

Corso di aggiornamento

Progetto di edifici antisismici
con struttura controventata in acciaio

Telai con controventi ad instabilità impedita

7 - I controventi ad instabilità impedita

Spoletto

24-25 marzo 2017

Edoardo M. Marino

La ricerca sperimentale

Sviluppo di dispositivi e tipologie strutturali per la protezione sismica degli edifici:

- Definizione del principio di funzionamento
- Vantaggi offerti rispetto alle tipologie strutturali tradizionali
- Determinazione della capacità
- Studio del comportamento ciclico e monotono
- Definizione di modelli numerici

Impatto scientifico socio/economico

L'applicazione delle nuove tecnologie per la protezione sismica degli edifici può:

- ridurre la probabilità di collasso in occorrenza di eventi sismici severi
- ridurre il danno agli elementi strutturali e non strutturali in occorrenza di eventi sismici moderati
- consentire la sostituibilità degli elementi dedicati a dissipare energia durante il sisma

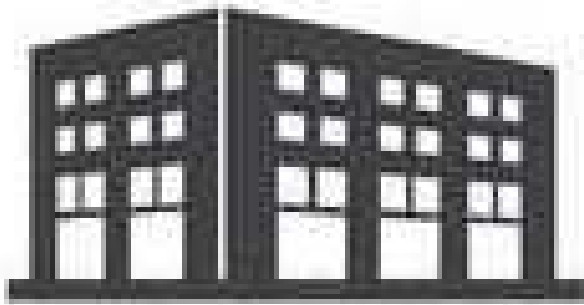
Promuove una società più resiliente

Chi può promuovere l'impiego delle nuove tecnologie?

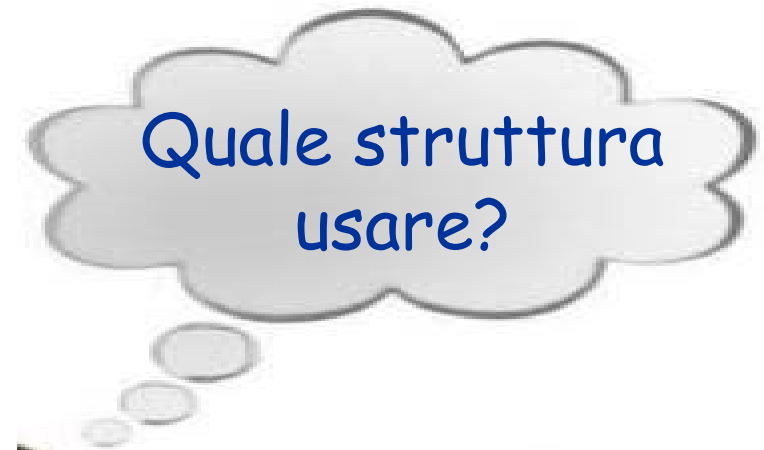


Siete voi!
I progettisti

Scelta della tipologia strutturale



- Destinazione d'uso
- Vincoli architettonici
- Funzionalità
- Dimensioni



Scelta della tipologia strutturale

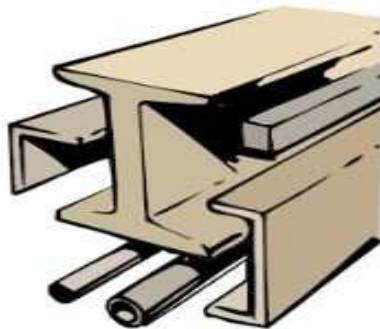
Metodi di progetto
chiari, normativa,
esperienza.



Progetto
Moda
Rapporto
Costo/benefici



No prescrizioni di
normativa, nessuna
idea su come
procedere.



Strutture
tradizionali



Nuove tecnologie

Scelta della tipologia strutturale

Metodi di progetto
chiari, normativa,
esperienza.



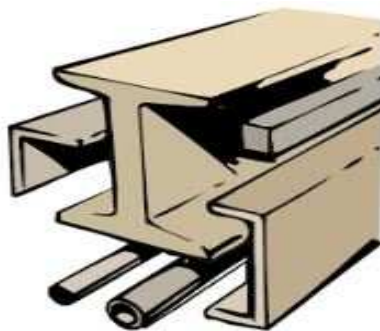
Progetto

Moda

Rapporto
Costo/benefici



No prescrizioni di
normativa, nessuna
idea su come
procedere.



Strutture
tradizionali

Scelgo il
tradizionale.



Nuove tecnologie

Vantaggi dei controventi ad instabilità impedita (Buckling Restrained Braces, BRB)

Assenza di instabilità

- Uguale comportamento a trazione e compressione
- Risposta ciclica e monotona facili da prevedere

Comportamento inelastico eccellente

- Elevata duttilità disponibile
- Comportamento ciclico stabile e altamente dissipativo

Vantaggi dei controventi ad instabilità impedita (Buckling Restrained Braces, BRB)

Sono stati studiati in maniera estesa ed approfondita

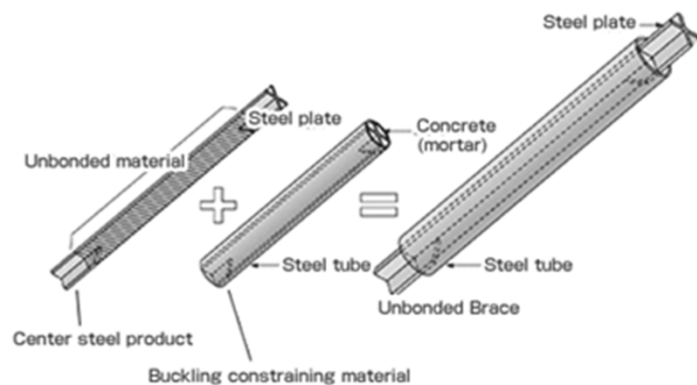
Alcuni studi sui BRB:

- Black CJ, Makris N, Aiken ID., Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 2002.
- Merritt S, Uang CM, Benzoni G. Subassemblage Testing of Star Seismic Buckling Restrained Braces. Structural Systems Research Project, Report No. TR-2003/04, University of California, San Diego, 2003.
- Takeuchi T, Ozaki H, Matsui R, Sutcu F. Out-of-plane stability of buckling-restrained braces including moment transfer capacity. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2014; 43: 851-869.
- Uang CM, Nakashima M, Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance Based Engineering, CRC Press LLC, 2004.
- Etc...

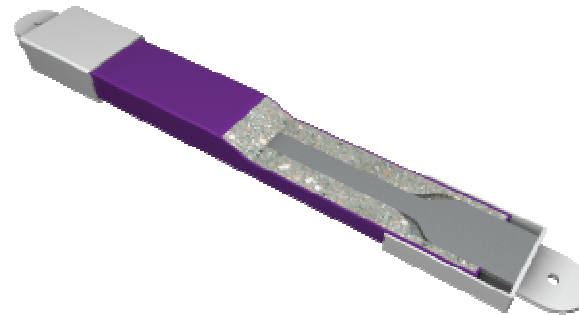
Le proprietà e le limitazioni dei BRB oggi sono ben note

Vantaggi dei controventi ad instabilità impedita (Buckling Restrained Braces, BRB)

Molte aziende hanno sviluppato il proprio BRB ...



NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL
JAPAN



STAR SEISMIC BRB
USA



FIP
INDUSTRIALE
ITALY

Sono facilmente reperibili nel mercato

La situazione normativa

La normativa vigente in Italia ed in Europa non fornisce indicazioni sul progetto dei telai in acciaio con BRB



L'uso di BRB in Italia ed in Europa è molto limitato

Scopo della ricerca

Sviluppo di un metodo di progetto di telai in acciaio con BRB coerente con la normativa e la pratica progettuale in Italia ed in Europa :

- Telai con collegamenti trave-colonna a cerniera
- Forze sismiche ridotte mediante fattore di struttura per tener conto della duttilità
- Progetto delle membrature non dissipative mediante criterio di gerarchia delle resistenze
- Calibrato per garantire i livelli prestazionali richiesti dalla normativa italiana ed europea

Il metodo di progetto

Earthquake Engineering
Structural Dynamics

The Journal of the
International Association for
Earthquake Engineering

EARTHQUAKE ENGINEERING & STRUCTURAL DYNAMICS

Earthquake Engng Struct. Dyn. 2013; **42**:1243–1263

Published online 29 October 2012 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/eqe.2269

Design method and behavior factor for steel frames with buckling restrained braces

Melina Bosco^{*,†} and Edoardo M. Marino

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Catania, V.le A. Doria, 6, 95125 Catania, Italy

SUMMARY

Buckling restrained braces (BRBs) are very effective in dissipating energy through stable tension–compression hysteretic cycles and have been successfully experimented in the seismic protection of buildings. Their behavior has been studied extensively in the last decades and today the level of performance guaranteed by these devices and the technological constraints that have to be fulfilled to optimize their behavior are well known. Furthermore, several companies in the world have developed their own BRBs and are now producing them. In spite of this, many seismic codes (for instance, the EuroCode 8) do not stipulate provisions for the design and construction of earthquake-resistant structures equipped with BRBs. This discourages the structural engineering community from using these devices and seriously limits their use in structural applications. In this paper a procedure for the seismic design of steel frames equipped with BRBs is proposed. Furthermore, the paper presents a numerical investigation aimed at validating this design procedure and proposing the value of the behavior factor q that should be used for this structural type. To this end, a set of frames with BRBs is first designed by means of several values of q . Then, the obtained frames are subjected to a set of accelerograms compatible with the elastic response spectrum considered in design. The seismic response of the frames is determined by nonlinear dynamic analysis and represented in terms of the ductility demand of BRBs and the internal force demand of nondissipative members (beams and columns). Finally, the largest value of q that leads to acceptable seismic performance of the analyzed frames is assumed as adequate. The value of q is given in the paper as a continuous function of the assumed ductility capacity of the BRBs. Copyright © 2012 John Wiley & Sons, Ltd.

Received 8 June 2012; Revised 1 October 2012; Accepted 3 October 2012

KEY WORDS: BRB; chevron braced frame; steel structure; behavior factor; seismic code

Il metodo di progetto



Design of steel frames equipped with BRBs in the framework of Eurocode 8



M. Bosco^a, E.M. Marino^{b,*}, P.P. Rossi^b

^a Department of Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University, 1455 de Maisonneuve Blvd. West, Montreal, Quebec, Canada

^b Department of Civil Engineering and Architecture, University of Catania, v.le A. Doria 6, 95125 Catania, Italy

ARTICLE INFO

Article history:

Received 4 February 2015

Received in revised form 24 April 2015

Accepted 7 May 2015

Available online xxx

Keywords:

BRB

Steel structure

Behaviour factor

Seismic design

Eurocode 8

ABSTRACT

Buckling restrained braces (BRBs) have been investigated extensively by means of experimental tests and their large ductility has been pointed out by many studies. Nevertheless, Eurocode 8 (EC8) does not provide any rules for design of steel frames with BRBs. For this reason, a design procedure for steel frames equipped with BRBs is proposed in this paper. The proposed design procedure is obtained by modifying the rules stipulated in EC8 for steel chevron braced frames. As a consequence, the obtained design procedure is consistent with the framework of EC8. BRBs are designed in terms of ductility and strength based on two parameters: the design storey drift Δu^d , i.e. the maximum accepted storey drift demand for earthquakes with a given probability of occurrence, and the behaviour factor q , which is a seismic force reduction factor correlated with the expected ductility of the structure. Beams and columns are designed according to capacity design principles derived from those given in EC8 with reference to steel chevron braced frames.

The design procedure is applied to a set of multi-storey frames with BRBs assuming different values of Δu^d and q . Their seismic response is evaluated by nonlinear dynamic analysis for two seismic excitation levels. The BRBs are modelled by a refined numerical model calibrated on the basis of a wide database of experimental data. For each value of Δu^d , the highest values of q leading to seismic response that does not exceed the Significant Damage and Near Collapse limit states are determined. Then, the suggested behaviour factor is given as a function of the design storey drift.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Indice

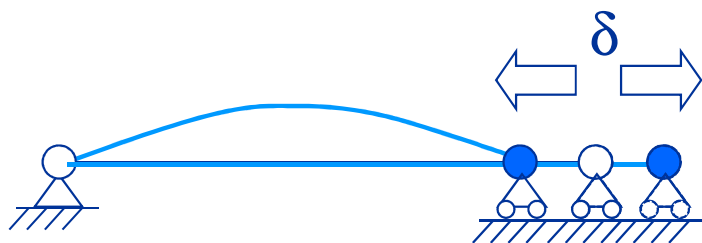
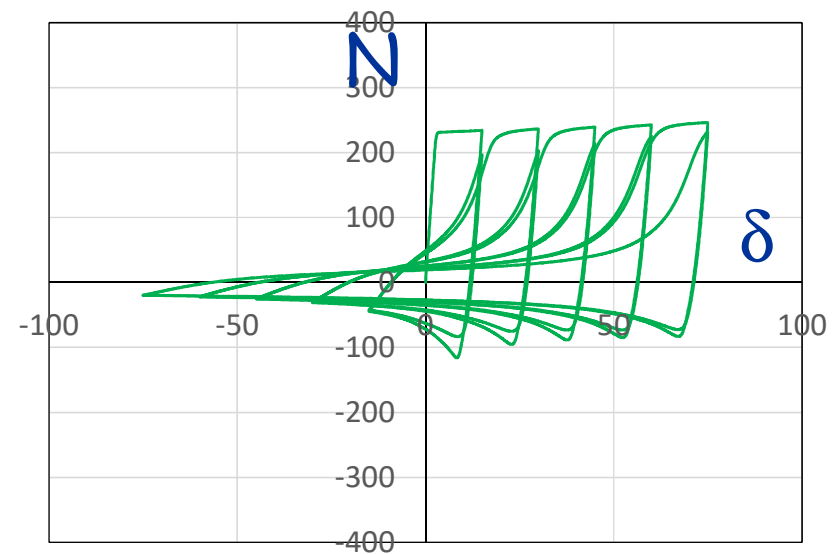
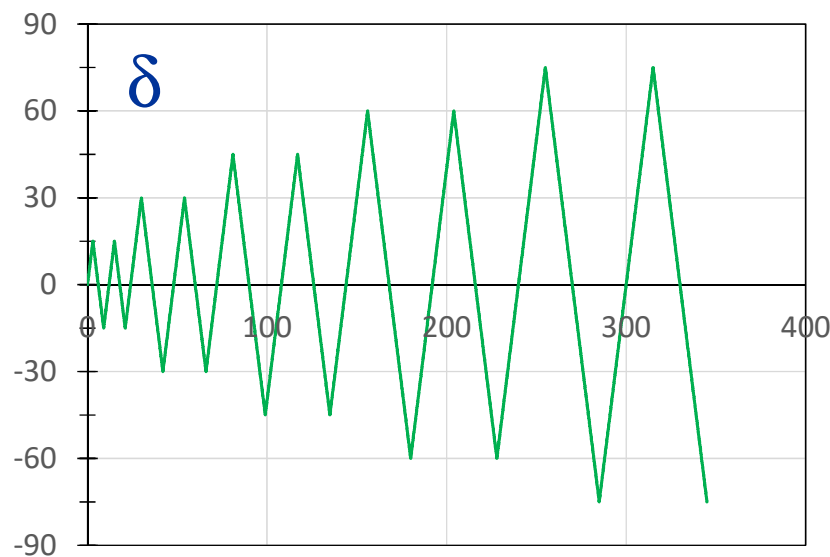
- Il controvento ad instabilità impedita
- Formulazione e applicazione del metodo di progetto
- Validazione del metodo di progetto

Il controvento ad instabilità impedita

Buckling Restrained Brace, BRB

Limiti del controvento tradizionale

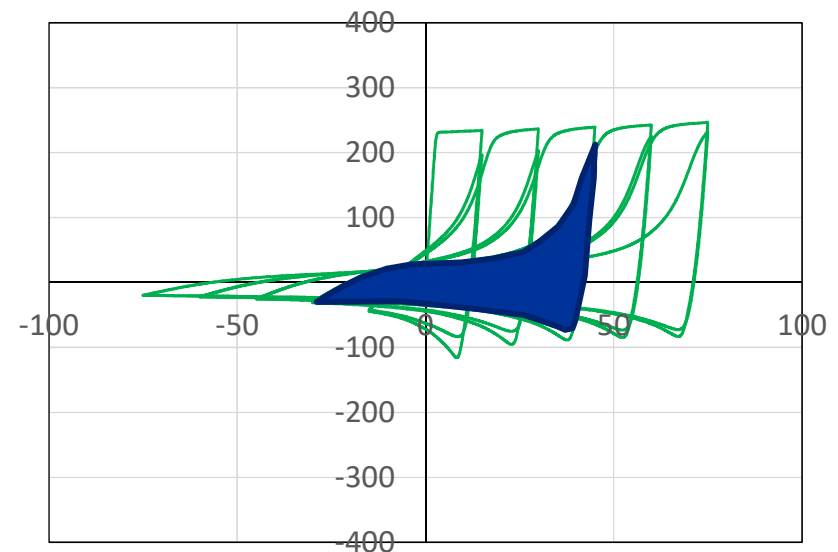
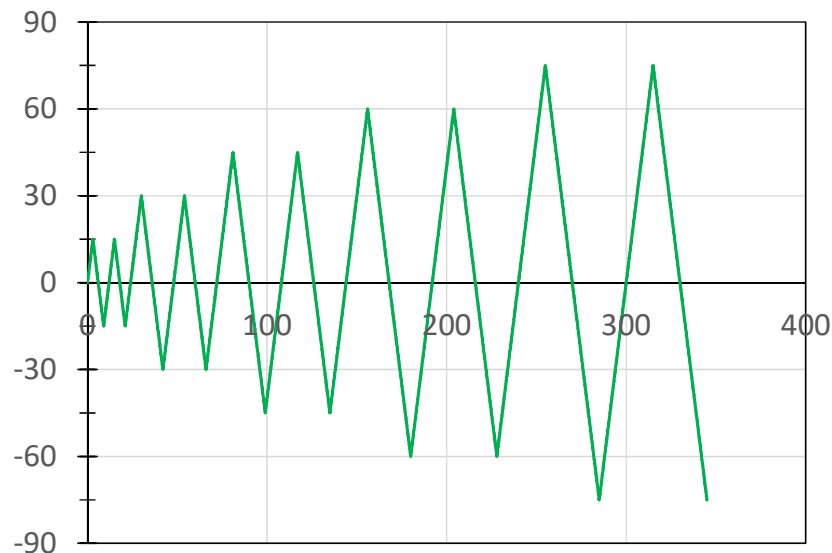
Perdita di efficacia nel comportamento ciclico, il controvento si allunga plasticamente a trazione e non recupera



Limiti del controvento tradizionale

Perdita di efficacia nel comportamento ciclico, il controvento si allunga plasticamente a trazione e non recupera

Ridotta capacità dissipativa, l'area racchiusa dal ciclo è piccola



Limiti del controvento tradizionale

Perdita di efficacia nel comportamento ciclico, il controvento si allunga plasticamente a trazione e non recupera

Ridotta capacità dissipativa, l'area racchiusa dal ciclo è piccola

Localizzazione del danno



Limiti del controvento tradizionale

Perdita di efficacia nel comportamento ciclico, il controvento si allunga plasticamente a trazione e non recupera

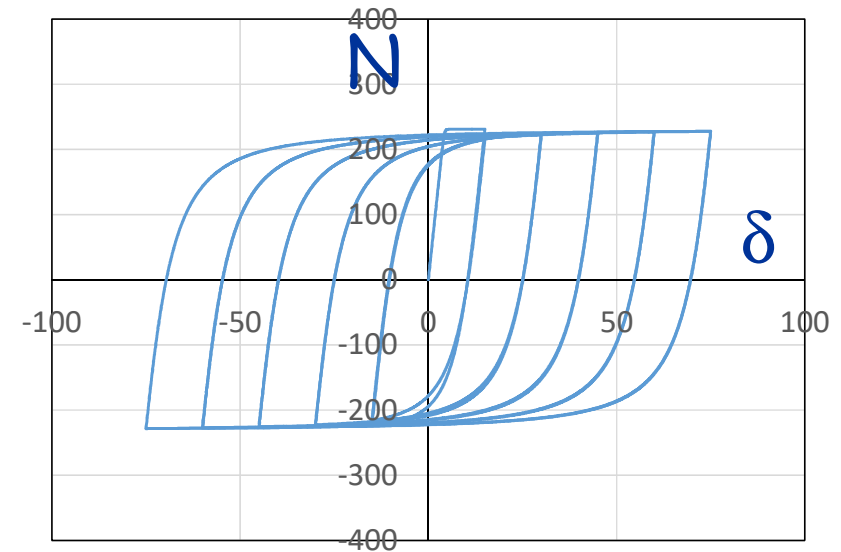
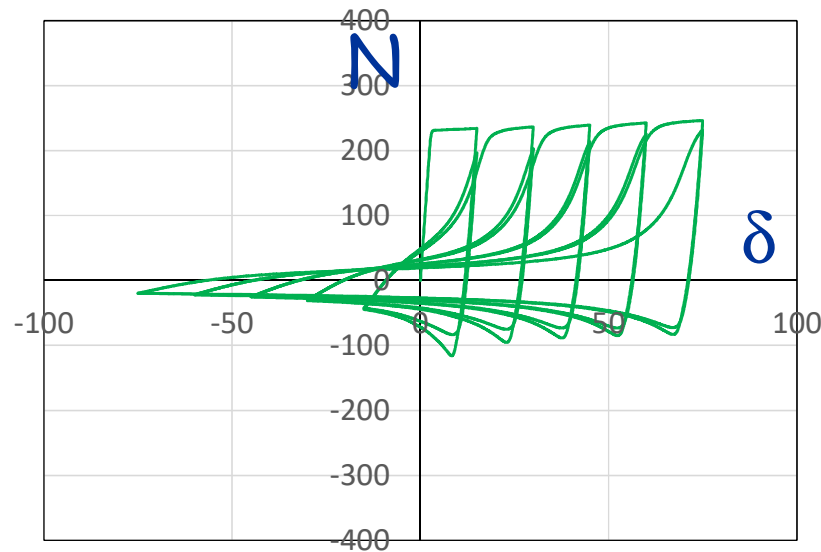
Ridotta capacità dissipativa, l'area racchiusa dal ciclo è piccola

Localizzazione del danno

Tutto a causa dell'instabilità

Instabilità impedita

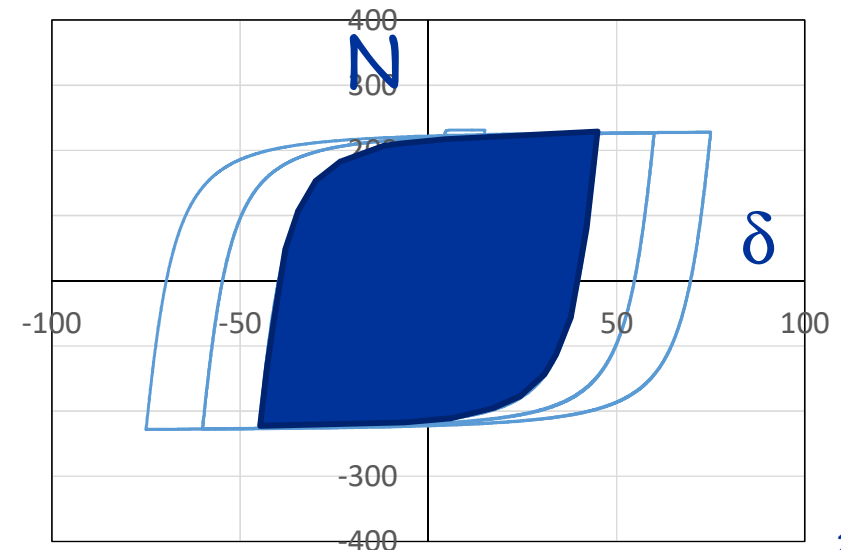
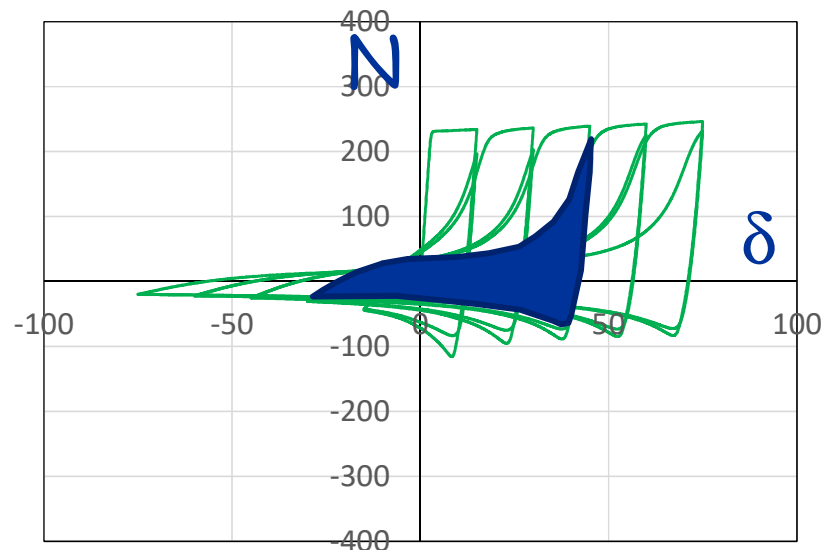
Il controvento si plasticizza anche a compressione, la deformazione plastica è recuperata ogni volta che si inverte la forza



Instabilità impedita

Il controvento si plasticizza anche a compressione, la deformazione plastica è recuperata ogni volta che si inverte la forza

Elevata capacità dissipativa, l'area racchiusa dal ciclo è più grande



Instabilità impedita

Il controvento si plasticizza anche a compressione, la deformazione plastica è recuperata ogni volta che si inverte la forza

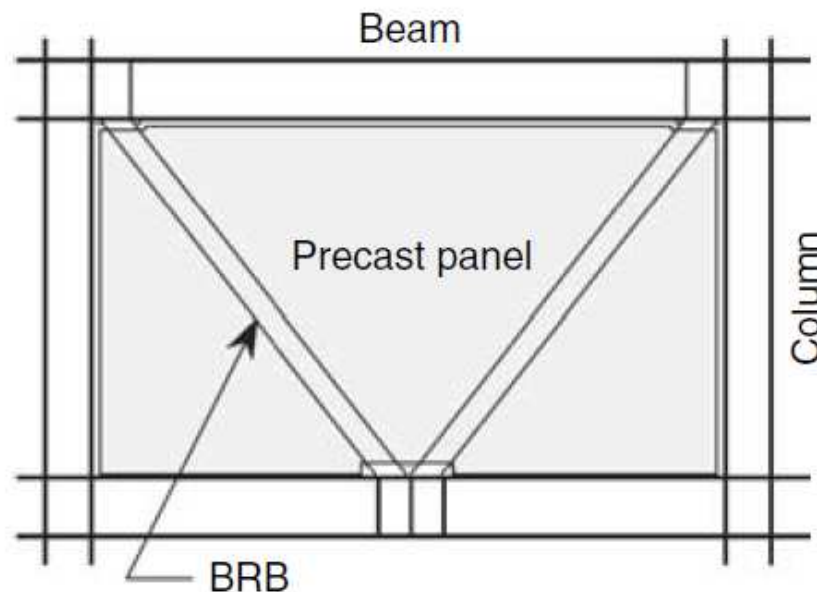
Elevata capacità dissipativa, l'area racchiusa dal ciclo è più grande

La plasticizzazione diffusa ritarda la frattura del controvento

Il controvento ad instabilità impedita (Buckling Restrained Brace, BRB)

La soluzione di Wakabayashi et al. 1973

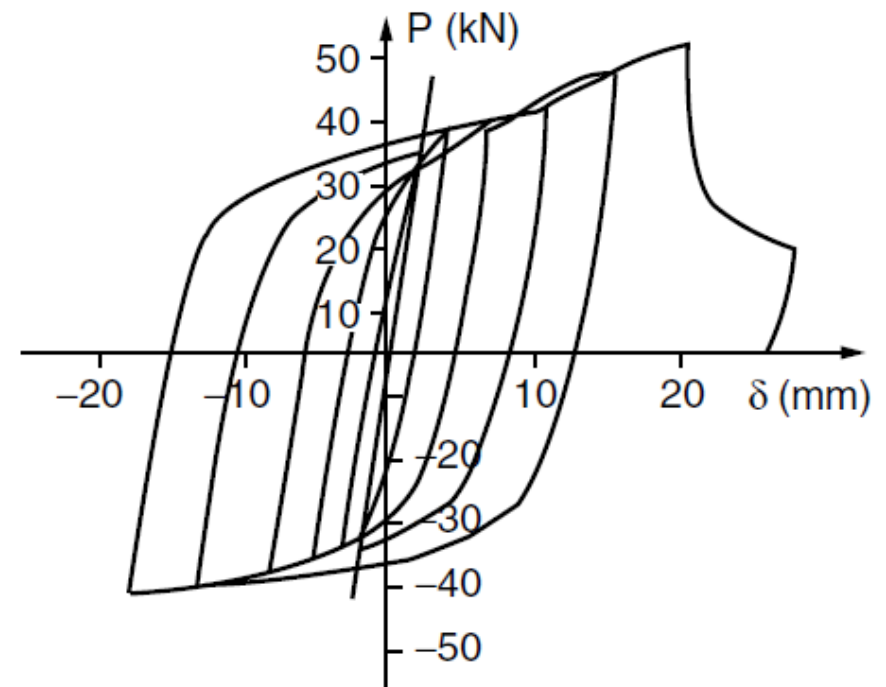
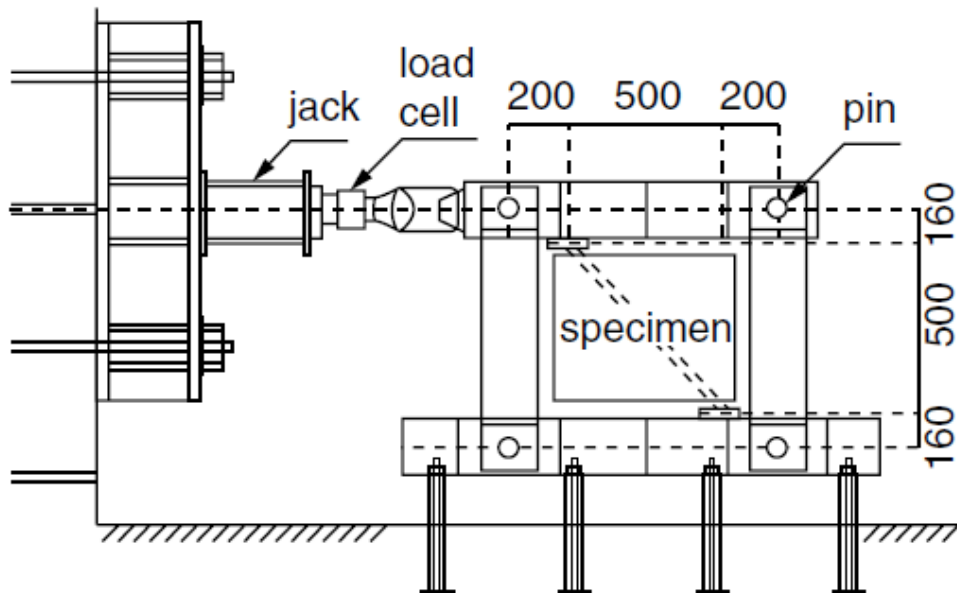
- Piatti d'acciaio (controventi)
- Pannelli sandwich prefabbricati in c.a. (evitano l'instabilità)



Il controvento ad instabilità impedita (Buckling Restrained Brace, BRB)

La soluzione di Wakabayashi et al. 1973

- Piatti d'acciaio (controventi)
- Pannelli sandwich prefabbricati in c.a. (evitano l'instabilità)

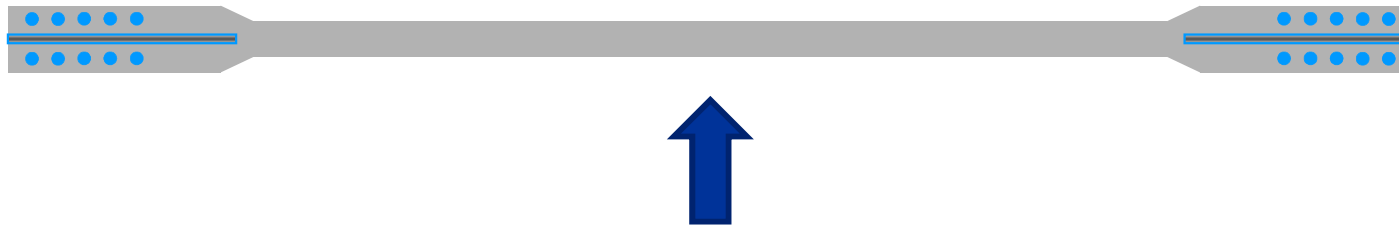


Il controvento ad instabilità impedita (Buckling Restrained Brace, BRB)

Unbounded brace, Wada et al. 1988 (Nippon Steel)

- Controvento in acciaio
- Tubo o scatolare in acciaio

Controvento in acciaio

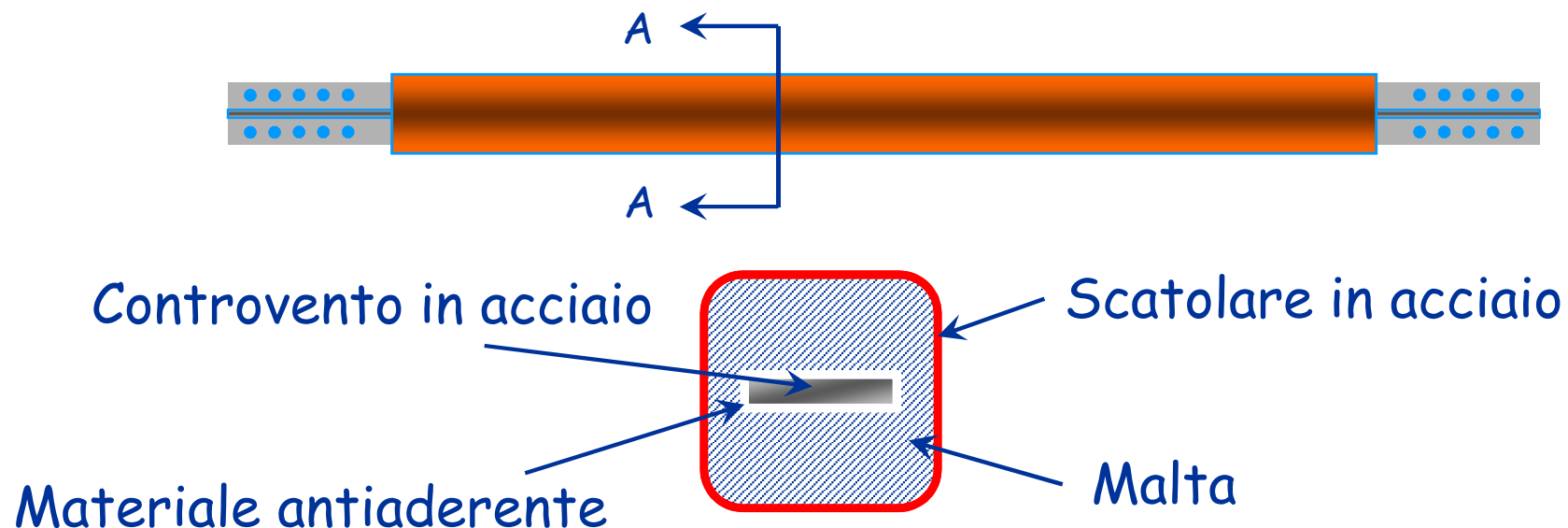


Tubo o scatolare in acciaio

Il controvento ad instabilità impedita (Buckling Restrained Brace, BRB)

Unbounded brace, Wada et al. 1988 (Nippon Steel)

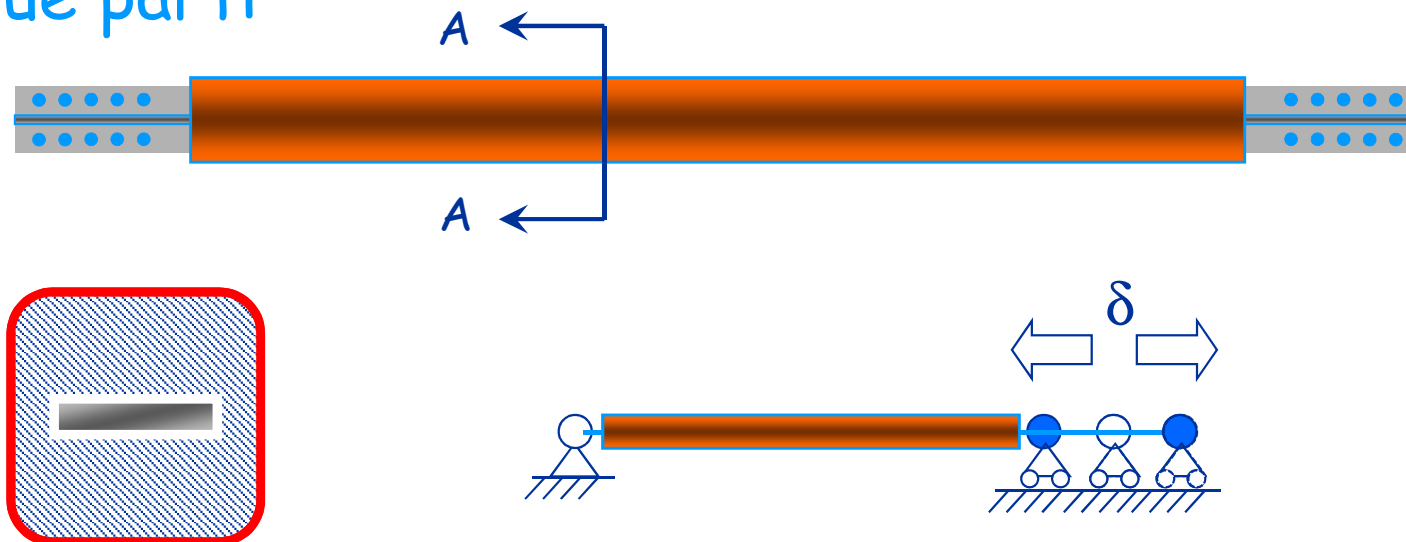
- Controvento in acciaio
- Tubo o scatolare in acciaio + malta
- Materiale antiaderente



Il controvento ad instabilità impedita (Buckling Restrained Brace, BRB)

Unbounded brace, Wada et al. 1988 (Nippon Steel)

- Controvento in acciaio, **nucleo dissipativo**
- Tubo o scatolare in acciaio + malta, **evita l'instabilità (meccanismo di confinamento)**
- Materiale antiaderente, **rende indipendenti le due parti**

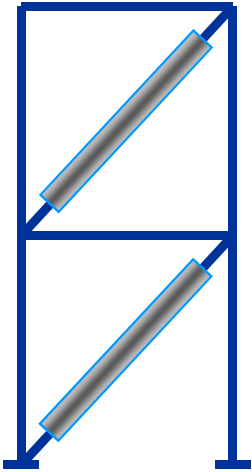


Unbounded brace, Nippon Steel and Sumikin

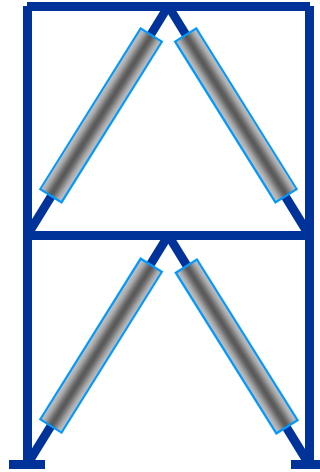
「アンボンドブレース®」は、軸力を負担する中心鋼材を鋼管とモルタルで拘束し、座屈せずに安定的に塑性化するブレースです。中心鋼材とモルタルの間には特殊な緩衝材(アンボンド材)を用いているため、座屈拘束材(鋼管とモルタル)には軸力が加わらないようになっています。この組み合わせにより、軸方向の引張・圧縮ともに、同性状の安定した履歴特性をもつ、制振ダンパー・耐震部材としてご利用いただけます。



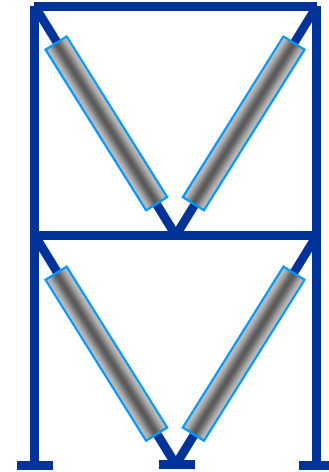
Possibili configurazioni



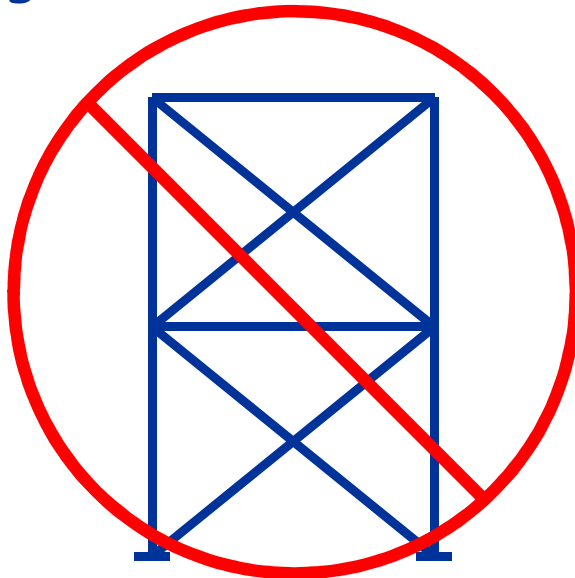
Singolo diagonale



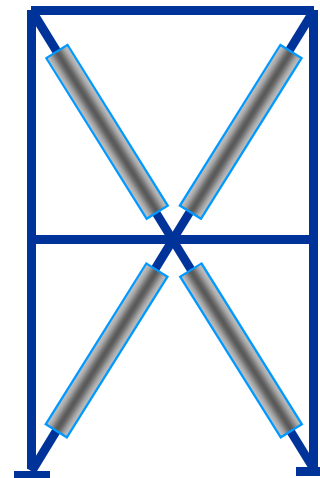
Contr. a V inversa



Controventi a V



Controventi ad X

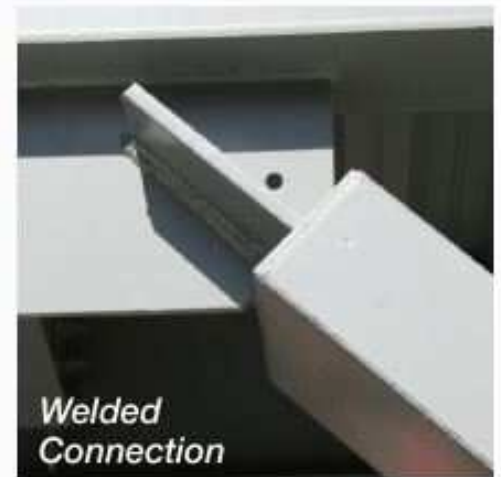


Contr. a X su due piani

Unbounded brace



Wildcat e Powercat, Star Seismic



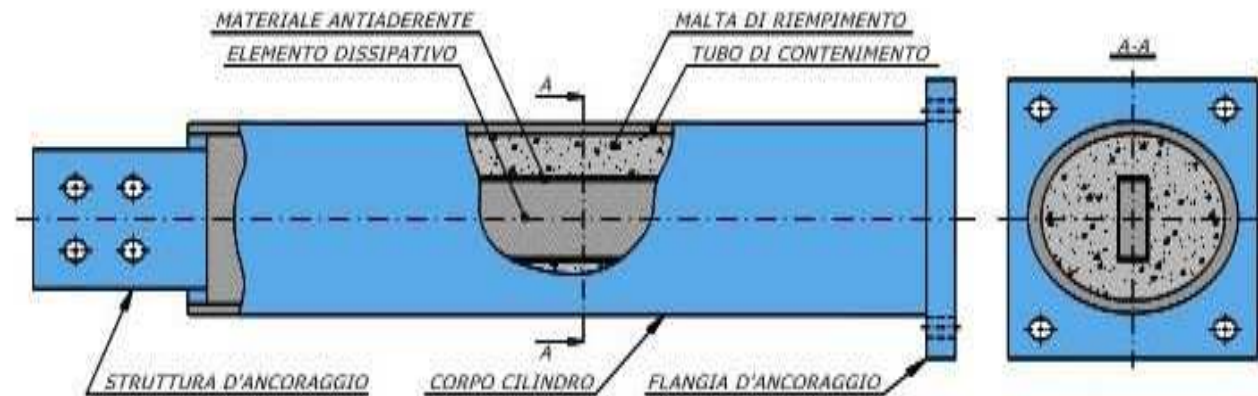
Il Powercat della Star Seismic



BRAD, FIP industriale Buckling Restrained Axial Damper



Usati perlopiù negli
interventi di adeguamento
sismico



Istallazione del BRAD

BRAD



Profilato,
prolunga
elastica

Adeguamento sismico mediante BRB



Adeguamento sismico mediante BRB



Facciata integrata:

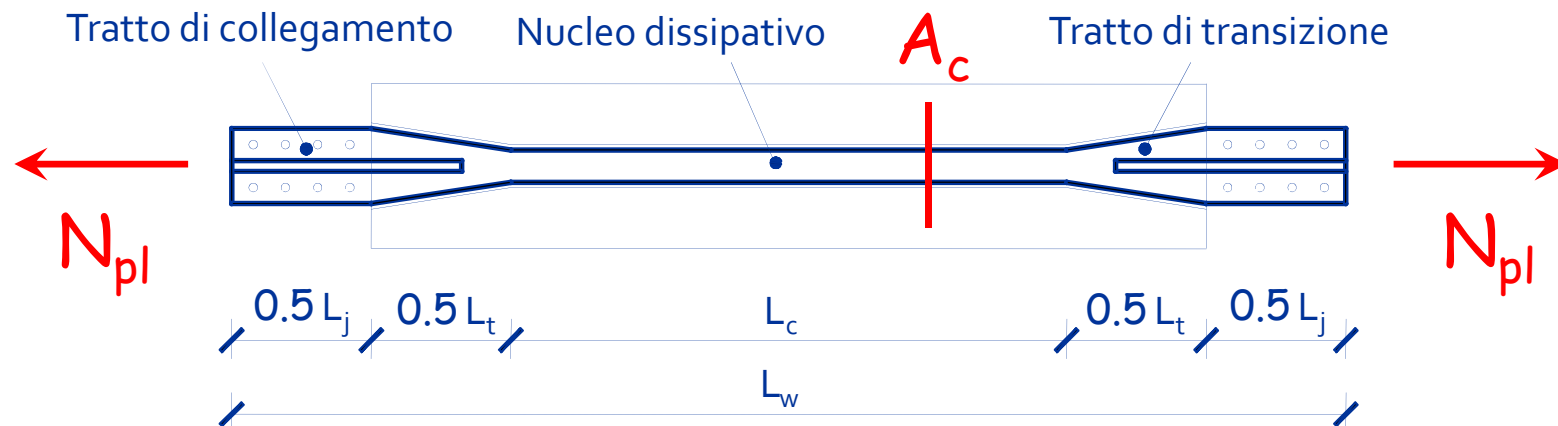
- Telaio in acciaio con BRB per l'adeguamento sismico
- Schermatura solare con lamelle orientabili per efficientamento energetico

Valutazione della forza di snervamento

Il nucleo dissipativo raggiunge lo snervamento perché ha sezione trasversale più piccola delle altre parti:

$$N_{pl} = A_c f_y$$

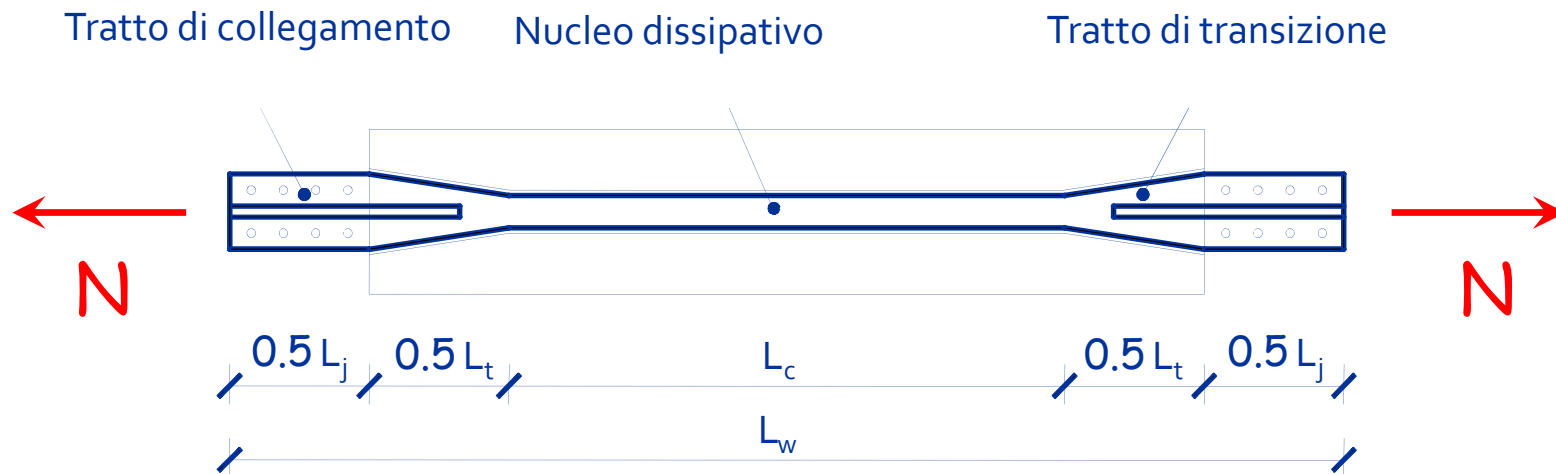
A_c = area sezione trasversale nucleo dissipativo



Rigidezza assiale

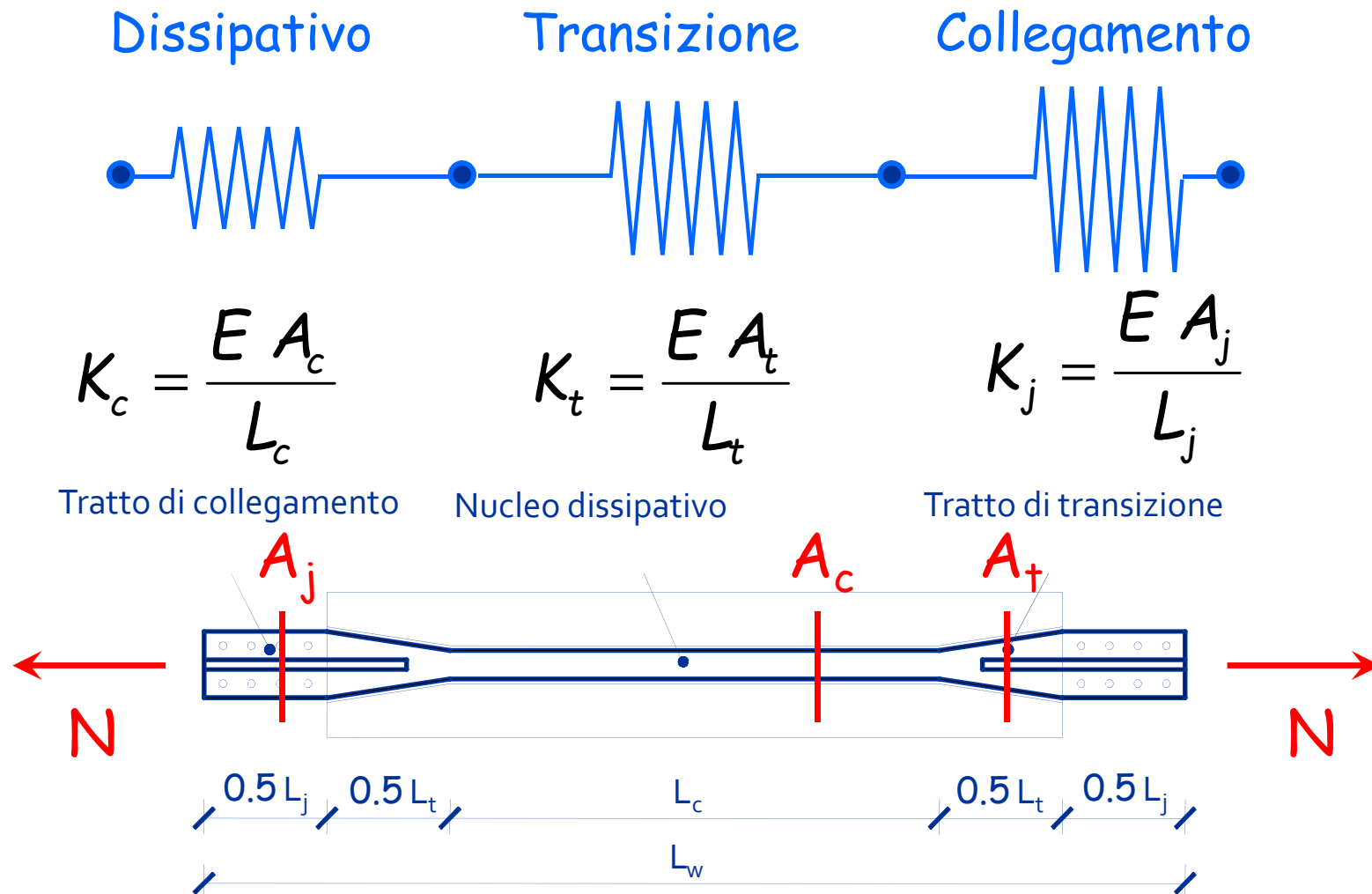
Si misura l'allungamento δ provocato da N si calcola la rigidezza:

$$K_{BRB} = \frac{N}{\delta}$$



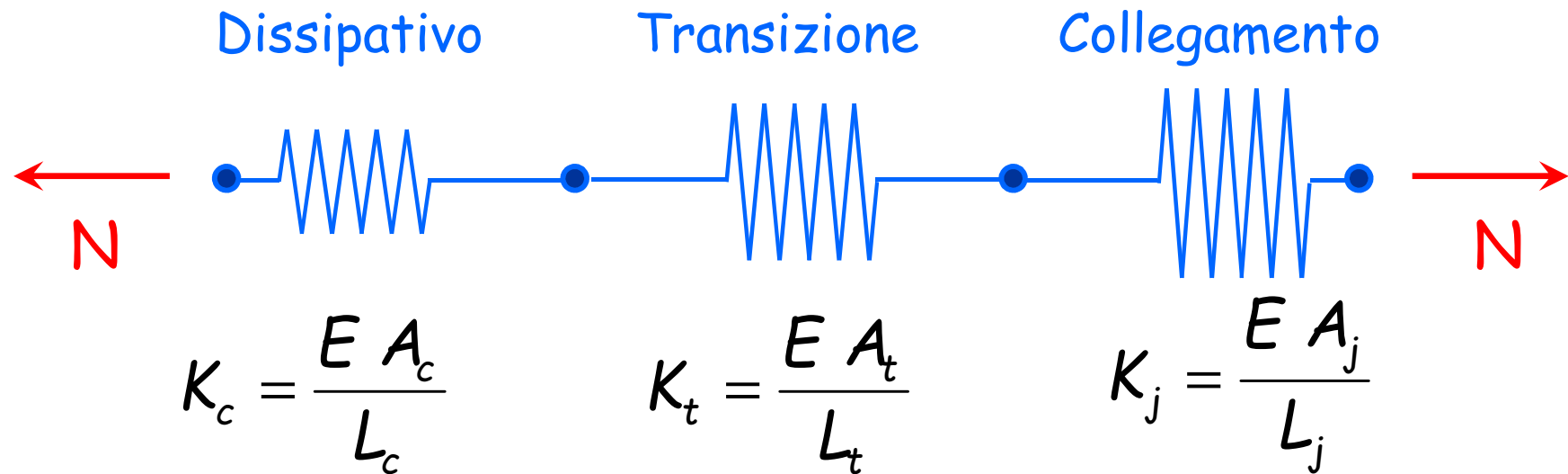
Rigidezza assiale

Si comporta come tre molle connesse in serie:



Rigidezza assiale

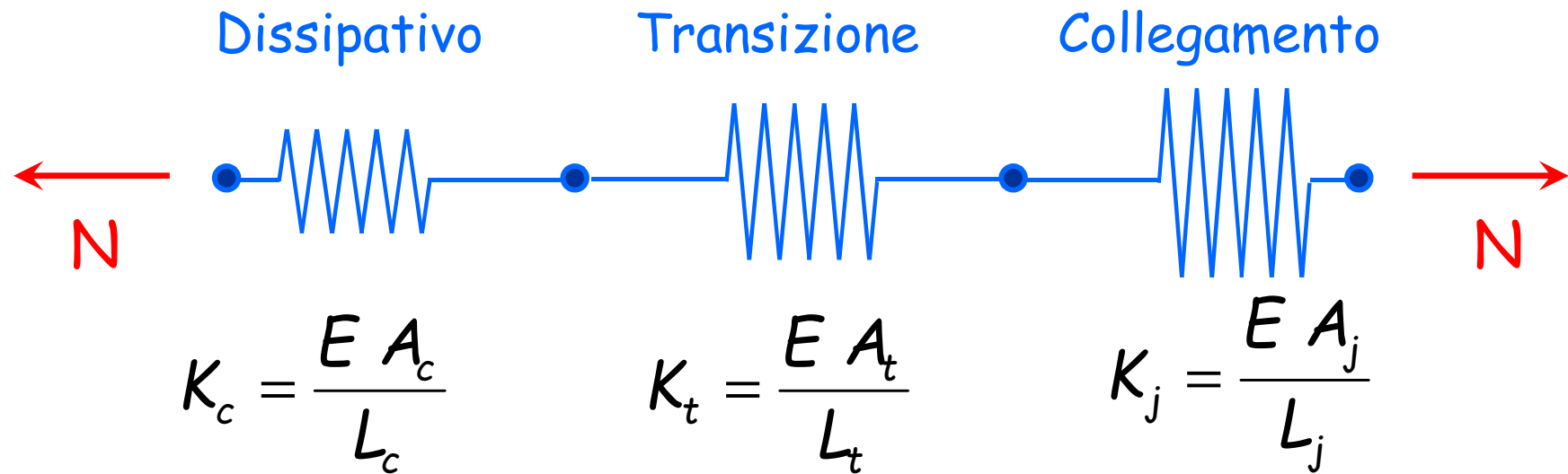
Si comporta come tre molle connesse in serie:



$$\delta = \frac{N L_c}{E A_c} + \frac{N L_j}{E A_j} + \frac{N L_t}{E A_t}$$

Rigidezza assiale

Si comporta come tre molle connesse in serie:



$$K_{BRB} = \frac{N}{\delta} = \frac{1}{\frac{L_c}{E A_c} + \frac{L_j}{E A_j} + \frac{L_t}{E A_t}}$$

Rigidezza assiale

... che può scriversi come:

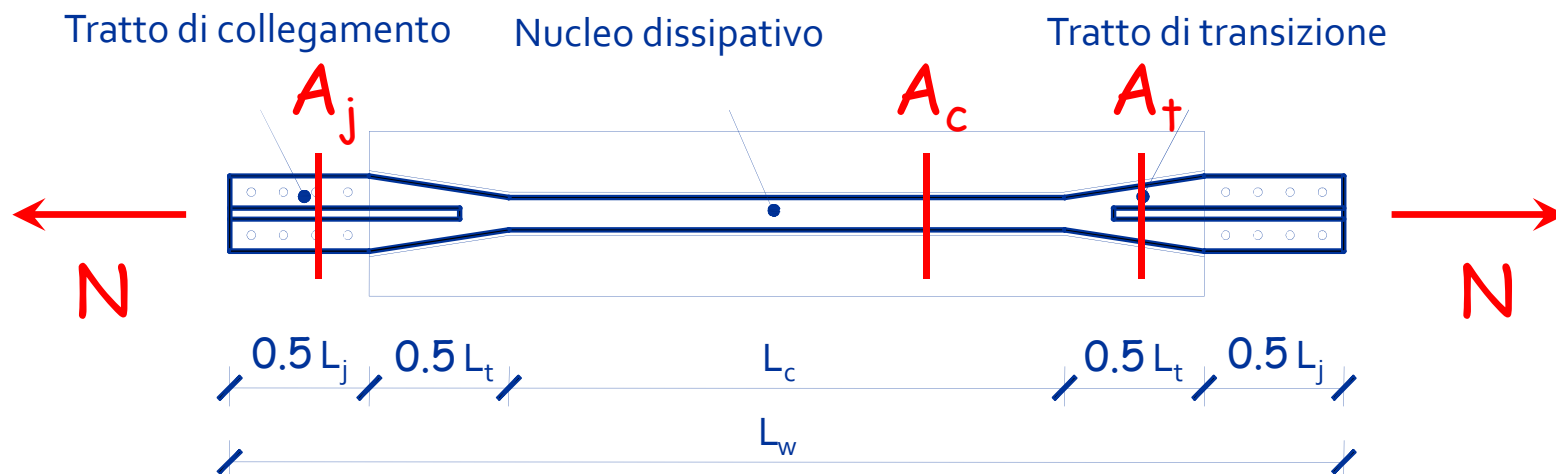
$$K_{BRB} = \frac{E}{L_w} \times \frac{A_c}{\frac{L_c}{L_w} + \frac{A_c L_j}{A_j L_w} + \frac{A_c L_t}{A_t L_w}}$$



Rigidezza assiale

... che può scriversi come:

$$K_{BRB} = \frac{E A_{eq}}{L_w} \quad \text{con} \quad A_{eq} = \frac{A_c}{\frac{L_c}{L_w} + \frac{A_c L_j}{A_j L_w} + \frac{A_c L_t}{L_w A_t}}$$



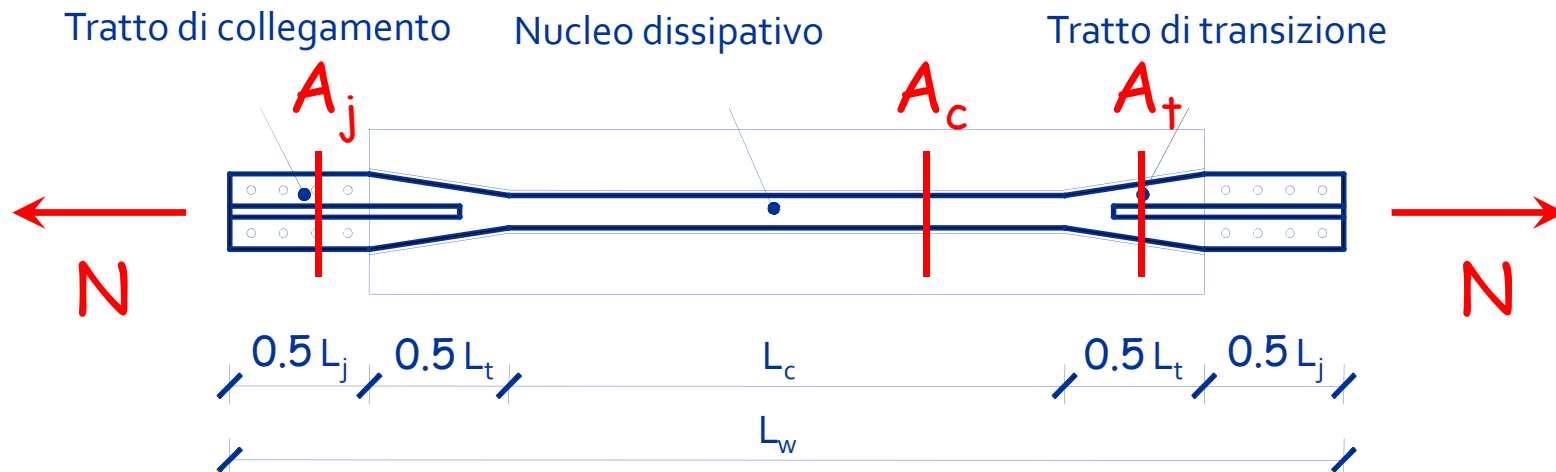
Allungamento allo snervamento

... che può scriversi come:

$$\delta_y = \frac{N_{pl}}{K_{BRB}} = \frac{A_c f_y L_w}{E A_{eq}}$$

... oppure ...

$$\delta_y = \frac{N_{pl}}{K_{BRB}} = \frac{f_y L_w}{E} \times \left(L_c + \frac{A_c L_j}{A_j} + \frac{A_c L_t}{A_j} \right)$$



Riepilogo delle proprietà del BRB (1)

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_c f_y}{\gamma_{MO}}$$

Resistenza plastica

$$K_{BRB} = \frac{E A_{eq}}{L_w}$$

Rigidezza assiale

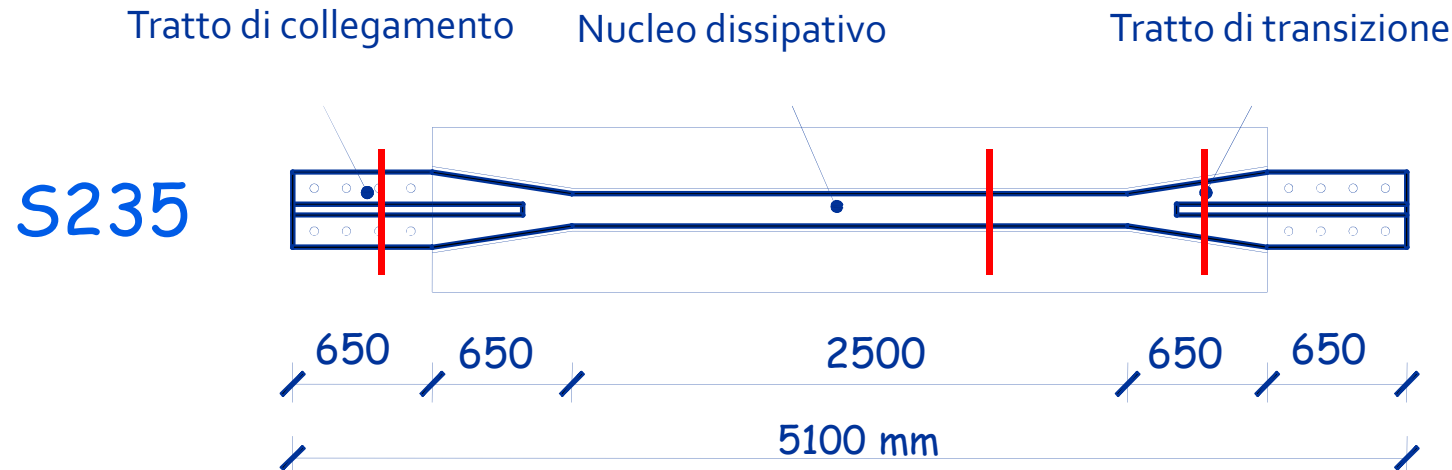
con

$$A_{eq} = \frac{A_c}{\frac{L_c}{L_w} + \frac{A_c L_j}{A_j L_w} + \frac{A_c L_t}{L_w A_t}}$$

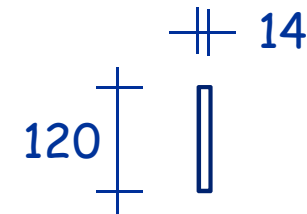
$$\delta_y = \frac{N_{pl,Rd}}{K_{BRB}} = \frac{A_c f_y L_w}{E A_{eq} \gamma_{MO}}$$

Allungamento allo snervamento

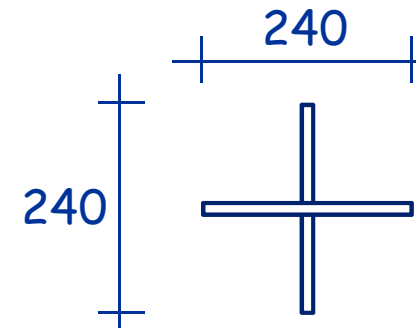
Applicazione numerica



Nucleo dissipativo:

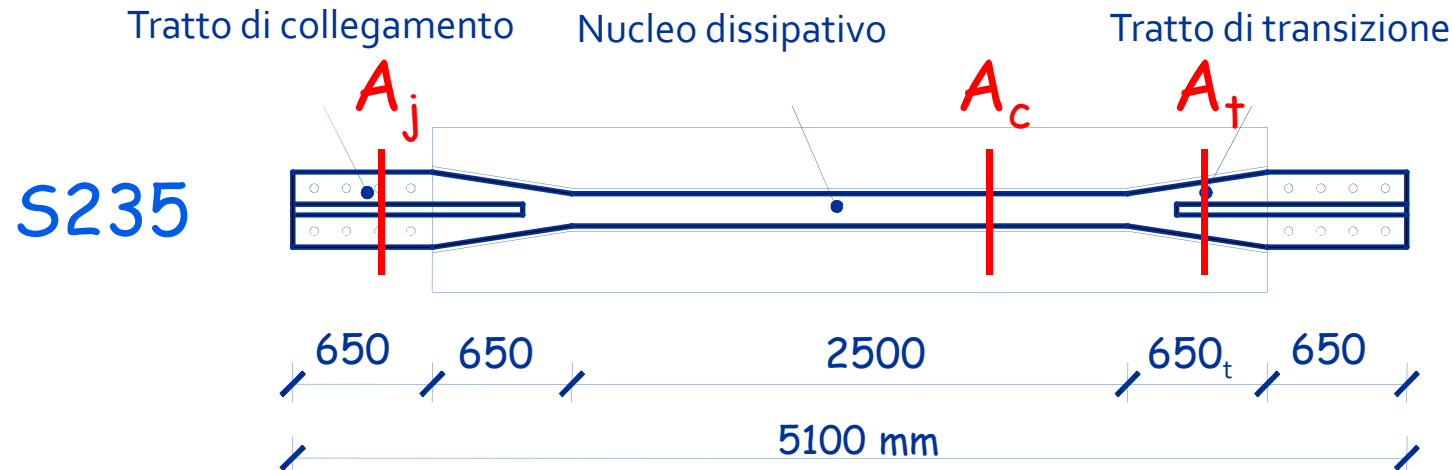


Collegamento:



Transizione: cruciforme, varia tra 120 e 240

Applicazione numerica



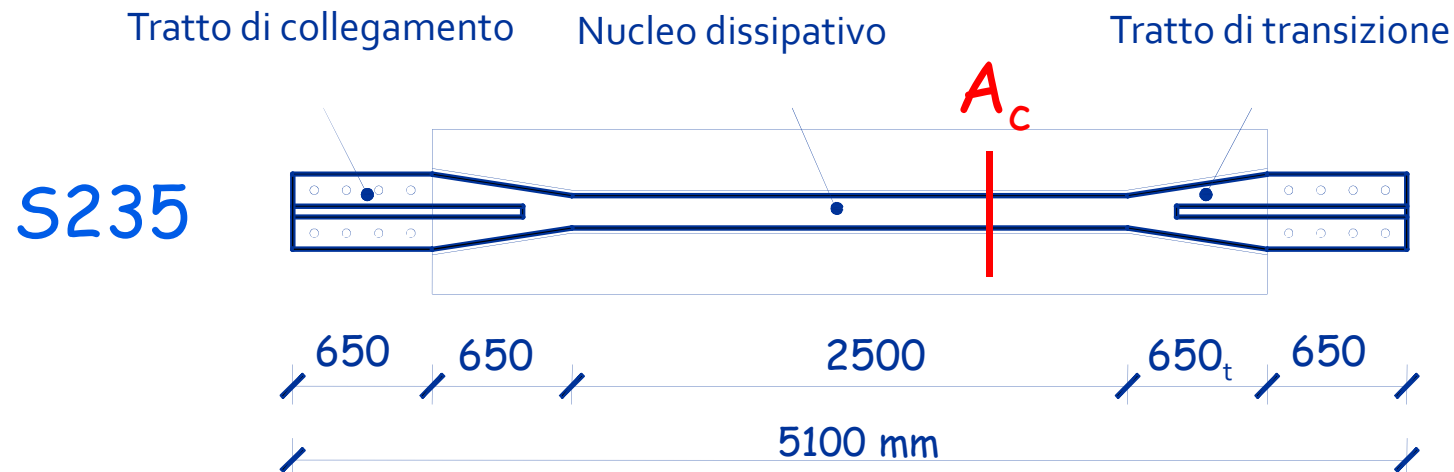
$$A_c = 120 \times 14 = 1680 \text{ mm}^2$$

$$A_j = 240 \times 14 + (240 - 14) \times 14 = 6524 \text{ mm}^2$$

$$A_{t,\min} = 120 \times 14 + (120 - 14) \times 14 = 3164 \text{ mm}^2 \quad A_{t,\max} = A_j$$

$$A_t = \frac{6524 + 3164}{2} = 4844 \text{ mm}^2$$

Resistenza plastica



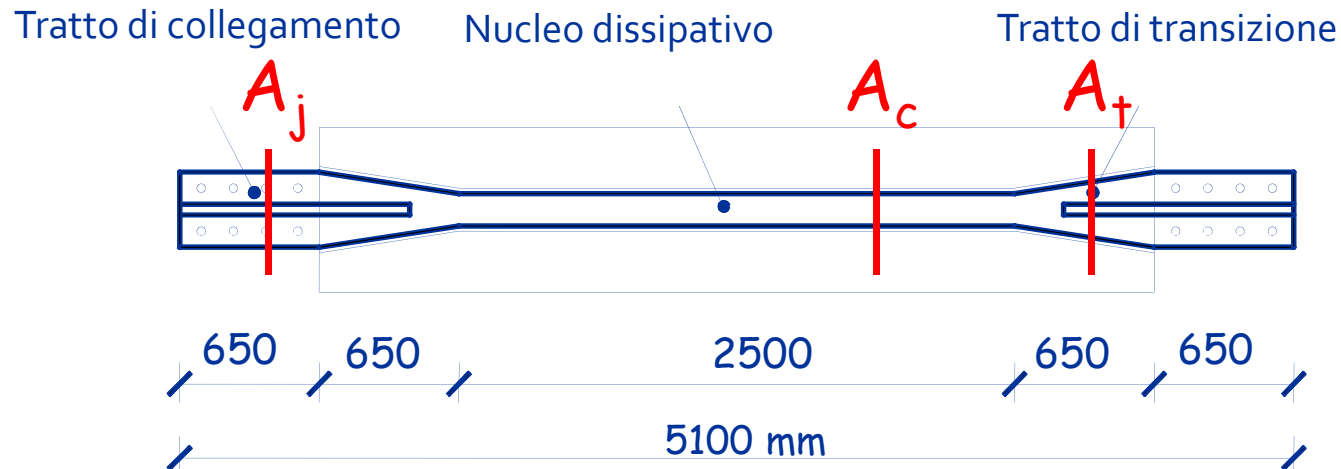
Dati:

$$A_c = 1680 \text{ mm}^2$$

$$f_y = 235 \text{ MPa}$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_c f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1680 \times 235}{1.05 \times 10^3} = 376.0 \text{ kN}$$

Rigidezza assiale



Dati:

$$L_c = 2500 \text{ mm}$$

$$L_t = 1300 \text{ mm}$$

$$L_j = 1300 \text{ mm}$$

$$L_w = 5100 \text{ mm}$$

$$A_c = 1680 \text{ mm}^2$$

$$A_t = 4844 \text{ mm}^2$$

$$A_j = 6524 \text{ mm}^2$$

Prima calcolo l'area equivalente ...

Dati:

$$L_c = 2500 \text{ mm}$$

$$A_c = 1680 \text{ mm}^2$$

$$L_t = 1300 \text{ mm}$$

$$A_t = 3164 \text{ mm}^2$$

$$L_j = 1300 \text{ mm}$$

$$A_j = 6524 \text{ mm}^2$$

$$L_w = 5100 \text{ mm}$$

$$A_{eq} = \frac{A_c}{\frac{L_c}{L_w} + \frac{A_c L_j}{A_j L_w} + \frac{A_c L_t}{L_w A_t}}$$

$$\frac{L_c}{L_w} = \frac{2500}{5100} = 0.490$$

$$\frac{L_j}{L_w} = \frac{1300}{5100} = 0.255$$

$$\frac{L_t}{L_w} = \frac{1300}{5100} = 0.255$$

$$\frac{A_c}{A_j} = \frac{1680}{6524} = 0.258$$

$$\frac{A_c}{A_t} = \frac{1680}{4844} = 0.347$$

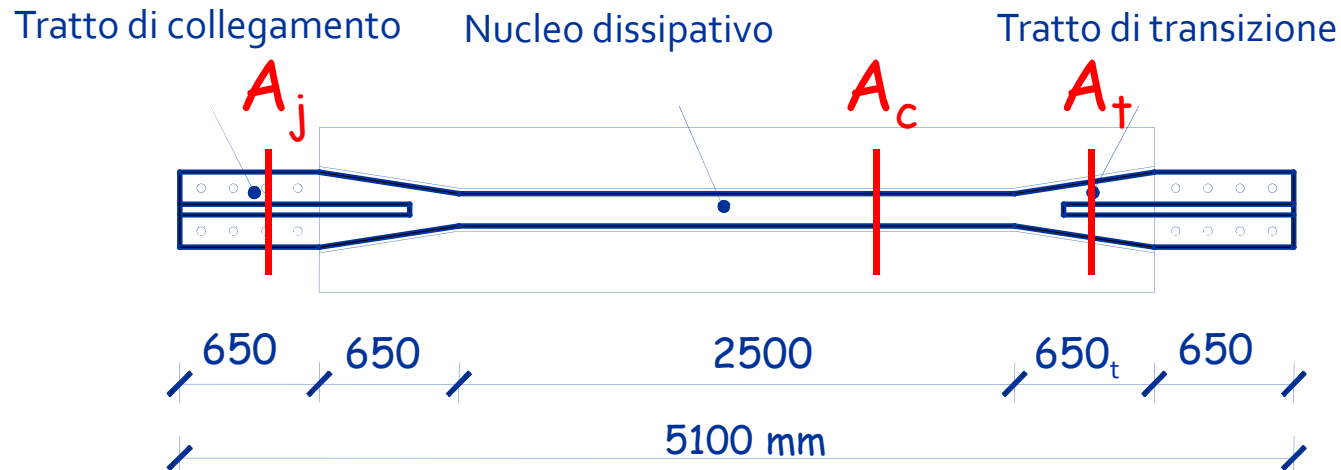
Prima calcolo l'area equivalente ...

Dati:

$$\begin{array}{ll} L_c = 2500 \text{ mm} & A_c = 1680 \text{ mm}^2 \\ L_t = 1300 \text{ mm} & A_t = 3164 \text{ mm}^2 \\ L_j = 1300 \text{ mm} & A_j = 6524 \text{ mm}^2 \\ L_w = 5100 \text{ mm} & \end{array}$$

$$A_{eq} = \frac{1680}{0.490 + 0.258 \times 0.255 + 0.347 \times 0.255} = 0.644$$
$$= \frac{1680}{0.644} = 2608.7 \text{ mm}^2$$

Rigidezza assiale

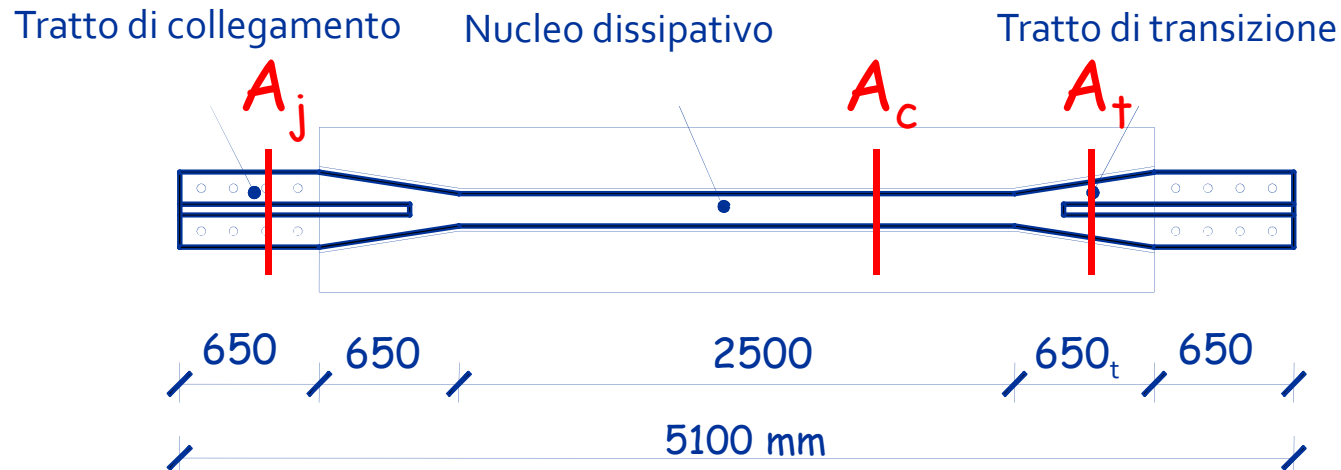


$$A_{eq} = 2608.7 \text{ mm}^2$$

$$L_w = 5100 \text{ mm}$$

$$K_{BRB} = \frac{E A_{eq}}{L_w} = \frac{210000 \times 2608.7}{5100 \times 10^3} = 107.4 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

Allungamento allo snervamento



$$\delta_y = \frac{N_{pl,Rd}}{K_{BRB}} = \frac{376}{107.4} = 3.50 \text{ mm}$$

$$K_{BRB} = 107.4 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

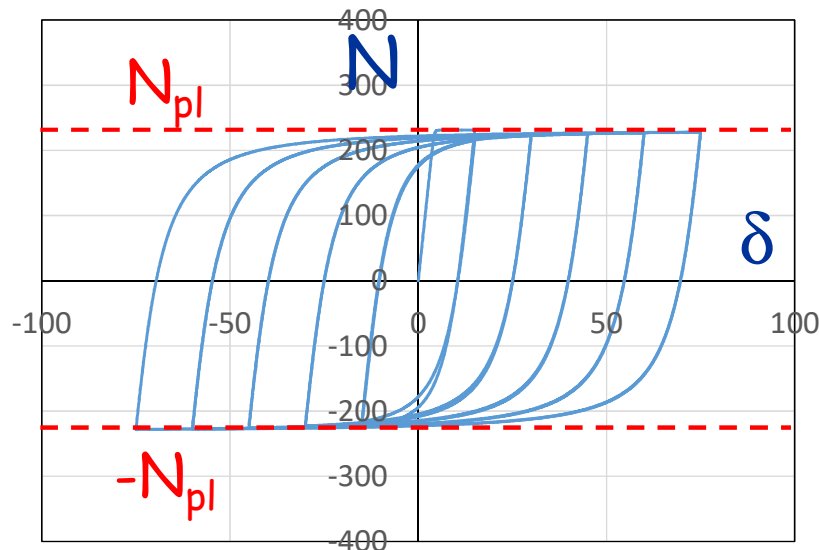
$$N_{pl,Rd} = 376.0 \text{ kN}$$

Comportamento reale dei BRB (Incrudimento isotropo)

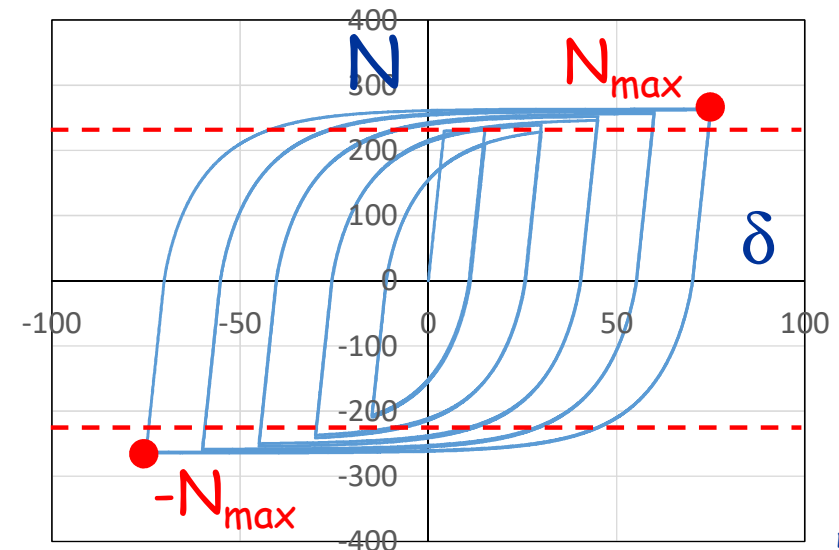
Si manifesta nel BRB caricato ciclicamente:

- Espansione del ciclo
- Lo sforzo normale supera il valore di plasticizzazione ($N_{\max} > N_{pl}$)
- Si satura dopo un certo numero di cicli

Senza incrudimento isotropo



Con incrudimento isotropo

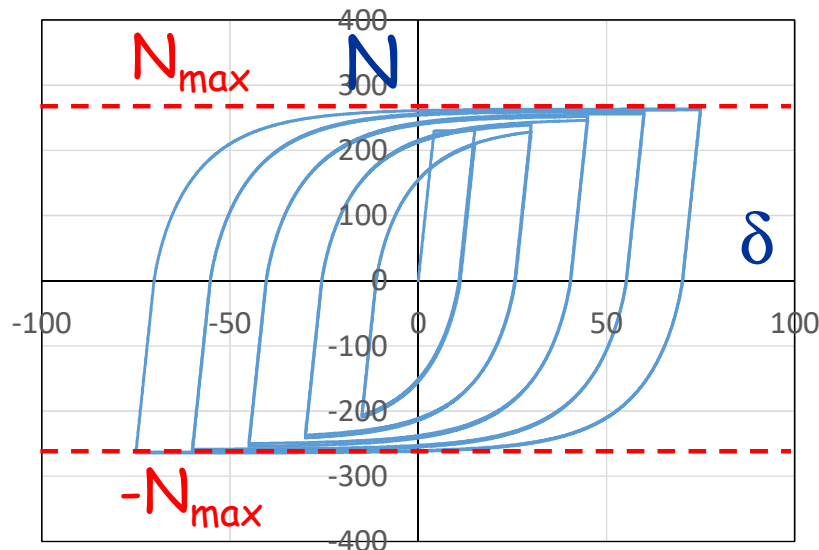


Comportamento reale dei BRB (Incrudimento cinematico)

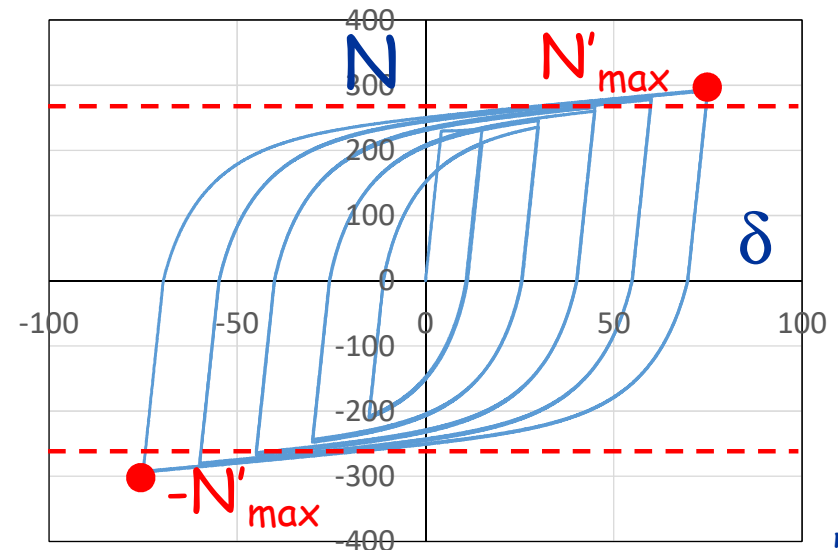
Gli effetti dell'incrudimento cinematico:

- Si sommano a quelli dell'incrudimento isotropo
- Crescono linearmente con la deformazione
- Incrementano ulteriormente lo sforzo normale

Senza incrudimento cinematico



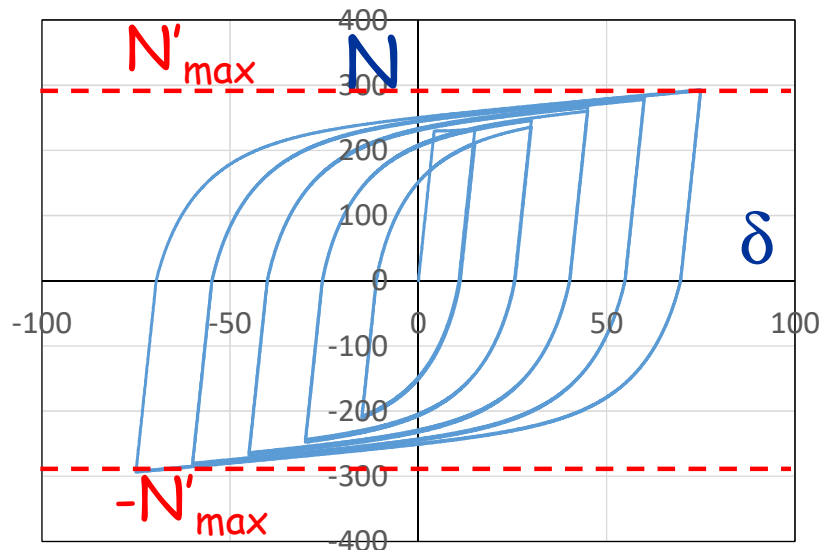
Con incrudimento cinematico



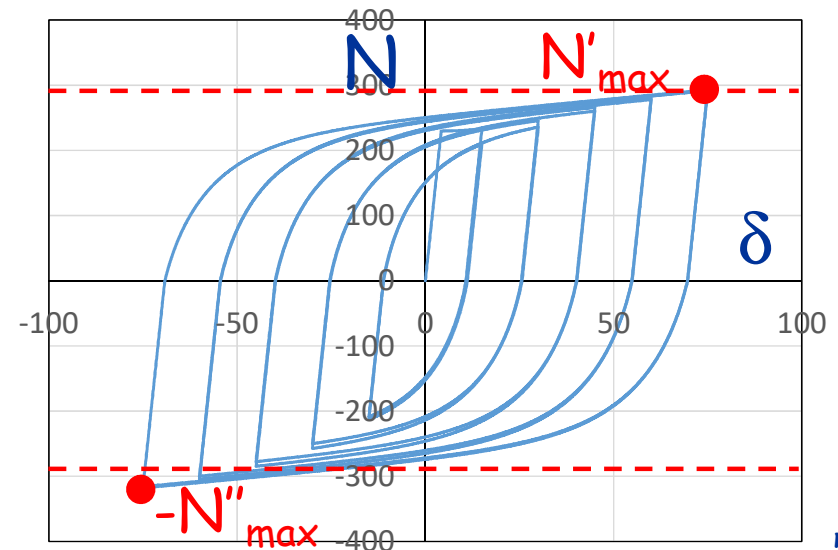
Comportamento reale dei BRB (Comportamento asimmetrico)

Lo sforzo normale di compressione, a parità di deformazione, è maggiore di quello di trazione a causa degli attriti tra nucleo dissipativo e meccanismo di confinamento.

Comportamento simmetrico



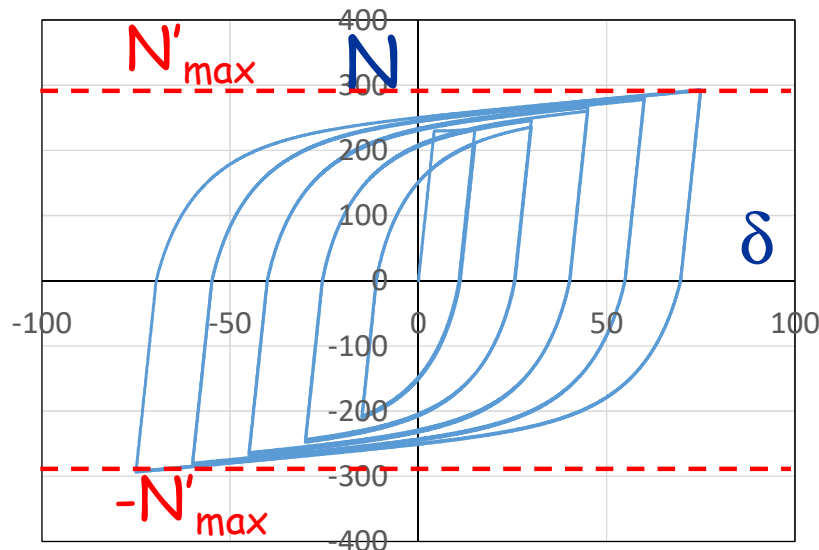
Comportamento asimmetrico



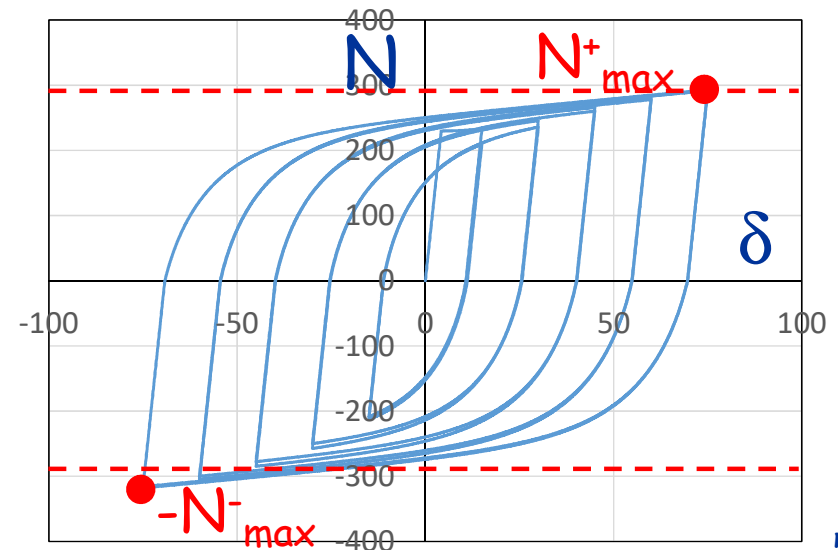
Comportamento reale dei BRB (Comportamento asimmetrico)

Lo sforzo normale di compressione, a parità di deformazione, è maggiore di quello di trazione a causa degli attriti tra nucleo dissipativo e meccanismo di confinamento.

Comportamento simmetrico



Comportamento asimmetrico



È importante considerare questi fenomeni?

Il BRB trasmette al telaio una forza pari allo sforzo normale.

Questa forza genera delle caratteristiche della sollecitazione nelle travi e nelle colonne.

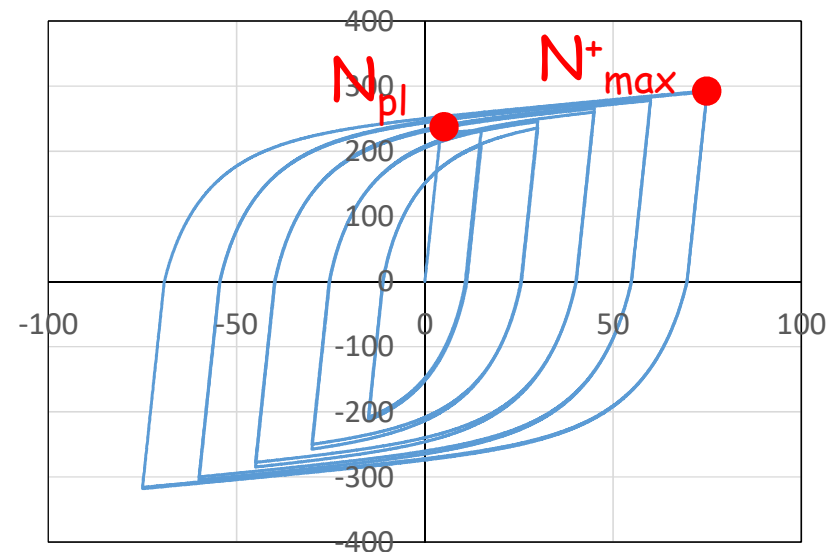
Se si sottostima lo sforzo normale del BRB, si sottostima anche le caratteristiche della sollecitazione di travi e colonne.

È importante calcolare correttamente N_{\max}^+ ed N_{\max}^- per poter progettare travi e colonne.

Valutare l'effetto dell'incrudimento

Se tiene conto attraverso il Fattore di correzione della resistenza a trazione

$$\omega = \frac{N_{\max}^+}{N_{pl}}$$



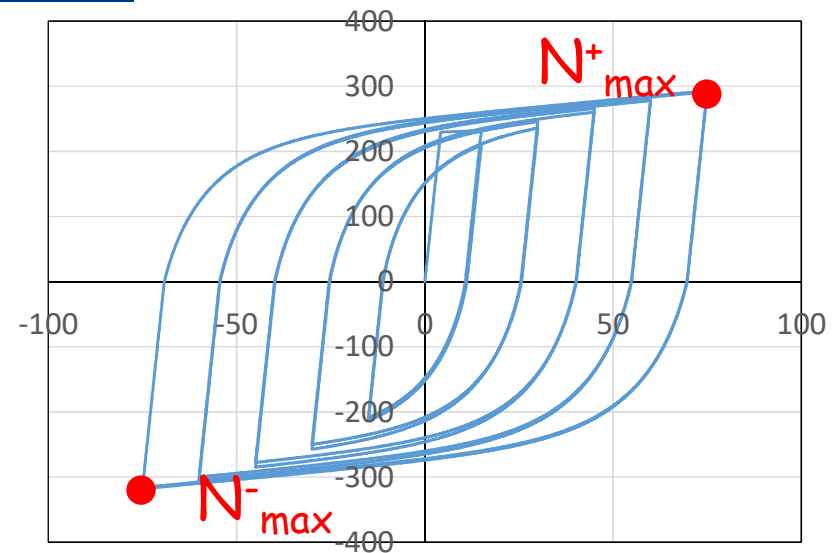
N_{pl} sforzo normale di plasticizzazione

N_{\max}^+ sforzo normale di trazione misurato in corrispondenza della massima deformazione sostenibile

Differenziare comportamento trazione/compressione

Se tiene conto attraverso il Fattore di correzione della resistenza a compressione

$$\beta = \frac{N_{\max}^{-}}{N_{\max}^{+}}$$



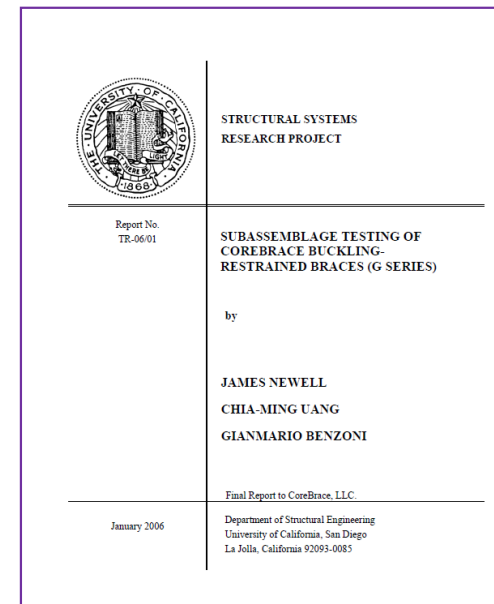
N_{pl} sforzo normale di plasticizzazione

N_{\max}^{-} sforzo normale di trazione misurato in corrispondenza della massima deformazione sostenibile

Quanto valgono ω e β ?

Possono essere forniti dal produttore, ma in fase di progetto bisogna assumere un valore ragionevole

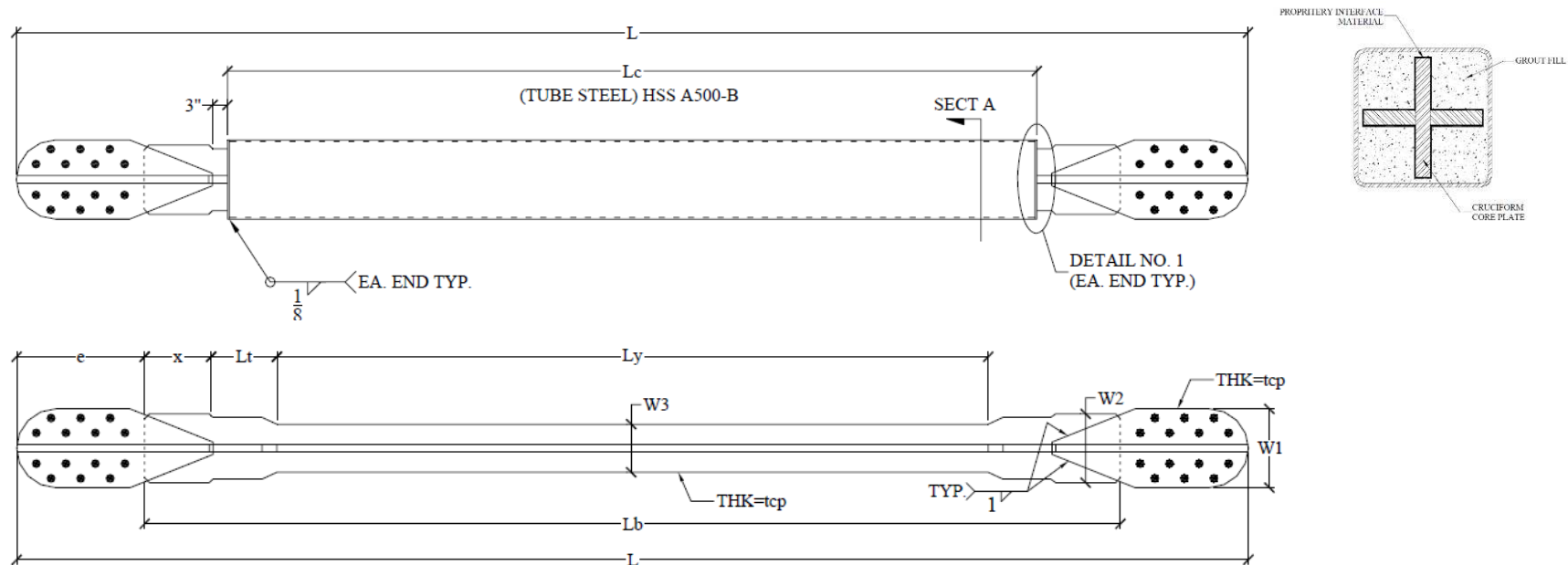
Valori ragionevoli di ω possono essere determinati dai risultati delle prove sperimentali eseguite negli anni



Ad esempio Newell et al. 2006

Provino 3G, Newell et al. 2006

Tutte le caratteristiche geometriche e meccaniche sono disponibili



Lunghezze

Specimen	L (in.)	Lb, L1 ^a (in.)	Lc (in.)	Ly (in.)	e (in.)	x (in.)	Lt (in.)
1G, 2G	260-1/8	208-3/8	184-3/8	132-1/2	25-7/8	5-1/2	32-7/16
3G, 4G	250-3/16	198-7/16	164-7/16	144-7/16	25-7/8	14	13

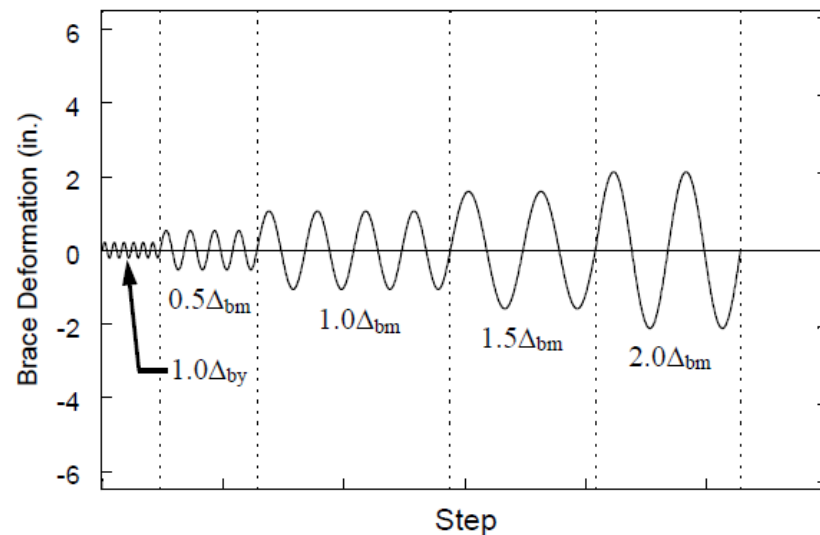
Caratteristiche meccaniche

Specimen	A_{sc} (in ²)	F_{ya} (ksi)	R_y	P_{yn} (kips)	P_{ya} (kips)	Δ_{by} (in.)
1G, 2G	12.0	37.5	1.042	432.0	450.0	0.21
3G, 4G	27.0	37.5	1.042	972.0	1012.5	0.24

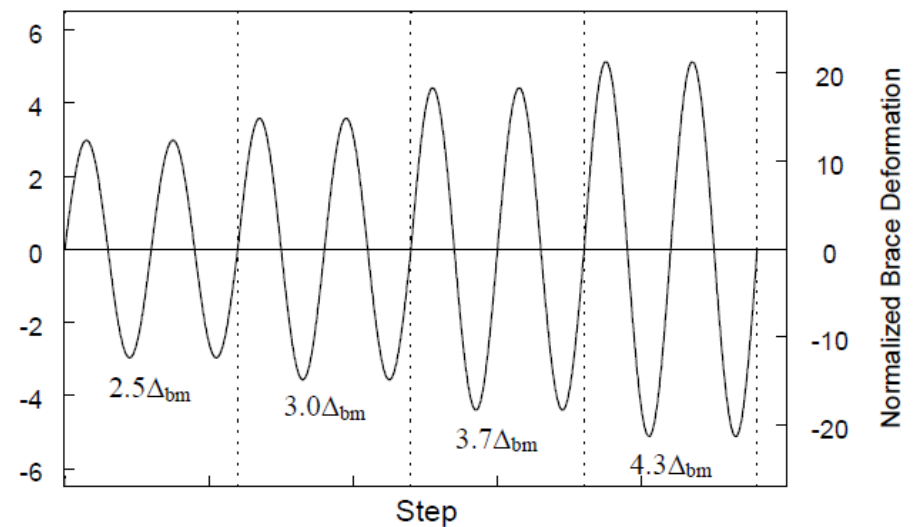
Provino 3G, Newell et al. 2006

È disponibile il protocollo di carico usato per eseguire la prova (AISC Seismic Provisions, 2005)

Protocollo standard



Cicli a grande ampiezza



Δ_{by} Spostamento di snervamento

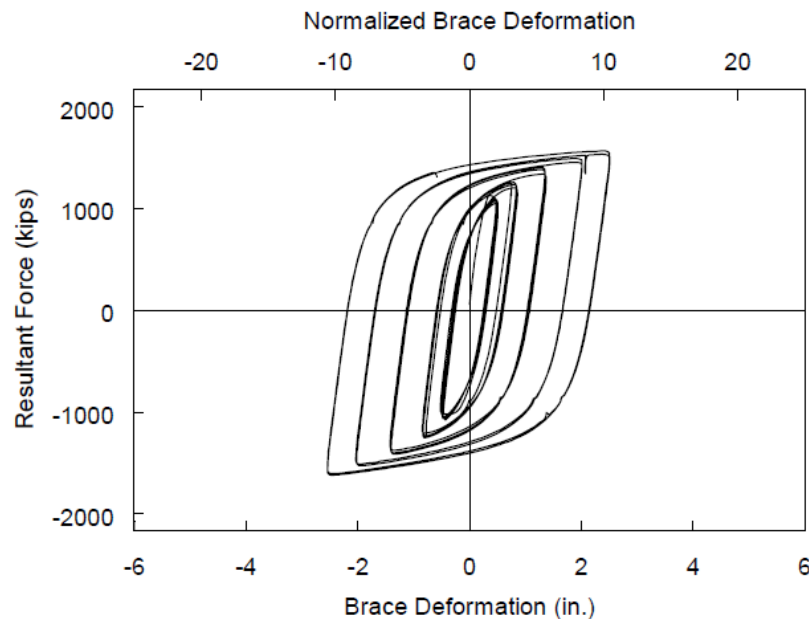
Δ_{bm} Spostamento di progetto

Normalized Brace Deformation = Richiesta di duttilità μ

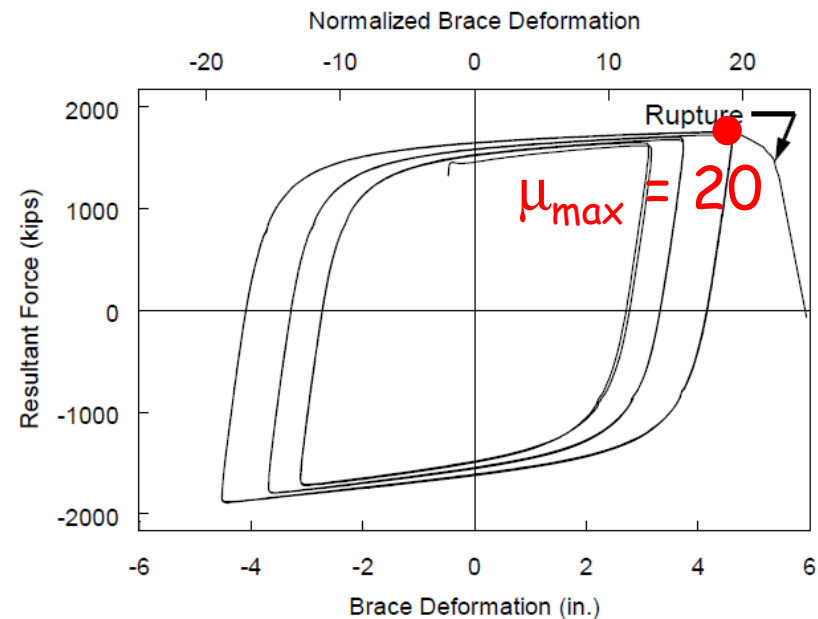
Provino 3G, Newell et al. 2006

È disponibile il protocollo di carico usato per eseguire la prova

Protocollo standard



Cicli a grande ampiezza



Calcolo di ω

Dati e risultati sono stati rielaborati per renderli coerenti

Properties of the BRBs tested by Newell et al. (2006).

Test	f_{ya} [MPa]	A_c [mm ²]	A_t	A_j	L_c [mm]	L_w	L_t	L_j	δ_y^{L1} [mm]
1G, 2G	258.55	7742	20,203	27,280	3366	6607	1927	1314	5.33
3G, 4G	258.55	17,420	25,647	41,615	3369	6355	1372	1314	6.10

$$\mu = \frac{\delta^{L1}}{\delta_y^{L1}} = \frac{63.5}{6.1} = 10.4$$

$$\omega = \frac{N_{max}^+}{A_c f_{ya}} = \frac{6948.1}{17.42 \times 258.55} = 1.54$$

Results of the experimental tests by Newell et al. (2006).

Test	14th cycle of the standard loading protocol			Last cycle of the standard loading protocol		
	$N^{(+)}$	$N^{(-)}$	δ^{L1}	$N^{(-)}$	$N^{(-)}$	δ^{L1}
	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]
1G	2873.6	-2909.1	31.0	3260.5	-3442.9	59.7
2G	2806.8	-2855.8	30.7	3193.8	-3420.7	59.2
3G	6236.4	-6289.8	34.3	6948.1	-7206.1	63.5
4G	6303.1	-6205.3	32.8	7046.0	-7166.1	63.0

Calcolo di β

Dati e risultati sono stati rielaborati per renderli coerenti

Properties of the BRBs tested by Newell et al. (2006).

Test	f_{ya} [MPa]	A_c [mm ²]	A_t	A_j	L_c [mm]	L_w	L_t	L_j	δ_y^{L1} [mm]
1G, 2G	258.55	7742	20,203	27,280	3366	6607	1927	1314	5.33
3G, 4G	258.55	17,420	25,647	41,615	3369	6355	1372	1314	6.10

$$\mu = \frac{\delta^{L1}}{\delta_y^{L1}} = \frac{63.5}{6.1} = 10.4$$

$$\beta = \frac{|N_{\max}^-|}{N_{\max}^+} = \frac{6289.8}{6236.4} = 1.01$$

Results of the experimental tests by Newell et al. (2006).

Test	14th cycle of the standard loading protocol			Last cycle of the standard loading protocol		
	$N^{(+)}$	$N^{(-)}$	δ^{L1}	$N^{(-)}$	$N^{(-)}$	δ^{L1}
	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]
1G	2873.6	-2909.1	31.0	3260.5	-3442.9	59.7
2G	2806.8	-2855.8	30.7	3193.8	-3420.7	59.2
3G	6236.4	-6289.8	34.3	6948.1	-7206.1	63.5
4G	6303.1	-6205.3	32.8	7046.0	-7166.1	63.0

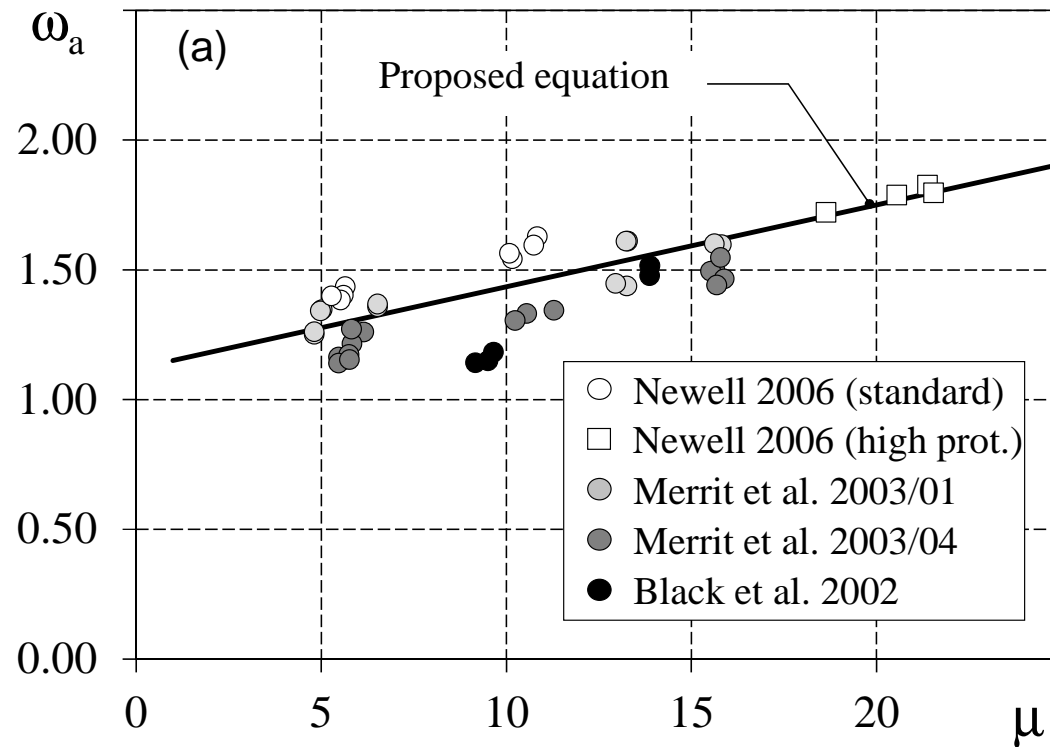
Test sperimentali analizzati

- Black CJ, Makris N, Aiken ID., Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 2002, (5 BRB)
- Merritt S, Uang CM, Benzoni G., University of California, San Diego, 2003, (6 BRB)
- Merritt S, Uang CM, Benzoni G., University of California, San Diego, 2003, (8 BRB)
- Newell J, Uang CM, Benzoni G., University of California, San Diego, 2006, (4 BRB)

Per un totale di 23 BRB

Proposta per il calcolo di ω

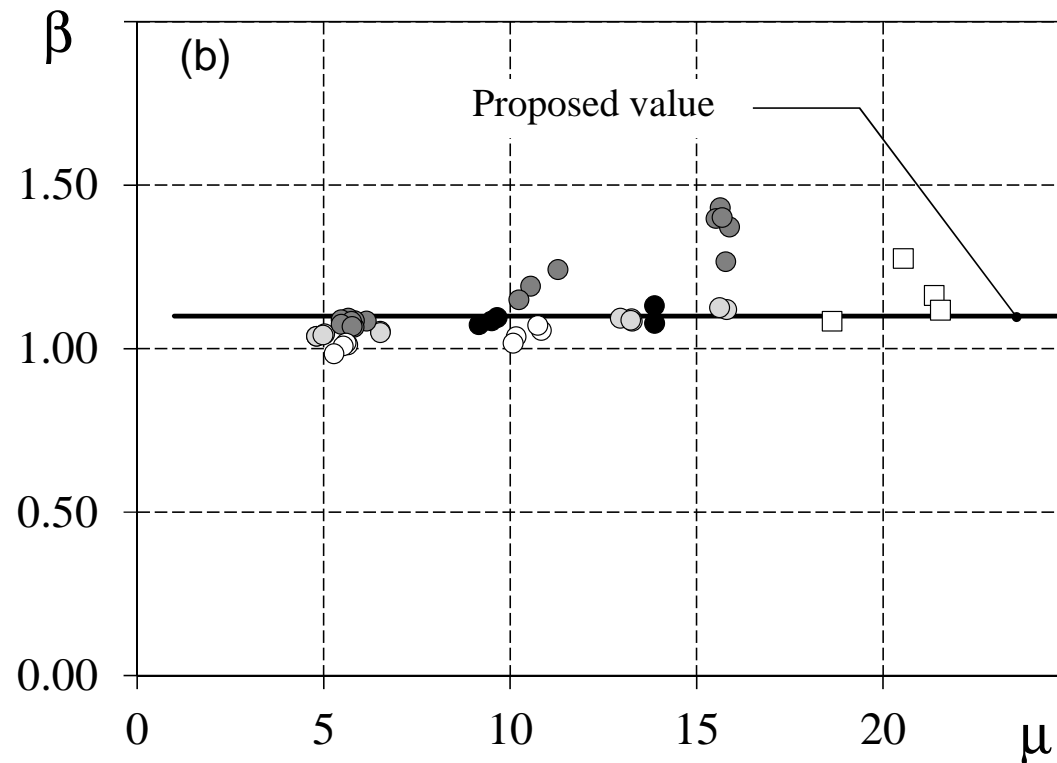
Il fattore ω varia linearmente con la duttilità μ



$$\omega = 1.15 + 0.0316 (\mu - 1)$$

Proposta per il calcolo di β

La maggior parte dei valori sono prossimi ad 1.1 indipendentemente da μ



$$\beta = 1.1$$

Duttilità disponibile

La duttilità disponibile è quella massima sopportabile prima della rottura del BRB (μ_{\max}). È pari al rapporto tra allungamento (complessivo) δ_{\max} corrispondente alla rottura del BRB e allungamento allo snervamento δ_y

$$\mu_{\max} = \frac{\delta_{\max}}{\delta_y} = \delta_{\max} \frac{E A_{eq}}{A_c f_y L_w}$$

δ_{\max} è fornito dal costruttore del BRB

Riepilogo delle proprietà del BRB (2)

$$\mu_{\max} = \frac{\delta_{\max}}{\delta_y} = \delta_{\max} \frac{E A_{eq} \gamma_{MO}}{A_c f_y L_w} \quad \text{Duttilità disponibile}$$

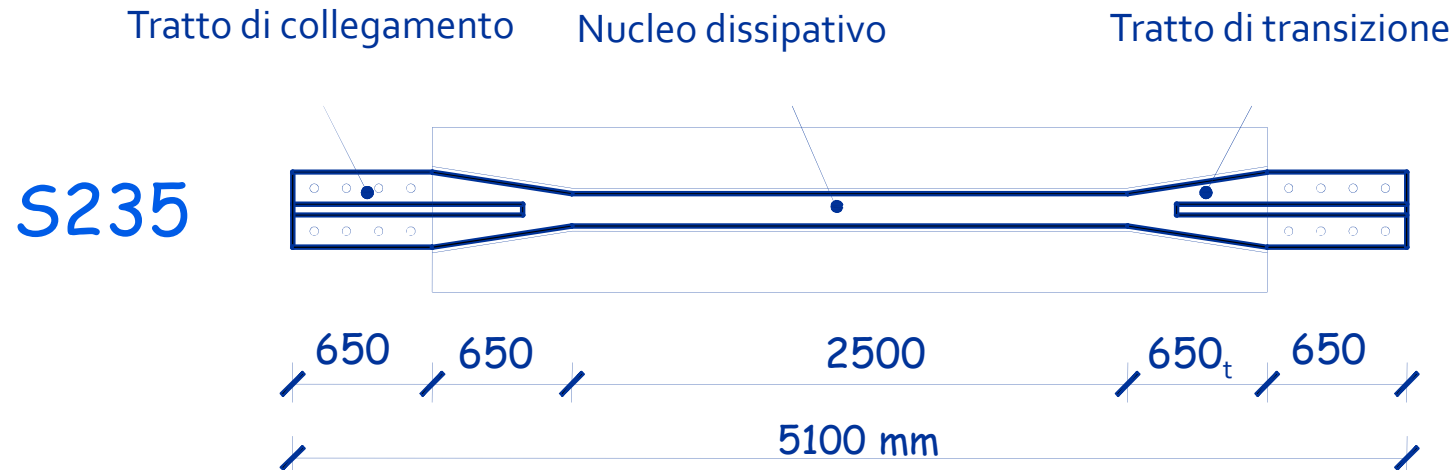
$$N_{\max}^+ = \omega N_{pl,Rd} \quad \text{Massima forza a trazione}$$

con $\omega = 1.15 + 0.0316 (\mu - 1)$

$$N_{\max}^- = \beta \omega N_{pl,Rd} \quad \text{Massima forza a compressione}$$

con $\beta = 1.1$

Duttilità disponibile



$$\mu_{\max} = \frac{\delta_{\max}}{\delta_y} = \frac{80}{3.50} = 22.8$$

$$\delta_{\max} = 80 \text{ mm}$$

$$\delta_y = 3.50 \text{ mm}$$

Massima forza a trazione

$$N_{\max}^+ = \omega N_{pl,Rd} = 1.84 \times 376 = 691.8 \text{ kN}$$

$$\omega = 1.15 + 0.0316 (\mu_{\max} - 1) = 1.15 + 0.0316 (22.8 - 1) = 1.84$$

$$N_{pl,Rd} = 376 \text{ kN}$$

$$\mu_{\max} = 22.8 \quad \dots \text{ e per livelli inferiori di duttilità, ad esempio } \dots$$

$$\mu = 0.75 \times \mu_{\max} = 0.75 \times 22.8 = 17.1$$

$$N_{\max}^+ = \omega N_{pl,Rd} = 1.66 \times 376 = 624.2 \text{ kN}$$

$$\omega = 1.15 + 0.0316 (\mu - 1) = 1.15 + 0.0316 (17.1 - 1) = 1.66$$

Massima forza a compressione

$$N_{\max}^{-} = \beta N_{\max}^{+}$$

Per $\mu_{\max} = 22.8$

$$N_{\max}^{+} = 691.8 \text{ kN}$$

$$N_{\max}^{-} = 1.1 \times N_{\max}^{+} = 761.0 \text{ kN}$$

Per $\mu = 0.75 \mu_{\max} = 17.1$

$$N_{\max}^{+} = 624.2 \text{ kN}$$

$$N_{\max}^{-} = 1.1 \times N_{\max}^{+} = 686.6 \text{ kN}$$