INDAGINI SPERIMENTALI SUL COLLEGAMENTO BULLONATO PILASTRO-FONDAZIONE PER APPLICAZIONI SISMICHE

E. Camnasio
Peikko Group Corporation, Lahti, Finlandia

L. Jurina, E.O. Radaelli
Politecnico di Milano, Dipartimento ABC, Milano

L. Bianco, S. Montenovo
Peikko Italia s.r.l., Milano

SOMMARIO
Le nuove disposizioni riguardanti la classificazione sismica dell'Italia e la relativa valutazione del rischio sismico richiedono da un lato la progettazione di strutture con migliori prestazioni e dall'altro sottolineano la necessità di riqualificare gli edifici esistenti. In passato, le numerose strutture prefabbricate sul nostro territorio hanno evidenziato dettagli costruttivi inadeguati a garantire una risposta alle azioni orizzontali cicliche soddisfacente. Le attuali normative impongono invece ai collegamenti fra gli elementi prefabbricati particolari requisiti in termini di resistenza, rigidezza e duttilità. A tal proposito, il Gruppo Peikko e il Politecnico di Milano hanno condotto un ampio programma sperimentale sui collegamenti bullonati pilastro-fondazione, con lo scopo di sviluppare una connessione prefabbricata emulativa dei collegamenti monolitici. Diversi provini di sotto-insiemi pilastro-fondazione in vera grandezza sono stati sottoposti a prove oligo-cicliche e confrontati con gli equivalenti pilastri gettati in opera. Un pilastro prefabbricato, precedentemente portato a incipiente collasso, è stato oggetto di intervento di ripristino, al fine di valutare la riparabilità e la capacità residua del giunto. I risultati attestano che l'utilizzo dei collegamenti bullonati, adeguatamente progettati, garantisce al giunto pilastro-fondazione sufficiente duttilità e rigidezza. Inoltre, si è dimostrato come sia operativamente possibile riqualificare i collegamenti prefabbricati anche se danneggiati o rinforzare le strutture esistenti.

1. INTRODUZIONE

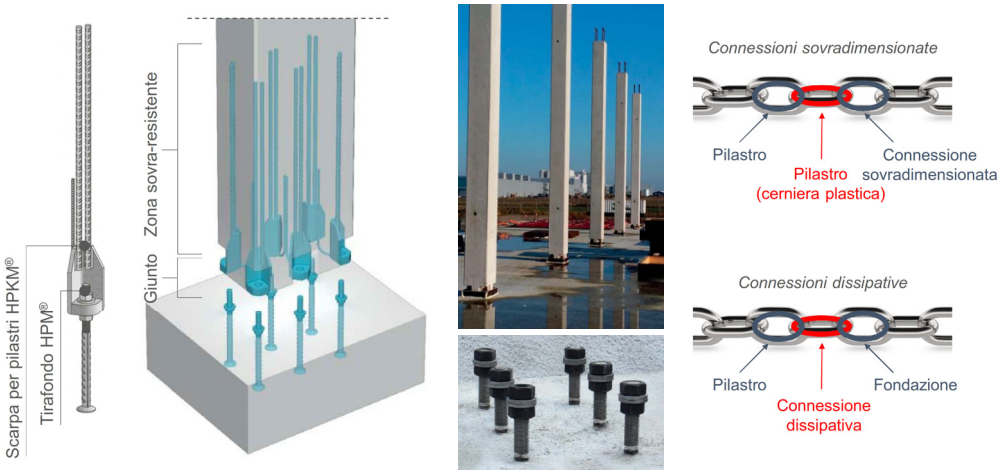
I collegamenti fra gli elementi prefabbricati svolgono un ruolo fondamentale nel comportamento globale della struttura, specialmente in zona sismica. Infatti, le connessioni rappresentano un punto critico laddove la continuità strutturale sarebbe necessaria. In passato, le strutture prefabbricate hanno evidenziato prestazioni sismiche carenti a causa di inadeguati

dettagli costruttivi e mancanza di continuità o ridondanza strutturale. Inoltre, non vi erano linee guida specifiche per le strutture prefabbricate in zona sismica.
Pertanto, si è in genere preferito il calcestruzzo gettato in opera o soluzioni alternative, come le armature fuoriuscenti dal pilastro e inghisate a posteriori nella fondazione o soluzioni miste. Tuttavia, per tali sistemi non c'è evidenza della loro risposta sismica né si sono valutati i possibili rischi e gli effettivi costi di utilizzo. Le strutture prefabbricate, invece, offrono alcuni vantaggi durante sia la produzione sia l'installazione se confrontati con le soluzioni tradizionali, come un miglior controllo della qualità del materiale e del prodotto, rapidità delle fasi di cantiere e quindi risparmi di tempo e denaro.
Negli ultimi decenni, si sono svolti numerosi studi riguardo il comportamento ciclico dei giunti prefabbricati a supporto dello sviluppo degli attuali Codici normativi (CEN 2004b, NTC 2008), i quali mirano alla mitigazione del rischio sismico attraverso un approccio progettuale prestazionale, dove predefiniti livelli di danneggiamento vengono considerati come stati limite. Particolari requisiti di resistenza e duttilità sono stati imposti affinché le strutture resistano i carichi ciclici senza una sostanziale riduzione della resistenza globale.
Date tali richieste di progetto, Peikko ed il Politecnico di Milano hanno svolto un ampio programma di ricerca sperimentale per indagare il comportamento della connessione pilastro prefabbricato-fondazione realizzata tramite scarpe e tirafondi. Lo scopo della ricerca è stato quello di sviluppare una connessione che fosse emulativa dei giunti monolitici in termini di duttilità, dissipazione energetica e degrado di resistenza e rigidezza, combinando così il rispetto dei Codici con i vantaggi delle strutture prefabbricate.

2. LE CONNESSIONI PREFABBRICATE BULLONATE

Un tipico sistema di connessione bullonata viene realizzato dall'unione di scarpe metalliche e tirafondi (
Figura **1**a). Il sistema di connessione Peikko si compone di scarpe per pilastri HPKM®, costituite da piastra di base, piastra laterale (EN 10025-2 2004) e barre di ancoraggio che vengono posizionate all'interno del pilastro (ETA-13/0603 2013), e da tirafondi HPM®, cioè da barre nervate che vengono gettate all'interno della fondazione (ETA-02/0006 2012). La resistenza delle saldature fra le piastre delle scarpe è pari almeno a due volte la resistenza del tirafondo così da garantire la risposta elastica delle stesse. I tirafondi possono essere corti con testa a martello o lunghi. La resistenza allo sfilamento viene garantita dall'aderenza fra acciaio e calcestruzzo e, nel caso dei tirafondi corti, dalla testa a martello.
L'istallazione del pilastro è resa agevole dalle tolleranze di posa sia nel piano orizzontale sia in direzione verticale, le quali ne permettono il corretto posizionamento. Il pilastro viene quindi installato tramite il serraggio dei dadi e il collegamento viene inghisato con malta cementizia anti-ritiro, di resistenza superiore a quella del calcestruzzo, così da evitare rotture fragili lato calcestruzzo a livello del giunto.
Tale sistema permette risparmi di tempo e di materiale in cantiere, essendo autoportante e non necessitando di armature integrative. Nel caso di tirafondi corti, si risparmia anche in termini di volume di scavo e opere di fondazione, riuscendo a contenere lo spessore in circa un metro. In fase di progettazione, la procedura di dimensionamento e verifica è analoga a quella di una tradizionale sezione in calcestruzzo armato. In aggiunta, occorre verificare la

capacità di ancoraggio in fondazione, nei riguardi dello sfilamento dei tirafondi o della rottura tronco-conica del calcestruzzo.



(a) (b)

Figura 1. (a) Connessione pilastro-fondazione Peikko (adattata da Peikko Group Corporation 2009, 2012); (b) Analogia delle alternative di progetto con la resistenza di una catena.

2.1. Connessioni sovra-dimensionate e connessioni dissipative

Secondo la vigente normativa (NTC 2008), i collegamenti pilastro-fondazione possono essere di "Tipo B" o di "Tipo C" (
Figura **1**b). I collegamenti di "Tipo B" sono quelli cosiddetti "sovra-dimensionati", ovvero dove la resistenza della connessione è superiore a quella dell'elemento adiacente collegato, in una percentuale che dipende dalla classe di duttilità considerata. La connessione risulta quindi un "anello forte" nella gerarchia delle resistenze, rimanendo pressochè elestica e subendo limitati spostamenti. Tuttavia, la base del pilastro risulta già sovra-resistente, data la presenza sia delle barre di ancoraggio delle scarpe sia della gabbia di armatura. Ciò può portare quindi a giunti fortemente armati.
I collegamenti di "Tipo C", invece, sono quelli considerati equivalenti ai giunti gettati in opera e che possono quindi essere dimensionati per corrispondere alla resistenza del pilastro collegato, purchè si sia dimostrato sperimentalmente che le loro prestazioni sono sufficienti a soddisfare le richieste globali e locali di duttilità ciclica. Nel caso delle unioni bullonate, le deformazioni si concentrano nei tirafondi, che si comportano come connettori duttili, rappresentando un "anello debole" e deformabile della catena. La formazione di cerniere plastiche nel pilastro e/o instabilizzazione delle barre di armatura vengono evitate, mentre il possibile danneggiamento viene limitato a livello del giunto.

2.2. La connessione per applicazioni sismiche

Al fine di combinare il rispetto dei requisiti normativi con i vantaggi della tecnologia prefabbricata, Peikko ha introdotto alcuni dettagli costruttivi volti a migliorare le prestazioni

del giunto sottoposto a carichi ciclici orizzontali (Figura 2) pur mantendendo inalterata la concezione del sistema di connessione. In tal modo, il collegamento fra pilastro prefabbricato e fondazione emulativo dei giunti gettati in opera diventa una soluzione non solo agevole dal punto di vista del montaggio a secco, ma anche affidabile e sicura in caso di applicazioni sismiche. L'efficacia delle migliorie proposte è stata valutata confrontando le prestazioni del sistema con i risultati sperimentali di precedenti campagne di prova su elementi con la connessione standard (Bianco et al. 2009, Jurina et al. 2014a).

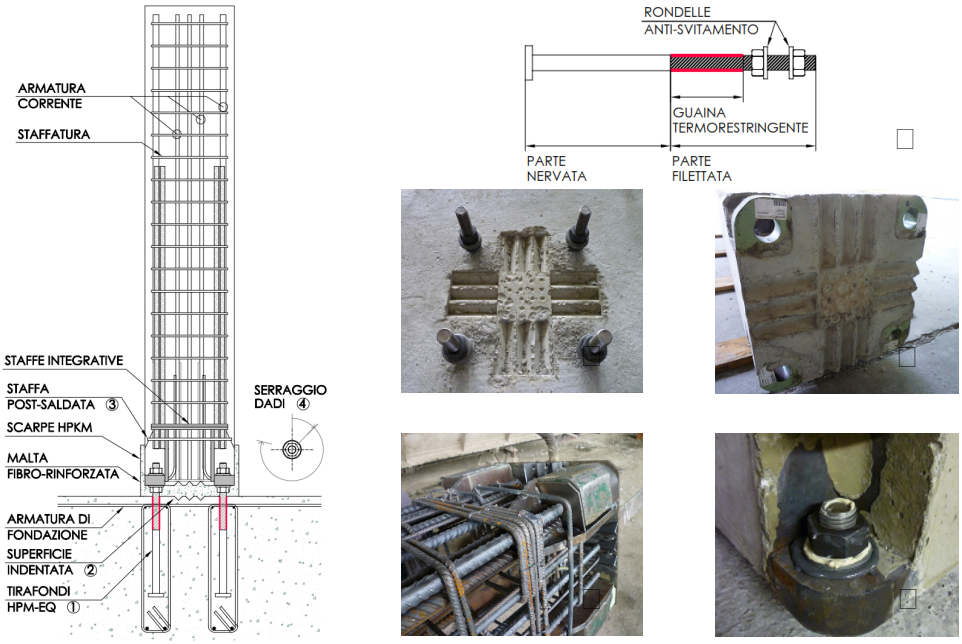


Figura 2. La connessione pilastro-fondazione emulativa.

Il componente principale della connessione è il tirafondo HPM®-EQ, le cui capacità deformative permettono di ottenere la duttilità locale del giunto. La parte di filettatura immersa nell'elemento di fondazione è stata resa non aderente da una guaina termorestringente, cosicché il tirafondo sia libero di deformarsi laddove si concentrano le maggiori sollecitazioni di trazione e compressione (Jurina et al. 2014b). Il tirafondo è dotato di rondelle ad elevata resistenza e anti-svitamento, le quali evitano che la connessione si allenti a seguito di ripetuti cicli di trazione e compressione. Il funzionamento della connessione viene garantito dall'applicazione di una rotazione aggiuntiva del dado superiore, a seguito del serraggio a rifiuto, la quale va a imporre una leggera pretensione al tirafondo in funzione del diametro. Inoltre, i tirafondi vengono prodotti in acciaio di tipo C, ovvero l'acciaio più duttile.
Si è iniettata della resina epossidica nel foro della piastra di base in modo da compensare le tolleranze necessarie in fase di posa e rendere così solidali tirafondo e scarpa. Ciò porta a una significativa riduzione, verificata sperimentalmente, del cosiddetto effetto di "pin-

ching" nei cicli di isteresi, con conseguente ampliamento dell'area sottesa e quindi della dissipazione energetica.
La malta fibrorinforzata per l'inghisaggio riduce lo spalling alla base del pilastro mentre la staffa post-saldata alla base del pilastro limita spostamenti e rotazioni relativi delle scarpe, così da ridurre la formazione di fessure nella zona del giunto.
Infine, le superfici di getto alla base del pilastro e sul piano di fondazione sono state indentate, così da dare luogo alla formazione di puntoni compressi di malta fibrorinforzata tra l'indentatura superiore (ossia la base del pilastro) e quella inferiore (ossia la fondazione). La resistenza a taglio del giunto sfrutta quindi sia l'attrito sia l'ingranamento meccanico delle superfici.

3. LE INDAGINI SPERIMENTALI

Nel corso del programma sperimentale fra il 2008 e il 2015, diverse sono state le tipologie di connessioni testate, variando tirafondi e scarpe, rondelle, malta di inghisaggio e applicando diversi livelli di pretensione ai tirafondi, alla ricerca della configurazione ottimale (Jurina et al. 2016). Alcune configurazioni sono state testate più volte per verificare la ripetibilità dei risultati.

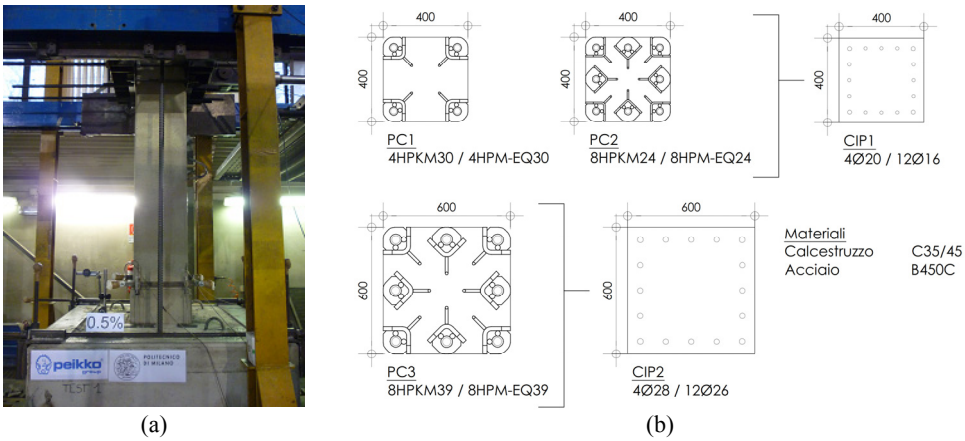


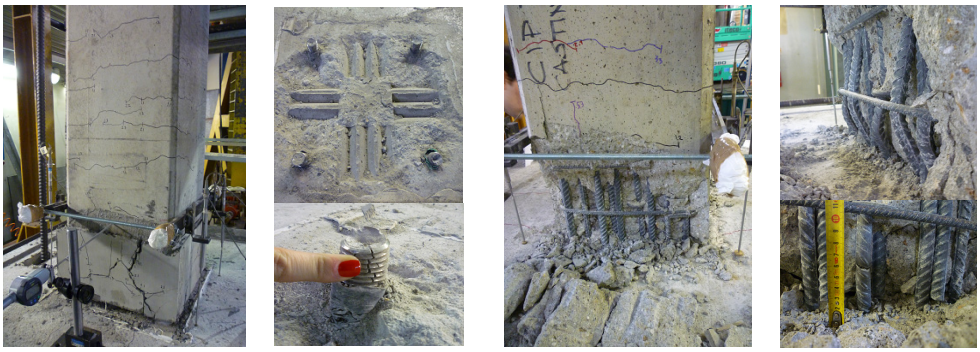
Figura 3. (a) Vista generale del provino in laboratorio;
(b) Sezioni e materiali dei provini prefabbricati e gettati in opera.

Prova del comportamento emulativo della connessione Peikko HPKM®– HPM®-EQ è stato il confronto sperimentale fra sotto-insiemi strutturali pilastro-fondazione prefabbricati e gettati in opera, in conformità alle attuali Norme Tecniche (NTC 2008).
Entrambe le tipologie di provini sono state sottoposte a prove oligo-cicliche in controllo di spostamento, con carico verticale costante e pari a un rapporto di compressione del 10% circa.
Si sono imposti tre cicli di spostamento per ogni livello di drift a spostamento crescente fi-

no a rottura (
Figura **3**a). Le sezioni ed i materiali dei provini confrontati sono mostrati in
Figura **3**b. I provini gettati in opera (Cast In Place-CIP) sono stati progettati in maniera conforme a CEN (2004a, 2004b) per la progettazione in classe di duttilità alta (DCH) e per avere una resistenza pari a quella dei provini prefabbricati. In particolare, il pilastro CIP2 soddisfaceva anche i requisiti contenuti in ACI (2014) per i telai a momento resistente cosiddetti "speciali".

3.1. Risultati

I provini prefabbricati hanno tutti presentato un danneggiamento localizzato in corrispondenza della malta di inghisaggio, la quale ha riportato un quadro fessurativo esteso al termine delle prove (
Figura **4**a). Il distacco della malta è stato però impedito dalla presenza delle fibre di acciaio, che hanno "contenuto" le porzioni di malta ai lati delle fessure.
Il collasso è avvenuto per rottura dei tirafondi, la quale si è generalmente verificata al di sotto del dado inferiore o del piano di fondazione, evidenziando il raggiungimento del picco di sforzi nel giunto di interfaccia pilastro-fondazione.
I tirafondi hanno in genere presentato un danneggiamento della filettatura, presumibilmente dovuto alla sollecitazioni cicliche di trazione e compressione (
Figura **4**a).



(a) (b)

Figura 4. (a) Vista del provino PC1 e tirafondi a rottura con danneggiamento della filettatura; (b) Vista del provino CIP1 con barre longitudinali instabilizzate e a rottura.

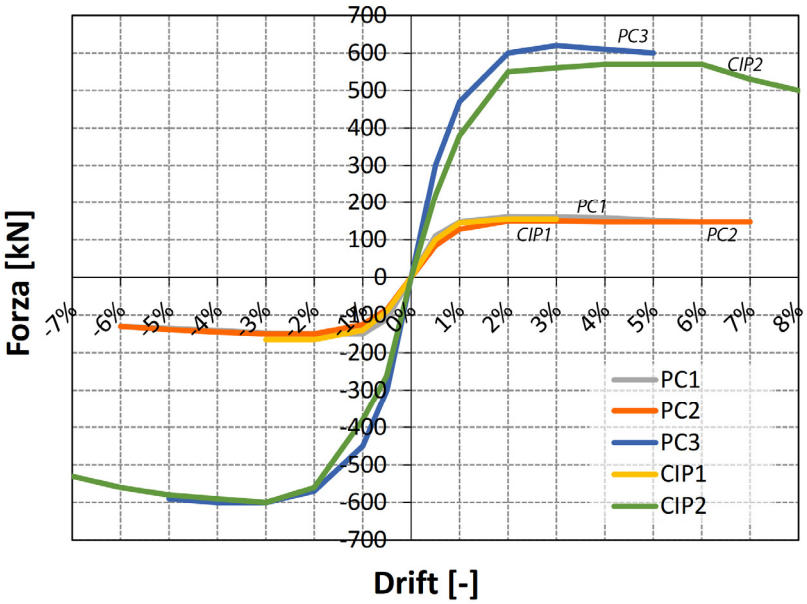
I provini gettati in opera hanno invece mostrato un danneggiamento più esteso con evidente spalling alla base del pilastro e fessurazioni sulla superficie di fondazione (
Figura **4**b). In particolare, nel provino CIP1 si è verificata l'instabilizzazione delle barre di armatura longitudinale con conseguente rottura di una di queste (
Figura **4**b). Tale fenomeno e la perdita di parte della sezione resistente di calcestruzzo hanno portato ad un degrado della resistenza superiore del 20%, già per drift del 5%.

3.2. Analisi dei dati

Uno dei principali parametri per la progettazione sismica è la duttilità in spostamento, cioè il rapporto fra lo spostamento a rottura e lo spostamento a snervemento di un elemento strutturale. Tale rapporto misura la capacità della connessione di sostenere cicli di deformazione ampi in campo plastico, senza una sostanziale riduzione di resistenza (ACI 2013). Tutti i provini prefabbricati hanno raggiunto una duttilità in spostamento μ almeno pari o superiore a 4, mostrando una buona capacità di deformazione post-elastica (Tabella 1).

Provino		PC1	PC2	PC3	CIP1	CIP2
+Δ	Δ_y	0.8	1.3	1.5	1.0	1.8
	μ_Δ	8.8	6.2	4.0	4.0	>5.0
-Δ	Δ_y	0.8	0.9	1.7	1.2	1.8
	μ_Δ	8.8	6.3	3.5	3.3	>4.4

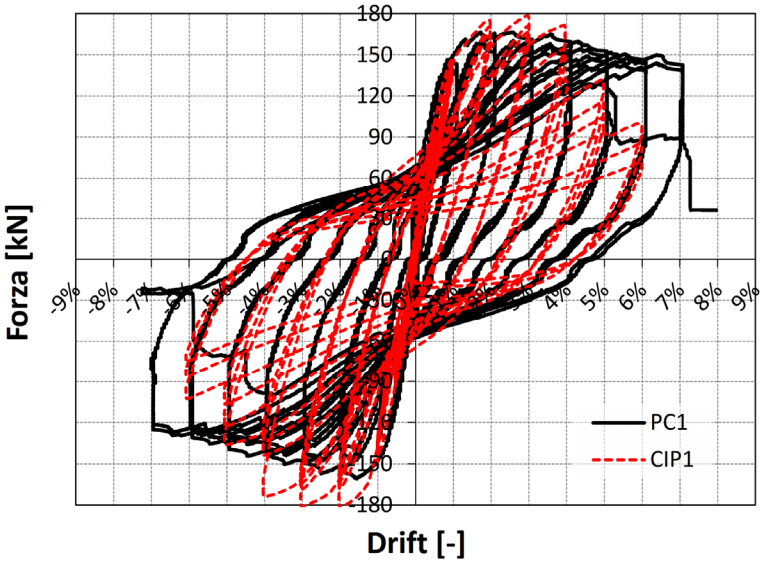
Tabella 1. Valori di drift a snervamento [%] e duttilità per spostamenti positive e negativi.



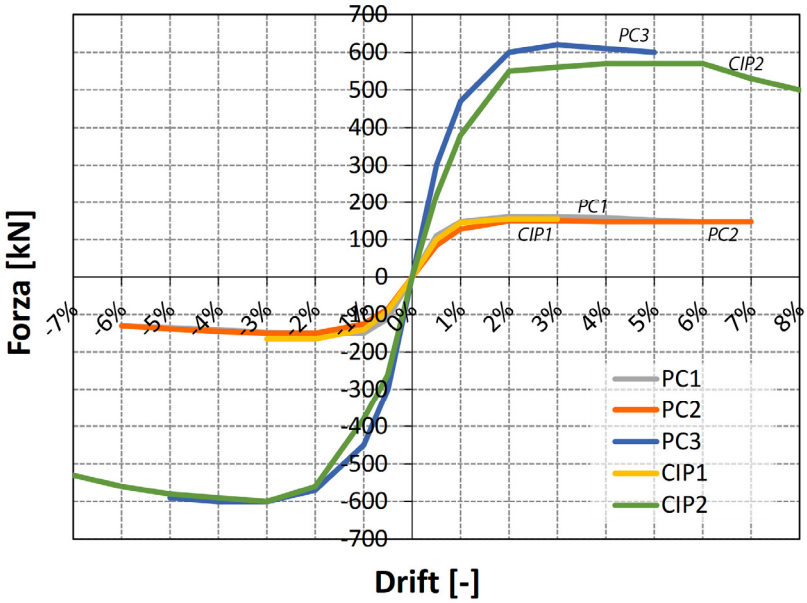
La
(b)

Figura 5a mostra il confronto fra le curve forza-spostamento dei provini PC1 e CIP1. Si può notare come la capacità di deformazione del provino prefabbricato sia superiore a quella del corrispondente pilastro gettato in opera. Inoltre, il degrado di resistenza del provino prefabbricato è estremamente limitato, in accordo con il valore limite (< 20%) raccomandato da ICBO (1995), mentre il pilastro prefabbricato ha subito una brusca perdita di resistenza dopo il drift del 4% a causa dell'instabilizzazione delle barre e dello spalling del calce-

struzzo.



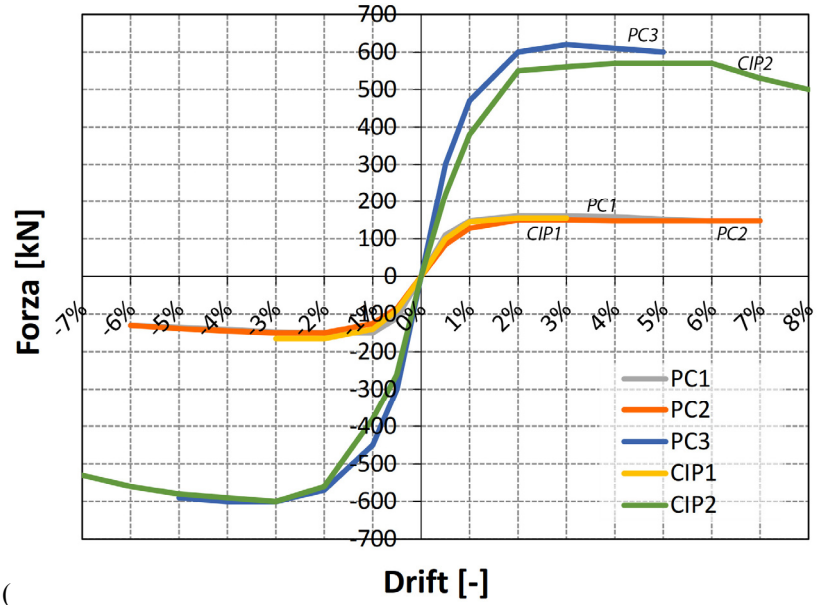
(a)



(b)

Figura 5. (a) Confronto fra la curva di isteresi dei provini PC1 e CIP1;
(b) Confronto fra le curve inviluppo.

Il confronto fra le curve inviluppo di tutte le tipologie di provini conferma che i pilastri prefabbricati e gettati in opera testati sono equivalenti in termini di resistenza secondo progetto



(
(b)

Figura 5b). Il provino PC2 mostra anche una maggiore capacità di deformazione del provino PC1, grazie alla presenza di più tirafondi di diametro minore. Il provino CIP2 è stato l'unico caso in cui non si è raggiunta la rottura, anche per drift superiori al 9%, e che ha mostrato migliori prestazioni rispetto all'equivalente provino prefabbricato PC3. Ciò è probabilmente dovuto alle barre di armatura in continuità fra pilastro e fondazione (ACI 2014).
Un altro parametro di confronto fra le prestazioni dei provini prefabbricati e gettati in opera è la capacità di dissipazione di energia. Lo smorzamento equivalente è stato calcolato sommando le componenti elastica (2 %) e isteretica. Si sono ottenuti valori simili del fattore di smorzamento equivalente per entrambe le tipologie di provini e in generale superiori al 37.5%, il che soddisfa i requisiti per connettori duttili stabiliti da ICBO (1995) (
Figura **6**a). Inoltre, i provini prefabbricati hanno mostrato cicli di isteresi anche più stabili. Infine, la
Figura **6**b dimostra che le connessioni bullonate offrono la stessa rigidezza dei giunti monolitici. Si può inoltre notare come il degrado della rigidezza sia graduale e senza brusche variazioni.

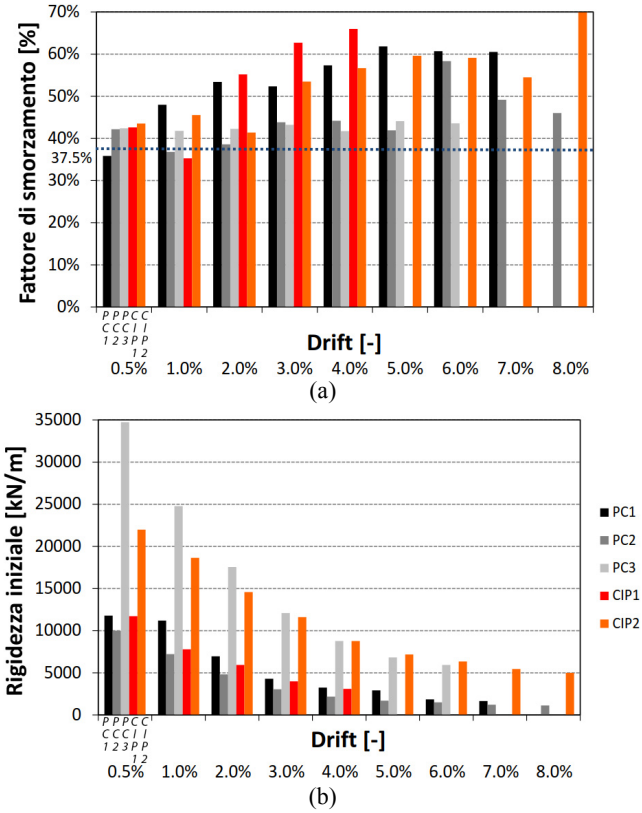
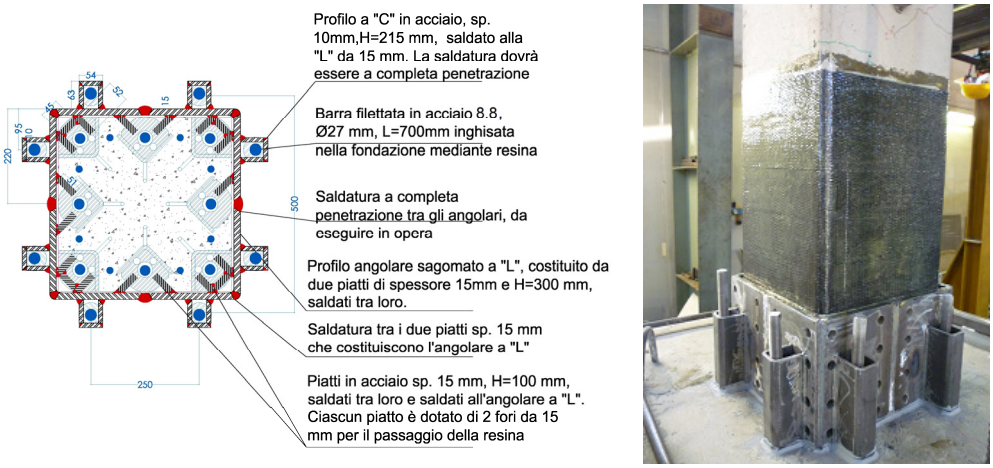


Figura 6. Confronto fra (a) lo smorzamento equivalente e (b) la rigidezza iniziale.

4. CAPACITÀ RESIDUA DEL GIUNTO DANNEGGIATO

Il programma di ricerca si è concluso con la valutazione della capacità residua del pilastro e con la progettazione di un sistema di ripristino del giunto danneggiato.
L'obiettivo era quello di individuare una modalità di rinforzo che fosse strutturalmente efficace, adattabile a differenti geometrie di pilastri esistenti, non ingombrante, di facile esecuzione e possibilmente economica.
In termini di efficacia strutturale il nuovo sistema di connessione doveva essere in grado di garantire caratteristiche di resistenza e di duttilità pari o superiori a quelle originarie, pre-danneggiamento.
Una connessione prefabbricata realizzata con 8 scarpe HPKM24 e 8 tirafondi HPM-EQ24 è stata inizialmente soggetta a una prova ciclica, fino ad un drift massimo del 5%. Al raggiungimento di tale drift, la connessione presentava un livello di danneggiamento analogo a quello degli altri provini testati, ossia caratterizzato da una limitata riduzione della resistenza (4-5 % circa) e da fessure concentrate nella parte bassa del pilastro, in corrispondenza

del giunto.
Al termine della prima fase di prova, il collare di malta di inghisaggio danneggiato è stato rimosso, esponendo le otto scarpe.
Si è quindi proceduto all'installazione del sistema di ripristino, il quale constava di quattro piastre metalliche angolari, di un bendaggio in FRP e di otto tirafondi di collegamento tra gli angolari e la fondazione (
Figura **7**a).
Si sono posizionate le piastre metalliche angolari, dotate di mensole saldate all'angolare ed in appoggio sulle 8 scarpe HPKM24, ai lati del dado. Il sistema di connessione originario è stato mantenuto in opera, così da poter sfruttare la capacità di resistenza residua dei vari elementi. I quattro angolari posti in opera sono stati saldati tra loro e collegati all'elemento di fondazione tramite otto tirafondi filettati ø27, in acciaio di classe 8.8, inghisati con resina all'interno di fori praticati nel plinto di fondazione e passanti attraverso altrettanti tubolari di collegamento, saldati alle piastre stesse.
Gli incavi delle scarpe HPKM24, il gap di circa 15 mm tra gli angolari metallici ed il pilastro in c.a. e gli otto tubolari di collegamento sono stati riempiti con malta fluida da inghisaggio. Infine, si è bendato in FRP del pilastro per 50 cm al di sopra delle piastre, in modo tale da confinare il pilastro in una zona soggetta a fessure orizzontali diffuse (
Figura **7**b), e si sono serrati a rifiuto i dadi in sommità degli otto tirafondi post-inseriti.

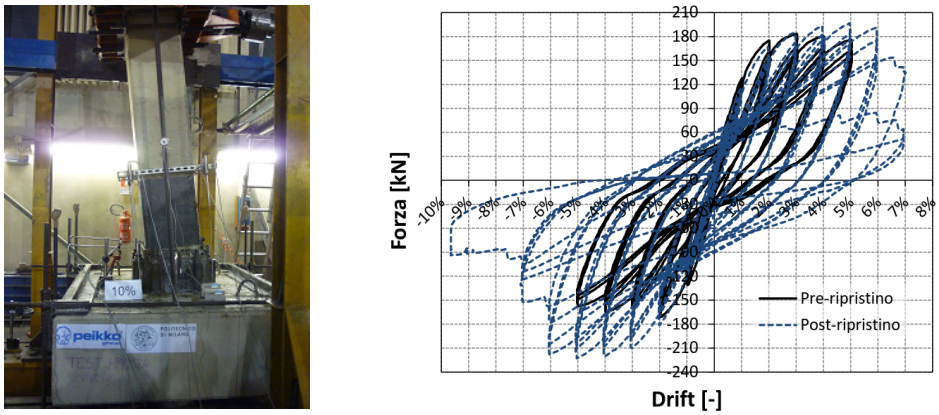


(a) (b)

Figura 7. (a) Sezione orizzontale del sistema di ripristino; (b) Particolare del sistema di ripristino durante l'installazione.

Il pilastro ripristinato è stato nuovamente sottoposto ad una prova ciclica, seguendo la medesima storia di carico dei precedenti test (
Figura **8**a). I risultati sono stati più che soddisfacenti, in termini di resistenza e di duttilità. Osservando il confronto tra le due curve sperimentali pre- e post-intervento (
Figura **8**b), si nota una perfetta coincidenza tra i valori ottenuti fino al 3% di drift, ed addi-

rittura un incremento della resistenza orizzontale nella situazione consolidata, fino al 6% di drift. Anche l'energia dissipata risulta maggiore nella configurazione post-intervento rispetto a quella originaria. La prova si è conclusa al 10% di drift, mostrando come il sistema sia in grado di riportare una connessione danneggiata da carichi orizzontali ad adeguati livelli di resistenza.



(a) (b)

Figura 8. (a) Vista generale del provino al termine del test; (b) Confronto delle curve di isteresi della connessione prefabbricata pre- e post-ripristino.

5. CONCLUSIONI

La connessione fra pilastro prefabbricato e fondazione di tipo emulativo unisce i vantaggi delle unioni bullonate al rispetto degli attuali requisiti normativi riguardanti i collegamenti dissipativi. In fase di esecuzione, il procedimento costruttivo è agevole grazie all'assenza di puntellature, a una limitata profondità di scavo e una ridotta armatura supplementare. In fase di progettazione, il giunto viene verificato come una tradizionale sezione in calcestruzzo armato non sovra-dimensionata, grazie alle caratteristiche di duttilità della connessione.
Infatti, le connessioni Peikko per applicazioni sismiche hanno sperimentalmente mostrato un comportamento ciclico stabile e dissipativo con duttilità pari o superiore a 4, per rapporti di compressione assiale fino al 15%. A conclusione del programma di ricerca, il Politecnico di Milano ha rilasciato un documento in cui si dichiara che i pilastri prefabbricati aventi le connessioni testate devono essere classificati come elementi sismici primari equivalenti a quelli gettati in opera.
Tali connessioni vengono definite pre-qualificate, ovvero sono connessioni dove l'utilizzo di componenti standard e le definite modalità di realizzazione fanno sì che le reali prestazioni non siano differenti da quelle osservate in laboratorio. Inoltre, i pilastri anche gravemente danneggiati da sisma possono recuperare livelli di rigidezza e resistenza uguali o superiori a quelli iniziali grazie a interventi di ripristino mirati.
I risultati sperimentali, la chiara procedura di progettazione e le semplici fasi di installazio-

ne rendono quindi le connessioni bullonate Peikko una soluzione sicura, affidabile e vantaggiosa per le strutture prefabbricate in zona sismica.

BIBLIOGRAFIA

American Concrete Institute (ACI) 2014. *Building code requirements for structural concrete.* ACI Committee 318, ACI318-14.

American Concrete Institute (ACI) 2013. *Guide for Testing Reinforced Concrete Structural Elements under Slowly Applied Simulated Seismic Loads*. ACI Committee 374, ACI 374.2R-13.

Bianco, L., Santagati, S., Bolognini, D. & Nascimbene, R. 2009. Seismic response of columns connected to the foundation through a fastening technique. *Peikko News*, No. 1: pp. 13-20.

CEN (European Committee for Standardization) 2004a. *Eurocode 2: Design of concrete structures. General rules and rules for buildings*. EN 1992-1-1:2004.

CEN (European Committee for Standardization) 2004b. *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. EN 1998-1:2004.

EN 10025-2 2004. *Hot rolled products of structural steels. Technical delivery conditions for non-alloy structural steels*.

ETA-02/0006 2012. *Peikko HPM/L Anchor Bolt for the connection of prefabricated reinforced columns*.

ETA-13/0603 2013. *Column shoe for connecting columns to concrete structures*.

International Conference of Building Officials (ICBO) Evaluation Service 1995. *AC41. Acceptance criteria for ductile connectors in precast concrete special moment resisting frames*.

Jurina, L., Camnasio, E., Radaelli, E.O., Bianco, L. & Montenovo, S. 2016. Confronto sperimentale fra collegamenti pilastro-fondazione prefabbricati e gettati in opera. *Atti del CTE2016*, 27-28 Ottobre 2016, Roma.

Jurina, L., Iliopoulos, A., Bianco, L., Montenovo, S. & Radaelli, E.O. 2014a. Un'indagine sperimentale sulla risposta sismica di connessioni bullonate pilastro-fondazione. *Atti delle Giornate AICAP2014*, 22-24 Maggio 2014, Bergamo.

Jurina, L., Iliopoulos, A., Camnasio, E., Bianco, L., Montenovo, S. & Radaelli, E.O. 2014b. Sul comportamento sismico delle connessioni pilastro-fondazione. *Atti del CTE2014*, 6-8 Novembre 2014, Milano.

Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) 2008. D.M. 14/02/2008.

Peikko Group Corporation 2012. *HPKM Column Shoe for bolted connections*. Manuale Tecnico.

Peikko Group Corporation 2009. *HPM and PPM bolts*. Manuale Tecnico.

Peikko Group Corporation 2016. *Bolted Column Connection for seismic applications*. Manuale Tecnico.