

TEORIA DEL CONTROLLO DEL MECCANISMO PLASTICO PER TELAI CON LINK DISSIPATIVI

THEORY OF PLASTIC MECHANISM CONTROL FOR DISSIPATIVE REPLACEABLE LINK FRAMES

Rosario Montuori,
University of Salerno
Department of Pharmacy
Fisciano (SA), Italy
r.montuori@unisa.it

Elide Nastri,
Vincenzo Piluso,
Alessandro Pisapia
University of Salerno
Department of Civil Engineering
Fisciano (SA), Italy
enastri@unisa.it,
v.piluso@unisa.it,
alpisapia@unisa.it

ABSTRACT

The aim of this work is the application of the Theory of Plastic Mechanism Control (TPMC) to a recent steel structural typologize, i.e. the Dissipative Replaceable Link Frames (DRLFs). They are characterized by the columns equipped with link elements representing the plastic zones of the structure and, consequently, they have to guarantee the maximum dissipation of seismic energy in input.

Then, to evaluate the accuracy of this procedure, a case study is presented. In particular, a single DRLF with four storeys and three bays is designed by means of TPMC. Subsequently, the same frame is implemented in SAP2000 program, and a pushover analysis is performed to evaluate the ultimate behaviour of the modelled structure.

SOMMARIO

L'obiettivo del presente lavoro è lo sviluppo teorico della teoria del controllo del meccanismo plastico (TPMC) in riferimento ad una recente tipologia strutturale in acciaio, ossia con colonne dissipative (DRLFs). Essi sono caratterizzati dalla presenza di colonne accoppiate e connesse tramite elementi di tipo *link* che rappresentano le parti strutturali destinate alla plasticizzazione e alla conseguente dissipazione dell'energia sismica in ingresso.

Al fine di valutare l'accuratezza della procedura analitica, viene presentato un caso esemplificativo. In particolare, un telaio DRLF a 4 piani e 3 campate è stato dimensionato in accordo alla procedura analitica. Successivamente, il medesimo telaio è stato implementato in SAP2000 ed un'analisi statica non lineare di tipo *pushover* è stata effettuata al fine di valutare la reale capacità della struttura progettata.

1 INTRODUZIONE

Nella progettazione di nuovi edifici in zone soggette ad eventi sismici di tipo distruttivo, è di fondamentale importanza prevenire il collasso strutturale, garantendo, per quanto possibile, la maggiore dissipazione di energia sismica in ingresso. Nell'ambito delle strutture sismoresistenti in acciaio, le tipologie strutturali, generalmente adottate, sono le strutture a telaio (Moment Resisting Frames MRFs) [1], le strutture con controventi concentrici o eccentrici (CBFs, EBFs) [2],[3], strutture accoppiate (Dual System) caratterizzate dall'accoppiamento di schemi MRFs più schemi CBFs (o EBFs) ed infine, le strutture caratterizzate dalla presenza di pareti di controvento (Shear Walls). È noto che, per assicurare le migliori performance strutturali durante un terremoto, le sopracitate soluzioni devono essere progettate in accordo ai ben noti principi del *Capacity Design* [4]. Nello specifico, le parti della struttura destinate alla plasticizzazione devono essere dimensionate in accordo al primo principio del CD, ossia in funzione delle sollecitazioni che derivano dall'analisi dell'intero edificio. Le parti non dissipative, ossia le parti strutturali da preservare durante un sisma, devono essere progettate in accordo al secondo principio del CD, cioè in funzione delle sollecitazioni trasmesse dalle zone dissipative plasticizzate ed incrudite fino al loro limite ultimo. Tuttavia, le attuali prescrizioni normative EN1998-1-1 [5] in materia di strutture sismoresistenti in acciaio, evitano il cosiddetto meccanismo di piano o meccanismo di piano soffice, ma non sempre permettono il raggiungimento del meccanismo di collasso globale che garantisce la massima dissipazione di energia sismica in ingresso. Per questo motivo, Mazzolani e Piluso hanno proposto una nuova procedura di progettazione, nota come Teoria del Controllo del Meccanismo Plastico (TPMC) che fonda le sue radici nel teorema cinematico dell'analisi limite del calcolo a rottura [4]. Diverse sono state le applicazioni della TPMC alle sopracitate tipologie strutturali [1]-[3]. L'obiettivo principale della TPMC è di garantire la plasticizzazione di tutte le zone dissipative della struttura evitando tutti i meccanismi di collasso indesiderati (meccanismo di piano e meccanismi parziali).

Nel presente lavoro, viene introdotta una nuova tipologia di telaio in acciaio (Dissipative Repleaceble Link Frames, DRLFs) [6]-[9], recentemente introdotta all'interno del progetto di ricerca *Dissipable project*. Suddetta struttura è caratterizzata dalla presenza di colonne accoppiate connesse da elementi tipo *link* che rappresentano le parti strutturali destinate alla plasticizzazione. Il grande vantaggio di questa struttura è che, a seguito di un evento sismico di tipo distruttivo, gli elementi dissipativi plasticizzati possono essere facilmente rimossi e sostituiti senza arrecare particolari problematiche funzionali e strutturali all'edificio.

Attualmente, non esistono regole specifiche per il dimensionamento di tali strutture, l'unico riferimento sono le attuali prescrizioni normative adottate per i MRFs. Per questo motivo, l'obiettivo del lavoro è presentare una nuova procedura di progettazione per i telai DRLFs basata sulla Teoria del Controllo del Meccanismo Plastico.

2 LA TPMC PER TELAI CON LINK DISSIPATIVI

La teoria del controllo del meccanismo plastico ha l'obiettivo di progettare le parti della struttura non dissipativa, nel caso specifico le colonne ad ogni livello, al fine di prevenire lo sviluppo di meccanismi indesiderati, quali il meccanismo di piano e i meccanismi parziali e, contestualmente, favorire lo sviluppo del meccanismo di collasso globale. La TPMC è basata sull'estensione del teorema cinematico dell'analisi limite al concetto di curva di equilibrio del meccanismo di collasso

[4]. In accordo all'approccio cinematico, per uno specifico meccanismo di collasso, la curva di equilibrio può essere facilmente determinata dall'equilibrio tra il lavoro delle forze esterne e il lavoro delle forze interne connesse alle cerniere plastiche coinvolte nello specifico meccanismo. Al fine di tener conto degli effetti del secondo ordine, il calcolo del lavoro esterno comprende anche il lavoro del secondo ordine compiuto dai carichi verticali. Lo sviluppo delle curve di equilibrio è stato da sempre sviluppato in accordo al parametro di spostamento δ definito in corrispondenza dell'ultimo piano e funzione dell'altezza totale del telaio e della rotazione plastica alla base delle colonne assunta pari a 0.02 rad. Nella presente trattazione, il parametro di spostamento utilizzato è direttamente la rotazione plastica delle colonne.

In Fig. 1 viene riportato uno schema tipo di telaio DRLF caratterizzato da tre colonne con link dissipativi, travi di piano (linea continua) e travi di piano fittizie in corrispondenza dei link intermedi (linea discontinua).

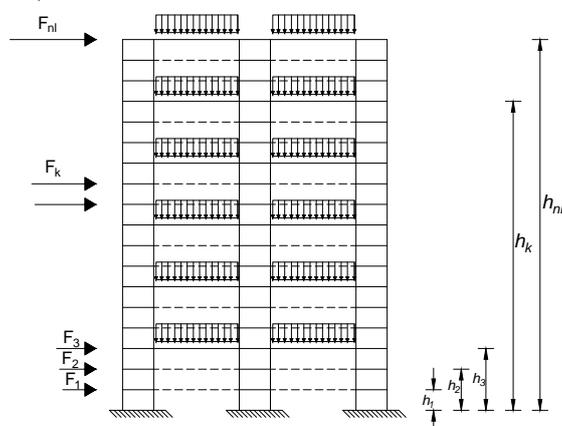


Fig. 1. Schema geometrico del telaio tipo DRLF

I possibili meccanismi di collasso per il sistema DRLF sono riportati in Fig. 2. Di seguito viene riportata la nomenclatura utilizzata per lo sviluppo analitico delle differenti curve di equilibrio del meccanismo:

i = indice di colonna

j = indice di campata

z = indice della colonna dissipativa

k = indice di piano del link

n_c = numero totale delle colonne

n_b = numero totale delle campate

n_s = numero totale di piani della struttura

n_l = numero totale dei piani di link

n_d = numero totale delle colonne dissipative

$c_1 = 1$: incastrati alla base delle colonne del primo piano; 0: cerniere alla base delle colonne del primo piano

$b_{jk} = 1$: incastrati agli estremi delle travi di piano; 0: cerniere agli estremi delle travi di piano

θ_u = rotazione ultima

V_k = carichi verticali di piano agenti al k -esimo livello di link

F_k = azione sismica agente al k -esimo livello di link

h_{nl} = altezza totale del telaio

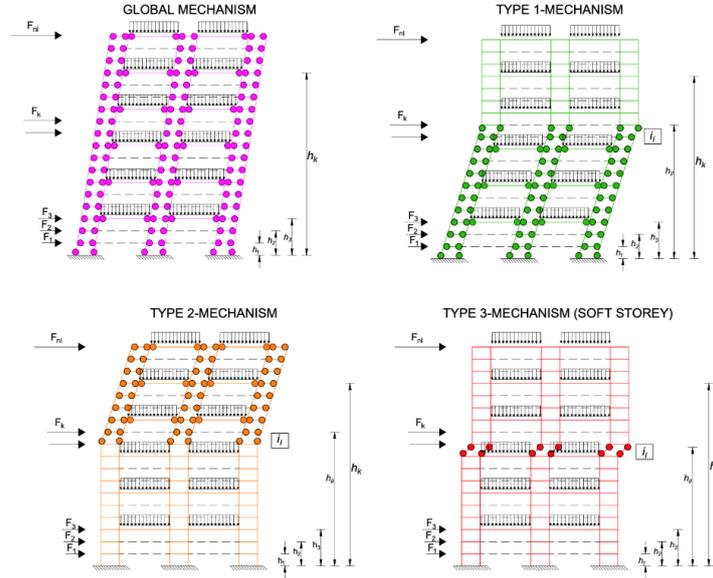


Fig. 2. Meccanismi di collasso per il sistema DRLF

Nel caso di meccanismo di collasso globale, il lavoro delle forze esterne dovute alla rotazione virtuale $\partial\theta$ delle cerniere plastiche delle colonne può essere espresso attraverso la seguente relazione:

$$W_e = \alpha \left(\sum_{k=1}^{n_l} F_k h_k \right) \partial\theta + \theta \left(\sum_{k=1}^{n_l} V_k h_k \right) \partial\theta \quad (1)$$

dove θ rappresenta la rotazione che subiscono le colonne nella configurazione deformata e quindi pari a δ/h_{nl} . Il coefficiente α rappresenta il moltiplicatore delle forze orizzontali. Il lavoro delle forze interne dovuto alla formazione delle cerniere plastiche sarà pari a:

$$W_i = \left(\sum_{i=1}^{n_c} M_{c,i1} c_1 + 2 \sum_{k=1}^{n_l} \sum_{z=1}^{n_d} M_{eq,zk} + 2 \sum_{k=1}^{n_l} \sum_{j=1}^{n_b} b_{jk} M_{b,jk} \right) \partial\theta \quad (2)$$

dove $M_{c,i1}$ indica il momento plastico alla base delle colonne del primo piano, $M_{eq,zk}$ rappresenta il momento equivalente riferito al k-esimo livello del link e per la singola colonna dissipativa, mentre $M_{b,jk}$ rappresenta il momento plastico al k-esimo piano dei link e per la j-esima campata. Dall'uguaglianza dell'Eq. (1) con l'Eq.(2), è possibile definire l'espressione del moltiplicatore di collasso per il meccanismo globale:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} M_{c,i1} c_1 + 2 \sum_{k=1}^{n_l} \sum_{z=1}^{n_d} M_{eq,zk} + 2 \sum_{k=1}^{n_l} \sum_{j=1}^{n_b} b_{jk} M_{b,jk}}{\sum_{k=1}^{n_l} F_k h_k} - \theta \frac{\sum_{k=1}^{n_l} V_k h_k}{\sum_{k=1}^{n_l} F_k h_k} \quad (3)$$

L'Eq. (3) rappresenta la curva di equilibrio del meccanismo globale e può essere riscritta nella seguente forma compatta:

$$\alpha = \alpha_0^{(g)} - \psi^{(g)} \theta \quad (4)$$

dove $\alpha_0^{(g)}$ è il moltiplicatore cinematicamente ammissibile in accordo ad una analisi rigido plastica del primo ordine, mentre $\psi^{(g)}$ rappresenta la pendenza della curva di equilibrio del meccanismo.

I medesimi passaggi possono essere facilmente ripetuti per le altre tre tipologie di meccanismo indicati in Fig. 2:

- Meccanismo di tipo 1

$$\alpha_{i_l}^{(1)} = \alpha_0^{(1)} - \psi^{(1)}\theta \quad (5)$$

dove:

$$\alpha_{0i_l}^{(1)} = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} M_{c,i1} c_1 + 2 \sum_{k=1}^{i_l-1} \sum_{z=1}^{n_d} M_{eq,zk} + 2 \sum_{k=1}^{i_l-1} \sum_{j=1}^{n_b} b_{jk} M_{b,jk} + \sum_{i=1}^{n_c} M_{c,i,i_l}}{\sum_{k=1}^{i_l} F_k h_k + h_{i_l} \sum_{k=i_l+1}^{n_s} F_k} \quad (6)$$

$$\psi_{i_l}^{(1)} = \frac{\left(\sum_{k=1}^{i_l} V_k h_k + h_{i_l} \sum_{k=i_l+1}^{n_l} V_k \right)}{\left(\sum_{k=1}^{i_l} F_k h_k + h_{i_l} \sum_{k=i_l+1}^{n_l} F_k \right)}$$

- Meccanismo di tipo 2

$$\alpha_{i_l}^{(2)} = \alpha_0^{(2)} - \psi^{(2)}\theta \quad (7)$$

dove per $i_l \neq 1$, risulta:

$$\alpha_{0i_l}^{(2)} = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} M_{c,i,i_l-1} + 2 \sum_{k=i_l}^{n_l} \sum_{z=1}^{n_d} M_{eq,zk} + 2 \sum_{k=i_l}^{n_l} \sum_{j=1}^{n_b} b_{jk} M_{b,jk}}{\sum_{k=i_l}^{n_l} F_k (h_k - h_{i_l-1})} \quad (8)$$

$$\psi_{i_l}^{(2)} = \frac{\sum_{k=i_l}^{n_l} V_k (h_k - h_{i_l-1})}{\sum_{k=i_l}^{n_l} F_k (h_k - h_{i_l-1})}$$

per $i_l = 1$, risulta:

$$\alpha_{01}^{(2)} = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} M_{c,i1} c_1 + 2 \sum_{k=1}^{n_l} \sum_{z=1}^{n_d} M_{eq,zk} + 2 \sum_{k=1}^{n_l} \sum_{j=1}^{n_b} b_{jk} M_{b,jk}}{\sum_{k=1}^{n_l} F_k h_k} \quad (9)$$

$$\psi_1^{(2)} = \frac{\sum_{k=1}^{n_l} V_k h_k}{\sum_{k=1}^{n_l} F_k h_k}$$

- Meccanismo di tipo 3

$$\alpha_{i_l}^{(3)} = \alpha_0^{(3)} - \psi^{(3)}\theta \quad (10)$$

dove per $i_l \neq 1$, risulta:

$$\alpha_{0i_l}^{(3)} = \frac{2 \sum_{i=1}^{n_c} M_{c,i,i_l}}{(h_{i_l} - h_{i_l-1}) \left(\sum_{k=i_l}^{n_s} F_k \right)} \quad (11)$$

$$\psi_{i_l}^{(3)} = \frac{\sum_{k=i_l}^{n_l} V_k}{\sum_{k=i_l}^{n_l} F_k}$$

per $i_l = 1$, risulta:

$$\alpha_{01}^{(3)} = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} M_{c,i1} c_1 + \sum_{i=1}^{n_c} M_{c,i1}}{h_1 \sum_{k=1}^{n_s} F_k} \quad (12)$$

$$\psi_1^{(3)} = \frac{\sum_{k=1}^{n_l} V_k}{\sum_{k=1}^{n_l} F_k}$$

In accordo alla TPMC, la condizione di progetto che deve essere soddisfatta è che la curva di equilibrio del meccanismo di collasso globale si trovi al di sotto delle curve di equilibrio dei meccanismi indesiderati. Dal punto di vista matematico, la precedente condizione può essere espressa attraverso la seguente disuguaglianza:

$$\alpha_0^{(g)} - \psi^{(g)}\theta_u \leq \alpha_{0i_l}^{(t)} - \psi_{i_l}^{(t)}\theta_u \quad \forall t = 1,2,3; \quad i_l = 1,2,\dots,n_l \quad (13)$$

L'Eq.(13) può essere risolta in maniera iterativa o in forma chiusa, in maniera analoga a quanto previsto per i telai tipo MRFs [1]. Di seguito, si riportano per punti i passaggi da seguire per l'applicazione della TPMC in forma chiusa:

1. Scelta della rotazione di progetto θ_u compatibile con le risorse di duttilità locale delle membrature della struttura in accordo al paragrafo 6.8.2 dell'Eurocodice 8.
2. Calcolo delle pendenze delle curve di equilibrio attraverso le precedenti equazioni.
3. Dimensionamento delle parti dissipative: elementi tipo link ed eventualmente le travi di piano nell'ipotesi di vincoli di incastro ($b_{jk} = 1$).
4. Calcolo della sommatoria dei momenti plastici delle colonne al primo piano, imponendo la condizione di progetto espressa dall'Eq.(13) per $i_l = 1$ e $t = 1$ o 3:

$$\sum_{i=1}^{n_c} M_{c.i.1} \geq \frac{2 \sum_{k=1}^{n_l} \sum_{z=1}^{n_d} M_{eq.zk} + 2 \sum_{k=1}^{n_l} \sum_{j=1}^{n_b} b_{jk} M_{b.jk} + (\psi_1^{(1)} - \psi^{(g)})\theta_u (\sum_{k=1}^{n_l} F_k h_k)}{\left(\frac{\sum_{k=1}^{n_l} F_k h_k}{h_1 \sum_{k=1}^{n_l} F_k} (c_1 + 1) - c_1 \right)} \quad (14)$$

5. Calcolo dello sforzo assiale agente nelle colonne nella condizione di collasso, cioè quando il meccanismo di collasso di tipo globale è completamente sviluppato.
6. La somma dei momenti plastici richiesti al primo piano viene ripartita tra le colonne proporzionalmente alla forza assiale agente al collasso, ossia sulla base di un coefficiente di ripartizione pari al rapporto tra lo sforzo normale al collasso nella singola colonna e la somma degli sforzi normali al collasso delle colonne del primo piano.
7. Calcolo della sommatoria dei momenti plastici delle colonne richiesti, ad ogni piano, per evitare tutti i meccanismi di collasso indesiderati come il massimo valore tra quelli provenienti dalle condizioni espresse dalle equazioni.

Vale la pena sottolineare che il dimensionamento delle parti dissipative può essere effettuato in diversi modi. In particolare, suddetti elementi possono essere progettati in accordo alla teoria di Goel et al [10] oppure, attraverso la ripartizione dei taglianti di piano. Inoltre, la definizione dei momenti plastici dei link ($M_{eq.zk}$) dipende dalla geometria e dalle caratteristiche meccaniche dell'elemento stesso. In particolare, sarà necessario definire il tipo di link e, conseguentemente, il momento equivalente in accordo a quanto prescritto al paragrafo 6.8.2 dell'EC8 [5].

3. CASO STUDIO

Al fine di valutare l'accuratezza della procedura sopra illustrata, è stato analizzato un telaio di quattro piani e tre campate estratto dallo schema tridimensionale riportato in Fig. 3. Dall'analisi dei carichi sono stati adottati come carichi permanenti strutturali e non strutturali $g_k = 23.75 \text{ kN/m}$ ai piani intermedi e $g_k = 25.78 \text{ kN/m}$ all'ultimo piano, mentre come carichi variabili $q_k = 26.13 \text{ kN/m}$ ai piani intermedi e $q_k = 20.73 \text{ kN/m}$ all'ultimo livello. In accordo alla combinazione sismica i carichi verticali sono stati combinati come: $q = g_k + 0.30q_k$. Le azioni orizzontali F_i sono state definite nell'ipotesi di categoria di sottosuolo B e con fattore di struttura pari a 2. Una sintesi dei principali parametri di sismicità sono stati riportati in Tabella 1. I valori delle azioni applicate allo schema di analisi sono riportati in Fig. 3. Gli elementi dissipativi (link e travi di piano) sono stati dimensionati in accordo al metodo β [10]. In particolare, per i link, lunghi 1.00 m, sono stati definiti i profili HE120B, mentre per le travi, sono stati scelti profili HE260B. Successivamente sono stati definiti i momenti equivalenti dei link ($M_{eq.zk}$) e i momenti plastici delle travi ($M_{b.jk}$). Infine, definita la rotazione di progetto $\theta_u = 0.04 \text{ rad}$, è stata applicata la procedura deterministica della TPMC e sono stati definiti per ogni piano i profili per le colonne come riportato in Tabella 2. Infine, il medesimo telaio è stato implementato in SAP2000 ed è stata effettuata una

analisi *Pushover* al fine di valutare l'accuratezza della TPMC per la sopracitata tipologia strutturale. I risultati delle analisi sono riportati in Fig. 4. È possibile osservare che la curva di capacità, ottenuta attraverso l'analisi *Pushover*, coincide quasi perfettamente con la curva del meccanismo di equilibrio definita analiticamente attraverso la procedura in forma chiusa della TPMC. Ciò implica che, attraverso tale procedura è assicurata la plasticizzazione del massimo numero di elementi dissipativi della struttura e, conseguentemente, la massima dissipazione di energia sismica.

Tabella 1. Parametri di sismicità in accordo all'Eurocodice 8

a_g/g	γ [-]	β [-]	S [-]	TB [s]	TC [s]	TD [s]
0.3	1	0.2	1.2	0.15	0.50	2.00
C [-]	T [s]	H [-]	$S_e(T)$ [m/s^2]	q	$S_d(T)$ [m/s^2]	$\beta \cdot a_g$ [m/s^2]
0.09	1.14 s	1	3.86	2	1.93	0.59

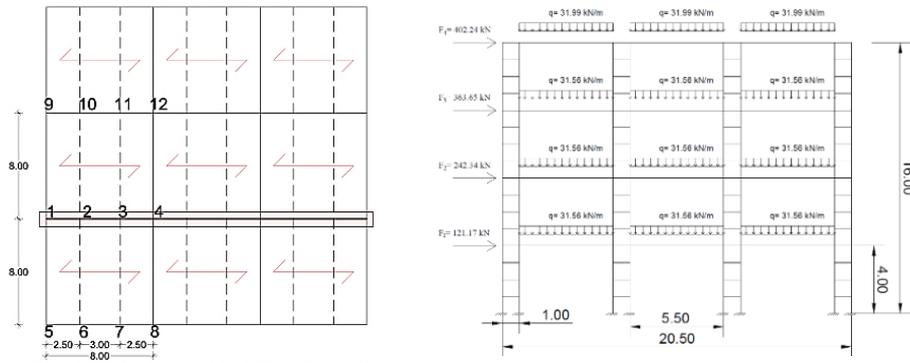


Fig. 3. Schema in pianta della struttura analizzata (sinistra); Schema del telaio tipo DRLF (destra)

Tabella 2. Profili per le colonne adottati in accordo alla TPMC

Livello	Colonna 1	Colonna 2	Colonna 3	Colonna 4
1	HE 450 B	HE 320 B	HE 320 B	HE 450 B
2	HE 400 B	HE 300 B	HE 300 B	HE 400 B
3	HE 400 B	HE 300 B	HE 300 B	HE 400 B
4	HE 300 B	HE 300 B	HE 300 B	HE 300 B

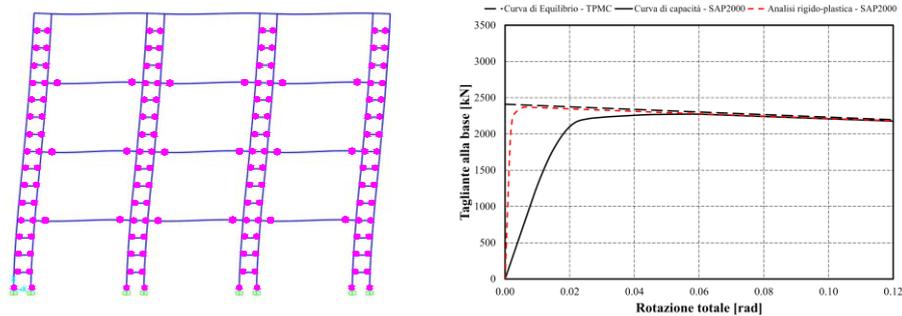


Fig. 4. Schema SAP2000 con formazione cerniere plastiche (sinistra); Confronto curva di capacità con curva di equilibrio (destra)

4. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stata presentata l'applicazione della teoria del controllo del meccanismo plastico (TPMC) alla tipologia di telaio in acciaio caratterizzato dalla presenza di colonne accoppiate con elementi di tipo *link* dissipativi (DRLF). Nello specifico, partendo dagli aspetti teorici della TPMC, sono state definite le espressioni delle curve di equilibrio del meccanismo di collasso globale e dei meccanismi indesiderati (meccanismo di piano e i meccanismi parziali). Successivamente, in maniera sintetica, è stata illustrata la procedura in forma chiusa per la definizione delle sezioni delle colonne al fine di garantire un meccanismo di collasso globale scongiurando i possibili meccanismi indesiderati. Infine, per valutare l'accuratezza di tale procedura, è stato analizzato un caso studio. In particolare, un telaio di quattro piani e tre campate è stato, preliminarmente progettato attraverso la TPMC. Successivamente, è stata condotta una analisi *Pushover* attraverso il software SAP2000 ed è stata determinata la curva di capacità (Tagliante - Rotazione). Dal confronto della curva di capacità con la curva di equilibrio ottenuta con la TPMC, è emerso che il telaio raggiunge la quasi totale plasticizzazione delle zone dissipative (estremità dei *link* e delle travi di piano) e conseguentemente la massima dissipazione di energia sismica.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Piluso V., Nastri E., Montuori R., Advances in Theory of Plastic Mechanism Control: Closed Form Solution for MR-Frames, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 44(7), pp. 1035-1054, 2015
- [2] Longo A., Montuori R., Piluso V., Moment frames – concentrically braced frames dual systems: analysis of different design criteria, *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(1), pp. 122-141, 2016
- [3] Montuori R., Nastri E., Piluso V. Theory of Plastic Mechanism Control for MRF-EBF dual systems: Closed form solution, *Engineering Structures* 118, pp.287-306, 2016
- [4] Mazzolani F.M., Piluso V., *Theory and Design of Seismic Resistant Steel Frames*, E&FN Spon, an imprint of Chapman & Hall, 1996
- [5] EN 1998-1-1. Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1.1: General rules, seismic actions and rules for buildings. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium, 2005
- [6] Vayas I., Thanopoulos P., Innovative Dissipative Pin Connection for Seismic Resistant Braced Frames, *Steel Structures*,5, pp 1-3, 2005
- [7] Tsarpalis P., Vayas I., Thanopoulos P., Fuseis Pin Links: Information brochures and design of case study, ECCOMAS 2017
- [8] Pinkawa M., Bartsch H., Schaffrath S., Hoffmeister B., Feldmann M., Seismic Design of steel frames with fuseis beam link energy dissipation systems, COMPDYN 2017
- [9] Pinkawa M., Vulcu C., Hoffmeister B., Feldmann M., Optimization of dissipative replaceable link frames by elastic high strength steel coupling beams, EURO DYN 2020
- [10] Goel S.C., Chao S-H., Performance-Based Plastic Design: Earthquake Resistant steel Structures, International Code Council: Washington, DC, 2008

PAROLE CHIAVE

Telai con colonne dissipative, DRLF, link, TPMC, analisi rigido-plastica, analisi pushover