

# **PROVA SPERIMENTALE DI UN ELEMENTO DIAGONALE DI CONTROVENTO AD INSTABILITÀ CONTROLLATA**

## **EXPERIMENTAL RESULTS OF A BUCKLING RESTRAINED BRACING**

Piero Gelfi, Giovanni Metelli  
Università degli Studi di Brescia  
Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio e Ambiente  
Brescia, Italia  
gelfi@ing.unibs.it; gmetelli@ing.unibs.it

### **ABSTRACT**

This paper deals with the design and tests of a simple and economical Buckling Restrained Bracing. The core is a rectangular steel section, stiffened at the ends by two longitudinal ribs. It is hinged at the ends in order to avoid the bending action in the member. The buckling inhibitor is composed by four L shaped bolted members, thus allowing to easily assembly the BRB and to substitute the core after the earthquake. The results of three tests on a full scale BRB, according to the AISC prescriptions, are presented. They show the good hysteretic behaviour of the proposed BRB in term of resistance, ductility and energy dissipation

### **SOMMARIO**

In questo lavoro si presenta un elemento diagonale ad instabilità controllata (BRB Buckling Restrained Bracing) con caratteristiche di particolare semplicità ed economicità, impiegando materiali e tecnologie correnti. Per semplicità di esecuzione l'anima del BRB è costituita da un piatto di sezione costante, rinforzato alle estremità con la formazione di una sezione a croce. Per evitare collegamenti iperstatici, che inducono sforzi 'parassiti' dovuti alla deformazione angolare del controvento, il BRB è semplicemente incernierato agli estremi in modo da essere sollecitato solo assialmente. Il guscio di contenimento è costituito da angolari commerciali a lati uguali, uniti mediante bullonatura, con l'inserimento tra le ali di piatti di imbottitura continui che contribuiscono notevolmente ad aumentarne il momento d'inerzia. Il collegamento mediante bullonatura, oltre che essere semplice ed economico, permette di smontare il BRB per ispezionarne l'anima dopo un evento sismico. La prova sperimentale, in grandezza reale, eseguita secondo le prescrizioni delle norme AISC, ha dimostrato il buon comportamento isteretico del BRB.

### **1 INTRODUZIONE**

Tra le tipologie strutturali in acciaio, i telai con controventi reticolari concentrici sono i più utilizzati per la semplicità di esecuzione e la conseguente economicità. In zona sismica il comportamento dei controventi reticolari concentrici tradizionali è però insoddisfacente a

causa della scarsa duttilità dovuta all'instabilità degli elementi diagonali compressi. Per migliorarne il comportamento, le principali indicazioni delle normative sono rivolte a limitare la snellezza delle diagonali e a garantire una adeguata sovrarresistenza dei collegamenti e degli elementi non dissipativi (travi e colonne). Le limitazioni sulla snellezza conducono però spesso a sovradimensionare le diagonali rispetto alla effettiva richiesta di resistenza: ne consegue, nell'ottica dell'applicazione del capacity design, un aggravio nella richiesta di resistenza di travi, colonne e fondazioni.

Per migliorare la risposta al sisma dei controventi reticolari concentrici, la ricerca si è indirizzata negli ultimi anni allo studio di elementi diagonali innovativi che esibiscono un comportamento praticamente simmetrico a trazione e compressione, ottenuto contrastando la tendenza all'instabilità con una struttura esterna. In letteratura questi elementi ad instabilità controllata sono chiamati Buckling Restrained Braces (BRB) o Buckling Inhibited Braces (BIB). Fondamentalmente essi sono costituiti da un'anima in acciaio (core) che può scorrere liberamente all'interno di un "guscio" molto rigido flessionalmente, che ne ostacola l'instabilità; l'anima è l'elemento portante che dissipa energia nelle escursioni in campo plastico.

Una caratteristica particolarmente interessante è la possibilità di tarare separatamente, entro certi limiti, la resistenza, che dipende solo dalla sezione dell'anima e dal materiale, e la rigidità, che dipende anche dalla lunghezza del tratto dissipativo. Questa libertà progettuale rende possibile una migliore distribuzione della rigidità e della resistenza lungo l'altezza dell'edificio, evitando la concentrazione di richiesta di duttilità in pochi piani "deboli".

Varie tipologie sono state proposte, con anima metallica (generalmente in acciaio) a sezione rettangolare o cruciforme, con il guscio costituito da tubi iniettati con malta o con guscio interamente metallico [1-2].

In questo lavoro si presenta un BRB con caratteristiche di particolare semplicità ed economicità, impiegando materiali e tecnologie correnti. Fra le varie tipologie presenti in letteratura, si è scelta quella costituita da soli elementi metallici, per la maggior leggerezza e perché più adatta ad essere realizzata da una ditta di carpenteria. Per semplicità di esecuzione l'anima del BRB è costituita da un piatto di sezione costante, rinforzato alle estremità con la formazione di una sezione a croce. Per evitare collegamenti iperstatici, che inducono sforzi 'parassiti' dovuti alla deformazione angolare del controvento, il BRB è semplicemente incernierato agli estremi in modo da essere sollecitato solo assialmente. Il guscio di contenimento è costituito da angolari commerciali a lati uguali, uniti mediante bullonatura, con l'inserimento tra le ali di piatti di imbottitura continui che contribuiscono notevolmente ad aumentarne il momento d'inerzia. Il collegamento mediante bullonatura, oltre che essere semplice ed economico, permette di smontare il BRB per l'ispezione dell'anima e l'eventuale sostituzione dopo un evento sismico.

I BRB sono già stati impiegati in alcune importanti costruzioni negli Stati Uniti ed in Giappone ed il loro impiego è previsto dalle recenti *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 341-05) emanate dall'American Institute of Steel Construction [3]. In Italia ed in Europa essi rappresentano invece una novità ed il loro impiego non è previsto né dall'Eurocodice 8 [4], né dall'Ordinanza 3274 [5].

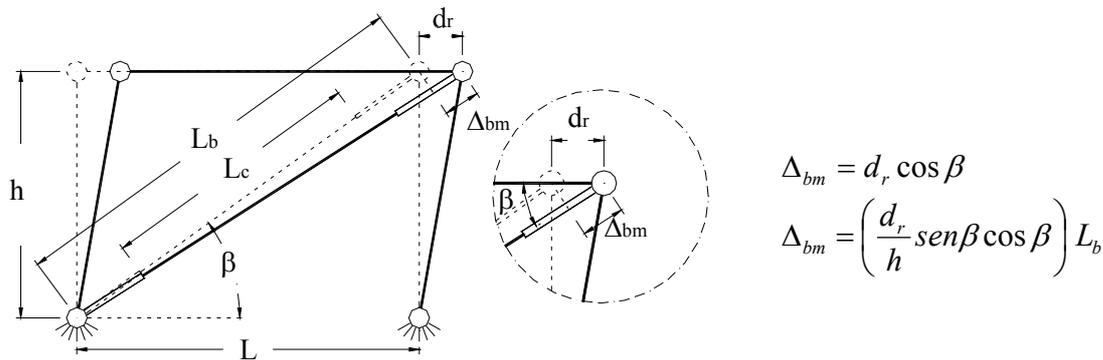
## 2 PROGETTO DEL BRB

### 2.1 Anima del BRB

La diagonale ad instabilità controllata va progettata secondo criteri di resistenza, di rigidità e di duttilità. Per quanto riguarda la resistenza, si progetta l'area della sezione dell'anima in base alle sollecitazioni derivanti dall'analisi a spettro di risposta, adottando per il coefficiente di struttura  $q$  un valore che in letteratura è indicato compreso fra 6 e 8. Il procedimento è evidentemente iterativo dato che la risposta della struttura dipende dalla geometria del BRB.

È conveniente scegliere un tipo di acciaio a basso snervamento per aumentare la rigidezza, che è spesso un parametro vincolante per il controllo delle deformazioni, necessario per soddisfare la verifica allo SLD e per limitare gli effetti del secondo ordine. Per le stesse ragioni è conveniente limitare al massimo la lunghezza del tratto dissipativo, il cui valore minimo è governato dal rispetto del requisito di duttilità, dovendo permettere le deformazioni relative di piano (story drift) richieste dal sisma.

La normativa italiana [5] prescrive, per la verifica allo Stato Limite di Danno, un valore limite del rapporto tra lo spostamento relativo di piano  $d_r$  e l'altezza di interpiano  $h$ . Tale valore limite, indicato nello 0.5%, può salire fino all'1% se i tamponamenti sono opportunamente progettati. La lunghezza del tratto dissipativo va calcolata in base al valore del drift di progetto allo Stato Limite Ultimo che è pari a 2.5 volte il valore allo Stato Limite di Danno.



**Fig. 1:** Relazione fra drift e allungamento del BRB

La relazione fra la deformazione  $\Delta_{bm}$  del BRB ed il drift  $d_r$  è illustrata in Figura 1. Trascurando la parte elastica della deformazione, che è di un ordine di grandezza inferiore a quella plastica  $\varepsilon_{cu}$ , il tratto dissipativo (core) del BRB deve avere una lunghezza minima  $L_c$ :

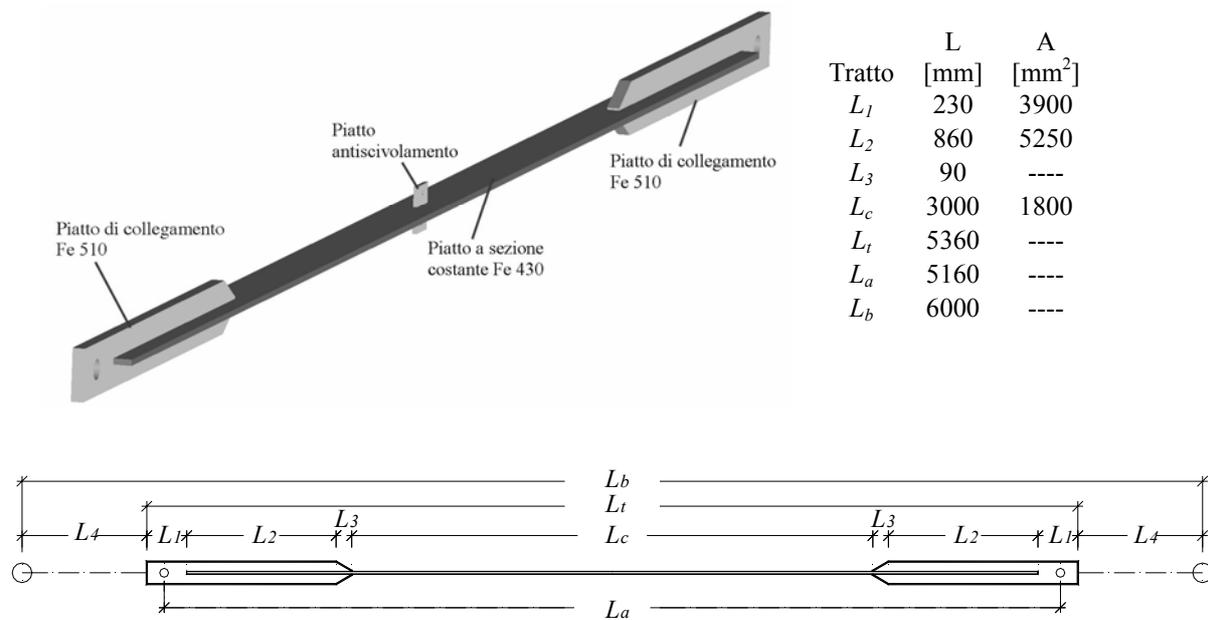
$$L_c = \frac{\Delta_{bm}}{\varepsilon_{cu}} = L_b \left( \frac{d_r}{h} \operatorname{sen} \beta \cos \beta \right) / \varepsilon_{cu} \quad (1)$$

Dati di letteratura indicano, per la deformazione ultima  $\varepsilon_{cu}$  sotto carichi ciclici, valori compresi fra 2.5% e 3%. Secondo l'appendice T delle norme AISC [3] la prova sperimentale di qualificazione del BRB deve essere condotta fino a valori della deformazione doppi di quelli corrispondenti al drift di progetto. Per la prova sperimentale la lunghezza  $L_c$  è stata calcolata assumendo prudenzialmente  $\varepsilon_{cu} = 2.5/2 = 1.25\%$ . Assumendo  $\beta = 45^\circ$  ed un drift di progetto  $d_r/h = 2.5 \cdot 0.5 = 1.25\%$ , dalla relazione (1) si è ricavata la lunghezza del tratto dissipativo:

$$L_c = L_b (1.25 \cdot 0.5) / 1.25 = 0.5 L_b \quad (2)$$

Ipotizzando una lunghezza totale (da nodo a nodo del telaio) della diagonale  $L_b = 6$  m, si è adottata la lunghezza di 3 m del tratto dissipativo  $L_c$ .

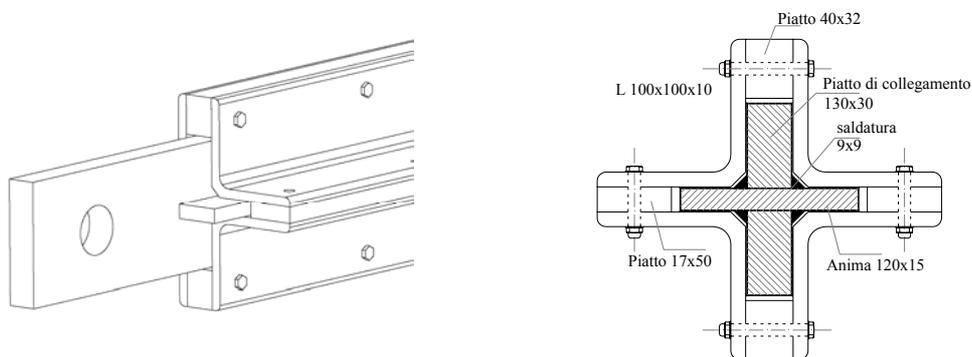
In Figura 2 sono riportati i dati geometrici del BRB. Il tratto centrale ha sezione 120x15 mm ed è in acciaio S275. I piatti di collegamento di estremità, in acciaio S355, hanno sezione 130x30 mm. Il collegamento a cerniera è costituito da un bullone in acciaio C40, con diametro  $\phi=50$  mm in foro da 51 mm.



**Fig. 2:** Dimensioni del BRB provato

## 2.2 Guscio di contrasto

Il guscio di contrasto (Figura 3) è costituito da 4 laminati ad L in acciaio S355, collegati mediante bullonatura. I piatti di imbottitura inseriti tra le ali sono continui per aumentare il momento d'inerzia della sezione.



**Fig. 3:** Guscio di contrasto

Per controllare l'instabilità dell'anima, il guscio deve avere una rigidezza flessionale sufficientemente elevata da contrastare l'effetto del secondo ordine esercitato dall'anima compressa. Alla sua rigidezza flessionale deve cioè corrispondere un valore del carico critico euleriano  $N_{cr}$  superiore alla resistenza a compressione  $N_{Rc}$  dell'anima, con un coefficiente di sicurezza che in letteratura è generalmente proposto pari a 2:

$$N_{Rc} = \beta \gamma_{ov} s f_y A_a = 783 \text{ kN} \quad (3)$$

$$N_{cr} = 2 N_{Rc} = 1566 \text{ kN} \quad (4)$$

avendo assunto

$L_0 = 516$  cm lunghezza di libera inflessione,

$\beta = 1.1$  coefficiente di sovraresistenza a compressione,

$\gamma_{ov} = 1.15$  coefficiente di sovraresistenza per l'acciaio S275,

$s = 1.25$  fattore di duttilità,

$f_y = 275$  MPa tensione nominale di snervamento,

$A_a = 18$  cm<sup>2</sup> area dell'anima del BRB.

Il momento d'inerzia  $J_G$  del guscio deve essere maggiore di:

$$J_G > \frac{N_{cr} L_0^2}{\pi^2 E} = 2012 \text{ cm}^4 \quad (5)$$

Il momento d'inerzia del BRB, considerando i piatti di imbottitura, vale invece 3670 cm<sup>4</sup>, cui corrisponde un valore del carico critico  $N_{cr,eff} = 2857$  kN.

Per la verifica di resistenza si può ipotizzare un'imperfezione iniziale pari a  $e_0 = L_0 / 500$  (EC3 §5.3.3 [6]). Considerando l'effetto del secondo ordine, si ha in mezzeria:

$$M_{Ed} = N_{Rc} \frac{e_0}{1 - N_{Rc} / N_{cr,eff}} = 783 \frac{0.0103}{1 - 783 / 2857} = 783 \cdot 0.0142 = 11.1 \text{ kNm} \quad (6)$$

valore ampiamente inferiore al momento resistente del guscio, pari a:

$$M_{Rd} = W_{el} f_y / \gamma_{M0} = 109 \text{ kNm} \quad (7)$$

Con lo stesso criterio si progetta la bullonatura per un taglio sollecitante

$$V_{Ed} = 4M_{Ed} / L_0 = 8.6 \text{ kN} \quad (8)$$

cui corrisponde una forza di scorrimento  $q_{Ed}$  pari a 58 N/mm, che deve essere affidata a due bulloni. Si posano bulloni M10 classe 8.8 con passo di 200 mm, con una resistenza a scorrimento di 302 N/mm. I bulloni sono serrati con chiave dinamometrica.

### 3 BANCO DI PROVA

Il banco di prova (Figura 4) è un telaio chiuso costituito da profili HEB 280 in acciaio S355. Il carico è applicato tramite un martinetto elettro-meccanico da 1000 kN, con corsa di +/- 250 mm. Una guida impedisce lo sbandamento della testa del martinetto in fase di spinta. Fra il martinetto e il BRB è inserita una cella di carico. Le deformazioni longitudinali dell'anima e del guscio sono misurate tramite trasduttori di spostamento induttivi. Due comparatori meccanici controllano anche lo spostamento relativo tra guscio e anima.

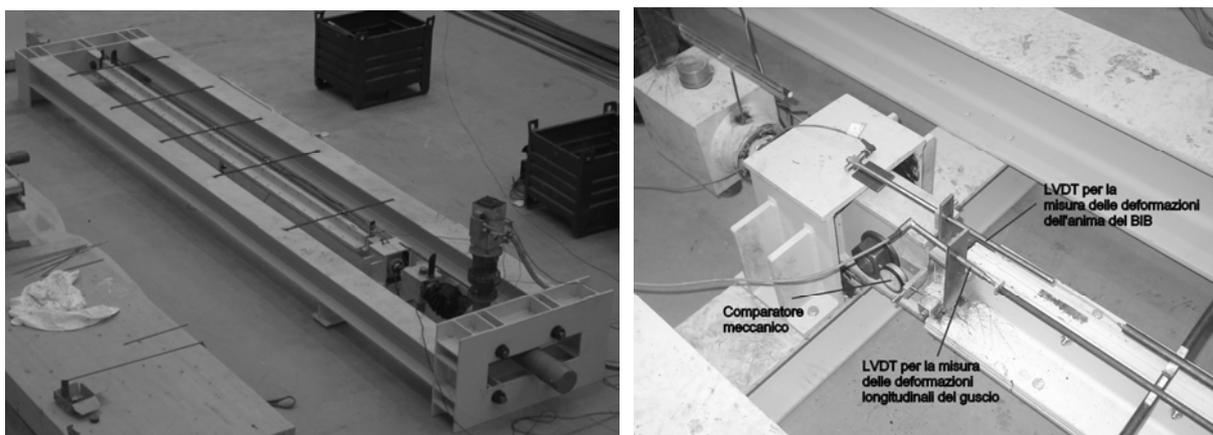


Fig. 4: Banco di prova

#### 4 PROVE SPERIMENTALI

Si sono eseguite tre prove sperimentali su altrettanti BRB, utilizzando lo stesso guscio e tre anime identiche. Il materiale dell'anima, nominalmente acciaio S275, è stato caratterizzato mediante prova completa di trazione che ha fornito le seguenti caratteristiche meccaniche: tensione di snervamento  $f_y = 321$  MPa, tensione di rottura  $f_t = 468$  MPa, allungamento a rottura  $A_5 = 34\%$ ,  $A_{gt} = 18.6\%$ .

Il protocollo di carico è quello indicato dalle norme AISC che prevede, detta  $\Delta_{bm}$  la deformazione di progetto allo stato limite ultimo e  $\Delta_{by}$  la deformazione al limite elastico, le seguenti fasi: I) 2 cicli con ampiezza  $\Delta_{by}$ ; II) 2 cicli con ampiezza  $0.50\Delta_{bm}$ ; III) 2 cicli con ampiezza  $1\Delta_{bm}$ ; IV) 2 cicli con ampiezza  $1.5\Delta_{bm}$ ; V) 2 cicli con ampiezza  $2\Delta_{bm}$ ; eventuali cicli addizionali di ampiezza  $\Delta_{by}$  per raggiungere una deformazione plastica cumulativa (Cumulative Plastic Deformation) pari ad almeno  $200\Delta_{by}$ .

Prudenzialmente si è assunto un valore  $\Delta_{bm} = 30$  mm, corrispondente ad un allungamento del tratto dissipativo pari a circa 1%. La deformazione è stata applicata con una velocità di circa 0.1 mm/s. L'allungamento al limite elastico, calcolato considerando la sezione variabile dell'anima, è pari a  $\Delta_{by} = 5.5$  mm.

Nella Tabella 1 sono riportati i dati relativi alla prima prova. In particolare sono indicati l'allungamento totale dell'anima  $\Delta_b$ , la deformazione del solo tratto dissipativo dell'anima  $\varepsilon_c$ , la duttilità  $\mu = \Delta_b / \Delta_{by}$ , la deformazione plastica cumulativa  $CPD = \Sigma(|\Delta_b - \Delta_{by}| / \Delta_{by})$ , la forza massima di compressione  $F_c$  e di trazione  $F_t$  per ogni fase di carico. La prova è stata interrotta prima di raggiungere il valore prescritto di deformazione plastica cumulativa ( $CPD = 200$ ) per la rottura a trazione di alcuni bulloni del guscio.

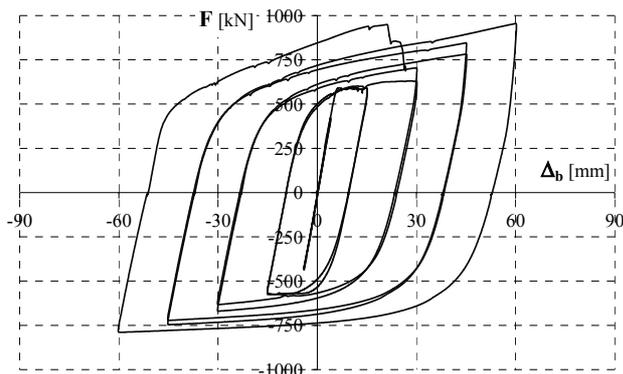
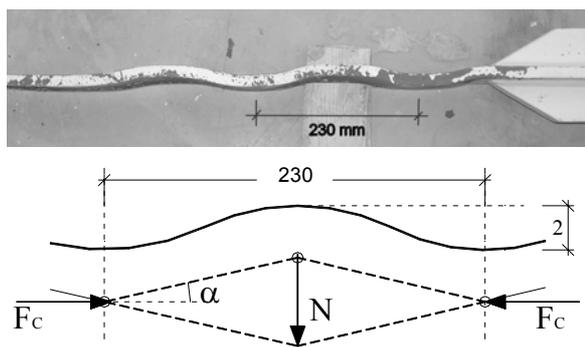
**Tabella 1:** riepilogo dei risultati della prima prova

Fase	N° cicli	$\Delta_b$ [mm]	$\varepsilon_c$ [%]	$\mu$	CPD	$F_c$ [kN]	$F_t$ [kN]	$(F_c - F_t) / F_t$ [%]
I ( $\Delta_{by}$ )	2	5.5	0.15	1.0	0	567	567	0
II ( $0.5\Delta_{bm}$ )	2	15.0	0.47	2.7	13.8	595	576	3.3
III ( $1.0\Delta_{bm}$ )	2	30.0	0.96	5.5	49.5	705	670	5.2
IV ( $1.5\Delta_{bm}$ )	2	45.0	1.46	8.2	106.9	846	747	13.2
V ( $2.0\Delta_{bm}$ )	1	60.0	1.95	10.9	186.2	956	789	21.2

In Figura 5 è riportato il diagramma  $F-\Delta_b$  (positive le compressioni). Si può notare una crescente dissimmetria di comportamento, con una resistenza a compressione che nell'ultimo ciclo è pari a 1.21 volte la resistenza a trazione, indice di un crescente trasferimento del carico dall'anima al guscio a causa dell'attrito. Questo comportamento è da imputare al serpeggiamento del tratto dissipativo dell'anima (Fig. 6), che provoca spinte a vuoto, con conseguente aumento dell'attrito. L'entità delle spinte a vuoto, calcolate in base allo schema di Figura 6 con il carico assiale raggiunto nell'ultimo ciclo, spiega la rottura dei bulloni del guscio.

Per migliorare il comportamento del BRB, per la seconda prova si è provveduto ad irrobustire la bullonatura dimezzandone il passo e posando bulloni M10 classe 10.9. Per ridurre il gioco fra anima e guscio, si sono incollati agli angolari lamierini da 0.4 mm in acciaio inox (Figura 7) e si è lubrificata l'anima con grasso a base grafitica.

I risultati della seconda prova sono riportati nella Tabella 2 e nella Figura 8a). Il comportamento è pienamente soddisfacente fino alla conclusione del protocollo di carico standard (fase VI). La prova è stata proseguita con due ulteriori cicli fino a raggiungere una deformazione  $\varepsilon_c$  del tratto dissipativo pari a circa il 3%. La prova è stata interrotta per un guasto al martinetto.


**Fig. 5:** Cicli di isteresi della prima prova

**Fig. 6:** Deformata dell'anima

**Fig. 7:** Posa dei lamierini inox

**Tabella 2:** riepilogo dei risultati della seconda prova

Fase	N° cicli	$\Delta_b$ [mm]	$\varepsilon_c$ [%]	$\mu$	CPD	$F_c$ [kN]	$F_t$ [kN]	$(F_c - F_t)/F_t$ [%]
I ( $\Delta_{bv}$ )	2	5.5	0.15	1.0	0	567	567	0
II ( $0.5\Delta_{bm}$ )	2	15.0	0.47	2.7	13.8	583	580	0.5
III ( $1.0\Delta_{bm}$ )	2	30.0	0.96	5.5	49.5	685	651	5.2
IV ( $1.5\Delta_{bm}$ )	2	45.0	1.46	8.2	106.9	760	717	6.0
V ( $2.0\Delta_{bm}$ )	2	60.0	1.95	10.9	186.2	827	765	8.1
VI ( $1.5\Delta_{bm}$ )	1	45.0	1.45	8.2	214.9	805	770	4.5
VII ( $2.5\Delta_{bm}$ )	1	75.0	2.45	13.4	260.0	867	781	11.0
VIII ( $3.0\Delta_{bm}$ )	1	90.0	2.95	16.1	304.3	922	819	12.6

Nella terza prova si è voluto determinare se l'inserimento dei lamierini inox è stato determinante per la buona riuscita della seconda prova. L'anima è stata quindi inserita nel guscio senza particolari provvedimenti, se non l'applicazione di una vernice lubrificante a base di teflon (Bechem, Berulub Pal 3), più adatta del grasso a rimanere efficiente nel tempo.

Il comportamento del BRB (Figura 8b) è stato del tutto analogo a quello della seconda prova, nonostante il maggiore gioco fra anima e guscio, che indagini numeriche successive hanno indicato essere determinante per la valutazione delle spinte a vuoto. L'aumento di resistenza delle bullonatura è stato sufficiente ad assorbire anche le maggiori spinte. Il buon comportamento fino ad una deformazione plastica del tratto dissipativo  $\varepsilon_c=3\%$ , raggiunta con una deformazione plastica cumulativa ben superiore al minimo richiesto, fa ritenere che questo valore di deformazione può essere adottato come criterio progettuale della lunghezza del tratto dissipativo, che quindi poteva essere ridotta. Per ulteriori dettagli si veda il lavoro "Studio Teorico e Sperimentale sui controventi Concentrici ad Instabilità Controllata" [7].

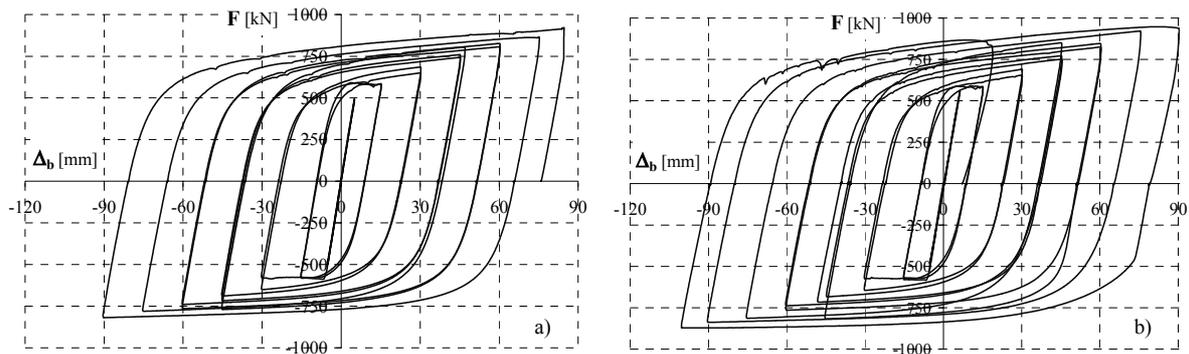


Fig. 8: Cicli di isteresi della seconda (a) e della terza prova (b).

## 5 CONCLUSIONI

Il BRB progettato con criteri di economicità si è dimostrato idoneo a soddisfare il severo test di qualificazione prescritto dalla normativa AISC. La soluzione con BRB semplicemente incernierato agli estremi evita i delicati problemi di flessioni parassite che si presentano nel caso di collegamento iperstatico al sistema di controvento, permettendo di evitare la costosissima prova sperimentale dell'intero sistema.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la Cordioli & C S.p.A. di Valeggio sul Mincio per aver fornito il banco di prova, ed in particolare gli ingegneri S. Freddi ed E. Tosoni per i preziosi consigli nella definizione del guscio del BRB. Si ringrazia l'ing. A. Temponi che ha progettato ed eseguito le prove sperimentali durante il suo lavoro di tesi.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Black C., Makris N., Aiken I., Component testing, seismic evaluation and characterization of buckling-restrained braces, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 130, n.° 6, pagg. 880-894, 2004
- [2] Mazzolani F. M., Consolidamento antisismico di edifici in C.A. attraverso tecniche innovative: il progetto ILVA-IDEM. *Costruzioni Metalliche*, N.°2/2005, pagg. 35-48
- [3] AISC, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings ANSI/AISC 341-05, 341s1-05, Chicago, Illinois, March 9, 2005
- [4] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, EN 1998-1, CEN, December 2004
- [5] O.P.C.M. n.°3274, Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica, 20 marzo 2003, come modificata dall'O.P.C.M. n.°3431 del 3 maggio 2005
- [6] Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1: General Rules and Rules for Buildings, EN 1993:1, CEN, May 2005
- [7] Gelfi P., Marchina E., Metelli G, Temponi A., Studio Teorico e Sperimentale sui Controventi Concentrici ad Instabilità Controllata, *Technical Report n.5, Università degli Studi di Brescia, DICATA*, 2007

## PAROLE CHIAVE

Buckling restrained braces, prove sperimentali, controventi, instabilità, risposta sismica, duttilità, deformazione plastica.