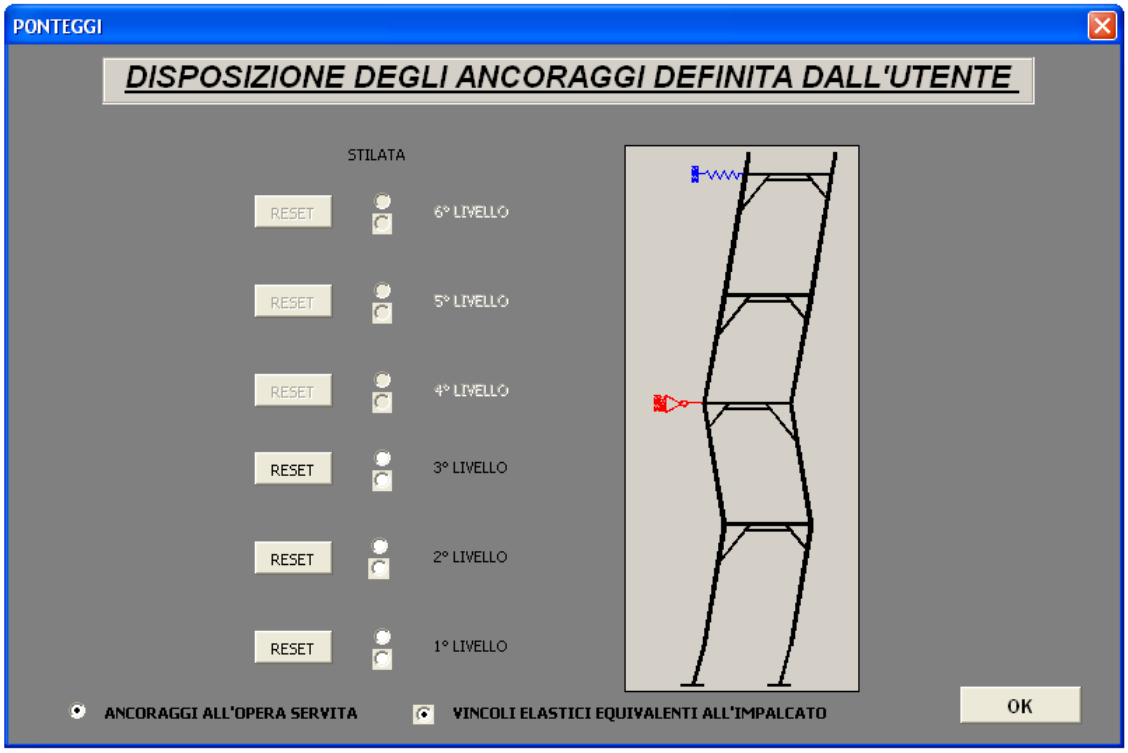


Figura A7.9 – Definizione dei vincoli all'opera servita definita dall'utente

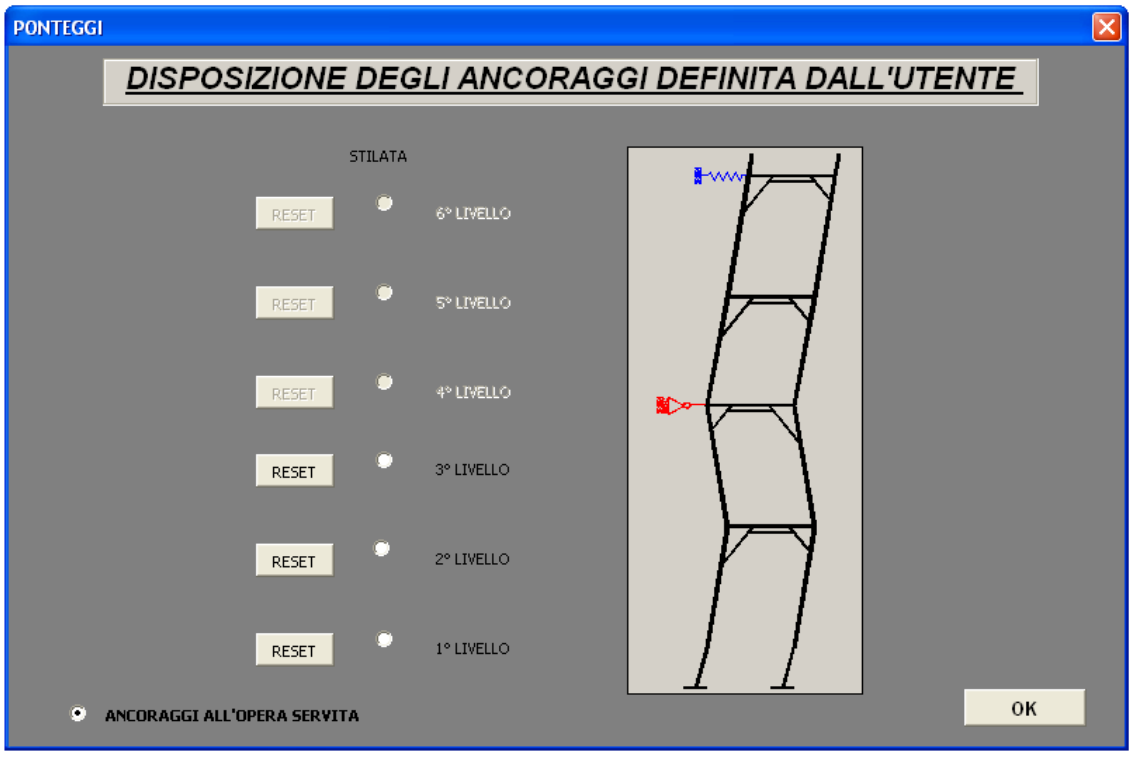


Figura A7.10 – Definizione dei vincoli all'opera servita definita dall'utente (contributo nullo del sistema di impalcato)

PASSO 10

All'utente compare la finestra di dialogo di figura A7.11, che riguarda la tipologia di analisi e l'assegnazione dei carichi. Anche in questo caso possono essere seguite due procedure: "AUTOMATIZZATA" o "UTENTE"..

Nel caso in cui l'utente scelga la procedura automatizzata e scelga dal menù a tendina "CONDIZIONI DI CARICO" una delle opzioni "SERVIZIO" o "FUORI SERVIZIO" vengono attivate le caselle contenute nel box "CARICHI VERTICALI" che consentono l'attribuzione dell'interasse tra le stilate, del peso proprio dell'impalcato, del carico variabile sull'impalcato, e il peso del fermapiede presente sulla facciata esterna. Non viene invece attivata la casella "CARICHI SUL MONTANTE A COLLASSO" che riguarda invece le analisi elastiche del secondo ordine a collasso. La macroprocedura genera autonomamente i carichi verticali in accordo alla normativa UNI EN 12811-1:2004 [5] utilizzando il coefficiente di amplificazione dei carichi indicato dall'utente nella pertinente casella. La procedura attiva il PASSO 12 che riguarda l'attribuzione dei carichi dovuti al vento.

Nel caso in cui l'utente scelga di svolgere una analisi del secondo ordine elastica fino a collasso del sistema (opzione "II ORDINE A COLLASSO" del menù a tendina "CONDIZIONI DI CARICO") nel box "CARICHI VERTICALI" viene attivata la sola casella "CARICHI SUL MONTANTE A COLLASSO". All'utente è chiesto di attribuire una stima del valore del massimo carico agente sul montante nelle condizioni di collasso del sistema. La macroprocedura automaticamente applica carichi verticali alla sommità di ogni montante di entità pari all'indicazione fornita dall'utente. La procedura attiva il PASSO 13.

Nel caso in cui l'utente selezioni dal box "CARICHI VERTICALI" la casella "UTENTE" la procedura attiva il PASSO 11 che permette l'inserimento dei carichi verticali agenti sul sistema.

Premere OK.

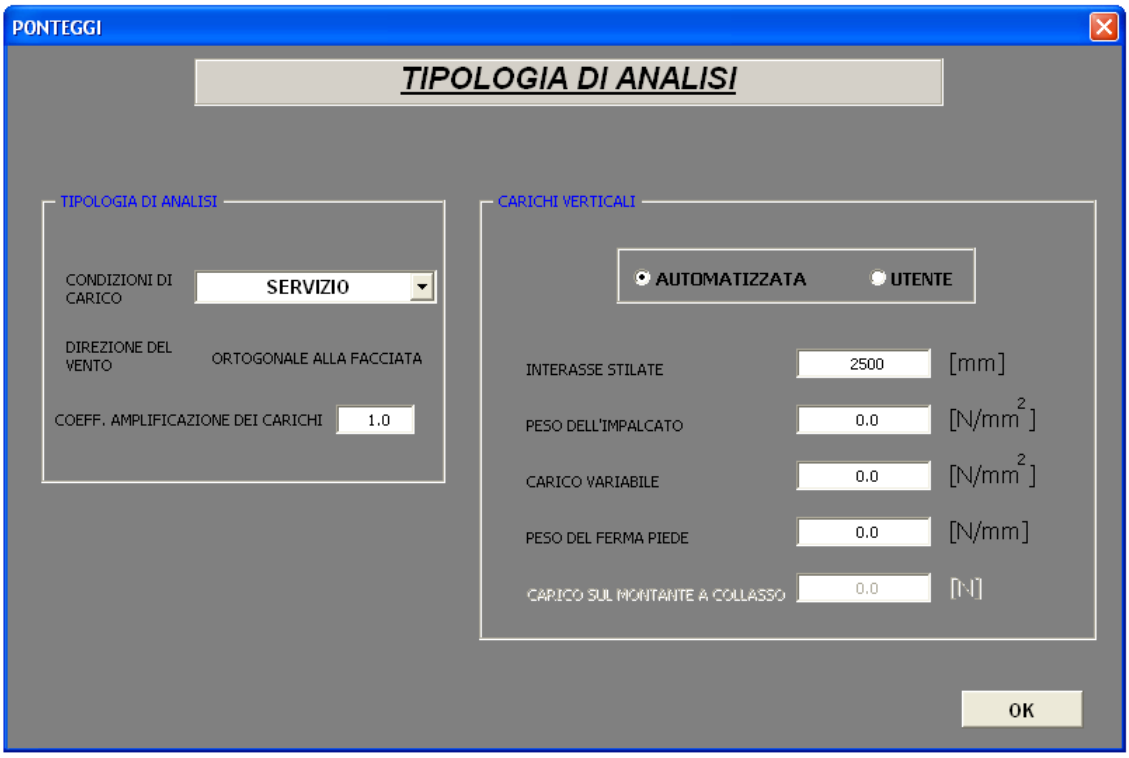


Figura A7.11 – Scelta del tipo di analisi

PASSO 11

Nel caso l'utente al PASSO 10 abbia selezionato dal box "CARICHI VERTICALI" la casella "UTENTE" appaiono in successione le finestre di dialogo presentata nelle figure A7.12 e A7.13 destinate all'attribuzione dei carichi verticali che devono essere applicati ai montanti ai vari livelli.

All'utente in questa fase è richiesto di inserire nelle apposite caselle i valori dei carichi verticali agenti sui montanti distinguendo tra il montante verso l'opera servita (Fig. A7.12), e quello della facciata esterna (Fig. A7.13). Nelle finestre di dialogo delle figure A7.12 e A7.13 sono attivate le sole caselle di attribuzione associate ai livelli dei quali la stilata si compone.

Premere OK

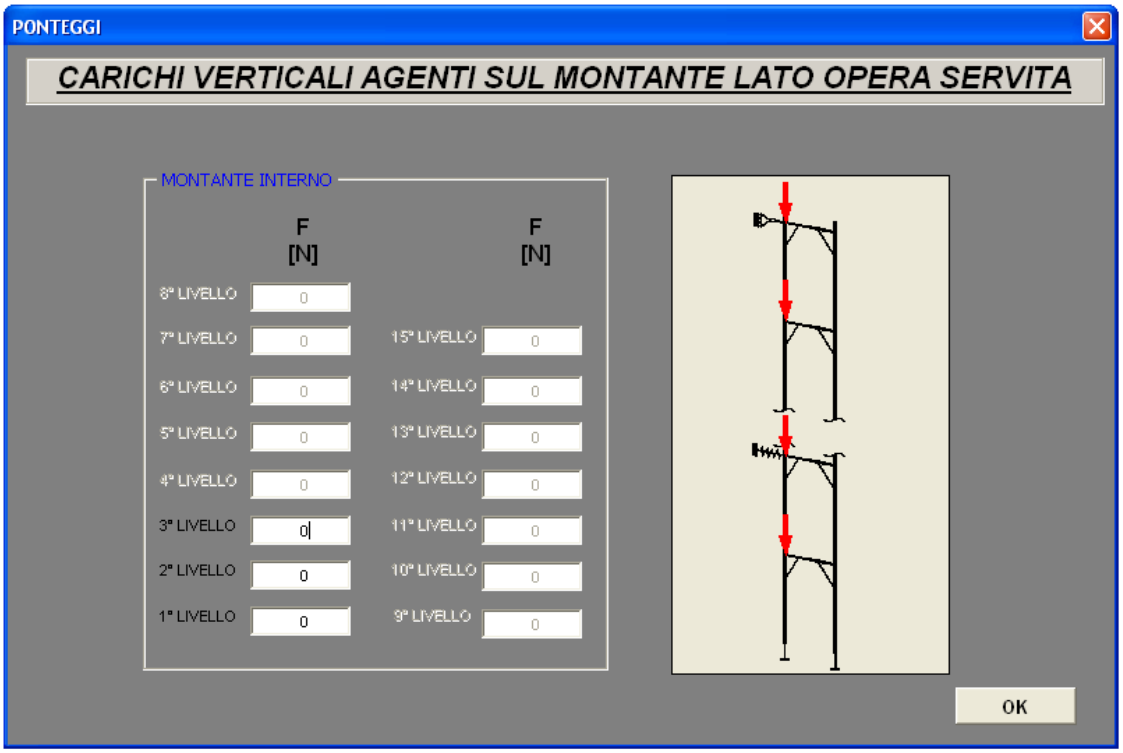


Figura A7.12 – Attribuzione dei carichi verticali

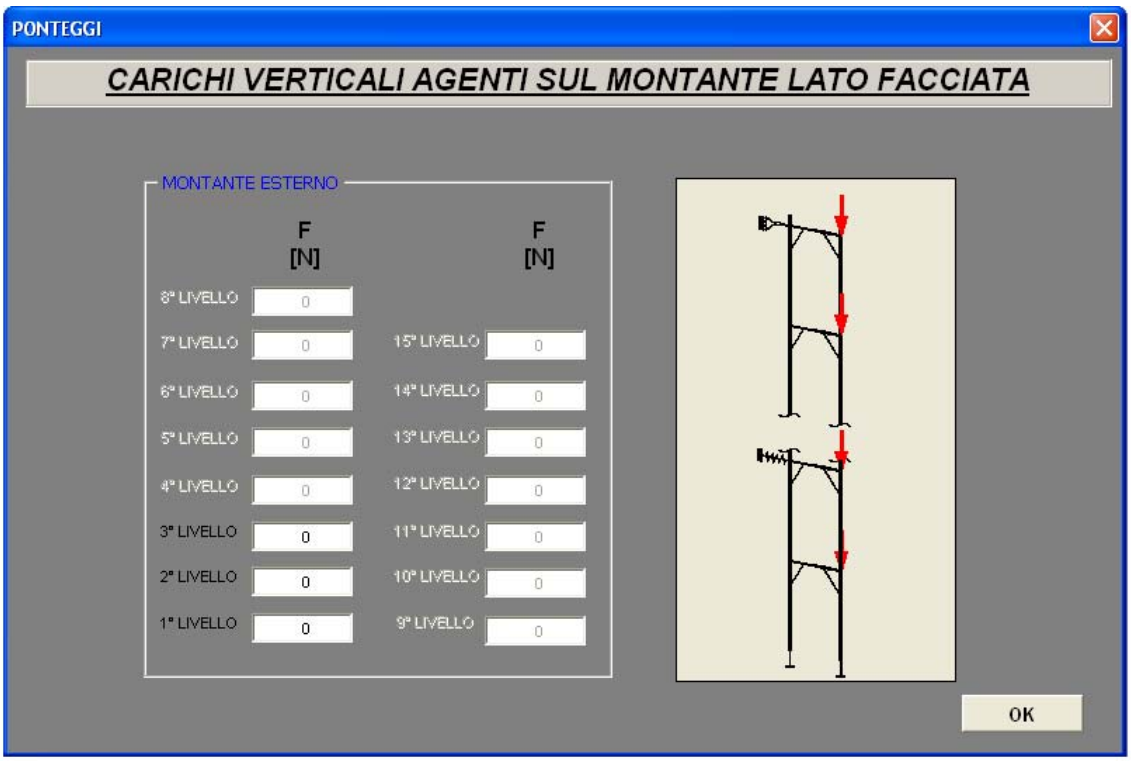


Figura A7.13 – Attribuzione dei carichi verticali

PASSO 12

All'utente appare la finestra di dialogo di figura A7.14 che permette l'attribuzione dei carichi del vento agenti in direzione ortogonale all'opera servita. Nella finestra di dialogo sono attive le sole caselle di attribuzione associate ai livelli dei quali la stilata si compone.

Premere OK

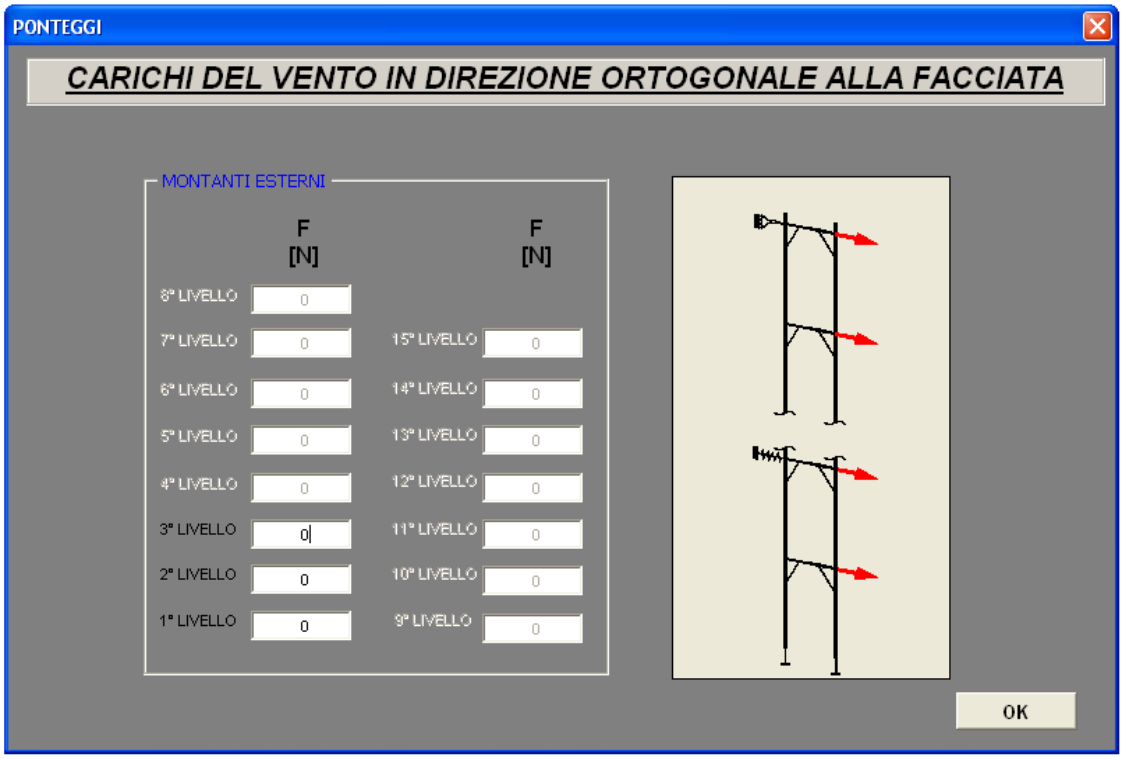


Figura A7.14 – Attribuzione dei carichi dovuti al vento agente in direzione ortogonale all'opera servita

PASSO 13

Il livello1 della procedura ha termine e l'utente visualizza nuovamente il foglio "DATI" (Fig. A7.15). Qualora l'utente debba operare al livello 2, ad esempio per modificare lo schema dei vincoli, o i valori dei carichi per le analisi del secondo ordine, dovrà operare nel rispetto delle indicazioni fornite nella successiva sezione. Se invece ha completato l'inserimento dei dati attraverso l'interfaccia grafica, egli dovrà attivare la macroprocedura agendo sul pulsante di avvio (START). L'output della macroprocedura è il listato del programma necessario per lo svolgimento delle analisi mediante SAP. Il listato è generato su un foglio di lavoro appartenente alla cartella di lavoro nella quale l'utente sta operando. Il foglio è denominato in automatico "TESTO SAP2000 2D". Il foglio di lavoro dovrà essere esportato in formato testo (tipo Unicode denominato "TESTO SAP2000 2D"). Questo file costituisce la fase di preprocessing dei dati scambiati con i codici di calcolo.

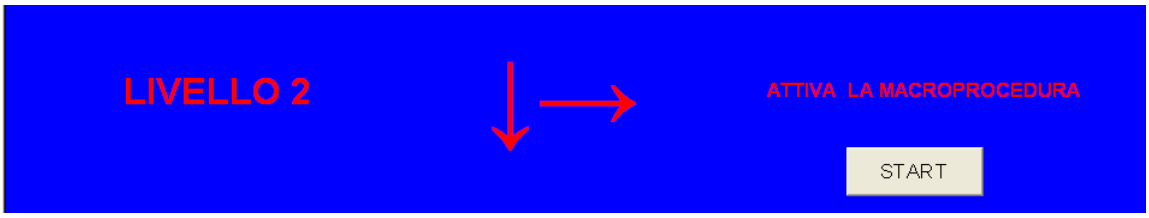


Figura A7.15– Termine procedura al livello di interazione 1

A.7.5 LIVELLO DI OPERATIVITA' 2

Qualora scelga di operare al livello 2, l'utente si trova ad interagire direttamente con il foglio "DATI". Per limitare le possibilità di errori, questo è stato strutturato in sezioni, ciascuna delle quali destinate al trattamento di una specifica categoria di dati. All'interno di ciascuna sezione i dati sono elencati sequenzialmente e chiaramente identificati mediante commenti.
L'utente potrà interagire con il foglio "DATI" modificando il contenuto delle sole celle con sfondo azzurro e scritte blu. Eventuali modifiche apportate ad altre celle potranno tradursi in un malfunzionamento della procedura. Si osserva che ciascuna delle caselle "modificabili" è provvista di commenti che possono essere visionati dall'utente e che forniscono le opzioni (laddove possibili) a supporto di una corretta compilazione del foglio "DATI".

SEZIONE 1

La prima sezione (Fig. A7.16) è dedicata alla modifica dei dati generali del sistema intelaiato già attribuiti al livello 1.

Figura A7.16 – Assegnazione delle caratteristiche generali del ponteggio

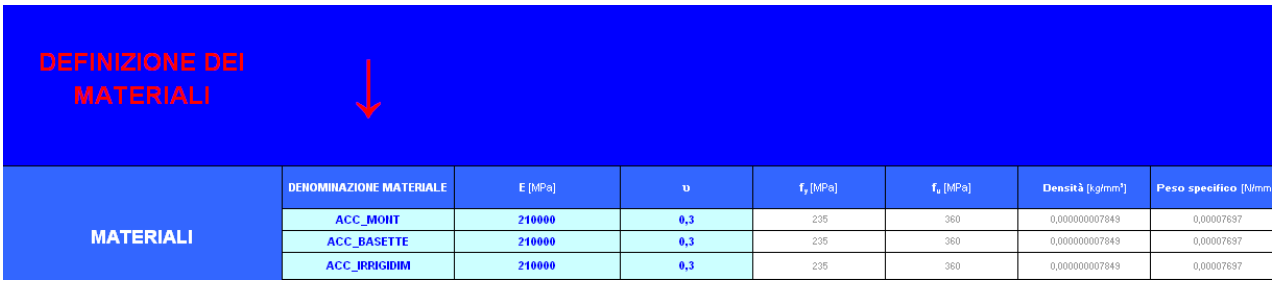
Nell'ordine l'utente può operare su:

- **Titolo:** in questa casella di testo può essere inserita una breve descrizione del problema investigato. Questo titolo entrerà a fare parte del listato di input come commento iniziale e faciliterà il riconoscimento del problema al quale il file è associato. La procedura assegna un titolo di default che può essere modificato dall'utente. Il titolo dovrà essere composto da un numero massimo di caratteri tale da non superare lo spazio a disposizione nella casella di testo predisposta;
- **Nome del ponteggio:** nella cella appare la denominazione assegnata al passo 2 del livello di operatività 1 (Fig. A7.2). La denominazione coincide con la denominazione assegnata al ponteggio nel database. L'utente non può modificare la denominazione qualora intenda proseguire con l'analisi del problema ma può scegliere un ponteggio già contenuto nel database. Ciò significa modificare il problema in analisi;
- **Numero di livelli**: nella cella appare il numero di livelli attribuito dall'utente al livello 1. Agendo su questa casella l'utente può modificare le scelte operate. Il valore attribuito deve essere un numero intero scelto nell'intervallo 3-15;
- **Altezza del telaio prefabbricato**: dimensione espressa in mm che è conservata tale all'interno dell'intero sistema intelaiato. La casella non è attiva in quanto il dato è parte integrante della geometria assegnata al livello di operatività 1;
- **Altezza della basetta** espressa in mm. Agendo su questa casella l'utente può modificare le scelte operate al livello 1 al PASSO 3 del livello 1;
- **Irrigidimento orizzontale:** l'utente può scegliere tra le due opzioni "SI'" oppure "NO" . Nel primo caso si indica che il telaio è dotato di un irrigidimento orizzontale, nel secondo caso il telaio prefabbricato ne è privo. Agendo su questa opzione l'utente può inserire un irrigidimento non considerato al livello 1 nella definizione del telaio o, in alternativa, può rimuoverlo se precedentemente inserito. L'irrigidimento, qualora inserito a questo livello, è posizionato automaticamente dalla macroprocedura a metà altezza tra i nodi 105 (115) e 109 (119) di figura A7.3;
- **Imperfezioni tra telai:** indica l'imperfezione localizzata tra telai sovrapposti che, in assenza di indicazioni più precise, questa può essere assunta in accordo a quanto prescritto dalla norma UNI EN 12811-1:2004 [5] Agendo su questa casella l'utente può modificare le scelte del PASSO 4 del livello 1;
- **Imperfezioni della basetta:** indica l'imperfezione localizzata alla base in caso di basetta estensibile. In assenza di indicazioni più precise, questa può essere assunta in accordo a quanto prescritto dalla norma UNI EN 12811-1:2004 [5] Agendo su questa casella l'utente può modificare le scelte del PASSO 4 del livello 1;

- **Local bow**: definisce l'imperfezione dei montanti rispetto alla condizione di rettilineità. Questa è assunta in accordo a quanto previsto dall'Eurocodice 3 [8] con andamento parabolico con massima "freccia" in corrispondenza della metà altezza dell'elemento. La procedura definisce automaticamente l'imperfezione in funzione della massima "freccia" che deve essere attribuita dall'utente espressa in mm. L'imperfezione locale è implementata sui soli montanti. Agendo su questa casella l'utente può modificare le scelte del PASSO 4 del livello 1;

SEZIONE 2: DEFINIZIONE DEI MATERIALI

La seconda sezione (Fig. A7.17) è dedicata all'inserimento delle proprietà meccaniche dei materiali. Nell'ottica delle analisi elastiche del secondo ordine implementate nella procedura, l'utente può agire esclusivamente sui valori del modulo di elasticità e del coefficiente di Poisson.



DENOMINAZIONE MATERIALE	E [MPa]	υ	f_y [MPa]	f_u [MPa]	Densità [kg/mm³]	Peso specifico [N/mm
ACC_MONT	210000	0,3	235	360	0,000000007849	0,00007697
ACC_BASETTE	210000	0,3	235	360	0,000000007849	0,00007697
ACC_IRRIGIDIM	210000	0,3	235	360	0,000000007849	0,00007697

Figura A7.17- Assegnazione delle proprietà meccaniche del materiale

E' possibile anche modificare la denominazione del materiale associato agli elementi strutturali componenti il ponteggio. Va però precisato che, indipendentemente dalle denominazioni utilizzate, la procedura assegnerà le proprietà del primo materiale dell'elenco a tutti gli elementi del telaio ad eccezione degli irrigidimenti, le proprietà del secondo materiale alle basette, quelle del terzo agli irrigidimenti del telaio.
Il foglio "DATI" è predisposto per l'espansione della procedura anche al caso delle analisi elasto-plastiche del secondo ordine per le quali sarà necessario l'inserimento della tensione di snervamento (f_y) e della tensione ultima (f_u) dei materiali. Le celle al momento non sono attive.
Nelle ultime due colonne di questa sezione sono indicati i valori della densità e del peso specifico. Questi valori, non modificabili dall'utente, sono utilizzati dalla macroprocedura per la determinazione del peso proprio del ponteggio.

SEZIONE 3: DEFINIZIONE DELLE SEZIONI

La terza sezione (Fig. A7.18) è dedicata all'inserimento delle caratteristiche geometriche delle sezioni degli elementi. Per tutti gli elementi si è supposta una sezione tubolare per la cui caratterizzazione è necessario attribuire il diametro esterno e lo spessore del profilo.
Così come visto per i materiali, anche in questo caso è possibile modificare a piacere la denominazione della sezione. Nonostante ciò la macroprocedura in sede di elaborazione dei dati attribuirà le proprietà indicate nella prima riga dell'elenco ai montanti, quella della seconda riga alle basette e quelle della terza riga agli irrigidimenti dei telai.
Accanto alla colonna della denominazione della sezione, nella tabella compare, in celle non attivate, la denominazione del materiale corrispondente al componente, utile ai fini di un controllo delle attribuzioni effettuate. Eventuali errate attribuzioni possono essere modificate agendo sulla SEZIONE 2.

DENOMINAZIONE SEZIONI	MATERIALE	DIAMETRO ESTERNO [mm]	SPESSORE [mm]
MONTANTI	ACC_MONT	48,30	2,90
BASETTE	ACC_BASETTE	38,00	4,00
IRRIGIDIM	ACC_IRRIGIDIM	26,00	2,30

Figura A7.18 – Assegnazione delle proprietà geometriche delle sezioni

SEZIONE 4: SCELTA DEI VINCOLI ELASTICI EQUIVALENTI

In questa sezione può essere assegnata la legge carico-spostamento relativa alla risposta degli impalcati nei piani perpendicolare all'opera servita (Fig. A7.19).

L'utente può modificare la scelta operata al livello 1 agendo sulla casella "VINCOLI ELASTICI EQUIVALENTI". Le possibili opzioni sono "SI" o "NO". Qualora l'utente al livello 1 avesse previsto la presenza dell'impalcato e volesse escludere il loro contributo è sufficiente digitare NO. Questo fa sì che in sede di elaborazioni non vengano generati i vincoli equivalenti all'impalcato benché ad essi siano state attribuite leggi carico-spostamento. Se invece l'utente non avesse considerato gli impalcati al livello 1 e volesse viceversa inserirli, deve digitare SI nella casella "VINCOLI ELASTICI EQUIVALENTI" e deve attribuire le pertinenti leggi carico-spostamento. Questo può essere fatto agendo sulla tabella contenuta nelle righe 72-80 del foglio "DATI" corrispondente al ponteggio che si sta analizzando. Questo foglio di lavoro si trova all'interno della medesima cartella di lavoro entro la quale l'utente sta operando ed è denominato con la "DENOMINAZIONE DEL PONTEGGIO" scelta dall'utente nella sezione 1 (Fig. A7.16 riga 2).

Nelle righe 72-80 del foglio di lavoro associato al ponteggio, compare la tabella presentata in figura A7.20 che permette di inserire la legge carico-spostamento.

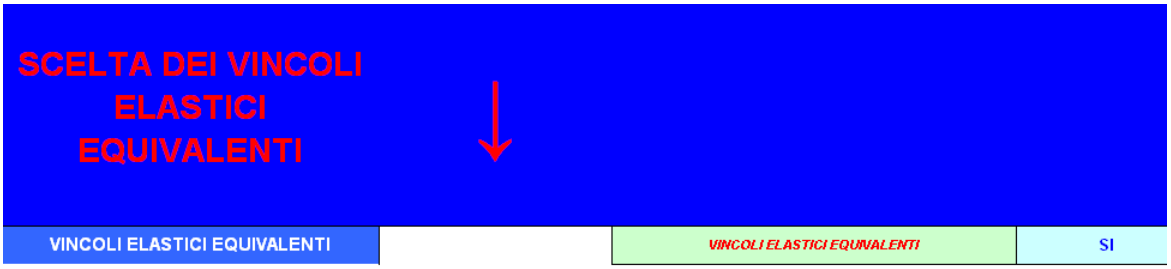


Figura A7.19 – Definizione dei vincoli elastici associati agli impalcati nel piano perpendicolare all'opera servita

Questa deve essere definita mediante 9 punti in modo da rappresentare la risposta per carichi positivi e carichi negativi. I primi quattro punti devono essere identificati mediante valori numerici negativi per quanto riguarda sia il carico sia lo spostamento, il 5° punto deve coincidere con l'origine degli assi mentre i punti tra il 6° ed il 9° devono essere identificati da valori positivi sia dei carichi e sia degli spostamenti. Terminato l'inserimento dei dati, l'utente deve passare nuovamente alla sezione 5 del foglio "DATI".

DEFINIZIONI DELLE LEGGI CARICO-SPOSTAMENTO

Vincoli elastici equivalenti all'impalcato nel piano ortogonale all'opera servita		
	Forza [N]	Spostam. [mm]
1	-1700,000	-80,000
2	-1200,000	-60,000
3	-700,000	-30,000
4	-1,000	-15,000
5	0,000	0,000
6	1,000	10,000
7	800,000	40,000
8	1500,000	50,000
9	2000,000	100,000

Figura A7.20 – Definizione della legge carico-spostamento dei vincoli elastici nel piano perpendicolare all'opera servita

SEZIONE 5: DISPOSIZIONE DEGLI ANCORAGGI E DEI VINCOLI ELASTICI

La sezione 6 è dedicata all'assegnazione della posizione degli ancoraggi all'opera servita e degli eventuali vincoli elastici equivalenti all'impalcato in direzione ortogonale all'opera servita (Fig. A7.21).

In questa sezione l'utente, agendo sulla casella "LUNGHEZZA DEGLI ANCORAGGI", può scegliere se modificare o conservare la scelta attribuita al PASSO 7 del livello 1

Nella casella "DISPOSIZIONE DEGLI ANCORAGGI" compare l'indicazione della scelta operata dall'utente al PASSO 7 del livello operativo 1: l'utente può decidere di modificare o di conservare la sua scelta. Qualora

decida di modificarla, non è sufficiente la semplice modifica della denominazione, ma egli deve operare direttamente sulla tabella denominata “DISPOSIZIONE DEGLI ANCORAGGI E DEI VINCOLI ELASTICI”.
L’utente dovrà inserire nelle celle associate ai vari livelli uno dei seguenti codici:

- 0 qualora nel nodo non voglia inserire alcun vincolo;
- 1 qualora voglia inserire un vincolo all’opera servita;
- 2 qualora voglia inserire un vincolo elastico corrispondente all’impalcato.

Le celle devono comunque sempre contenere un valore numerico tra i tre indicati.
Si fa presente che la procedura è predisposta in modo tale che agli ancoraggi all’opera servita non siano disposti a distanze superiori ai sei livelli. Se erroneamente questa evenienza dovesse accadere, la macroprocedura non genererà correttamente il file di input.
La disposizione degli ancoraggi all’opera servita determina automaticamente la generazione delle imperfezioni nel piano di stilata e di facciata. Riguardo alle modalità secondo le quali queste vengono generate si rimanda al paragrafo 7.1.1.6 della relazione principale.

Figura A7.21 – Definizione dei vincoli all’opera servita e dei vincoli elastici

SEZIONE 6: DEFINIZIONE DEI CARICHI

Questa sezione è dedicata alla definizione dei carichi e del tipo di analisi (Fig. A7.22). Nella prime celle non attivate della tabella all’utente è presentato un riepilogo delle scelte operate al livello 1.
L’utente può apportare delle modifiche aggiornando manualmente le tabelle riguardanti i carichi applicati al ponteggio. Queste risultano infatti compilate nel rispetto delle scelte operate al livello 1. Qualora l’utente non introducesse alcuna modifica, l’analisi sarà svolta nel rispetto delle indicazioni della tabella.
Il coefficiente di amplificazione dei carichi può essere invece modificato. Il nuovo valore è utilizzato dalla macroprocedura per amplificare tutti i carichi sia verticali sia orizzontali utilizzati in sede di analisi.
Si precisa che il coefficiente di amplificazione non è considerato nel caso in cui si eseguano analisi del secondo ordine elastico a collasso.
Per attribuire i carichi l’utente dovrà “compilare” le tabelle appositamente predisposte relative ai carichi (Fig. A7.23 e Fig. A7.25).
La tabella di figura A7.23 consente di attribuire i carichi verticali. E’ bene precisare che la tabella considera il massimo numero di livello ammessi dalla procedura (15). Le celle dovranno essere compilate limitatamente

al numero di livello effettivamente presenti nella stilata. Qualora i carichi fossero disposti a livelli superiori rispetto al livello massimo della stilata, questi non saranno considerati in sede di analisi.

ATTRIBUZIONE DEI CARICHI	AUTOMATIZZATA
TIPOLOGIA DI ANALISI	SERVIZIO
DIREZIONE DEL VENTO RISPETTO ALLA FACCIATA	ORTOGONALE
CARICO ACCIDENTALE [N/mm²]	0,00000
CARICO DEL TAVOLATO [N/mm²]	0,00000
CARICO FERMAPIEDE E PROTEZIONI [N/mm]	0,00000
CARICO DI COLLASSO PER MONTANTE [N]	0
COEF. AMPLIFICAZIONE CARICHI	1,0

Figura A7.22 – Definizione dei carichi

CARICHI VERTICALI		
LIVELLI	MONTANTE LATO OPERA SERVITA	MONTANTE ESTERNO
	[N]	[N]
15° Livello	0,00	0,00
14° Livello	0,00	0,00
13° Livello	0,00	0,00
12° Livello	0,00	0,00
11° Livello	0,00	0,00
10° Livello	0,00	0,00
9° Livello	0,00	0,00
8° Livello	0,00	0,00
7° Livello	0,00	0,00
6° Livello	0,00	0,00
5° Livello	0,00	0,00
4° Livello	0,00	0,00
3° Livello	0,00	0,00
2° Livello	0,00	0,00
1° Livello	0,00	0,00

Figura A7.23 – Attribuzione dei carichi verticali

Qualora l'utente al PASSO 10 avesse scelto di attivare una analisi elastica del secondo ordine a collasso la macroprocedura aplica automaticamente all'estremo superiore dei montanti dei carichi verticali di valore pari a quello assegnato nella cella "CARICO PER MONTANTE A COLLASSO" (Fig. A7.11) (Fig. 3.20). Qualora l'utente volesse modificare tale valore dovrà provvedere all'inserimento manuale dei nuovi valori dei carichi. Resta inteso che agendo su questa tabella possono essere inseriti carichi verticali ai montanti in corrispondenza di qualsivoglia livello di carico. La figura A7.24 chiarisce le denominazioni utilizzate nella tabella relativa all'attribuzione dei carichi verticali.
In modo analogo ai carichi verticali, la tabella di figura A7.25 consente l'inserimento/aggiornamento dei carichi orizzontali dovuti al vento.
I criteri secondo cui i carichi sono applicati sono indicati nella figura A7.26.

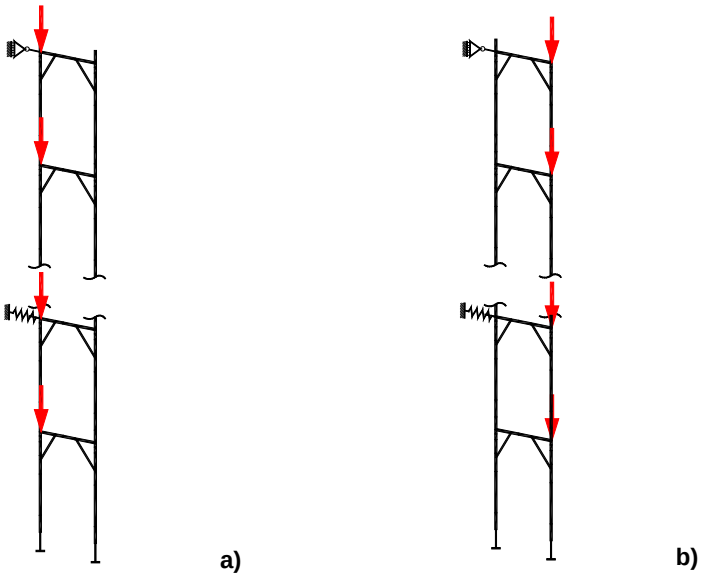


Figura A7.24 – Carichi verticali agenti sulla stilata: a) montante lato opera servita; b) montante esterno

CARICHI DA VENTO ORIZZONTALI ALLA FACCIATA	
LIVELLI	MONTANTE ESTERNO [N]
15° Livello	0,00
14° Livello	0,00
13° Livello	0,00
12° Livello	0,00
11° Livello	0,00
10° Livello	0,00
9° Livello	0,00
8° Livello	0,00
7° Livello	0,00
6° Livello	0,00
5° Livello	0,00
4° Livello	0,00
3° Livello	0,00
2° Livello	0,00
1° Livello	0,00

Figura A7.25 – Attribuzione dei carichi orizzontali

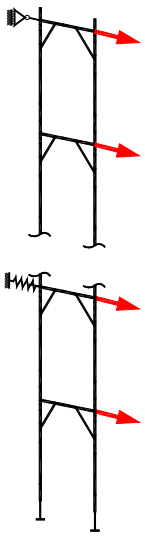


Figura A7.26 – Carichi orizzontali ortogonali alla facciata

SEZIONE 7: FINE INPUT DATI

L'utente dopo aver completato l'inserimento dei dati può attivare la macroprocedura attivando il pulsante "START" (Fig. A7.27). L'output della macroprocedura è il listato del programma necessario per lo svolgimento delle analisi mediante SAP. Il listato è generato su un foglio di lavoro appartenente alla cartella di lavoro nella quale l'utente sta operando. Il foglio è denominato in automatico "TESTO SAP2000 2D". Il foglio di lavoro dovrà essere esportato informato testo (tipo Unicode denominato "TESTO SAP2000 2D"). Questo file costituisce la fase di preprocessing dei dati scambiati con i codici di calcolo.

Figura A7.27 – Comando di attivazione della macroprocedura

B1-5/DTS/05

I ponteggi metallici di facciata utilizzati nei cantieri temporanei o mobili.
Le nuove norme di prodotto: aspetti tecnici e legislativi

Relazione finale – Allegato 8

Autori: N. Baldassino, R. Zandonini

Affiliazione: Università degli Studi di Trento
Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale

Ricerca finanziata da:

Dipartimento Tecnologie di Sicurezza

10/02/2009

INTRODUZIONE

In questo allegato sono raccolti i valori dei carichi utilizzati per lo svolgimento delle analisi comparative tra i codici di calcolo SAP e ANSYS, ed i dettagli relativi alle analisi numeriche 3D.
Il documento è diviso in tre parti, ciascuna delle quali relativa ad una delle tipologie di ponteggio analizzate, nell'ordine Cs, Cb e D. La struttura è la medesima per ciascuna delle tre parti. In ciascuna di esse, nell'ordine, sono raccolti:

- i valori dei carichi variabili verticali ed orizzontali associati alle condizioni di servizio per i modelli 3D (Tab. A8.1 e A8.2 per il ponteggio Cs, Tab. A8.14 e A8.15 per il ponteggio Cb e Tab. A8.27 e A8.28 per il ponteggio D);
- i valori dei carichi variabili verticali ed orizzontali associati alle condizioni di fuori servizio per i modelli 3D (Tab. A8.3 e A8.4 per il ponteggio Cs, Tab. A8.16 e A8.17 per il ponteggio Cb e Tab. A8.29 e A8.30 per il ponteggio D);
- i valori dei carichi variabili verticali ed orizzontali associati alle condizioni di servizio per i modelli 2D (Tab. A8.5 e A8.6 per il ponteggio Cs, Tab. A8.18 e A8.19 per il ponteggio Cb e Tab. A8.31 e A8.32 per il ponteggio D);
- i valori dei carichi variabili verticali ed orizzontali associati alle condizioni di fuori servizio per i modelli 2D (Tab. A8.7 e A8.8 per il ponteggio Cs, Tab. A8 20 e A8.21 per il ponteggio Cb e Tab. A8.33 e A8.34 per il ponteggio D);
- le azioni agenti alla base dei montanti determinati mediante le analisi sui modelli 3D (Tab. A8.9-A8.13 per il ponteggio Cs, A8.22-A8.26 per il ponteggio Cb ed infine Tab. A8.35-A8.39 per il ponteggio D).

PONTEGGIO Cs

DETTAGLIO CARICHI PER ANALISI 3D

Tabella A8.1 – Ponteggio Cs: carichi verticali variabili per condizioni di servizio

Carichi verticali – condizioni di servizio – ponteggio Cs				
Livello	Stilate esterne		Stilate interne	
	Montanti lato opera servita [N]	Montanti facciata esterna [N]	Montanti lato opera servita [N]	Montanti facciata esterna [N]
12°	2100,00	2124,75	4200,00	4249,50
11°	1115,63	1140,38	2231,25	2280,75
10° - 1°	131,25	156,00	262,50	312,00

Tabella A8.2 – Ponteggio Cs: carichi orizzontali per condizioni di servizio

Carichi orizzontali – condizioni di servizio – ponteggio Cs			
Livello	Carico ortogonale alla facciata		Carico parallelo alla facciata
	Montanti esterni [N]	Montanti interni [N]	Montanti di bordo [N]
12°	243,86	487,72	587,65
11°	243,86	487,72	587,65
10° - 1°	158,93	317,86	505,75

Tabella A8.3 – Ponteggio Cs: carichi verticali variabili per condizioni di fuori servizio

Carichi verticali – condizioni di fuori servizio – ponteggio Cs				
Livello	Stilate esterne		Stilate interne	
	Montanti lato opera servita [N]	Montanti facciata esterna [N]	Montanti lato opera servita [N]	Montanti facciata esterna [N]
12°	1115,63	1140,38	2231,25	2280,75
11°-1°	131,25	156,00	262,50	312,00

Tabella A8.4 – Ponteggio Cs: carichi orizzontali per condizioni di fuori servizio

Carichi orizzontali – condizioni di fuori servizio – ponteggio Cs			
Livello	Carico ortogonale alla facciata		Carico parallelo alla facciata
	Montanti esterni [N]	Montanti interni [N]	Montanti di bordo [N]
12°	982,97	1965,94	1435,85
11°	960,63	1921,26	1403,22
10°	847,70	1695,39	1327,59
9°	827,51	1655,03	1295,98
8°	807,33	1614,66	1264,37
7°	787,15	1574,29	1232,76
6°	766,96	1533,93	1201,15
5°	746,78	1493,56	1169,54
4°	726,60	1453,19	1137,93
3°	706,41	1412,83	1106,33
2°	686,23	1372,46	1074,72
1°	666,05	1332,10	1043,11

DETTAGLIO CARICHI PER ANALISI 2D DI STILATA

Tabella A8.5 – Ponteggio Cs: carichi verticali variabili per condizioni di servizio

Carichi verticali – condizioni di servizio – ponteggio Cs		
Livello	Stilate esterne	
	Montanti lato opera servita [N]	Montanti facciata esterna [N]
12°	4200,00	4249,50
11°	2231,25	2280,75
10° - 1°	262,50	312,00

Tabella A8.6 – Ponteggio Cs: carichi orizzontali per condizioni di servizio

Carichi orizzontali – condizioni di servizio – ponteggio Cs	
Livello	Carichi ortogonali alla facciata [N]
12°	487,72
11°	487,72
10° - 1°	317,86

Tabella A8.7 – Ponteggio Cs: carichi verticali per condizioni di fuori servizio

Carichi verticali – condizioni di fuori servizio – ponteggio Cs		
Livello	Stilate esterne	
	Montanti lato opera servita [N]	Montanti facciata esterna [N]
12°	2231,25	2280,75
11° - 1°	262,50	312,00

Tabella A8.8 – Ponteggio Cs: carichi orizzontali per condizioni di fuori servizio

Carichi orizzontali – condizioni di fuori servizio – ponteggio Cs	
Livello	Carichi ortogonali alla facciata [N]
12°	1965,94
11°	1921,26
10°	1695,39
9°	1655,03
8°	1614,66
7°	1574,29
6°	1533,93
5°	1493,56
4°	1453,19
3°	1412,83
2°	1372,46
1°	1965,94

Tabella A8.9 – Ponteggio Cs: analisi del secondo ordine a collasso

Stilata n.	Reazione [kN]					
	ANSYS			SAP		
	Montante interno	Montante esterno	Stilata	Montante interno	Montante esterno	Stilata
1 Tipo A	47,140	35,952	83,092	25,599 (-45,70%)	45,256 (25,88%)	70,855 (-14,73%)
2 Tipo B	37,810	32,769	70,579	32,237 (-14,74%)	27,750 (-15,31%)	59,988 (-15,01%)
3 Tipo A	47,802	40,706	88,508	34,931 (-26,92%)	37,553 (-7,75%)	72,484 (-18,10%)
4 Tipo B	37,906	33,219	71,125	32,976 (-13,01%)	28,069 (-15,50%)	61,044 (-14,17%)
5 Tipo A	47,605	41,812	89,417	33,499 (-29,63%)	37,890 (-9,38%)	71,389 (-20,16%)
390.9066 Tipo B	35,818	28,639	64,457	25,995 (-27,42%)	29,150 (1,79%)	55,145 (-14,45%)
Totale facciata	254,081	213,097	-	185,237 (-27,10%	205,669 (-3,49%)	-
Totale ponteggio		467,178			390,906 (-16,33%)	

Tabella A8.10 – Ponteggio Cs: analisi con carichi di servizio – vento ortogonale alla facciata

Stilata n.	Reazione [kN]					
	ANSYS			SAP		
	Montante interno	Montante esterno	Stilata	Montante interno	Montante esterno	Stilata
1 Tipo A	9,240	11,108	20,348	9,977 (7,98%)	12,218 (9,99%)	22,195 (9,08%)
2 Tipo B	18,537	12,849	31,386	20,215 (9,05%)	10,031 (-21,93%)	30,246 (-3,63%)
3 Tipo A	16,209	17,712	33,921	16,850 (3,95%)	17,931 (1,24%)	34,781 (2,54%)
4 Tipo B	19,226	13,779	33,005	20,937 (8,90%)	11,122 (-19,29%)	32,058 (-2,87%)
5 Tipo A	15,545	16,849	32,394	16,110 (3,63%)	16,563 (-1,70%)	32,673 (0,86%)
6 Tipo B	11,382	9,999	21,381	12,308 (8,14%)	9,009 (-9,90%)	21,317 (-0,30%)
Totale facciata	90,139	82,296	-	96,397 (6,94%)	76,874 (-6,59%)	-
Totale ponteggio		172,435			173,271 (0,49%)	

Tabella A8.11 – Ponteggio Cs: analisi con carichi di servizio – vento parallelo alla facciata

Stilata n.	Reazione [kN]					
	ANSYS			SAP		
	Montante interno	Montante esterno	Stilata	Montante interno	Montante esterno	Stilata
1 Tipo A	9,787	8,974	18,761	10,170 (3,92%)	9,396 (4,70%)	19,566 (4,29%)
2 Tipo B	17,466	14,803	32,269	18,804 (7,66%)	12,987 (-12,27%)	31,791 (-1,48%)
3 Tipo A	17,526	16,181	33,707	18,338 (4,63%)	15,567 (-3,80%)	33,905 (0,59%)
4 Tipo B	18,039	15,751	33,790	19,421 (7,66%)	14,000 (-11,12%)	33,421 (-1,09%)
5 Tipo A	17,134	15,497	32,631	17,951 (4,77%)	14,722 (-5,00%)	32,673 (0,13%)
6 Tipo B	10,385	11,324	21,709	11,466 (10,41%)	10,450 (-7,72%)	21,916 (0,95%)
Totale facciata	90,337	82,530	-	96,150 (6,43%)	77,121 (-6,55%)	-
Totale ponteggio		172,867			173,271 (0,23%)	

Tabella A8.12 – Ponteggio Cs: analisi con carichi di fuori servizio – vento ortogonale alla facciata

Stilata n.	Reazione [kN]					
	ANSYS			**SAP**		
	Montante interno	Montante esterno	Stilata	Montante interno	Montante esterno	Stilata
1 Tipo A	4,768	10,000	14,768	5,117 (7,33%)	10,664 (6,64%)	15,781 (6,86%)
2 Tipo B	13,219	5,808	19,027	14,466 (9,43%)	5,164 (-11,10%)	19,630 (3,17%)
3 Tipo A	8,516	14,212	22,728	8,785 (3,16%)	13,762 (-3,17%)	22,547 (-0,79%)
4 Tipo B	14,013	6,925	20,938	15,287 (9,09%)	5,422 (-21,70%)	20,709 (-1,10%)
5 Tipo A	7,712	13,356	21,068	8,073 (4,68%)	12,617 (-5,53%)	20,690 (-1,79%)
6 Tipo B	9,403	5,933	15,336	9,513 (1,17%)	5,338 (-10,02%)	14,852 (-3,16%)
Totale facciata	57,631	56,234	-	61,242 (6,26%)	52,967 (-5,81%)	-
Totale ponteggio		113,865			114,209 (0,30%)	

Tabella A8.13 – Ponteggio Cs: analisi con carichi di fuori servizio – vento parallelo alla facciata

Stilata n.	Reazione [kN]					
	ANSYS			SAP		
	Montante interno	Montante esterno	Stilata	Montante interno	Montante esterno	Stilata
1 Tipo A	6,572	4,728	11,300	6,473 (-1,51%)	5,106 (7,99%)	11,578 (2,46%)
2 Tipo B	11,299	9,384	20,683	11,990 (6,12%)	8,870 (-5,48%)	20,860 (0,85%)
3 Tipo A	11,527	10,549	22,076	11,825 (2,58%)	10,166 (-3,63%)	21,990 (-0,39%)
4 Tipo B	11,820	10,464	22,284	12,392 (4,84%)	9,760 (-6,73%)	22,152 (-0,59%)
5 Tipo A	11,340	10,257	21,597	11,751 (3,63%)	9,957 (-2,93%)	21,708 (0,51%)
6 Tipo B	7,113	8,955	16,068	7,910 (11,20%)	8,011 (-10,54%)	15,921 (-0,91%)
Totale facciata	59,671	54,337	-	62,340 (4,47%)	51,869 (-4,54%)	-
Totale ponteggio		114,008			114,209 (0,18%)	

PONTEGGIO Cb

DETTAGLIO CARICHI PER ANALISI 3D

Tabella A8.14 – Ponteggio Cb: carichi verticali variabili per condizioni di servizio

Carichi verticali – condizioni di servizio – ponteggio Cb				
Livello	Stilate esterne		Stilate interne	
	Montanti lato opera servita [N]	Montanti facciata esterna [N]	Montanti lato opera servita [N]	Montanti facciata esterna [N]
12°	2100,00	2124,75	4200,00	4249,50
11°	1115,63	1140,38	2231,25	2280,75
10° - 1°	131,25	156,00	262,50	312,00

Tabella A8.15 – Ponteggio Cb: carichi orizzontali per condizioni di servizio

Carichi orizzontali – condizioni di servizio – ponteggio Cb			
Livello	Carico ortogonale alla facciata		Carico parallelo alla facciata
	Montanti esterni [N]	Montanti interni [N]	Montanti di bordo [N]
12°	243,86	487,72	587,65
11°	243,86	487,72	587,65
10° - 1°	158,93	317,86	505,75

Tabella A8.16 – Ponteggio Cb: carichi verticali variabili per condizioni di fuori servizio

Carichi verticali – condizioni di fuori servizio – ponteggio Cb				
Livello	Stilate esterne		Stilate interne	
	Montanti lato opera servita [N]	Montanti facciata esterna [N]	Montanti lato opera servita [N]	Montanti facciata esterna [N]
12°	1115,63	1140,38	2231,25	2280,75
11°-1°	131,25	156,00	262,50	312,00

Tabella A8.17 – Ponteggio Cb: carichi orizzontali per condizioni di fuori servizio

Carichi orizzontali – condizioni di fuori servizio – ponteggio Cb			
Livello	Carico ortogonale alla facciata		Carico parallelo alla facciata
	Montanti esterni [N]	Montanti interni [N]	Montanti di bordo [N]
12°	982,97	1965,94	1435,85
11°	960,63	1921,26	1403,22
10°	847,70	1695,39	1327,59
9°	827,51	1655,03	1295,98
8°	807,33	1614,66	1264,37
7°	787,15	1574,29	1232,76
6°	766,96	1533,93	1201,15
5°	746,78	1493,56	1169,54
4°	726,60	1453,19	1137,93
3°	706,41	1412,83	1106,33
2°	686,23	1372,46	1074,72
1°	666,05	1332,10	1043,11

DETTAGLIO CARICHI PER ANALISI 2D

Tabella A8.18 – Ponteggio Cb: carichi verticali variabili per condizioni di servizio

Carichi verticali – condizioni di servizio – ponteggio Cb		
Livello	Stilate esterne	
	Montanti lato opera servita [N]	Montanti facciata esterna [N]
12°	4200,00	4249,50
11°	2231,25	2280,75
10° - 1°	262,50	312,00

Tabella A8.19 – Ponteggio Cb: carichi orizzontali per condizioni di servizio

Carichi orizzontali – condizioni di servizio – ponteggio Cb	
Livello	Carichi ortogonali alla facciata [N]
12°	487,72
11°	487,72
10° - 1°	317,86

Tabella A8.20 – Ponteggio Cb: carichi verticali per condizioni di fuori servizio

Carichi verticali – condizioni di fuori servizio – ponteggio Cb		
Livello	Stilate esterne	
	Montanti lato opera servita [N]	Montanti facciata esterna [N]
12°	2231,25	2280,75
11° - 1°	262,50	312,00

Tabella A8.21 – Ponteggio Cb: carichi orizzontali per condizioni di fuori servizio

Carichi orizzontali – condizioni di fuori servizio – ponteggio Cb	
Livello	Carichi ortogonali alla facciata [N]
12°	1965,94
11°	1921,26
10°	1695,39
9°	1655,03
8°	1614,66
7°	1574,29
6°	1533,93
5°	1493,56
4°	1453,19
3°	1412,83
2°	1372,46
1°	1965,94

DETTAGLIO DELLE ANALISI 3D

Tabella A8.22 – Ponteggio Cb: analisi del secondo ordine a collasso

Stilata n.	Reazione [kN]					
	ANSYS			**SAP**		
	Montante interno	Montante esterno	Stilata	Montante interno	Montante esterno	Stilata
1 Tipo A	47,374	36,003	83,377	24,829 (-47,59%)	45,108 (25,29%)	69,937 (-16,12%)
2 Tipo B	37,563	32,872	70,435	30,577 (-18,60%)	28,052 (-14,66%)	58,629 (-16,76%)
3 Tipo A	47,793	42,016	89,809	33,686 (-29,52%)	39,025 (-7,12%)	72,711 (-19,04%)
4 Tipo B	37,862	33,109	70,971	31,097 (-17,87%)	28,694 (-13,33%)	59,791 (-15,75%)
5 Tipo A	47,888	43,872	91,760	31,984 (-33,21%)	39,748 (-9,40%)	71,732 (-21,83%)
6 Tipo B	36,430	28,340	64,770	24,005 (-34,11%)	31,796 (12,19%)	55,800 (-13,85%)
Totale facciata	254,910	216,212	-	176,177 (-30,89%)	212,422 (-1,75%)	-
Totale ponteggio		471,122			388,599 (-17,52%)	

Tabella A8.23 – Ponteggio Cb: analisi con carichi di servizio – vento ortogonale alla facciata

Stilata n.	Reazione [kN]					
	ANSYS			**SAP**		
	Montante interno	Montante esterno	Stilata	Montante interno	Montante esterno	Stilata
1 Tipo A	9,319	11,605	20,924	9,984 (7,14%)	13,036 (12,33%)	23,020 (10,02%)
2 Tipo B	18,288	12,803	31,091	20,194 (10,42%)	9,453 (-26,17%)	29,647 (-4,64%)
3 Tipo A	15,968	17,862	33,830	16,732 (4,78%)	18.702 (4,70%)	35,433 (4,74%)
4 Tipo B	19,000	13,937	32,937	20,946 (10,24%)	10,663 (-23,49%)	31,608 (-4,03%)
5 Tipo A	15,272	16,825	32,097	15,907 (4,16%)	17,038 (1,27%)	32,945 (2,64%)
6 Tipo B	11,383	10,461	21,844	11,987 (5,31%)	8,558 (-18,19%)	20,545 (-5,95%)
Totale facciata	89,230	83,493	-	95,749 (7,31%)	77,449 (-7,24%)	-
Totale ponteggio		172,723			173,198 (0,28%)	

Tabella A8.24 – Ponteggio Cb: analisi con carichi di servizio – vento parallelo alla facciata

Stilata n.	Reazione [kN]					
	ANSYS			**SAP**		
	Montante interno	Montante esterno	Stilata	Montante interno	Montante esterno	Stilata
1 Tipo A	9,734	8,816	18,550	10,245 (5,25%)	9,306 (5,56%)	19,551 (5,39%)
2 Tipo B	17,244	14,661	31,905	18,880 (9,49%)	12,566 (-14,29%)	31,446 (-1,44%)
3 Tipo A	17,398	16,159	33,557	18,508 (6,38%)	15,622 (-3,32%)	34,130 (1,71%)
4 Tipo B	17,856	15,851	33,707	19,536 (9,41%)	13,646 (-13,91%)	33,182 (-1,56%)
5 Tipo A	17,033	15,450	32,483	18,117 (6,36%)	14,704 (-4.83%)	32,821 (1,04%)
6 Tipo B	10,594	12,337	22,931	11,594 (9,44%)	10,474 (-15,10%)	22,068 (-3,76%)
Totale facciata	89,859	83,274	-	96,880 (7,81%)	76,319 (-8.35%)	-
Totale ponteggio		173,133			173,198 (0,04%)	

Tabella A8.25 – Ponteggio Cb: analisi con carichi di fuori servizio – vento ortogonale alla facciata

Stilata n.	Reazione [kN]					
	ANSYS			**SAP**		
	Montante interno	Montante esterno	Stilata	Montante interno	Montante esterno	Stilata
1 Tipo A	4,881	10,544	15,425	5,249 (7,54%)	11,787 (11,79%)	17,037 (10,45%)
2 Tipo B	13,012	5,471	18,483	13,433 (3,24%)	5,448 (-0,42%)	18,882 (2,16%)
3 Tipo A	8,386	14,458	22,844	8,768 (4,56%)	12,649 (-12,51%)	21,417 (-6,25%)
4 Tipo B	13,855	6,784	20,639	15,280 (10,28%)	5,794 (-14,59%)	21,074 (2,11%)
5 Tipo A	7,490	13,414	20,904	7,883 (5,24%)	14,099 (5,11%)	21,982 (5,16%)
6 Tipo B	9,496	6,399	15,895	9,188 (-3,25%)	4,558 (-28,78%)	13,745 (-13,53%)
Totale facciata	57,120	57,070	-	59,800 (4,69%)	54,336 (-4,79%)	-
Totale ponteggio		114,190			114,136 (-0,05%)	

Tabella A8.26 – Ponteggio Cb: analisi con carichi di fuori servizio – vento parallelo alla facciata

Stilata n.	Reazione [kN]					
	ANSYS			**SAP**		
	Montante interno	Montante esterno	Stilata	Montante interno	Montante esterno	Stilata
1 Tipo A	6,422	3,947	10,369	8,194 (27,59%)	6,017 (52,44%)	14,210 (37,05%)
2 Tipo B	11,301	9,203	20,504	12,079 (6,88%)	9,666 (5,03%)	21,745 (6,05%)
3 Tipo A	11,510	10,305	21,815	12,486 (8,48%)	9,503 (-7,78%)	21,990 (0,80%)
4 Tipo B	11,821	10,339	22,160	12,161 (2,87%)	9,893 (-4,31%)	22,054 (-0,48%)
5 Tipo A	11,388	10,167	21,555	12,084 (6,11%)	8.683 (-14.60%)	20,767 (-3,66%)
6 Tipo B	7,489	10,302	17,791	6,658 (-11,10%)	6,712 (-34,85%)	13,370 (-24,85%)
Totale facciata	59,931	54,263	-	63,661 (6,22%)	50,475 (-6,98%)	-
Totale ponteggio		114,194			114,136 (-0,05%)	

PONTEGGIO D

DETTAGLIO CARICHI PER ANALISI 3D

Tabella A8.27 – Ponteggio D: carichi verticali variabili per condizioni di servizio

Carichi verticali – condizioni di servizio – ponteggio D				
Livello	Stilate esterne		Stilate interne	
	Montanti lato opera servita [N]	Montanti facciata esterna [N]	Montanti lato opera servita [N]	Montanti facciata esterna [N]
12°	2096,00	2120,70	4192,00	4241,41
11°	1113,50	1138,20	2227,00	2276,41
10° - 1°	131,00	155,70	262,00	311,41

Tabella A8.28 – Ponteggio D: carichi orizzontali per condizioni di servizio

Carichi orizzontali – condizioni di servizio – ponteggio D			
Livello	Carico ortogonale alla facciata		Carico parallelo alla facciata
	Montanti esterni [N]	Montanti interni [N]	Montanti di bordo [N]
12°	243,86	487,72	587,65
11°	243,86	487,72	587,65
10° - 1°	158,93	317,86	505,75

Tabella A8.29 – Ponteggio D: carichi verticali variabili per condizioni di fuori servizio

Carichi verticali – condizioni di fuori servizio – ponteggio D				
Livello	Stilate esterne		Stilate interne	
	Montanti lato opera servita [N]	Montanti facciata esterna [N]	Montanti lato opera servita [N]	Montanti facciata esterna [N]
12°	1113,50	1138,20	2227,00	2276,41
11° - 1°	131,00	155,70	262,00	311,41

Tabella A8.30 – Ponteggio D: carichi orizzontali per condizioni di fuori servizio

Carichi orizzontali – condizioni di fuori servizio – ponteggio D			
Livello	Carico ortogonale alla facciata		Carico parallelo alla facciata
	Montanti esterni [N]	Montanti interni [N]	Montanti di bordo [N]
12°	982,97	1965,94	1435,85
11°	960,63	1921,26	1403,22
10°	847,70	1695,39	1327,59
9°	827,51	1655,03	1295,98
8°	807,33	1614,66	1264,37
7°	787,15	1574,29	1232,76
6°	766,96	1533,93	1201,15
5°	746,78	1493,56	1169,54
4°	726,60	1453,19	1137,93
3°	706,41	1412,83	1106,33
2°	686,23	1372,46	1074,72
1°	666,05	1332,10	1043,11

DETTAGLIO CARICHI PER ANALISI 2D

Tabella A8.31 – Ponteggio D: carichi verticali variabili per condizioni di servizio

Carichi verticali – condizioni di servizio – ponteggio D		
Livello	Stilate esterne	
	Montanti lato opera servita [N]	Montanti facciata esterna [N]
12°	4192,00	4241,41
11°	2227,00	2276,41
10° - 1°	262,00	311,41

Tabella A8.32 – Ponteggio D: carichi orizzontali per condizioni di servizio

Carichi orizzontali – condizioni di servizio – Ponteggio D	
Livello	Carichi ortogonali alla facciata [N]
12°	487,72
11°	487,72
10° - 1°	317,86

Tabella A8.33 – Ponteggio D: carichi verticali per condizioni di fuori servizio

Carichi verticali – condizioni di fuori servizio – ponteggio D		
Livello	Stilate esterne	
	Montanti lato opera servita [N]	Montanti facciata esterna [N]
12°	2227,00	2276,41
11° - 1°	262,00	311,41

Tabella A8.34 – Ponteggio D: carichi orizzontali per condizioni di fuori servizio

Carichi orizzontali – condizioni di fuori servizio – Ponteggio D	
Livello	Carichi ortogonali alla facciata [N]
12°	1965,94
11°	1921,26
10°	1695,39
9°	1655,03
8°	1614,66
7°	1574,29
6°	1533,93
5°	1493,56
4°	1453,19
3°	1412,83
2°	1372,46
1°	1332,10

DETTAGLIO DELLE ANALISI 3D

Tabella A8.35 – Ponteggio D: analisi del secondo ordine a collasso

Stilata n.	Reazione [kN]					
	ANSYS			**SAP**		
	Montante interno	Montante esterno	Stilata	Montante interno	Montante esterno	Stilata
1 Tipo A	40,089	44,130	84,219	20,409 (-49,09%)	43,142 (-2,24%)	63,550 (-24,54%)
2 Tipo B	40,251	31,764	72,015	30,195 (-24,98%)	27,100 (-14,68%)	57,296 (-20,44%)
3 Tipo A	39,790	45,752	85,542	31,191 (-21,61%)	39,983 (-12,61%)	71,174 (-16,80%)
4 Tipo B	41,574	34,146	75,720	31,270 (-24,78%)	27,485 (-19,51%)	58,755 (-22,41%)
5 Tipo A	38,235	43,797	82,032	28,082 (-26,55%)	39,580 (-9,63%)	67,662 (-17,52%)
6 Tipo B	36,268	30,385	66,653	20,624 (-43,13%)	30,263 (-0,40%)	50,887 (-23,65%)
Totale facciata	236,207	229,974	-	161,771 (-31,51%)	207,552 (-9,75%)	-
Totale ponteggio		466,181			369,323 (-20,78%)	

Tabella A8.36 – Ponteggio D: analisi con carichi di servizio – vento ortogonale alla facciata

Stilata n.	Reazione [kN]					
	ANSYS			**SAP**		
	Montante interno	Montante esterno	Stilata	Montante interno	Montante esterno	Stilata
1 Tipo A	9,607	11,731	21,338	9,887 (2,92%)	13,345 (13,76%)	23,232 (8,88%)
2 Tipo B	18,067	12,848	30,915	18,674 (3,36%)	9,865 (-23,22%)	28,538 (-7,69%)
3 Tipo A	16,926	16,723	33,649	17,538 (3,62%)	19,062 (13,99%)	36,600 (8,77%)
4 Tipo B	19,387	15,546	34,933	19,987 (3,10%)	12,416 (-20,13%)	32,403 (-7,24%)
5 Tipo A	15,867	14,936	30,803	16,383 (3,25%)	16,511 (10,54%)	32,894 (6,79%)
6 Tipo B	11,406	9,858	21,264	11,453 (0,41%)	8,702 (-11,73%)	20,154 (-5,22%)
Totale facciata	91,260	81,642	-	93,922 (2,92%)	79,900 (-2,13%)	-
Totale ponteggio		172,902			173,822 (0,53%)	

Tabella A8.37 – Ponteggio D: analisi con carichi di servizio – vento parallelo alla facciata

Stilata n.	Reazione [kN]					
	ANSYS			**SAP**		
	Montante interno	Montante esterno	Stilata	Montante interno	Montante esterno	Stilata
1 Tipo A	10,403	10,258	20,661	10,705 (2,90%)	11,214 (9,32%)	21.919 (6.09%)
2 Tipo B	17,697	12,861	30,558	18,309 (3,46%)	10,031 (-22,00%)	28.340 (-7.26%)
3 Tipo A	18,039	16,386	34,425	18,992 5,28%	17,986 (9,77%)	36.978 (7.42%)
4 Tipo B	18,790	15,506	34,296	19,427 3,39%	12,715 (-18,00%)	32.143 (-6.28%)
5 Tipo A	14,159	14,194	28,353	17,983 27,01%	15,186 (6,99%)	33.170 (16.99%)
6 Tipo B	11,047	10,839	21,886	11,736 6,24%	9,536 (-12,02%)	21.272 (-2,81%)
Totale facciata	90,135	80,044	-	97,153 7,79%	76,669 (-4,22%)	-
Totale ponteggio		170,179			173,822 (2,14%)	

Tabella A8.38 – Ponteggio D: analisi con carichi di fuori servizio – vento ortogonale alla facciata

Stilata n.	Reazione [kN]					
	ANSYS			**SAP**		
	Montante interno	Montante esterno	Stilata	Montante interno	Montante esterno	Stilata
1 Tipo A	6,009	10,058	16,067	6,084 (1,25%)	11,847 (17,79%)	17,931 (11,60%)
2 Tipo B	12,473	5,196	17,669	12,773 (2,40%)	4,952 (-4,70%)	17,725 (0,31%)
3 Tipo A	9,864	13,749	23,613	9,884 (0,20%)	14,065 (2,30%)	23,949 (1,42%)
4 Tipo B	13,687	7,567	21,254	14,005 (2,33%)	6,256 (-17,32%)	20,262 (-4,67%)
5 Tipo A	8,625	11,546	20,171	8,509 (-1,35%)	11,747 (1,74%)	20,256 (0,42%)
6 Tipo B	8,867	6,484	15,351	8,866 (-0,01%)	5,771 (-11,00%)	14,637 (-4,65%)
Totale facciata	59,525	54,600	-	60,121 (1,00%)	60,121 (10,11%)	-
Totale ponteggio		114,125			120,241 (5,36%)	

Tabella A8.39 – Ponteggio D: analisi con carichi di fuori servizio – vento parallelo alla facciata

Stilata n.	Reazione [kN]					
	ANSYS			**SAP**		
	Montante interno	Montante esterno	Stilata	Montante interno	Montante esterno	Stilata
1 Tipo A	7,207	6,386	13,593	7,458 (3,49%)	7,154 (12,03%)	14,612 (7,50%)
2 Tipo B	11,819	6,470	18,289	12,025 (1,74%)	5,580 (-13,75%)	17,605 (-3,74%)
3 Tipo A	11,923	12,308	24,231	12,799 (7,35%)	12,428 (0,97%)	25,227 (4,11%)
4 Tipo B	12,409	8,186	20,595	12,613 (1,64%)	6,264 (-23,48%)	18,877 (-8,34%)
5 Tipo A	11,254	9,827	21,081	12,026 (6,86%)	10,698 (8,86%)	22,723 (7,79%)
6 Tipo B	7,986	8,627	16,613	8,671 (8,58%)	7,044 (-18,35%)	15,715 (-5,40%)
Totale facciata	62,598	51,804	-	65,591 (4,78%)	49,168 (-5,09%)	-
Totale ponteggio		114,402			114,759 (0,31%)	