

Validazione di sistemi di continuità per strutture prefabbricate

A. Saviotti¹, P. Olmati², F. Bontempi³, S. Zambelli⁴, C. Pagani⁵, L. Sgambi⁶

Memoria tratta dagli Atti del WORKSHOP CONNECTIONS IN PRECAST STRUCTURES – Università di Bergamo, 5 ottobre 2012”, per gentile concessione degli autori, dell’Università di Bergamo e dell’ ACI ITALY CHAPTER

ABSTRACT

Il presente lavoro raccoglie parte degli studi sperimentali e numerici atti a validare il sistema di connessione sismo-resistente (“Connessione di Continuità RS”) brevettato da B.S. Italia. Tale sistema di connessione è stato progettato per il trasferimento diretto delle forze tra barre di armatura, realizzando una perfetta emulazione di una struttura gettata in opera. La validazione ha coinvolto un’estesa campagna sperimentale sia per investigare il comportamento locale del sistema di connessione, sia per riprodurre il comportamento globale dei manufatti collegati. Si è poi previsto che ogni analisi sperimentale abbia la sua interpretazione numerica, in modo da validare e anche di generalizzare il comportamento meccanico a casi non testati sperimentalmente. In questo lavoro, dopo una panoramica sul sistema costruttivo di B.S. Italia saranno evidenziate le analisi eseguite su di una colonna di dimensioni 50 x 50 cm alta 5 m e su di un nodo di collegamento trave colonna.

1 INTRODUZIONE

La progettazione strutturale ha assunto negli ultimi anni una sempre maggiore complessità. Nuovi aspetti progettuali sono stati introdotti, allo scopo di minimizzare il costo della struttura per la società e giungere a una progettazione consapevole non solo delle problematiche strutturali, ma di tutte le principali discipline che intervengono in fase di progettazione e realizzazione della costruzione.

Oggi una costruzione è progettata perché possa funzionare per un determinato periodo definito come vita utile della costruzione. Nessun materiale mantiene le proprie caratteristiche per un tempo indefinito (Malerba et al. 2011). Al pari di una struttura biologica, l’acciaio, il legno, il calcestruzzo, degradano nel tempo e hanno quindi bisogno di interventi di manutenzione. Se questi sono definiti sin dalla fase di progettazione della costruzione (Garavaglia et al. 2012, Basso et al. 2012) è possibile progettare la struttura con lo scopo di ridurre il costo complessivo (iniziale e di mantenimento) della costruzione.

Nuove tipologie di carico, definite eccezionali, sono state inserite nelle normative per far fronte a incidenti o attacchi terroristici che possono mettere in crisi nodi infrastrutturali di una certa importanza per la società. È oggi importante studiare nel dettaglio la risposta al fuoco o alle esplosioni delle strutture (Bontempi 2008, 2010) al fine di poter controllare questi eventi critici. Un’importante costruzione o un nodo infrastrutturale deve poter rimanere operativo durante le

¹ Ingegnere Civile, angela.s15@libero.it

² Studente di Dottorato, Sapienza Università di Roma, pierluigi.olmati@uniroma1.it

³ Professore, Sapienza Università di Roma, franco.bontempi@uniroma1.it

⁴ Presidente, B.S. Italia S.p.A., Styl-Comp Group S.P.A., Zanica, Italy

⁵ Resp. Dip. R&S, B.S. Italia S.p.A., Styl-Comp Group S.P.A., Zanica, Italy, ufftecnico06@styl-comp.it

⁶ Ricercatore, Politecnico di Milano, sgambi@stru.polimi.it

emergenze. Tutte queste considerazioni comportano un allargamento dell'orizzonte di progetto (StroNGER 2012).

In quest'ottica ha assunto grande importanza il tema della robustezza strutturale. Crolli sproporzionati rispetto all'importanza del danno iniziale (collassi progressivi) devono essere evitati (Bontempi, 2007).

A queste problematiche, tipiche dell'ingegneria civile moderna, l'ingegneria delle strutture prefabbricate ne aggiunge altre, tipiche del settore, di non secondaria importanza: la capacità resistente sotto azioni sismiche, la duttilità, la velocità di montaggio con la possibilità di aggiustare la posizione di posa, l'ancoraggio in fondazione, le tolleranze costruttive. Rimane quindi aperto il campo della ricerca e la possibilità di studiare e brevettare nuove soluzioni.

Questo lavoro si focalizza, per l'appunto, sul sistema costruttivo "Connessione di Continuità RS" brevettato da B.S. Italia.

1.1 Il sistema costruttivo

La Connessione di Continuità RS, sistema brevettato sismo-resistente per il collegamento tra manufatti in calcestruzzo (Figura 1), serve a garantire il trasferimento diretto delle forze tra due barre di armatura, evitando la sovrapposizione dei ferri ed eliminando ogni eccentricità nei componenti costituenti il collegamento. Il sistema è pensato per realizzare una perfetta emulazione delle strutture gettate in opera e rappresenta una soluzione ideale dal punto di vista delle prestazioni sismiche: sfruttando il concetto di aderenza (mediante una matrice cementizia) tra barre d'armatura e manicotto metallico (che per la prima volta al mondo è proposto con una doppia aderenza: interna ed esterna) attua una completa continuità strutturale tra manufatti in calcestruzzo (tra pilastro prefabbricato e strutture di fondazione, tra due segmenti di pilastro prefabbricato e tra travi e pilastri prefabbricati), tipica delle strutture gettate in opera. Grazie ad un innovativo sistema di regolazione la Connessione di Continuità RS permette la messa in opera dei manufatti prefabbricati senza opere provvisorie di puntellamento e sostegno. Un risultato innovativo ottenuto da un dispositivo regolabile (piede di regolazione) interposto a secco tra i manufatti in calcestruzzo da connettere. Il collegamento tra i manufatti è infine completato in opera mediante una sigillatura a umido impiegando B.S.Grout, malta ad alta resistenza, doppiamente espansiva (in fase di presa e di indurimento) nata dalla collaborazione tra Mapei e B.S.Italia e appositamente studiata per dotare la connessione di continuità RS di elevate prestazioni.

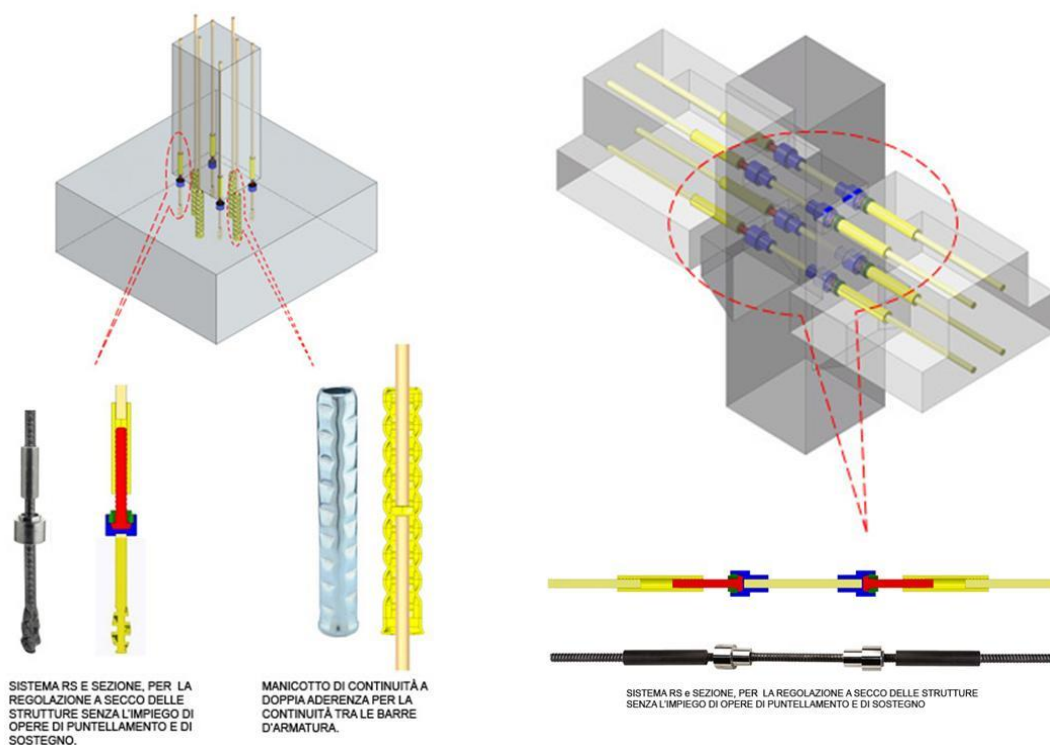


Figura 1. Esempificazione di un collegamento colonna fondazione e di un nodo trave colonna.

I vantaggi del sistema RS si possono quindi riassumere in:

- Riduzione delle quote di scavo: grazie all'eliminazione del pozzetto di alloggiamento del plinto, le quote di fondo scavo possono essere sensibilmente ridotte.
- Semplificazione delle gabbie d'armatura: l'eliminazione del pozzetto consente di semplificare enormemente le gabbie di armatura delle opere di fondazione.
- Tolleranze di accoppiamento: garantisce una tolleranza maggiore rispetto ai sistemi di giunzione in commercio.
- Regolazione verticale della quota d'imposta pilastro: il piede del sistema permette una regolazione micrometrica delle quote d'imposta e della verticalità del manufatto fino a 5 cm.
- Doppia aderenza: la forma del manicotto è studiata per garantire l'aderenza interna ed esterna del sistema.
- Senza puntellazioni: maggior velocità e maggior risparmio in fase di verticalizzazione.
- Universalità: il manicotto può essere utilizzato con tondini di diverso diametro: da $\varnothing 12$ a $\varnothing 40$.

La Figura 2 mostra, tramite una serie di quattro fotografie, la procedura di posizionamento di una colonna.



Figura 2. Immagini che evidenziano la facilità della posa in opera di una colonna.

La prima fotografia mostra i fori di alloggiamento delle barre di armatura predisposti nella fondazione e lo spessore centrale necessario per facilitare il successivo riempimento con malta a espansione dello spazio rimanente tra la fondazione e la colonna. La seconda foto evidenzia le barre di armatura delle colonne che andranno a inserirsi nei fori e i quattro piedini d'angolo su cui

andranno a innestarsi i manicotti di regolazione. La terza fotografia mostra la facilità con cui una colonna può essere spostata nella corretta posizione, mentre la quarta fotografia mostra la semplicità con cui è possibile regolare la verticalità della colonna, prima che la posizione sia resa definitiva dal getto di malta a espansione.

1.2 La campagna di studio e validazione

Il sistema costruttivo è stato oggetto di un'estesa campagna di validazione (Figura 3), ora in fase di conclusione. Si è studiato, dal punto di vista sperimentale e numerico, sia il comportamento locale dei manicotti di continuità, sia il comportamento globale della giunzione.

Per lo studio del comportamento locale, manicotti di continuità di differenti dimensioni sono stati testati sia sotto carichi monotoni sia sotto carichi ciclici. Sperimentalmente si è potuto notare che la rottura si è sempre verificata fuori dal manicotto.

Per lo studio del comportamento della giunzione sono state programmate quattro prove sperimentali su elementi in scala reale. Per testare la capacità di trasmissione delle forze di taglio in fondazione è stata testata una colonna di dimensioni 50 x 50 cm alta 1 m. La prova è stata eseguita con un carico ciclico di ampiezza crescente sino a una forza orizzontale massima di 500 kN (la massima spinta che poteva fornire il macchinario di prova) senza che si manifestassero rotture.

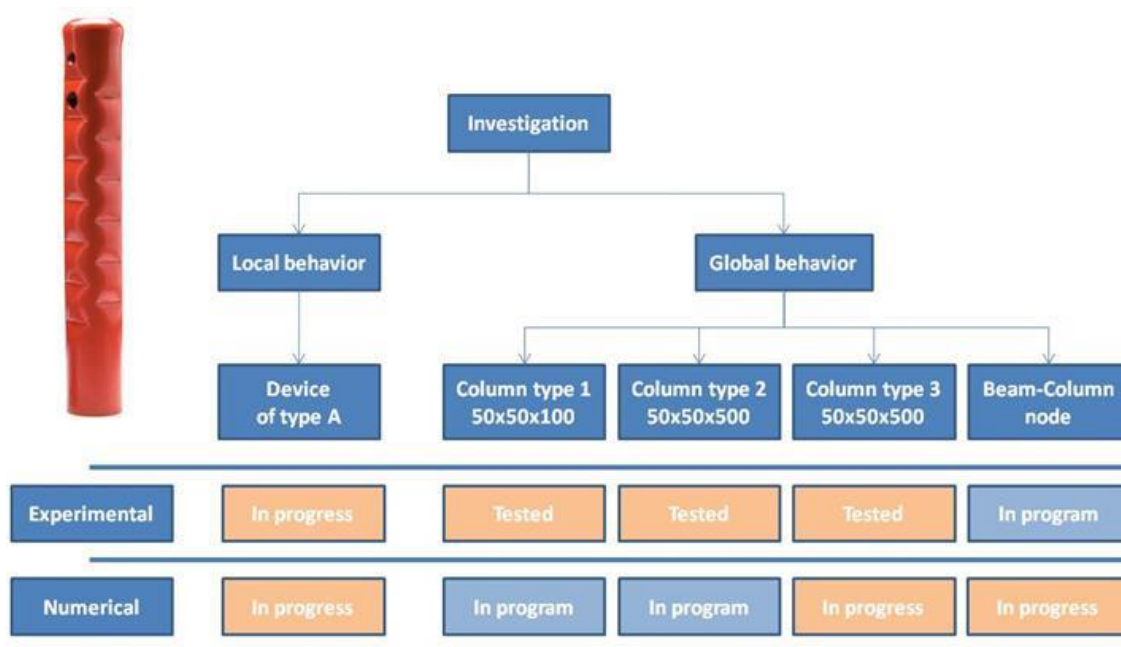


Figura 3. Diagramma a blocchi riassuntivo della campagna sperimentale e numerica.

Per lo studio del comportamento flessionale del giunto di continuità in fondazione, sono state testate due differenti colonne di dimensioni 50 x 50 cm alte 5 m. Le due colonne differivano per il numero di barre di armatura presenti nella sezione. I risultati sperimentali e numerici di questa prova saranno meglio descritti nel seguito di questo lavoro, sperimentalmente la giunzione ha fornito ottimi risultati anche con dei drift finali, sotto carico ciclico, superiori al 4%.

Rimane in programma lo studio sperimentale del comportamento di un nodo trave colonna, sperimentazione che sarà ultimata nei prossimi mesi. Numericamente, alcuni risultati saranno presentati nelle ultime pagine di questo lavoro.

Le attività di ricerca numerica e sperimentale hanno visto e vedono tuttora coinvolte differenti organismi di ricerca (Figura 4). L'attività di sperimentazione è stata principalmente suddivisa tra il laboratorio Eucentre di Pavia e il Politecnico di Milano. Nel primo si stanno ultimando le prove sperimentali sugli elementi colonna e nodo trave colonna in scala 1:1 mentre al Politecnico di Milano si stanno testando i comportamenti dei singoli manicotti di continuità sottoposti a carico monotono e a carico ciclico. Recentemente si è anche deciso eseguire alcune prove a carico ciclico in un centro di ricerca degli USA. Per quanto riguarda l'attività di modellazione numerica, gli

organismi coinvolti sono La Sapienza Università di Roma e il Politecnico di Milano. Al Politecnico di Milano si stanno sviluppando i modelli per la riproduzione del comportamento locale dei manicotti e per il comportamento globale del nodo colonna fondazione, mentre alla Sapienza (dove il Prof. Franco Bontempi detiene il coordinamento scientifico delle attività) si sta investigando il comportamento del nodo trave colonna. Infine, lo spin-off di ricerca StroNGER permette di inserire i risultati nell'ottica più ampia e attuale della progettazione prestazionale.

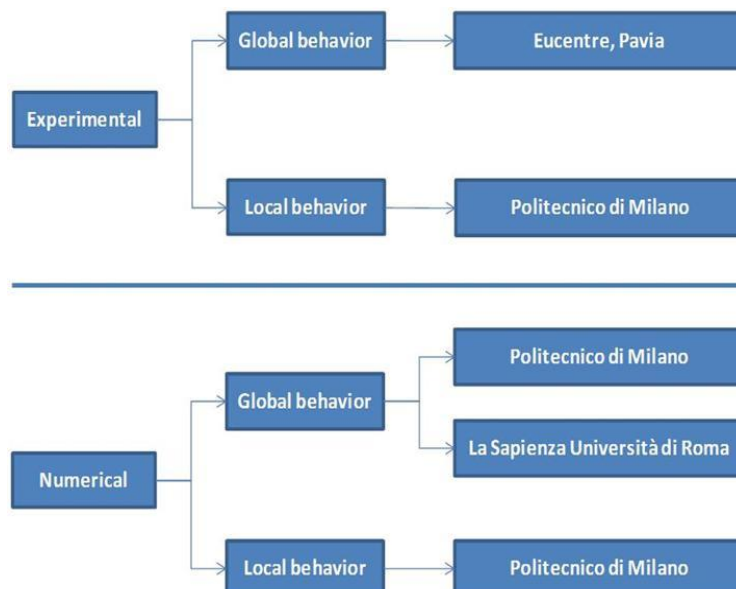


Figura 4. I differenti organismi di ricerca coinvolti negli studi sperimentali e numerici.

2 STUDI SPERIMENTALI E NUMERICI SUL COLLEGAMENTO COLONNA FONDAZIONE

Allo scopo di validare il comportamento flessionale del collegamento colonna fondazione si riportano le analisi eseguite su di una colonna avente sezione 50 x 50 cm e altezza pari a 5 m. Dettagli sull'armatura sono reperibili in Sgambi et al. 2011A/B.

La prova sperimentale consiste in una serie di cicli di spostamento crescente imposto alla sommità della colonna. Per simulare l'effetto del carico assiale, è stato considerato un carico verticale costante pari a 400kN. La Figura 5 mostra alcune fotografie scattate durante la prova sperimentale. L'esteso uso di strumentazione ha permesso la registrazione di vari spostamenti nonché di svariati campi di deformazione lungo l'intero sviluppo della colonna. L'analisi numerica, sviluppata in ambiente ABAQUS, è dettagliatamente descritta di seguito.

Come mostrato dalla Figura 6, il modello numerico coinvolge l'intera colonna e una parte della fondazione. Si è ritenuta necessaria la discretizzazione di una parte della fondazione sia per rappresentare adeguatamente la deformazione della base sia per poter includere nel modello numerico una discretizzazione del sistema di continuità. Poiché il problema flessionale si presenta simmetrico, si è deciso di modellare numericamente mezza colonna, riproducendo la metà mancante con adeguati vincoli di simmetria. In Figura 6 la discretizzazione del calcestruzzo della colonna è stata tolta per mettere in risalto la modellazione delle barre di armatura.



Figura 5. Immagini della colonna testata a carico ciclico.

Per simulare la presenza di un carico assiale, sperimentalmente è stato fatto passare, in corrispondenza dell'asse della colonna, un cavo di precompressione. Tale cavo, non è stato modellato nell'analisi numerica ma è stata considerata la riduzione di sezione dovuto al suo foro di alloggiamento (75 x 200 mm). Lo strato di malta presente tra la colonna e la fondazione è stato modellato in base alle dimensioni sperimentali. Tali dimensioni sono state tenute più grandi delle dimensioni della colonna in modo che si potesse sviluppare un certo effetto di confinamento sulla parte di malta interna.

La discretizzazione geometrica della colonna è stata eseguita utilizzando elementi finiti solidi esaedrici e tetraedrici (C3D8R e C3D4 in ambiente ABAQUS). Questi ultimi sono stati utilizzati soltanto in alcune parti della fondazione, in cui la geometria dettagliata del sistema di continuità ha reso necessario l'impiego di una discretizzazione più irregolare. Le barre di rinforzo e le staffe sono state modellate con elementi biella (T3D2 in ambiente ABAQUS).

La Figura 6 mostra lo sviluppo di armatura longitudinale e la discretizzazione delle staffe all'interno della sezione. Si può notare come la staffatura sia molto più ravvicinata nella parte inferiore della colonna. Il calcestruzzo è stato modellato in ambito non lineare tramite il legame "concrete plasticity" di ABAQUS. La parte superiore della colonna (zona di applicazione del carico) è stata invece mantenuta in campo elastico lineare. In tale zona, dato il legame costitutivo assunto per il calcestruzzo, non è stato necessario estendere il modello delle staffe.

Tutte le grandezze geometriche sono state assunte secondo le misure riportate sui disegni di progetto della prova sperimentale. Nella parte inferiore della colonna, il meccanismo di sovrapposizione è stato modellato introducendo nel modello tutte le sovrapposizioni di barre che devono garantire il trasferimento degli sforzi.

Particolare attenzione è stata data nel modellare il collegamento tra la colonna e la fondazione. Il sistema di continuità utilizza due dispositivi: il manicotto (definito dispositivo A in Figura 6), posto all'interno della colonna e il manicotto di continuità (definito dispositivo B), che si trova all'interno della fondazione. Entrambi i dispositivi sono stati modellati utilizzando elementi shell (S3 e S4 in ambiente ABAQUS) e cercando di riprodurre il più fedelmente possibile i meccanismi di trasferimento delle forze. La Figura 6 mostra questi elementi posti all'interno del calcestruzzo.

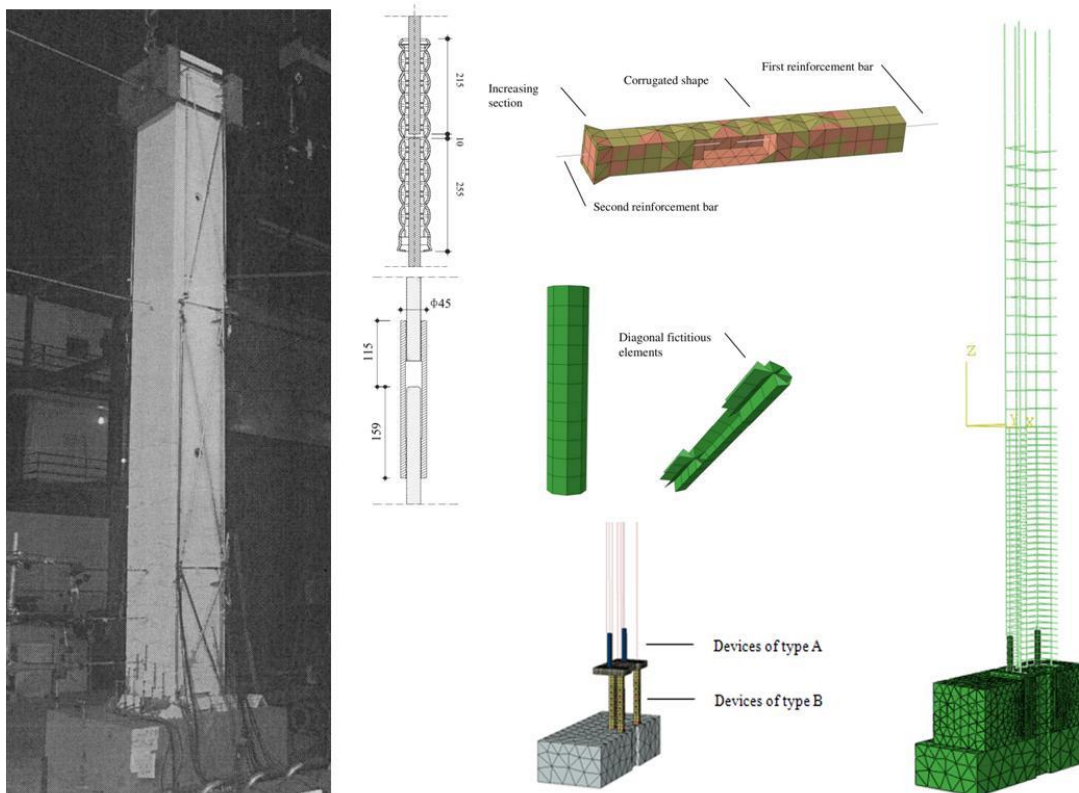


Figura 6. Immagini del modello numerico agli elementi finiti.

Il manicotto (dispositivo A) è un elemento di trasferimento di forze in cui le barre sono avvitate alle sue estremità. La connessione è molto rigida poiché la tensione presente nella prima barra è convertita in tensione interna al dispositivo da un meccanismo di taglio agente sulla filettatura del manicotto e quindi in tensione assiale nella seconda barra. Il meccanismo è stato modellato numericamente con un collegamento diretto tra le barre e il dispositivo attraverso l'introduzione di elementi shell fittizi diagonali presenti solo alle estremità del dispositivo. In questo modo le barre sono allineate con l'asse del dispositivo e la tensione è trasferita attraverso un meccanismo di taglio, come evidenziato dalla fisica del problema. Il dispositivo è stato modellato tramite una sezione ottagonale che appare un giusto equilibrio tra l'andamento circolare della reale geometria e il costo computazionale richiesto per il raffinamento locale della discretizzazione.

Il manicotto di continuità (dispositivo B) è una connessione meno rigida. Le barre di acciaio passano in asse al dispositivo e trasmettono la forza assiale alla malta attraverso meccanismi interni di adesione e di taglio. Attraverso la formazione di puntoni compressi, la malta mette in tensione il manicotto e l'azione viene trasmessa alla seconda barra tramite un meccanismo simile. In alternativa le tensioni possono anche essere trasmesse dal manicotto al calcestruzzo circostante, nel caso si volesse ancorare la barra in una massa di calcestruzzo. I meccanismi di diffusione e la formazione dei puntoni compressi sono enfatizzati dalla forma ondulata delle pareti laterali del dispositivo. Poiché questo meccanismo di trasferimento delle azioni appare piuttosto complesso ed è legato alla forma del manicotto brevettato da B.S. Italia, si è deciso di modellare il dispositivo considerandone la sua reale geometria. Le pareti del dispositivo sono modellate tramite elementi shell con tre o quattro nodi (S3 e S4 in ambiente ABAQUS) basati sulla geometria reale, mentre per la malta interna si sono utilizzati elementi solidi (C3D8R e C3D4 in ambiente ABAQUS).

In questo modo, il modello numerico della colonna, benché pensato per riprodurre il comportamento globale, è in grado di mostrare localmente i singoli meccanismi di trasferimento del carico.

Il modello numerico include inoltre due tipi di elementi di contatto. Il primo è utilizzato solo dal punto di vista numerico per collegare due parti del modello con discretizzazioni non conformi (interfaccia tra parte inferiore della fondazione e la parte superiore della stessa, aventi dimensioni in pianta differenti, Figura 6). Il secondo tipo di elemento è invece utilizzato per riprodurre il

comportamento fisico di una fessura discreta formatasi alla base della colonna durante la prova sperimentale e che ha influenzato le misurazioni di spostamento. Questo tipo di elemento riproduce un comportamento con legge elastica in compressione e taglio, mentre non si assume alcuna resistenza in trazione.

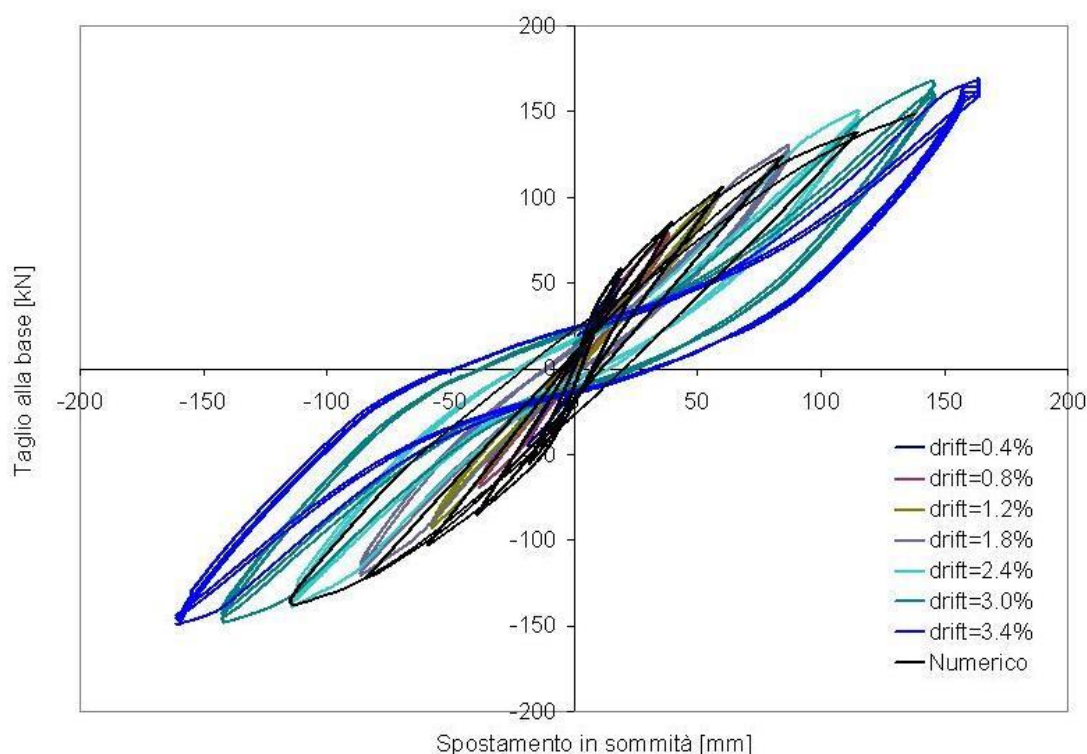


Figura 7. Immagini del modello numerico agli elementi finiti.

A livello di legame di materiali, per il calcestruzzo e la malta è stato utilizzato il legame “concrete plasticity” presente in ABAQUS. Tale legame si basa sul presupposto di danneggiamento isotropo ed è formulato per applicazioni in cui il materiale è sottoposto a condizioni di carico arbitrarie. Il modello prende in considerazione il degrado della rigidità elastica indotto dal danneggiamento e l'esistenza di deformazioni residue sia in tensione, sia compressione (Dassault Systemes, 2008). Per quanto riguarda l'acciaio (barre e manicotti) è stato utilizzato un legame elastoplastico bilineare con incrudimento cinematico.

La Figura 7 mostra i risultati dell'analisi sperimentale e dell'analisi numerica. Dal punto di vista numerico, il collasso della colonna si verifica dopo il quinto ciclo, con un drift tra il 2,4% e il 3% (mentre sperimentalmente la prova completa anche cicli con drift del 3,4%). Il collasso della colonna è causato dalla rottura a trazione delle barre di armatura. Sia dall'analisi numerica, sia dai risultati sperimentali, non ci sono state evidenze di collassi in altre posizioni dell'elemento, in particolare all'interno dei manicotti di continuità.

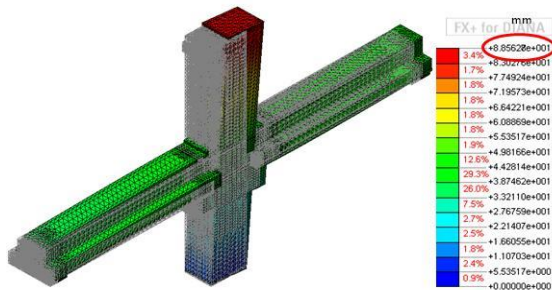
3 STUDI NUMERICI SUL NODO TRAVE COLONNA

In questo paragrafo si riportano alcuni studi preliminari eseguiti in ambito numerico, per definire il comportamento del nodo trave colonna in vista delle analisi sperimentali. Le analisi sono state eseguite allo scopo di definire l'importanza del riempimento di malta nell'interfaccia tra gli elementi strutturali e per testare la capacità di modellazione di differenti codici di calcolo. Per conseguire questo risultato, si sono sviluppati modelli 2D e 3D sia in ambiente DIANA sia in ASTER, considerando sia la presenza sia l'assenza dello strato di malta. La Figura 8 mostra due immagini dei modelli 3D sviluppati in DIANA (Saviotti et al. 2012).

LOAD CONDITION Applied Horizontal Force at the top of the column
NON LINEAR ANALYSIS

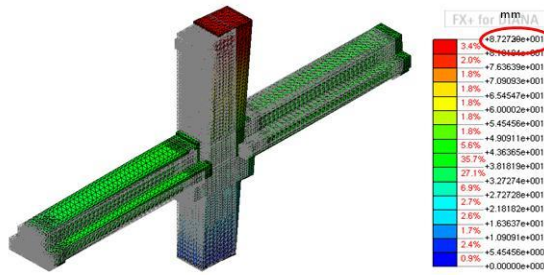
3D

MODEL "A"



Deformed configuration developed by the structure at
STEP 20 - $F_{max} = 390.2 \text{ kN}$, $\delta_{max} = 88.6 \text{ mm}$.

MODEL "B"



Deformed configuration developed by the structure at
STEP 15 - $F_{max} = 269.83 \text{ kN}$, $\delta_{max} = 87.27 \text{ mm}$.

Figura 8. Immagini di alcuni modelli 3D sviluppati in ambiente DIANA.

Le analisi preliminari, condotte sotto carico monotono crescente, sono riassunte nel grafico di Figura 9. Le analisi in ambito lineare mostrano un incremento del 35% di rigidità iniziale nei modelli con la presenza di malta, mentre le analisi in ambito non lineare mostrano un incremento di resistenza del 45% (a parità di spostamento imposto) sempre da attribuire alla presenza della malta.

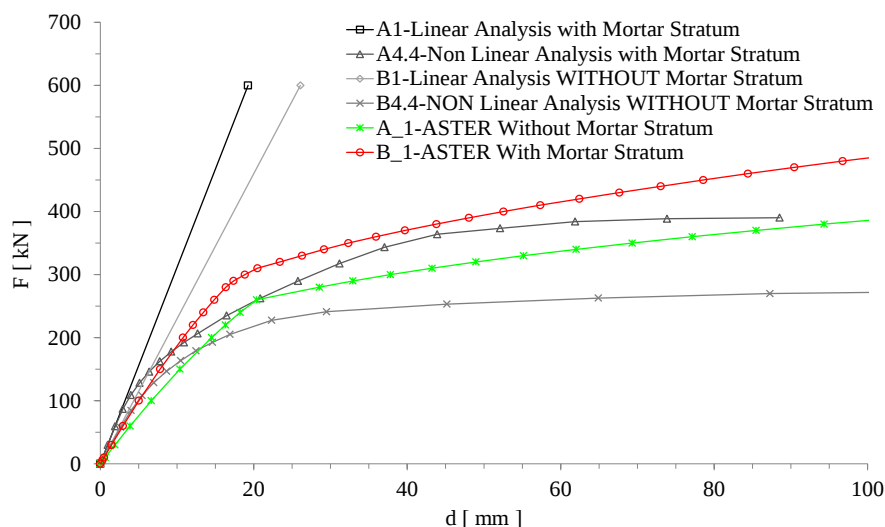


Figura 9. Risposta in termini di curva forza – spostamento dei modelli analizzati.

4 CONCLUSIONI

Il lavoro espone parte delle analisi sperimentali e numeriche eseguite in questi anni per la validazione del sistema di collegamento "Connessione di Continuità RS" brevettato da B.S. Italia. Gli studi eseguiti a livello locale sui manicotti di collegamento mostrano ottimi comportamenti degli stessi, con rotture localizzate al di fuori del sistema di collegamento. Gli studi a livello globale mostrano ottimi comportamenti dei giunti colonna fondazione (testati sia sperimentalmente che numericamente) sia per quanto riguarda la trasmissione delle forze di taglio sia per il comportamento flessionale.

Per analizzare numericamente il comportamento flessionale è stato sviluppato un modello in ambiente ABAQUS. I risultati numerici mostrano un buon accordo a livello di risposta globale per i primi 5 cicli di carico con la risposta sperimentale. Sia dal punto di vista numerico sia da quello sperimentale non si evidenziano rotture localizzate interne al sistema di continuità.

Studi numerici preliminari sul nodo trave colonna, sviluppati in ambiente DIANA e ASTER mostrano la capacità del giunto di trasmettere momento flettente tra gli elementi, capacità che sarà testata sperimentalmente nei test in programma.

REFERENCES

- Basso, N., Garavaglia, E. & Sgambi, L. 2012. Selective maintenance planning based on a Markovian approach. Proceedings of the Third International Symposium on Life-cycle Civil Engineering, Ialcc'e'12, Held in Vienna, Austria.
- Bontempi, F., 2007. Robustezza strutturale. In: Crolli e affidabilità delle strutture civili. vol. 1, p. 3-24, PALERMO:Dario Flaccovio Editore, ISBN: 9788877587497, Messina, 20-22 Aprile 2006
- Bontempi, F., 2008. Handling Exceptions in Structural Engineering: Robustezza Strutturale, Scenari Accidentali, Complessità di Progetto. vol. 1, doi: 10.3267/HE2008, http://www.francobontempi.org/handling_08.php
- Bontempi, F., 2010. Handling Exceptions in Structural Engineering: Sistemi Strutturali, Scenari Accidentali, Complessità di Progetto. vol. 1, doi: 10.3267/HE 2010, <http://www.francobontempi.org/handling.php>
- Dassault Systemes (2008). ABAQUS/Standard User's Manual; Version 6.8 (Vols. I-III). Simulia Corp., Providence, RI, USA.
- Garavaglia, E., Sgambi, L. & Basso N. 2012. Selective maintenance strategies applied to a bridge deteriorating steel truss. Proceedings of the Sixth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Stresa, Italy, 1764-1770.
- Malerba, P.G., Sgambi, L., Ielmini, D. & Gotti G. 2011. Influence of Corrosive Phenomena on the mechanical behaviour of R.C. Elements. Proceedings of the 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics. Seoul, Korea, 1269-1288.
- Saviotti, A., Olmati, P., Bontempi, F. (2012). "Finite element analysis of innovative solutions of precast concrete beam-column ductile connections". Proceedings of the Sixth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Stresa, Italy, 2048-2055.
- Sgambi, L., Olmati, P., Petrini, F. & Bontempi, F. (2011A). "Seismic performance assessment of precast element connections". In: Proceedings of 2011 PCI Annual Convention and National Bridge Conference. Salt Lake City, UT 84101, USA.
- Sgambi, L., Zambelli, S., Pagani, C. & Bontempi, F. (2011B). "Experimental and Numerical Assessment of a Special Joint Connection for Precast Columns". Proceedings of the 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics. Seoul, Korea, Techno-Press, 2549-2561.
- StroNGER 2012, <http://www.stronger2012.com/>