

**OTTIMIZZAZIONE DEL POSIZIONAMENTO DI NODI
RICENTRANTI IN TELAI MOMENTO RESISTENTI IN
ACCIAIO TRAMITE UN ALGORITMO GENETICO**

**OPTIMAL PLACEMENT OF SELF-CENTERING JOINTS IN
STEEL MOMENT RESISTING FRAMES THROUGH A
GENETIC ALGORITHM**

Ludovica Pieroni, Fabio Freddi
University College London
Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering
London, United Kingdom
ludovica.pieroni.20@ucl.ac.uk
f.freddi@ucl.ac.uk

Sabatino Di Benedetto
Massimo Latour
University of Salerno
Department of Civil Engineering
Fisciano, Italy
sdibenedetto@unisa.it
mlatour@unisa.it

ABSTRACT

Nowadays' earthquake engineering is coping with the challenging task of providing low-cost seismic resilient structures. For Steel Moment Resisting Frames (MRFs) a viable solution is to use Self-Centering Damage-Free (SCDF) devices at Column Bases (CBs) and Beam-to-Column Joints (BCJs), ensuring both the energy dissipation capacity and the self-centering behavior of the structure. Past studies demonstrated the beneficial effects gained in damage and residual drifts reduction through the use of SCDF devices in all BCJs and CBs. However, this solution leads to the highest structural complexity and cost, limiting the practical application of these systems. Significant improvements can be obtained including a limited number of SCDF BCJs, but there is a lack of generalized recommendations on the number required and the effective placement. In this work, a Genetic Algorithm (GA) is proposed to define the optimal placement of a limited number of SCDF BCJs in steel MRFs. The GA is implemented in Matlab, and Non-Linear Time-History Analyses are performed in OpenSees to calculate the *Fitness-Function* based on residual drifts. An 8-story 3-bays steel MRF and a type of SCDF device are selected as case study and non linear Finite Element Models (FEM) are developed in OpenSees. The GA is applied assuming 16 SCDF BCJs and it is validated through a *Brute Force* approach. The results show that the proposed GA is an efficient methodology to solve the considered optimization problem.

SOMMARIO

Uno degli obiettivi principali dell'ingegneria sismica odierna è quello di progettare strutture sismo-resilienti a basso costo e tali da poter essere ampiamente utilizzate su larga scala. Per i telai momento resistenti in acciaio (MRFs), una possibile soluzione consiste nell'utilizzo di dispositivi dissipativi-ricentranti (SCDF) nei nodi trave-colonna (BCJs) e nodi di base (CBs) in modo da garantire sia la capacità dissipativa che il comportamento ricentrante della struttura. È stato dimostrato che l'uso di tali dispositivi in tutti i BCJs e CBs ha effetti benefici nella riduzione dei danni e degli spostamenti residui. Tuttavia, tale soluzione incrementa complessità e costo strutturale, limitando l'applicazione di questi sistemi nella pratica progettuale. Al fine di raggiungere un compromesso, studi precedenti hanno investigato l'utilizzo di un numero limitato di SCDF BCJs dimostrando che tali soluzioni possono fornire miglioramenti significativi in termini di prestazione sismica mantenendo una complessità ridotta. Tuttavia non ci sono ancora raccomandazioni generalizzate rispetto al numero di dispositivi necessario e al loro efficace posizionamento. In questo studio, viene proposto un Algoritmo Genetico (GA) per definire il posizionamento ottimale di un numero limitato di SCDF BCJs in MRFs in acciaio. Il GA è implementato in Matlab ed analisi dinamiche non lineari sono eseguite in OpenSees per calcolare la *Fitness-Function* basata sui drifts residui. Un MRF in acciaio con 8 piani e 3 campate e un tipo di dispositivo SCDF sono considerati per la definizione di un caso studio. Il GA è applicato assumendo 16 SCDF BCJs e validato rispetto un approccio *Brute Force*. I risultati mostrano che il GA proposto è una metodologia efficiente per risolvere il problema di ottimizzazione considerato.

1 INTRODUZIONE

La progettazione di strutture sismo-resilienti è al giorno d'oggi uno degli obiettivi principali dell'ingegneria sismica. Alcune tecnologie sismo-resilienti, come i sistemi con dispositivi dissipativi [1] ed i sistemi di isolamento alla base, sono riconosciute e implementate nelle normative e utilizzate nella pratica progettuale in molte regioni ad alto rischio sismico. Tuttavia, altre tecnologie innovative, come i sistemi dissipativi-ricentranti [2], necessitano di studi aggiuntivi per la loro standardizzazione al fine di ampliarne l'utilizzo nella pratica progettuale. Questi sistemi hanno il principale vantaggio di limitare sia i danni strutturali tramite la dissipazione di energia, sia le deformazioni residue tramite la capacità di ricentraggio. Per i telai momento resistenti (*i.e.*, Moment Resisting Frames - MRFs) in acciaio, una possibile soluzione è l'utilizzo di dispositivi dissipativi-ricentranti (*i.e.*, Self-Centring Damage-Free - SCDF) in corrispondenza dei nodi trave-colonna (*i.e.*, Beam-to-Column-Joints - BCJs) [3] e dei nodi di base (*i.e.*, Column Bases - CBs) [4]. Negli ultimi decenni, svariati studi si sono concentrati nell'utilizzo di questi sistemi, tuttavia, la maggior parte di essi [5] hanno considerato l'applicazione di tali dispositivi innovativi a tutti i BCJs e le CBs dimostrando l'effetto benefico ottenuto in termini di riduzione del danno e spostamenti residui. Tuttavia tali soluzioni incrementano complessità e costo strutturale, limitando l'applicazione di questi sistemi nella pratica progettuale.

In questo contesto, recenti ricerche hanno investigato l'utilizzo di un numero limitato di nodi SCDF studiandone il posizionamento ottimale che ne massimizzi l'efficacia. I risultati hanno dimostrato che tali soluzioni possono fornire miglioramenti significativi in termini di prestazione sismica mantenendo una complessità strutturale ridotta. In particolare, è stato dimostrato che il solo utilizzo di SCDF CBs riduce significativamente gli spostamenti residui e protegge dal danneggiamento le colonne del primo piano [6, 7]. Tuttavia, questa soluzione è particolarmente efficace per edifici bassi, mentre la sua efficacia si riduce per edifici di media e elevata altezza [8]. Un recente studio basato sulla valutazione di diverse configurazioni con diversi posizionamenti di SCDF BCJs [9] fornisce indicazioni qualitative e alcune raccomandazioni preliminari per il loro posizionamento efficace all'interno di MRFs in acciaio. La ricerca in questa direzione è tuttavia,

ancora molto limitata e c'è una forte necessità di studi aggiuntivi per definire soluzioni economicamente sostenibili per tali tecnologie e per promuoverne l'uso nella pratica progettuale.

Rimane un problema irrisolto lo sviluppo di procedure e metodologie generali per la definizione del posizionamento ottimale di un numero limitato di SCDF BCJs tali da massimizzarne l'efficacia. A tal fine, le tecniche di intelligenza artificiale stanno diventando sempre più comuni nell'ingegneria civile [10]. Nello specifico, gli Algoritmi Genetici (*i.e.*, Genetic Algorithms - GAs) nell'ambito del 'soft computing' possono fornire un modo razionale e sistematico per affrontare e risolvere i problemi relativi all'ottimizzazione strutturale [11]. I GAs sono stati utilizzati in molte applicazioni [12] e il loro principale vantaggio, rispetto ai metodi di ottimizzazione convenzionali, consiste nella loro capacità di *i)* esplorare lo spazio delle soluzioni senza la necessità di una stima iniziale delle variabili, *ii)* risolvere problemi di ottimizzazione multi-obiettivo, *iii)* considerare vincoli specifici. Tuttavia, la scelta di alcune caratteristiche del GA (*e.g.*, la dimensione della popolazione, la strategia di selezione, il tipo di crossover e l'approccio di mutazione) è cruciale per garantire la sua robustezza. In questo contesto, è importante evidenziare che i GAs definiscono soluzioni 'quasi ottimali' (*i.e.*, soluzioni *Most-Fit*), che possono essere diverse dalle soluzioni assolute (*i.e.*, soluzione *Best-Fit*).

Il problema di ottimizzazione considerato in questo studio mira a definire il posizionamento di un limitato numero di SCDF BCJs nei MRFs in acciaio in modo da minimizzare gli spostamenti residui. La metodologia proposta, combina tecniche di intelligenza artificiale (*i.e.*, GA) e metodologie di analisi sismica (*i.e.*, analisi dinamiche non lineari). Un MRF in acciaio con 8 piani e 3 campate e uno specifico tipo di dispositivo SCDF [13] sono selezionati per la definizione del caso studio. Tale struttura è modellata agli Elementi Finiti (*i.e.*, Finite Element Modelling - FEM) in OpenSees (Sezione 2), il GA è implementato utilizzando un codice sviluppato in Matlab e la procedura si basa sulla valutazione di diverse configurazioni di SCDF BCJ, per identificare quella che minimizza la mediana degli spostamenti residui; tale funzione da ottimizzare è definita come *Fitness-Function*. Analisi dinamiche non lineari (*i.e.*, Non Linear Time Histories - NLTHAs) sono eseguite in OpenSees [14] per calcolare la *Fitness-Function* (Sezione 3). Il numero di SCDF BCJs da posizionare in modo ottimale tramite il GA è assunto pari a 16. La validazione della metodologia viene eseguita confrontando il risultato del GA con quello di un approccio *Brute Force* (Sezione 4). I risultati dimostrano che il GA proposto rappresenta una procedura efficace per individuare la configurazione ottimale di un numero limitato di nodi SCDF.

2 CASO STUDIO

Il caso studio considerato è stato precedentemente studiato dagli Autori [9]; pertanto, nel seguente capitolo, è fornita una descrizione sintetica delle informazioni essenziali. Ulteriori dettagli riguardo le proprietà, il progetto e la modellazione del MRF in acciaio e del dispositivo SCDF possono essere trovati in Pieroni *et al.* [9].

Figura 1 (a) illustra la vista in pianta dell'edificio selezionato come caso studio, mentre la Figura 1 (b) mostra la vista in elevazione di uno dei MRF in direzione x selezionato come caso studio e avente 8 piani e 3 campate. Figura 1 (c) è una rappresentazione schematica del dispositivo SCDF applicato alle CBs, proposto e sperimentalmente testato da Latour *et al.* [13] e considerato in questo studio. Esso è costituito da: *i)* un sistema di dissipatori ad attrito composto da piastre in acciaio con fori asolati fissati tramite bulloni precaricati per dissipare l'energia sismica, *ii)* un sistema di barre pretese e disk-springs per il controllo del comportamento ricentrante. I nodi della struttura dotati dei dispositivi SCDF, rispondono all'azione sismica con un meccanismo caratterizzato da un legame momento-rotazione di tipo 'flag-shape'.

Il MRF convenzionale (*i.e.*, con CBs e BCJs a completo ripristino di resistenza) è progettato secondo l'Eurocodice 8 [15] considerando la regolarità in pianta e in elevazione. Il terremoto di progetto allo Stato Limite Ultimo (ULS [15] – probabilità di superamento del 10% in 50 anni) è

definito considerando lo spettro di risposta elastico di Tipo 1 con un picco di accelerazione al suolo di 0,35 g, Tipo di sottosuolo C e una classe di importanza II (*i.e.*, edifici ordinari). Il fattore di struttura (q) è assunto pari a 6,5, secondo quanto previsto dall'Eurocodice 8 [15] per MRF in classe di duttilità elevata. La Figura 1 (b) mostra i profili di travi e pilastri ottenuti dal progetto. I MRFs ricentranti (*i.e.*, la configurazione con tutte le CBs e BCJs SCDF - indicata come M-BCJ, e le configurazioni con diverso posizionamento di un numero limitato di SCDF BCJs) sono ottenuti includendo, nel MRF convenzionale, SCDF CBs e BCJs in specifiche posizioni. Le SCDF CBs e i BCJs sono progettati seguendo una procedura proposta da Pieroni *et al.* [9], che tiene conto della variabilità correlata alle proprietà degli elementi del dispositivo (*i.e.*, il coefficiente di attrito dei dissipatori ad attrito, le forze di post-tensione nelle barre post tese).

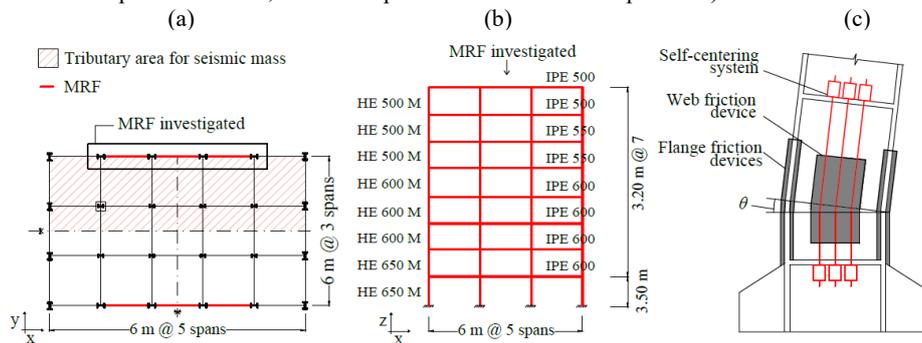


Fig. 1. (a) Vista in pianta dell'edificio. (b) Vista in elevazione del telaio momento resistente in acciaio (MRF). (c) Rappresentazione schematica della colonna di base (CB) con dispositivo dissipativo-ricentrante (SCDF).

Modelli FE non lineari 2D sono sviluppati in Opensees per il MRF convenzionale e ricentrante. Le colonne sono modellate come elementi non lineari con plasticità distribuita ("elemento non-linearBeamColumn" [14]) ricorrendo al modello Scissor [16] per le zone di intersezione trave-colonna. Le travi sono modellate con un approccio a plasticità concentrata. In particolare, nel modello del MRF convenzionale, molle rotazionali ("elementzeroLength" [14]) sono disposte alle estremità delle travi per simulare la formazione di cerniere plastiche. Esse sono modellate con un comportamento isteretico bilineare ("uniaxialMaterial Bilin" [14]) secondo il modello proposto da Lignos e Krawinkler [17]. Al contrario, nel modello del MRF ricentrante, dispositivi SCDF sono implementati alle estremità delle travi e nelle CB. Le SCDF CBs sono modellate secondo una strategia avanzata precedentemente proposta e validata in Elettore *et al.* [6], mentre i SCDF BCJs sono modellati secondo una strategia semplificata già adottata in Pieroni *et al.* [9].

3 DESCRIZIONE DELL'ALGORITMO GENETICO

In questo studio, viene sviluppato un GA per definire il posizionamento ottimale di un dato numero di SCDF BCJs in MRFs in acciaio. Tre assunzioni vengono considerate riguardo il posizionamento dei dispositivi SCDF: *i*) l'inclusione di SCDF CBs, *ii*) il posizionamento simmetrico di SCDF BCJs nel MRF, *iii*) l'inclusione dello stesso numero di SCDF BCJs interni ed esterni ($n_{BCJ-INT} = n_{BCJ-INT} = n_{BCJ}/2$). I parametri di input del GA sono i seguenti: il numero di SCDF BCJs da includere (n_{BCJ}), il numero di generazioni (G) da analizzare, il numero di nuovi individui (I) generati tramite *Random Mutation* in ogni generazione. Gli individui rappresentano le configurazioni con diversi posizionamenti di un dato numero di SCDF BCJs. Grazie all'assunzione di posizionamento simmetrico dei SCDF BCJs, l'implementazione del GA è semplificata considerando solo

metà della struttura (*i.e.*, 16 BCJ invece di 32 BCJ). Gli individui sono implementati da vettori colonna con 16 righe in cui ogni elemento rappresenta una posizione specifica. In particolare, le righe da 1 a 8 si riferiscono ai BCJ esterni dal piano 1 (*i.e.*, riga 1) al piano 8 (*i.e.*, riga 8), e le righe da 9 a 16 si riferiscono a BCJ interni dal piano 1 (*i.e.*, riga 9) al piano 8 (vale a dire, riga 16). I vettori sono composti da numeri decimali compresi tra 0 e 1. Le generazioni sono rappresentate da matrici in cui ogni colonna è un singolo individuo con 16 righe. La *Fitness-Function* è definita in modo tale da esprimere l'efficacia del posizionamento in termini di capacità di ricentrante. Figura 2 mostra le fasi principali del GA sviluppato in questo studio.

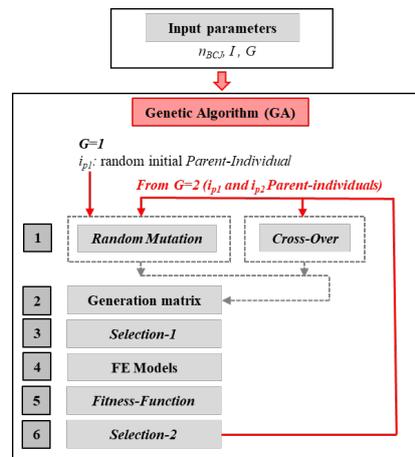


Fig. 2. Schema riassuntivo delle fasi dell'Algoritmo Genetico (GA).

Fase 1 - Generazione di nuovi individui tramite due operatori indipendenti (*i.e.* *Random Mutation* e *Cross-over*), a partire da *Parents-Individuals* (vedi **Fase 6**). I *Parents-Individuals* sono rappresentati da vettori colonna 16×1 aventi come elementi dei numeri decimali compresi tra 0 e 1. L'operatore *Random Mutation* genera un numero di nuovi individui (I) basati su un *Parents-Individuals* (i_{p1}). Per la generazione 1, i_{p1} è un individuo casuale iniziale, mentre per le generazioni successive, i_{p1} è il l'individuo *Most-Fit* dalle generazioni precedenti (vedi **Fase 6**). Nella *Random Mutation*, gli elementi di i_{p1} vengono alterati aggiungendo quantità casuali comprese tra -0,5 e 0,5 per creare nuovi individui. Gli elementi dei nuovi individui vengono quindi arrotondati a valori Booleani (*i.e.*, 0 o 1) dove 0 sta per 'BCJ convenzionale' (*i.e.*, assenza del dispositivo SCDF) e 1 sta per 'BCJ ricentrante' (*i.e.*, presenza del dispositivo SCDF). Assumendo una variazione casuale pari a 1 (*i.e.*, $\pm 0,5$), ogni elemento di i_{p1} (*i.e.*, in ogni posizione specifica) ha potenzialmente la possibilità di passare da 0 a 1 e viceversa. L'operatore *Cross-Over* viene eseguito dalla generazione 2 in poi e crea 10 nuovi individui sulla base di due *Parents-Individuals* (i_{p1} and i_{p2}) selezionati dalle generazioni precedenti come i due individui *Most-Fit* (vedi **Fase 6**). Esso consiste nel dividere i_{p1} e i_{p2} (*i.e.*, vettori colonna 16×1) in due stringhe (*i.e.*, 2 stringhe di vettori colonna 8×1) e combinarle per creare 10 nuovi individui. In seguito gli elementi dei nuovi individui sono arrotondati in valori Booleani (*i.e.*, 0 o 1) come per la *Random Mutation*.

Fase 2 - Definizione della matrice rappresentativa dei nuovi individui. Essa viene generata dall'unione degli individui ottenuti dalla *Random Mutation* e dal *Cross-Over*.

Fase 3 - Applicazione dell'operatore *Selection-1* con l'obiettivo di: *i*) selezionare gli individui con un numero di SCDF BCJs interni ed esterni in accordo all'ipotesi iniziale (*i.e.*, $n_{BCJ-INT} = n_{BCJ-INT}$).

$INT = n_{BCJ}/2$); ii) eliminare gli individui che si ripetono nella generazione corrente e selezionare quelli che non sono stati studiati nelle generazioni precedenti.

Fase 4 - Modellazione FEM. Per ciascuno degli individui selezionati nella **Fase 3** si procede all'implementazione in OpenSees [14] di un modello FE non lineare 2D del MRF ricentrante, con SCDF CBs e SCDF BCJs in posizioni specifiche in base alle informazioni contenute nel vettore.

Fase 5 - Valutazione della Fitness-Function. Per ciascun individuo, è calcolata la mediana dei drifts residui (*Fitness-Function*, $f(\theta_{res})$) ottenuti ad ogni piano con sette NLTHAs.

Fase 6 - Applicazione dell'operatore Selection-2. I due individui con valori minori di $f(\theta_{res})$ sono selezionati come *Parents-Individuals* per le nuove generazioni. La procedura iterativa continua a partire dalla **Fase 1** fino al completamento del numero di generazioni (G) definite in input.

4 APPLICAZIONE DELL'ALGORITMO GENETICO

Il GA è applicato al caso studio con i seguenti parametri di input: i) $n_{BCJ} = 16$ (i.e., $n_{BCJ-INT} = n_{BCJ-INT} = n_{BCJ}/2 = 8$), ii) $G = 75$, iii) $I = 25$. La scelta di G e I è condotta tramite un'analisi di sensitività, non riportata per brevità. Il set di accelerogrammi usato nel GA in **Fase 5** è selezionato da SIMBAD tramite REXEL [18] e consiste in sette accelerogrammi il cui spettro elastico medio è mantenuto tra il 75% e il 130% del corrispondente spettro di risposta elastico dell'Eurocodice 8 [15] considerato per il progetto. Un'ulteriore assunzione per il posizionamento è definita e indicata come *Story-Restraint*. Essa consiste nell'assumere che tutti i BCJ appartenenti allo stesso piano siano caratterizzati dalle stesse proprietà (i.e., tutti BCJ convenzionali o tutti BCJ SCDF). Lo *Story-Restraint* consente una significativa riduzione del numero delle possibili configurazioni (C_P) con diverse posizioni dei 16 SCDF BCJs, nello specifico si passa da $C_P = 4900$ senza *Story-Restraint* a $C_{P,R} = 70$ con *Story-Restraint*.

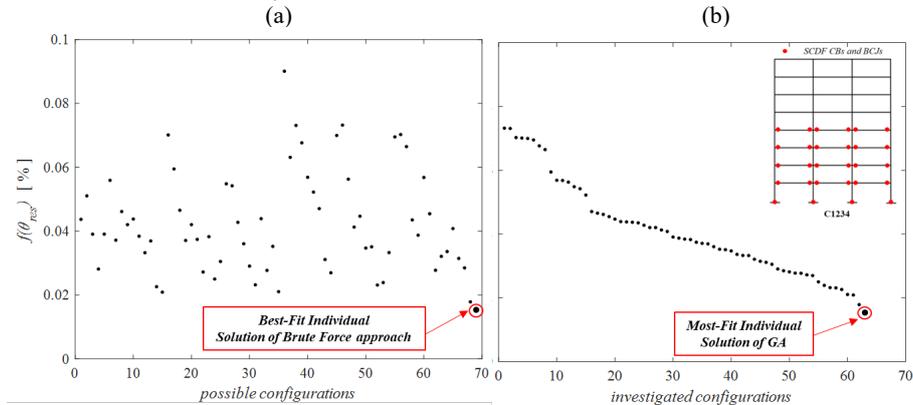


Fig. 3. Validazione dell'Algoritmo Genetico (GA) con 16 nodi trave-colonna dissipativi-ricentranti (SCDF BCJs) con *Story-Restraint* tramite (a) *Brute-Force* approach (b) GA.

In Figura 3 è mostrato il confronto tra i risultati ottenuti con un approccio *Brute-Force* (i.e., investigando tutte le possibili configurazioni) e con il GA, considerando lo *Story-Restraint*. Entrambe le metodologie definiscono come posizionamento ottimale, la configurazione C1234 (i.e., SCDF CBs e BCJs ai piani 1, 2, 3, 4). Inoltre si nota che considerati 16 SCDF BCJs il loro posizionamento ha un'influenza significativa sul ricentraggio. Infatti il posizionamento ottimale (C1234) porta a una diminuzione di $f(\theta_{res})$ del 83% rispetto al posizionamento peggiore. La Figura 4 mostra i risultati dell'applicazione del GA senza lo *Story-Restraint*. L'AG arriva alla soluzione investigando un numero di configurazioni limitato (i.e., $C_{GA} = 141$) e significativamente inferiore

rispetto al numero delle possibili configurazioni (*i.e.*, $C_P = 4900$). Questo risultato è ottenuto anche nell'applicazione con lo *Story-Restraint* ma in modo meno significativo (*i.e.*, $C_{GAR} = 63$ and $C_{PR} = 70$). La *Fitness-Function* è anche calcolata per il MRF convenzionale e quello con tutti i nodi SCDF (*i.e.*, M-BCJ), ottenendo rispettivamente 0.174% e 0.0006%~0. Dalle analisi svolte si vede che l'inclusione di 16 SCDF BCJs con l'adozione di un posizionamento ottimale, porta ad una riduzione di $f(\theta_{res})$ rispetto al MRF convenzionale del 91% and 93% rispettivamente con e senza *Story-Restraint*.

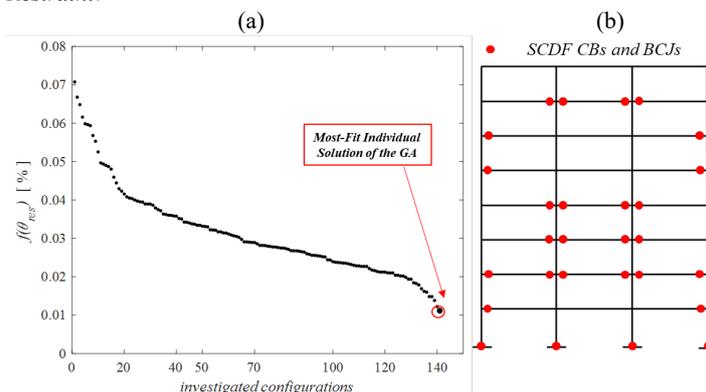


Fig. 4. Applicazione dell'Algoritmo Genetico (GA) con 16 nodi trave-colonna dissipativi-ricentranti (SCDF BCJ) senza *Story-Restraint* (a) risultati del GA (b) optimal placement.

5 CONCLUSIONI

In questo studio viene sviluppato un Algoritmo Genetico per definire il posizionamento ottimale di un limitato numero di nodi dissipativi-ricentranti in telai in acciaio momento resistenti. Le principali conclusioni sono di seguito riassunte. *i)* L'Algoritmo Genetico proposto rappresenta una procedura efficiente per definire il posizionamento ottimale di un numero limitato di nodi dissipativi-ricentranti. *ii)* L'Algoritmo Genetico trova la soluzione al problema investigando una piccola percentuale delle possibili configurazioni richiedendo uno sforzo computazionale inferiore rispetto a un approccio *Brute-Force*. *iii)* L'inclusione di un numero limitato di nodi dissipativi-ricentranti è una strategia efficace per garantire la capacità ricentrante della struttura, con minore complessità strutturale e minor costo di costruzione. *iv)* Dato un numero di nodi dissipativi-ricentranti, l'impiego del loro posizionamento ottimale garantisce un miglioramento della capacità di ricentrante rispetto a un posizionamento casuale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Soong, T.T., Spencer, B.F.: Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice. *Eng. Struct.* 24, 243–259 (2002). [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00092-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00092-X).
- [2] Ricles, J.M., Sause, R., Peng, S.W., Lu, L.W.: Experimental evaluation of earthquake resistant posttensioned steel connections. *J. Struct. Eng.* 128, 850 – 859 (2002). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:7\(850\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:7(850)).
- [3] Dimopoulos, A.I., Karavasilis, T.L., Vasdravellis, G., Uy, B.: Seismic design, modelling and assessment of self-centering steel frames using post-tensioned connections with web

- hourglass shape pins. *Bull. Earthq. Eng.* 11, 1797–1816 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9437-4>.
- [4] Freddi, F., Dimopoulos, C.A., Karavasilis, T.L.: Experimental evaluation of a rocking damage-free steel column base with friction devices. *J. Struct. Eng.* 146, 4020217 (2020).
- [5] Freddi, F., Dimopoulos, C.A., Karavasilis, T.L.: Rocking damage-free steel column base with friction devices: design procedure and numerical evaluation. *Earthq. Eng. Struct. Dyn. Struct. Dyn.* 46, 2281–2300 (2017). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/eqe.2904>.
- [6] Elettore, E., Freddi, F., Latour, M., Rizzano, G.: Design and analysis of a seismic resilient steel moment resisting frame equipped with damage-free self-centering column bases. *J. Constr. Steel Res.* 179, 106543 (2021). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106543>.
- [7] Lettieri, A., Elettore, E., Pieroni, L., Freddi, F., Latour, M., Rizzano, G.: Parametric analysis of steel MRFs with self-centring column bases. *Steel Constr.* (2022). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/stco.202100050t>.
- [8] Elettore, E., Lettieri, A., Freddi, F., Latour, M., Rizzano, G.: Performance-based assessment of seismic-resilient steel moment resisting frames equipped with innovative column base connections. *Structures.* 32, 1646–1664 (2021). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.072>.
- [9] Pieroni, L., Freddi, F., Latour, M.: Effective placement of self-centering damage-free connections for seismic-resilient steel moment resisting frames. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 51, 1292–1316 (2022). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/eqe.3615>.
- [10] Falcone, R., Lima, C., Martinelli, E.: Soft computing techniques in structural and earthquake engineering: a literature review. *Eng. Struct.* 207, 110269 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110269>.
- [11] Platt, G.M., Yang, X.S., Silva Neto, A.J.: Computational intelligence, optimization and inverse problems with applications in engineering. (2018).
- [12] Singh, M.P., Moreschi, L.M.: Optimal placement of dampers for passive response control. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 31, 955–976 (2002). <https://doi.org/10.1002/eqe.132>.
- [13] Latour, M., Rizzano, G., Santiago, A., Simões da Silva, L.: Experimental response of a low-yielding, self-centering, rocking column base joint with friction dampers. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 116, 580–592 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.10.011>.
- [14] Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., Fenves, G.L.: *OpenSEES: Open System for earthquake engineering simulation*. , California (2009).
- [15] European Committee for Standardization: EN 1998-1. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, (2004).
- [16] Charney, F.A., Downs, W.M.: Modeling Procedures for Panel Zone Deformations in Moment Resisting Frames. In: *Connections in steel structures V. ESSC/AISC Workshop*. pp. 121–130. , Amsterdam (2004).
- [17] Lignos, D.G., Krawinkler, H.: Deterioration Modeling of Steel Components in Support of Collapse Prediction of Steel Moment Frames under Earthquake Loading. *J. Struct. Eng.* 137, 1291–1302 (2011). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000376](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000376).
- [18] Iervolino, I., Galasso, C., Cosenza, E.: REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis. *Bull. Earthq. Eng.* 2009 82. 8, 339–362 (2009). <https://doi.org/10.1007/S10518-009-9146-1>.

KEYWORDS

Seismic Resilience, Steel Moment Resisting Frames, Self-Centering Damage-Free Devices, Residual Drifts, Structural Optimization, Genetic Algorithm.