



# Risposta sismica di strutture intelaiate metalliche con collegamenti di base ricentranti e dissipatori ad attrito

Elena Elettore<sup>a</sup>, Fabio Freddi<sup>b</sup>, Massimo Latour<sup>a</sup>, Gianvittorio Rizzano<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Salerno, Via Giovanni Paolo II, 84084 Fisciano, Italy

<sup>b</sup> Civil Environmental Geomatic Engineering, University College London, Gower St, Bloomsbury, London WC1E 6BT, UK

*Keywords: Column base; Moment Resisting Steel frames; Seismic design; Residual storey drifts; Resilience.*

## ABSTRACT

La ricerca degli ultimi anni ha focalizzato sensibilmente l'attenzione su sistemi strutturali innovativi, allo scopo di ottenere un comportamento resiliente nei confronti delle azioni sismiche. Con riferimento alle strutture intelaiate metalliche, è abbastanza recente la proposta di impiegare collegamenti dotati di dissipatori ad attrito in grado di conferire all'edificio un comportamento a basso danneggiamento. Però, sebbene siano stati eseguiti in tempi recenti già un certo numero di analisi su connessioni trave-colonna, gli studi riferiti ai collegamenti di base sono attualmente molto limitati. I nodi di base sono tradizionalmente progettati per garantire una certa sovra-resistenza rispetto alla membratura collegata, assicurando che la dissipazione energetica avvenga nel profilato metallico, piuttosto che in piatti o ancoraggi. Questo approccio, per quanto sia sicuramente in grado di conferire un'adeguata duttilità e capacità dissipativa, non è però capace di assicurare che la struttura sia effettivamente riparabile al termine dell'evento. Il presente studio si propone di esaminare la possibilità di sostituire il tradizionale collegamento di base a completo ripristino di resistenza con una connessione innovativa basata sull'impiego di dissipatori ad attrito ed elementi di ricentraggio, in linea con gli obiettivi del progetto europeo FREEDAM. Il lavoro presenta una procedura per il progetto del nodo di base e, successivamente, i primi risultati di un'analisi numerica volta a confrontare la risposta di telai tradizionali con quella di strutture con nodi di base ricentranti. Le analisi dinamiche non lineari hanno mostrato che l'impiego dei collegamenti proposti è capace di ottimizzare il comportamento dell'intera struttura, riducendo il danneggiamento locale e conferendo una migliore capacità di auto-ricentraggio all'intero edificio.

## 1 INTRODUZIONE

Negli ultimi due decenni, gran parte della ricerca si è concentrata sullo sviluppo di metodi innovativi di progettazione, al fine di migliorare le prestazioni sismiche delle strutture. Secondo i codici moderni, le strutture devono essere progettate per rimanere in campo elastico o per riportare solo lievi danni in caso di eventi sismici 'frequenti', a bassa intensità (*i.e.*, Stato Limite di Danno). Diversamente, in caso di eventi sismici 'rari', ad alta intensità, (*i.e.*, Stato Limite Ultimo) un danneggiamento esteso è generalmente ritenuto accettabile. In quest'ultimo caso, le strutture sono tipicamente progettate affinché il danno sismico sia concentrato in zone specifiche, denominate cerniere plastiche, la cui duttilità e capacità di dissipazione dell'energia sismica in ingresso richiedono l'adozione di specifiche regole di dettaglio. Allo stesso tempo, anche la duttilità globale può essere raggiunta mediante l'utilizzo di regole di progettazione adeguate, con l'obiettivo di

consentire lo sviluppo di un meccanismo di collasso di tipo globale. Nei telai sismo-resistenti in acciaio (*i.e.*, Moment Resisting Frames MRFs), questa strategia si traduce nell'adozione di colonne e connessioni sovra-resistenti e travi deboli. Questo approccio, se da un lato consente di raggiungere i requisiti di sicurezza specificati nei codici sismici, dall'altro lato, ha l'inconveniente di causare grandi perdite economiche. Infatti, poiché le zone dissipative appartengono ai principali elementi strutturali, dopo un evento sismico distruttivo, la struttura risulta significativamente danneggiata e caratterizzata da grandi spostamenti residui. Ciò implica elevate perdite dirette (*i.e.*, costi di riparazione) e indirette (*i.e.*, interruzioni di business) che, in molti casi, non sono accettabili dal punto di vista sia sociale che economico.

Per ovviare a questi inconvenienti, negli ultimi decenni, molti lavori di ricerca si sono concentrati sullo sviluppo di sistemi strutturali 'resilienti', in cui gli elementi danneggiati dal sisma possono essere facilmente sostituiti o riparati. In quest'ottica, nei MRFs in acciaio, le tradizionali

connessioni a pieno ripristino di resistenza possono essere sostituite da collegamenti a parziale ripristino dove la parte più debole della connessione è rappresentata da dissipatori ad attrito. Questo approccio consente di migliorare significativamente la riparabilità della struttura, senza comprometterne le prestazioni sismiche.

Grigorian e Popov (1993) sono stati tra i pionieri delle connessioni trave-colonna dotate di dispositivi ad attrito ed hanno ispirato numerosi lavori teorici, numerici e sperimentali, nonché applicazioni pratiche, tra cui l'utilizzo del giunto 'Slide Hinghe Joint' (SHJ) proposto da Clifton e Butterworth (2000). Quest'ultimo rappresenta un tipo di connessione trave-colonna asimmetrica e ad attrito, dotata di un sistema di dissipazione di energia supplementare collegato alla flangia inferiore della trave con fori asolati per consentire lo scorrimento, mentre la flangia superiore è saldata alla colonna.

Recentemente, nell'ambito del progetto europeo FREEDAM (FREE DAMAge Steel Connections, 2015-2018), è stata proposta una nuova tipologia di collegamento trave-colonna a basso danneggiamento, basata sull'utilizzo di dispositivi simmetrici ad attrito per l'applicazione nei telai sismo-resistenti in acciaio (Latour et al. 2018). Questa connessione, in modo analogo allo 'SHJ', include un dispositivo ad attrito collegato alla flangia inferiore della trave con bulloni ad alta resistenza precaricati. Questo dispositivo è progettato per comportarsi in modo rigido per terremoti a bassa intensità e consentire rotazioni trave-colonna per eventi sismici di grande intensità.

Sebbene l'uso di connessioni trave-colonna dotate di dispositivi ad attrito rappresenti una soluzione efficiente per proteggere la struttura da eventuali danni, esso non consente di controllare gli spostamenti residui. Questo problema è stato affrontato da diversi ricercatori introducendo il concetto di forze elastiche di richiamo sotto forma di barre post-tese (PT), in grado di controllare il meccanismo di 'rocking', come in Ricles et al. (2001) dove è proposto un innovativo sistema strutturale in cui le travi sono post-tese alle colonne mediante trefoli ad alta resistenza. Queste consentono il ricentraggio della struttura riducendo gli spostamenti residui sotto il sisma di progetto.

I telai sismo-resistenti in acciaio con connessioni trave-colonna innovative sono stati ampiamente studiati negli ultimi decenni, tuttavia, l'utilizzo di dispositivi ad attrito nei nodi di base è stato investigato solo recentemente. In McRae et al. (2009) sono presentate due tipologie di nodi di base, basati sul concetto 'SHJ', in grado di fornire

capacità dissipative e, allo stesso tempo, di impedire la plasticizzazione della colonna. In Freddi et al. (2017) viene presentato un nodo di base in acciaio in cui la dissipazione dell'energia sismica è fornita da dispositivi ad attrito e il comportamento 'rocking' è controllato da barre in acciaio post-tese ad alta resistenza. Semplici equazioni analitiche sono state utilizzate per descrivere il comportamento momento-rotazione della connessione, mentre analisi dinamiche non lineari mostrano il potenziale del nodo di base nel prevenire la plasticizzazione della colonna del piano terra e nell'eliminare gli spostamenti residui del primo piano. In modo analogo, in Kamperidis et al. (2018) è proposto un nodo di base a basso danneggiamento, dotato di barre post-tese al fine di garantire un comportamento ricentrante mentre in questo caso la dissipazione dell'energia sismica è affidata a dispositivi isteretici.

Recentemente, in linea con la filosofia sposata nel progetto FREEDAM, (Latour et al. 2019) è stata proposta e studiata sperimentalmente una connessione di base innovativa in cui il comportamento sismico è controllato da una combinazione di dispositivi ad attrito e barre filettate precaricate con rondelle, che introducono forze elastiche di ripristino. I test sperimentali ne hanno dimostrato le potenzialità ricentrante e il basso danneggiamento.

Il presente lavoro confronta la risposta sismica di un telaio sismo-resistente tradizionale in acciaio con connessioni trave-colonna a pieno ripristino di resistenza e una struttura equivalente dotata dell'innovativo nodo di base, studiato in Latour et al. (2019). In entrambi i casi i giunti trave-colonna sono convenzionali giunti saldati e il progetto viene eseguito in conformità con gli Eurocodici. L'obiettivo principale è quello di valutare le capacità di ricentraggio dei due sistemi e l'effetto benefico del nodo di base della colonna nel ridurre gli spostamenti residui dopo eventi sismici di elevata intensità.

Nelle sezioni seguenti viene inizialmente progettato un edificio, selezionato come caso studio, con e senza il nodo di base proposto. Lo studio numerico viene effettuato mediante OpenSees e la modellazione del telaio e del nodo viene accuratamente descritta. Successivamente la risposta sismica delle due configurazioni viene valutata e confrontata in termini di spostamenti residui e massimi di interpiano indotti dal terremoto di progetto allo Stato Limite Ultimo (SLU) e massimo credibile (Stato Limite di Collasso, SLC).

## 2 CASO STUDIO

Il caso studio consiste in un edificio di 4 piani avente 5 campate in direzione -x e 3 campate in direzione -y. Il layout considerato ha altezza di interpiano di 3,20 m, ad eccezione del primo livello, la cui altezza è pari a 3,50 m, mentre tutte le campate hanno luce di 6 m. I telai sismo-resistenti perimetrali si trovano nella direzione -x, mentre in direzione -y la struttura è controventata. Le viste in pianta e in elevazione sono riportate in Figura 1 (a) e (b), rispettivamente. Il progetto è stato eseguito secondo Eurocodice 8. Il terremoto di progetto allo SLU (*i.e.*, probabilità di superamento del 10% in 50 anni) è stato definito con spettro di risposta elastico di tipo 1, accelerazione di picco al suolo pari a 0,35 g e terreno di tipo C. L'edificio ha elementi non strutturali tali da non interferire con le deformazioni strutturali e, pertanto, il limite di spostamento di interpiano per lo stato limite di danno (*i.e.*, probabilità del 10% di superamento in 10 anni) è assunto pari all' 1%. Si presume che il massimo terremoto credibile (SLC) abbia un'intensità pari al 150% rispetto a quello dello SLU. La resistenza a snervamento dell'acciaio è pari a 355 MPa per le colonne, 275 MPa per le travi e 900 MPa per le barre post-tese. I profili selezionati sono IPE 550 e IPE 500 per le travi, mentre HE 600B e HE 500B per le colonne dei primi ed ultimi due piani, rispettivamente. Lo studio si concentra sulla valutazione della risposta sismica della struttura in direzione -x, dove sono presenti i telai sismo-resistenti. Il telaio di riferimento (MRF) è stato progettato con nodi di base tradizionali, in modo tale da promuovere la formazione di cerniere plastiche nella parte inferiore delle colonne del primo piano. Diversamente, il telaio con nodi di base ricentranti (MRF-CB) risulta esente dal danneggiamento, in quanto la connessione impedisce alla colonna del primo piano di entrare in campo plastico.

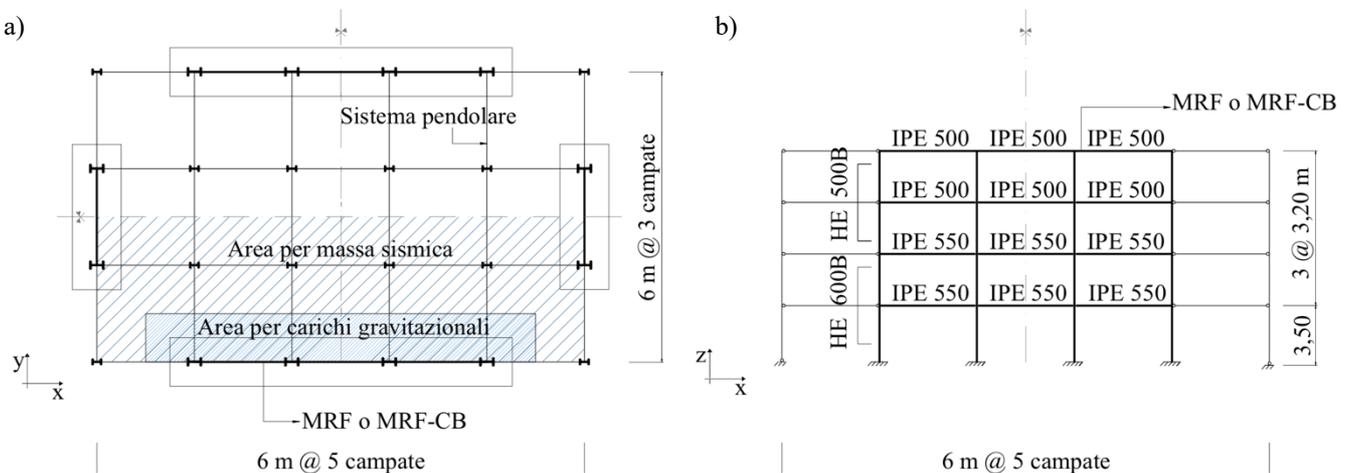


Figura 1. (a) Pianta e (b) vista in elevazione dell'edificio caso-studio.

## 3 PROGETTO DEL NODO DI BASE

### 3.1 Concept

Il nodo di base oggetto di studio, già testato da Latour et al. (2019), consiste in una connessione dotata di dispositivi ad attrito capaci di dissipare l'energia sismica in ingresso e barre post-tese con rondelle 'disk springs', che introducono forze di ripristino nel giunto, garantendo il comportamento ricentrante. I collegamenti ad attrito simmetrici vengono realizzati rinforzando la parte superiore della colonna, sopra la giunzione, con piastre e bulloni ad alta resistenza precaricati, sia sull'anima che sulle flange, garantendo la dissipazione dell'energia grazie allo scorrimento relativo delle superfici a contatto. Il comportamento ciclico di questi dispositivi è caratterizzato da un modello isteretico rigido-plastico, che dipende dalla forza di serraggio e dal coefficiente di attrito  $\mu$ . Il comportamento ricentrante è garantito dal sistema barre e disk springs, che aumenta la tendenza della struttura a ritornare verso la posizione iniziale, al termine dell'evento sismico. L'utilizzo combinato di queste due componenti è necessario al fine di creare un macro-elemento a molla, tale da garantire una deformabilità sufficiente alla connessione. Infatti le sole barre filettate non possiedono una rigidità adeguata per consentire l'apertura del 'gap' senza entrare in campo plastico. La forza ricentrante viene trasmessa alla colonna tramite due piatti di rinforzo, saldati nella parte superiore e inferiore dell'apertura del 'gap'. Inoltre, il collegamento bullonato con coprigiunti sull'anima e sulle flange della colonna sono realizzati con fori asolati tali da consentire una rotazione minima di 40 mrad stabilita da AISC 341-16, per telaio momento resistenti.

### 3.2 Dettagli strutturali

Il progetto basato sugli Eurocodici, ed eseguito sia carichi gravitazionali che sismici, fornisce colonne del primo piano con sezioni HE 600B in acciaio S355. La base della colonna è costituita da due parti, collegate mediante piastre in acciaio S355, fissate all'anima e alle flange con bulloni pre-caricati ad alta resistenza HV M30 classe 10.9 ed applicate sia nella parte esterna che interna della colonna. I dispositivi ad attrito sono costituiti da spessori in acciaio termicamente spruzzati di 8 mm di spessore, posizionati tra le piastre in acciaio e la colonna. La Figura 2 mostra una vista 3D (a) e una vista esplosa (b) della connessione di base proposta e dei diversi elementi.

### 3.3 Relazione momento-rotazione

Le forze previste in ciascun componente durante l'apertura possono essere rappresentate imponendo l'equilibrio statico alla traslazione e alla rotazione attorno al centro di rotazione (COR), considerando la simmetria della connessione, come riportato in Figura 3 (a).

$F_w$  e  $F_f$  rappresentano le forze dei dispositivi dell'anima e delle flange rispettivamente, mentre  $F_{TB}$  rappresenta la forza del sistema barre con rondelle.  $F_{TB,0}$  rappresenta la forza di post-tensione mentre  $\Delta F_{TB}$  rappresenta la forza addizionale dovuta all'apertura.

Il comportamento momento-rotazione del nodo di base è funzione della risposta di ciascun componente ed è rappresentato da una curva a bandiera, come evidenziato in Figura 3 (b).

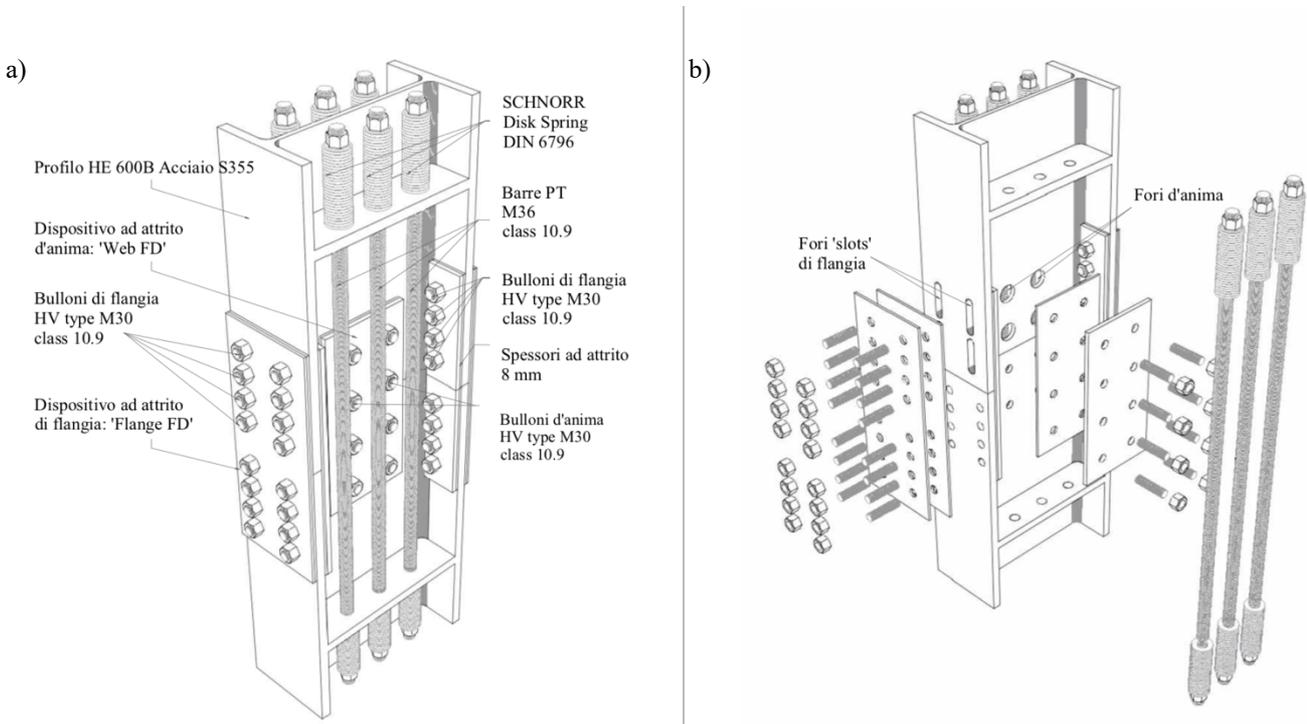


Figura 2. Dettagli della connessione di base proposta: (a) Vista 3D; (b) Esploso 3D.

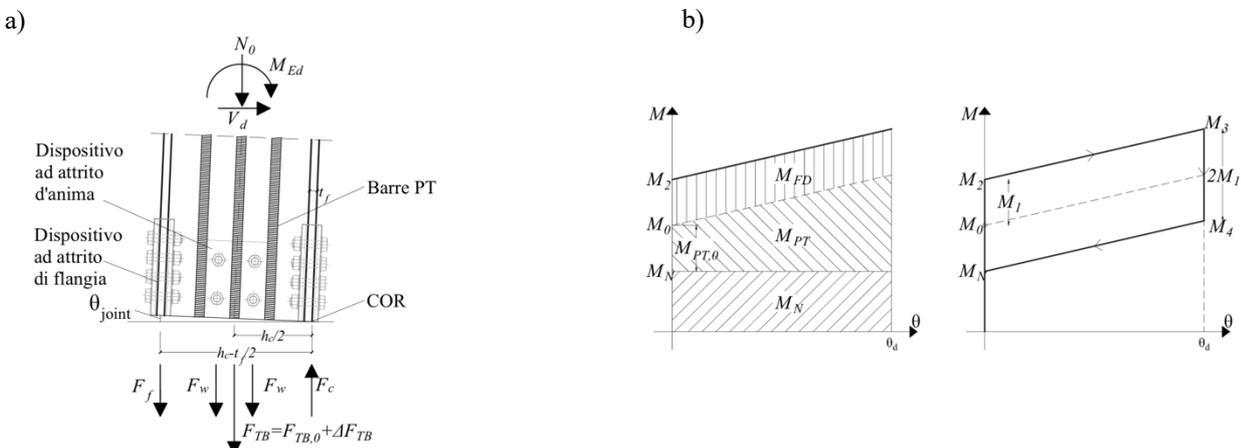


Figura 3. Comportamento della connessione di base. (a) Interazione tra le diverse azioni durante la fase di apertura del 'gap'; (b) Relazione teorica momento-rotazione: contributo dei diversi componenti e comportamento isteretico.

$M_0$  rappresenta il momento di decompressione, somma del contributo del momento dovuto ai carichi gravitazionali direttamente applicati sulla struttura ( $M_N$ ) e del momento prodotto dalle barre post-tese nel momento in cui la rotazione è nulla ( $M_{PT,0}$ ).  $M_0$  è calcolato come segue:

$$M_0 = (N_0 + F_{TB,0}) \frac{h_c}{2} \quad (1)$$

dove  $N_0$  è lo sforzo normale applicato sulla sezione,  $F_{TB,0}$  è la forza di post-tensione delle barre e  $h_c$  è l'altezza della sezione della colonna.

$M_1 = M_{FD}$  rappresenta il momento dovuto al contributo dei dispositivi ad attrito ed è uguale a:

$$M_1 = F_f \left( h_c - \frac{t_{fc}}{2} \right) + 2F_w \frac{h_c}{2} \quad (2)$$

dove  $F_f$  e  $F_w$  rappresentano le forze di scorrimento dei dispositivi ad attrito rispettivamente per l'anima e la flangia.  $M_2$  è il momento che si sviluppa nell'istante di apertura del 'gap' ed è dato dalla somma di  $M_0$  e  $M_1$ , mentre  $M_3$  è il momento raggiunto alla massima rotazione di progetto  $\theta_{joint} = 0,04$  rad, il cui valore è determinato tenendo in conto le forze aggiuntive presenti nelle barre post-tese, conseguenza dell'apertura del 'gap'.

$$M_3 = M_0 + M_1 + \Delta M_{PT} \quad (3)$$

$$\Delta M_{PT} = \Delta F_{TB} \cdot \frac{h_c}{2} \quad (4)$$

$$\Delta F_{TB} = K_{eq} \theta_{joint} \cdot \frac{h_c}{2} \quad (5)$$

dove  $K_{eq}$  è la rigidezza rotazionale dell'intero sistema che può essere determinata come segue:

$$K_{eq} = \frac{K_{TB} \cdot K_{ds}}{K_{TB} + K_{ds}} \quad (6)$$

La rigidezza del sistema barre ( $K_{TB}$ ) e la rigidezza del sistema di disk springs ( $K_{ds}$ ) sono fornite dalle seguenti relazioni:

$$K_{TB} = \frac{n_{tb} E_{tb} A_{tb}}{l_{tb} + l_{ds}} \quad (7)$$

$$K_{ds} = \frac{n_{par}}{n_{ser}} K_{ds1} \quad (8)$$

dove  $n_b$  è il numero di barre impiegate nella connessione, poste simmetricamente rispetto al

centro,  $l_{tb} + l_{ds}$  è la lunghezza delle barre e disk springs,  $n_{par}$  e  $n_{ser}$  sono il numero di disk springs in parallelo e in serie e  $K_{ds1}$  è la rigidezza della singola disk spring. Si sottolinea che il momento di massima rotazione  $M_3$  debba essere di valore inferiore al momento plastico della colonna, nell'ottica della progettazione a basso danneggiamento. Considerando le relazioni introdotte, il comportamento ricentrante della connessione può essere garantito se il momento di decompressione ( $M_0$ ) risulti più alto del momento prodotto dai dispositivi ad attrito ( $M_1$ ), che si traduce nella relazione seguente:

$$M_0 \geq M_1 \Rightarrow F_{TB} \geq F_f \left( 2 - \frac{t_{fc}}{h_c} \right) + 2F_w - N_0 \quad (9)$$

Le azioni di progetto per il nodo di base derivano dall'analisi sismica sul telaio dotato di nodi di base tradizionali a pieno ripristino di resistenza. Lo sforzo assiale  $N_0$  è assunto pari allo sforzo normale da combinazione per carichi gravitazionali ed è posto uguale a  $N_{0,int} = 400$  kN,  $N_{0,ext} = 200$  kN per la colonna interna ed esterna, rispettivamente. Il momento flettente è calcolato considerando la condizione più sfavorevole di sforzo normale e momento flettente, come richiesto da Eurocodice 8 (§6.6.3) (*i.e.*,  $M_{Ed} = M_{Ed,G} + 1.1 \gamma_{ov} \Omega M_{Ed,E}$ ) dove  $\gamma_{ov}$  è il fattore di sovrarresistenza pari a 1.25, mentre  $\Omega$  è il minimo fattore di  $\Omega_i = M_{Pl,Rd,i} / M_{Ed,i}$ , dove  $M_{Ed,i}$  è il valore del momento di progetto nella trave  $i$ -esima nella situazione sismica di progetto e  $M_{Pl,Rd,i}$  è il corrispondente momento plastico. I momenti flettenti di progetto sono definiti considerando la posizione della connessione e posti pari a  $M_{Ed,int} = 1985$  kNm and  $M_{Ed,ext} = 1875$  kNm per colonna interna ed esterna, rispettivamente. Infine, il taglio di progetto è assunto pari a  $V_d = M_{Ed} / L_0$ , dove  $L_0$  è la luce di taglio. Dunque,  $V_{d,int} = 894$  kN e  $V_{d,ext} = 845$  kN per la colonna interna ed esterna.

## 4 MODELLAZIONE STRUTTURALE

### 4.1 Modellazione del telaio

I telai oggetto di studio sono sviluppati mediante modelli bidimensionali in OpenSees (*e.g.*, Mazzoni et al. 2010) al fine di descrivere la risposta non lineare del sistema. Le travi rispondono a un modello a plasticità concentrata in cui la parte interna è modellata con elementi elastici, mentre le cerniere plastiche sono rappresentate da molle rotazionali associate a elementi 'zero-length'. Il comportamento delle molle rotazionali segue un modello isteretico

bilineare basato sul modello modificato di Ibarra-Krawinkler (2005), implementato da Lignos e Krawinkler (2011).

Diversamente, al fine di catturare l'interazione tra momento flettente e sforzo assiale, le colonne sono modellate con elementi 'non-linear beam-column' e ciascuna sezione è discretizzata in 4 fibre lungo la profondità. Il comportamento non lineare delle colonne è descritto attraverso il concetto di plasticità distribuita, in cui il comportamento plastico si verifica su una lunghezza finita. Per le colonne viene impiegato il materiale 'Steel01' di OpenSees con resistenza allo snervamento 355 MPa e rapporto di rigidezza post-snervamento 0,002. Riguardo le connessioni trave-colonna, la zona del pannello è modellata con il modello 'Scissor' (e.g., Charney and Downs, 2004) in cui due tratti rigidi sono collegati a un'unica cerniera al centro. La rotazione relativa dei due tratti rigidi è controllata da due molle rotazionali che rappresentano il comportamento a taglio della zona del pannello e a flessione della flangia, come indicato nel modello 'Krawinkler' (Krawinkler et al. 1987). La zona del pannello nodale è irrigidita con piastre doppie, al fine di promuovere l'impegno in campo plastico delle sole estremità delle travi.

Il diaframma è modellato assegnando un valore elevato alla rigidezza assiale delle travi. I carichi gravitazionali sono applicati sulle travi considerando la combinazione sismica da Eurocodice 8, mentre le masse sono concentrate a livello delle connessioni trave-colonna. Le sorgenti di smorzamento diverse dalla dissipazione di energia isterica sono modellate tramite la matrice di smorzamento Rayleigh, in cui i valori dei coefficienti di smorzamento relativi alla massa e alla rigidezza sono considerati per un fattore di smorzamento del 3% per i primi due modi di vibrazione.

## 4.2 Modellazione del nodo di base

Un modello bidimensionale agli elementi finiti del nodo di base proposto è sviluppato in OpenSees (e.g., Mazzoni et al. 2010), come riportato in Figura 4. La colonna è modellata con elementi a fibra associati al materiale 'Steel01' di OpenSees con resistenza allo snervamento 355 MPa e rapporto di rigidezza post-snervamento 0,002. Gli elementi rigidi dell'interfaccia 'rocking' sono modellati come 'elastic beam-column' con elevata rigidezza flessionale e vengono utilizzati per collegare la parte inferiore e superiore della colonna attraverso molle non lineari. Queste ultime sono rappresentate da quattro elementi bilineari 'zero-length' in parallelo con elementi 'gap' per simulare la risposta isteretica bilineare dei dispositivi ad attrito e il comportamento a contatto dell'interfaccia della colonna. I dissipatori di flangia ed anima sono modellati con il materiale 'Steel01' di OpenSees, considerando una rigidezza iniziale molto alta e una rigidezza post-elastica molto bassa per modellare il comportamento rigido-plastico. Gli elementi 'gap' sono rappresentati dal materiale 'Elastic-No Tension' (ENT) di OpenSees, che esibisce un comportamento forza-spostamento resistente a compressione e non a trazione. La rigidezza a compressione della molla di contatto è assunta pari a 10 volte la rigidezza assiale della colonna.

Inoltre, per modellare la forza fornita dalle barre post-tese con disk springs è utilizzata una molla traslazionale centrale 'zero-length', avente un comportamento bilineare elastico-plastico. Le sei barre PT, essendo posizionate simmetricamente, sono modellate da un'unica molla centrale avente rigidezza pari alla quella dell'intero sistema. La post-tensione iniziale è modellata imponendo una sollecitazione iniziale pari a  $F_{PT}/A_{PT}E_{PT}$  utilizzando il materiale elastoplastico 'Steel01', combinato mediante 'Initial Strain Material' di OpenSees.

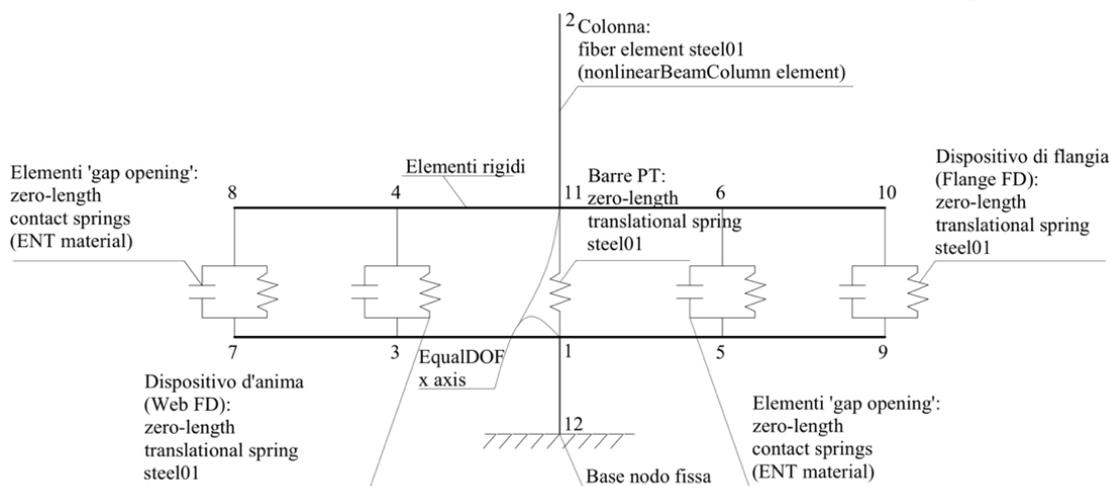


Figura 4. Modello bidimensionale della connessione di base in OpenSees.

### 4.3 Validazione del modello in OpenSees

Al fine di validare il modello in OpenSees (e.g., Mazzoni et al. 2010) è stato effettuato un confronto tra risultati numerici e sperimentali. A tal proposito, sono stati considerati i risultati sperimentali di diversi test ciclici realizzati su un modello a scala reale del nodo di base proposto eseguiti al Laboratorio Strutture dell'Università degli Studi di Salerno (Salerno, Italy), come parte del progetto europeo FREEDAM (2015-2018). La campagna sperimentale è stata eseguita su un campione HE 240B e ulteriori informazioni sono riportate in Latour et al. (2019).

I risultati numerici sono confrontati con i risultati sperimentali per 5 test ciclici, ottenuti variando lo sforzo assiale nella colonna, la forza di precarico dei bulloni dei dispositivi ad attrito FDs, considerando la presenza o meno delle barre ricentranti. Al fine di tenere in conto la perdita di precarico dei bulloni durante i test sperimentali, il coefficiente d'attrito è stato preventivamente ridotto del 20% rispetto ai valori di progetto. Per brevità, in Figura 5 è stato riportato il confronto tra i risultati sperimentali di due prove cicliche e i risultati numerici, da cui si evince una buona corrispondenza tra le due curve isteretiche.

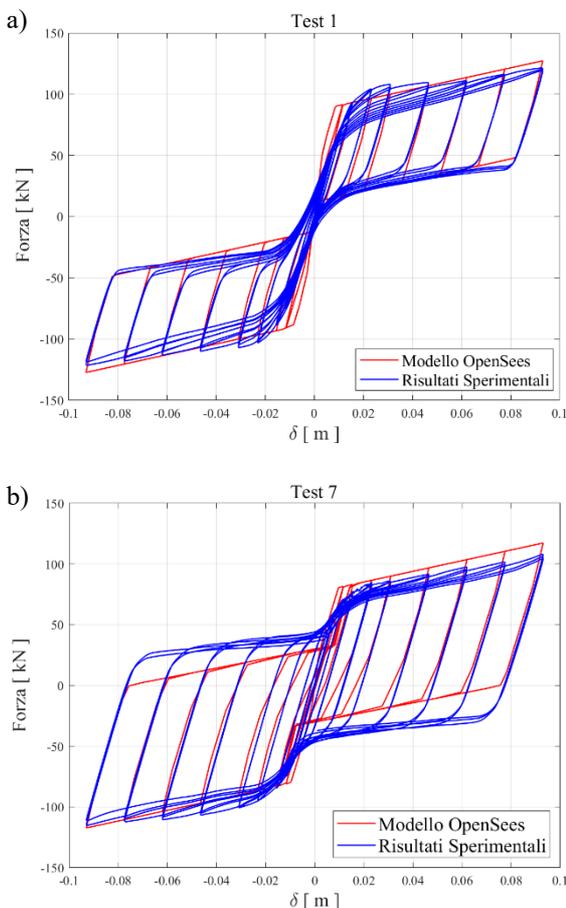


Figura 5. Comportamento della connessione in termini F- $\delta$ . Confronto tra modello OpenSees e risultati sperimentali (Laboratorio Strutture, UNISA) del TEST 1 (a) e TEST 7 (b).

## 5 ANALISI DINAMICHE NON-LINEARI INCREMENTALI

Analisi dinamiche non-lineari sono state eseguite al fine di analizzare e valutare la risposta sismica del telaio con nodi di base convenzionali (MRF) e lo stesso dotato dei nodi di base proposti (MRF-CB). Il periodo fondamentale di vibrazione  $T_1 = 0,74\text{sec}$  è lo stesso per entrambe le strutture. L'accelerazione spettrale corrispondente al tale periodo di vibrazione  $S_a(T_1)$  viene utilizzata come misura di intensità sismica (IM). Un set di 30 accelerogrammi naturali sono stati selezionati dal SIMBAD Database (e.g., Iervolino et al. 2010) e scalati secondo valori crescenti in modo da eseguire Analisi Dinamiche Incrementali 'IDAs' (e.g., Vamvatsikos and Cornell, 2002) fino al collasso. I parametri globali e locali vengono registrati al fine di effettuare il confronto delle prestazioni sismiche dei due sistemi. Le Figure 6 (a) e (b) mostrano il confronto degli spostamenti del primo piano per un singolo accelerogramma, rispettivamente per le intensità DBE e MCE (Stato Limite Ultimo e Stato Limite di Collasso secondo la definizione europea), dimostrando l'efficacia del nodo di base nel ridurre gli spostamenti residui del primo piano. Per lo stesso accelerogramma, le Figure 7 (a) e (b) mostrano la distribuzione degli spostamenti residui su tutti i piani. Si può osservare che, nonostante il sistema ricentrante sia presente solo al primo piano, esso consente una riduzione degli spostamenti residui sull'intera struttura. Infatti, per entrambe le condizioni limite, il telaio MRF-CB presenta valori di spostamenti d'interpiano residui inferiori allo 0,5%, considerata la soglia oltre la quale la riparazione dell'edificio potrebbe non essere economicamente sostenibile (e.g., McCormick et al. 2008). Questo limite non è soddisfatto per la struttura con nodi di base tradizionali. Le Figure 7 (c) e (d) riportano gli spostamenti d'interpiano massimi, mostrando la scarsa influenza dei nodi di base nei parametri di risposta massima della struttura, come previsto. Lo studio dei parametri locali evidenzia che le travi sviluppano cerniere plastiche e le zone del pannello nodale rimangono nel campo elastico, in entrambe le strutture, mentre le sezioni inferiori delle colonne del primo piano rimangono in campo elastico per l'MRF-CB. La Figura 8 confronta il comportamento momento-curvatura nelle sezioni delle colonne inferiori delle due strutture, mostrando che la struttura con nodi di base convenzionali subisce deformazioni e danni plastici, portando così alla necessità di essere riparata dopo forti terremoti. Diversamente, il telaio MRF-CB protegge completamente le colonne per entrambe le condizioni limite.

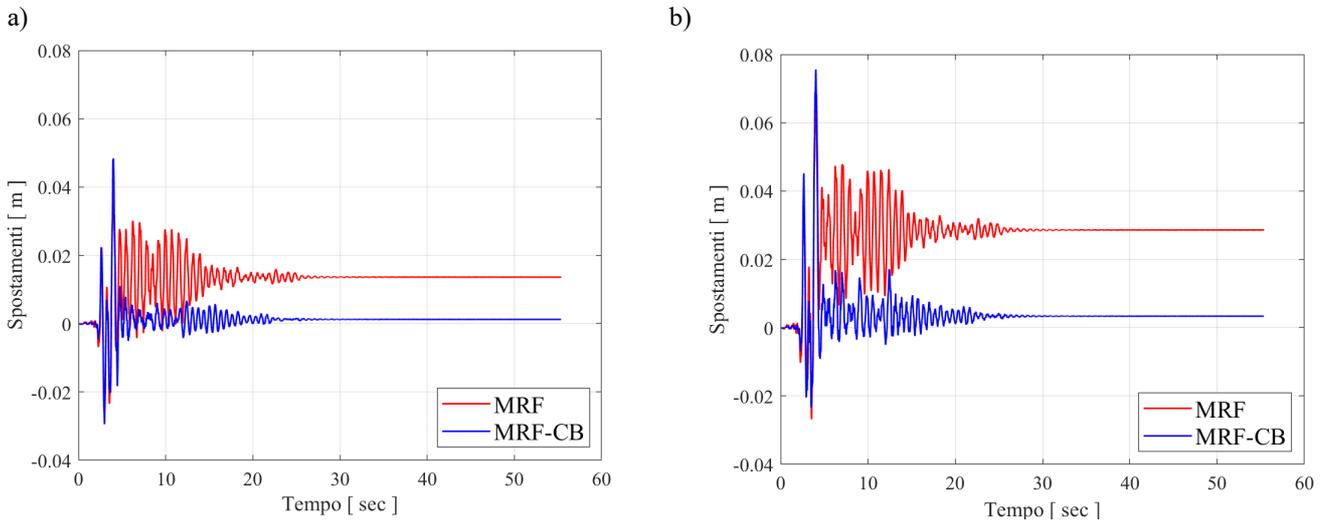


Figura 6. Confronto della storia di spostamenti assoluti del 1° piano delle due strutture per (a) Stato Limite Ultimo (DBE) e (b) Stato Limite di Collasso (MCE).

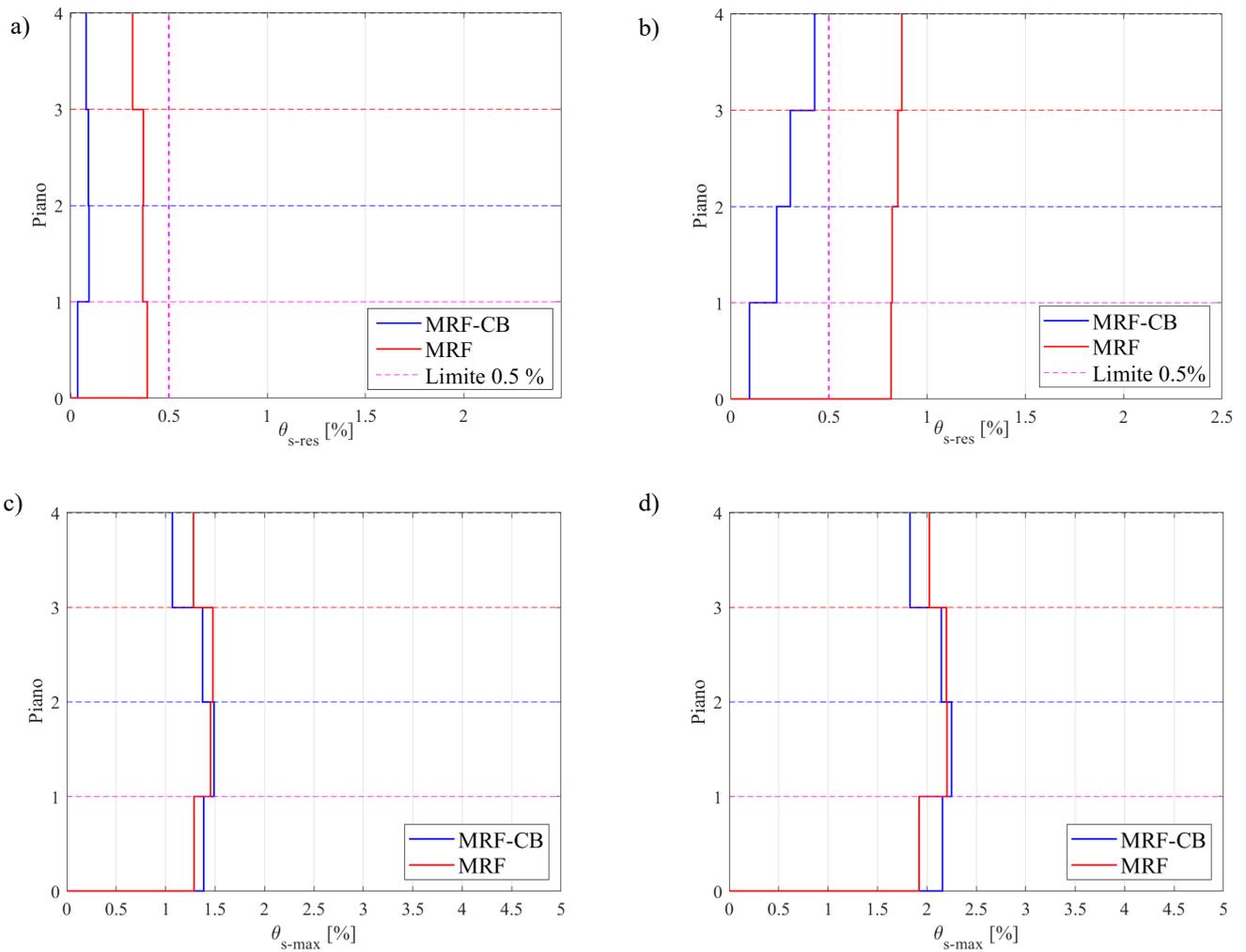


Figura 7. Spostamenti di interpiano residui per (a) Stato Limite Ultimo (DBE) e (b) Stato Limite di Collasso (MCE); Spostamenti di interpiano massimi per (c) Stato Limite Ultimo (DBE) e (d) Stato Limite di Collasso (MCE).

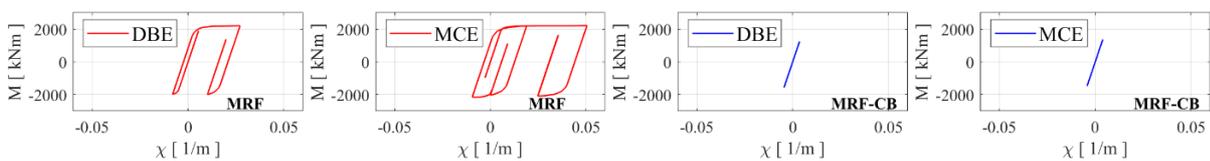


Figura 8. Relazione momento-curvatura nella sezione inferiore di una delle colonne del 1° piano delle due strutture (MRF e MRF-CB) per uno specifico accelerogramma, scalato alla condizione DBE e MCE.

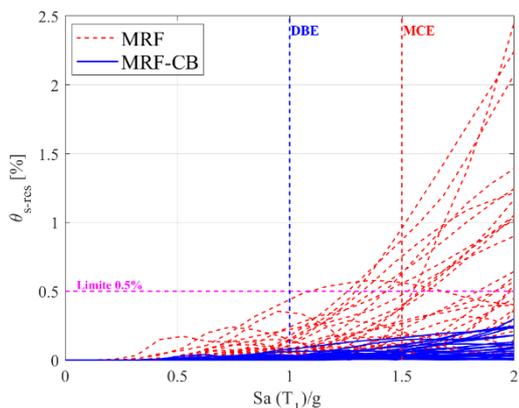


Figura 9. (a) Risultati IDA: confronto tra spostamenti relativi residui del 1° piano per le due strutture (MRF- MRF-CB).

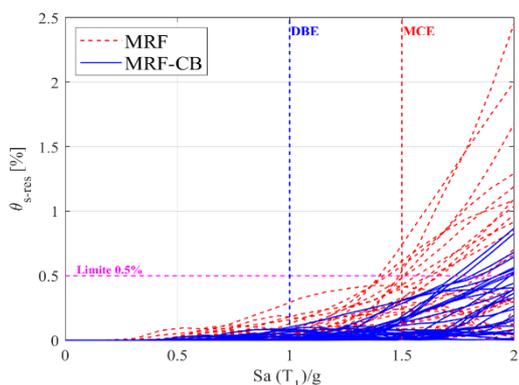


Figura 9. (b) Risultati IDA: confronto tra spostamenti relativi residui del 4° piano per le due strutture (MRF- MRF-CB).

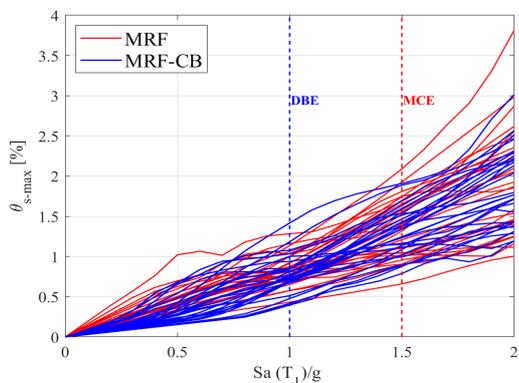


Figura 9. (c) Risultati IDA: confronto tra spostamenti relativi massimi del 1° piano per le due strutture (MRF- MRF-CB).

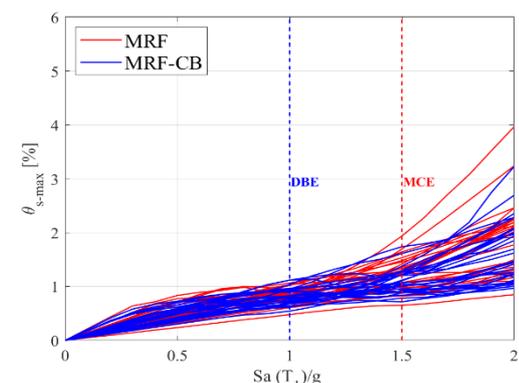


Figura 9. (d) Risultati IDA: confronto tra spostamenti relativi massimi del 4° piano per le due strutture (MRF- MRF-CB).

Le Figure 9 (a) e (b) mostrano il confronto dei risultati delle analisi dinamiche incrementalì ‘IDAs’ per gli spostamenti di interpiano residui, mentre le Figure 9 (c) e (d) rappresentano gli spostamenti di interpiano massimi. Per brevità, sono stati riportati esclusivamente i risultati relativi al 1° e il 4° piano, confermando quanto osservato nelle Figure 6 e 7. Nonostante sia possibile osservare un'ampia variabilità da record a record, i risultati evidenziano che l'inclusione del nodo di base proposto è sempre vantaggiosa, specialmente per gli spostamenti residui.

## 6 SOMMARIO E CONCLUSIONI

Questo lavoro propone una connessione di base in acciaio in cui il comportamento sismico è controllato da una combinazione di dispositivi ad attrito e barre ricentranti, sviluppato in conformità con gli obiettivi del progetto europeo FREEDAM. Il nodo di base è successivamente implementato in un telaio in acciaio sismo-resistente perimetrale con connessioni trave-colonna convenzionali, precedentemente progettato secondo gli Eurocodici.

Modelli numerici in OpenSees sono realizzati al fine di valutare e confrontare il comportamento sismico di due telai: il primo, con di nodi di base tradizionali a pieno ripristino di resistenza e un secondo, equivalente, dotato dei nodi di base ricentranti. Analisi dinamiche non lineari incrementalì vengono eseguite per valutare l'influenza e l'efficacia della connessione proposta nella riduzione degli spostamenti residui di interpiano. Le analisi mostrano che gli spostamenti di interpiano massimi risultano simili per le due strutture.

Il presente lavoro mostra che:

1. Il comportamento globale della struttura è significativamente migliorato dalla capacità ricentrante dei nodi di base. I drift residui sono significativamente ridotti sotto le diverse condizioni limite considerate.
2. I nodi di base proteggono completamente la colonna del primo piano dall'entrata in campo plastico, evitando così danni non riparabili, anche in caso di eventi sismici di elevata intensità.

## RIFERIMENTI

- ANSI/AISC 341-16, Seismic provisions for structural steel buildings, Chicago, Illinois, USA
- ASCE/SEI 7-10, Minimum design loads for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers, USA
- EN 1993-1-8: 2005, Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-8: Design of joints. European Committee for Standardization, Brussels
- EN 1998-1: 2004, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels
- Charney, F., Downs, W., 2004. Modelling procedures for panel zone deformations in moment resisting frames. *Connections in Steel Structures V*. ESSC/AISC Workshop, Amsterdam
- Clifton, G.C., Butterworth, J.W., 2000. Moment-resisting steel framed seismic-resisting systems with semi-rigid connections, 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, January 30 - February 17, Auckland, New Zealand
- Freddi, F., Dimopoulos, C.A., Karavasilis, T.L., 2017. Rocking damage-free steel column base with friction devices: design procedure and numerical evaluation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **46**: 2281-2300
- FREEDAM: FREE from DAMAGE steel connections, 2015-2018. Fund for Coal and Steel Grant Agreement No. RFSR-CT-2015-00022.
- Grigorian, C.E., Yang, T.S., Popov, E.P., 1993. Slotted bolted connection energy dissipators, *Earthquake Spectra*, **9**(3): 491-504
- Ibarra, L. F., Medina, R. A., Krawinkler, H., 2005. Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **34**: 1489-1511.
- Iervolino, V., Galasso, C., Cosenza, E., 2010. REXEL: Computer aided record selection for code-based seismic structural analysis, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **8**: 339-362
- Kamperidis, V., Karavasilis, T.L., Vasdravellis, G., 2018. Self-centering steel column base with metallic energy dissipation devices,” *Journal of Constructional Steel Research*, **149**: 14-30
- Krawinkler, H., Mohasseb, S., 1987. Effects of panel zone deformations on seismic response, *Journal of Constructional Steel Research*, **8**: 233-250
- Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G., 2018. Experimental analysis of beam-to-column joints equipped with sprayed aluminium friction dampers, *Journal of Constructional Steel Research*, **146**: 33-48
- Latour, M., Rizzano, G., Santiago, A., Da Silva, L., 2019. Experimental response of a low-yielding, self-centering, rocking column base joint with friction dampers, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **116**: 580-592
- Lignos, D.G., Krawinkler, H., 2009. Sidesway Collapse of deteriorating structural systems under seismic excitations. Report No. TB 172, The John A. Blume Earthquake Engineering Centre, Stanford University, Stanford, CA.
- Lignos, D.G., Krawinkler, H., 2011. Deterioration Modelling of Steel Components in Support of Collapse Prediction of Steel Moment Frames under Earthquake loading, *Journal of Structural Engineering*, **137**: 1291-1302
- MacRae, G.A., Urmson, C.R., Walpole, W.R., Moss, P., Hyde, K., Clifton, C., 2009. Axial Shortening of Steel Columns in Buildings Subjected to Earthquakes, *Bulletin of The New Zealand Society for Earthquake Engineering*, **42**(4): 275-287
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., Fenves, G.L., 2009. OpenSEES: Open System for earthquake engineering simulation, Pacific Earthquake Engineering Research Centre (PEER), University of California, Berkeley, CA, Available at: <http://opensees.berkeley.edu>
- McCormick, J., Aburano, H., Nakashima, M., 2008. Permissible residual deformation levels for building structures considering both safety and human elements, 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), October 12-17, Beijing, China
- Ricles, J., Sause, R., Garlock, M., Zhao, C., 2001. Posttensioned Seismic-Resistant Connections for Steel Frames, *Journal of Structural Engineering*, **127**(2): 113-121
- Vamvatsikos, D., Cornell, C., 2002. Incremental Dynamic Analysis, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **31**: 491-514