

Corso di aggiornamento
Progetto di strutture antisismiche
con pareti in c.a. ed in acciaio

**Problemi specifici nel progetto
di strutture antisismiche in acciaio**

5 - Strutture controventate e
comportamento ciclico dei controventi

Imola
23-25 giugno 2011
Melina Bosco

1/65

Definizione

Strutture in cui le forze orizzontali sono sostanzialmente assorbite da poche sottostrutture verticali

Il termine "poche" deve essere inteso come "poche rispetto al numero totale di sottostrutture verticali del sistema".



le sottostrutture controventate sono molto più rigide delle altre sottostrutture esistenti nell'edificio.

2/65

Definizione

I sistemi controventati resistono alle forze laterali principalmente attraverso forze assiali nelle aste delle sottostrutture controventate.

Solo una piccola percentuale (o nulla) delle forze laterali è portata per flessione nelle connessioni delle aste.

3/65

Definizione

Le sottostrutture controventate possono essere :

- A PARETE PIENA
(ad es. pareti in conglomerato cementizio armato)
- RETICOLARI
(ad es. telai controventati in acciaio)

4/65

Caratteristiche principali

VANTAGGI

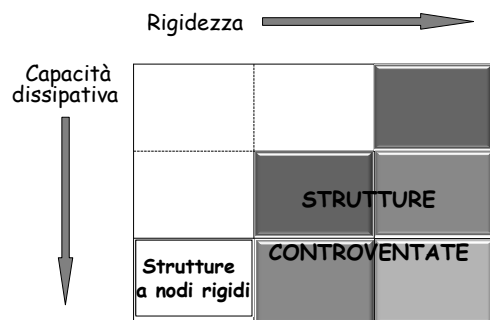
- Elevata resistenza alle azioni laterali
- Riduzione degli spostamenti di interpiano

SVANTAGGI

- Impedimento alle aperture
- Modesta duttilità globale

5/65

Caratteristiche principali



6/65

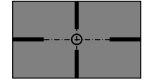
Problematiche principali

- Effetti torsionali in fase elastica o inelastica
- Elevate sollecitazioni e deformazioni nell'impalcato
- Elevate sollecitazioni applicate alle fondazioni delle sottostrutture controventate

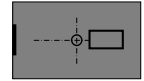
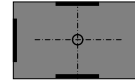
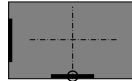
7/65

Stabilità torsionale

Sistemi instabili



Sistemi stabili



8/65

Strutture con controventi concentrici tradizionali

9/65

Classificazione dei controventi in acciaio

1. STRUTTURE CON CONTROVENTI CONCENTRICI

Il controvento è costituito da un telaio controventato con diagonali che convergono in :

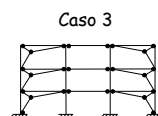
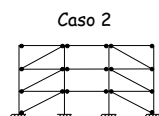
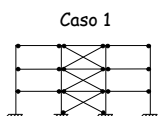
- nodi trave-pilastro
- punti di travi o pilastri in cui convergono altre diagonali.

10/65

Controventi concentrici

➤ CONTROVENTI CON DIAGONALE TESA ATTIVA

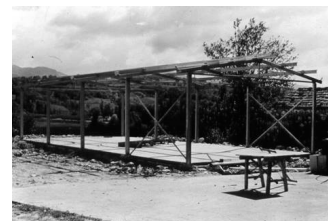
la resistenza alle forze orizzontali e le capacità dissipative sono affidate alle aste diagonali soggette a trazione



D.M. 14/01/2008 Norme Tecniche per le Costruzioni

11/65

Controventi concentrici



Struttura con controventi concentrici ad X (Caso 1)

12/65

Controventi concentrici



Struttura con controventi concentrici ad X (Caso 1) realizzata con profili scatolari

Struttura con controventi concentrici ad X (Caso 1) realizzata con profili angolari

13/65

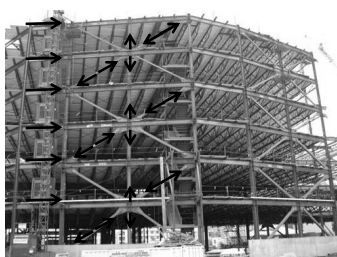
Controventi concentrici



Strutture con controventi concentrici (Caso 2)

14/65

Controventi concentrici



Strutture con controventi concentrici ad X a due piani e due campate

15/65

Controventi concentrici



Visitor centre, Limerick, Ireland.
(architetti: Murray O'Laoire Associates)

Trebilcock e Lawson. Architectural design in steel. Spon Press

16/65

Controventi concentrici

Reliance Controls, Swindon,
con pannelli controventati multipli
(architetti: Foster and Partners)
(Caso 1)



Trebilcock e Lawson. Architectural design in steel. Spon Press

17/65

Controventi concentrici



Campata controventata con
profili a doppio T
(Caso 2)

Campata controventata con
profili scatolari
(Caso 2)

18/65

Controventi concentrici



Campata controventata
con profili scatolari rotondi
(Caso 2)

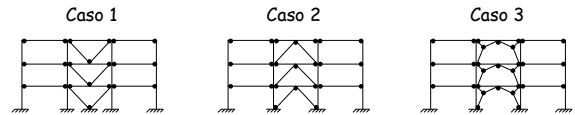
19/65

Controventi concentrici

➤ CONTROVENTI A V

Le forze orizzontali devono essere assorbite considerando sia le diagonali tese che quelle compresse.

Il punto d'intersezione di queste diagonali giace su di una membratura orizzontale che deve essere continua



D.M. 14/01/2008 Norme Tecniche per le Costruzioni

20/65

Controventi concentrici



Struttura controventata
con controventi concentrici a V invertita
(Caso 2)

21/65

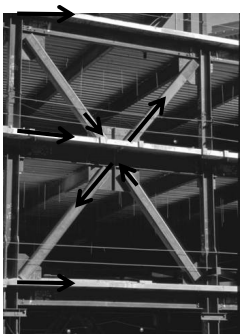
Controventi concentrici



Strutture controventate
con controventi concentrici a V
invertita (Caso 2)

22/65

Controventi concentrici



Strutture controventate
con controventi concentrici a V
a due piani (Caso 2)

23/65

Controventi concentrici



Particolari di collegamento
dei controventi concentrici a V
alla trave di piano
(Caso 2)

24/65

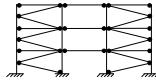
Controventi concentrici

➤ CONTROVENTI A K

Il punto d'intersezione delle diagonali giace su una colonna.

ATTENZIONE!

Non deve essere considerata dissipativa in quanto il meccanismo di collasso coinvolge la colonna.



D.M. 14/01/2008 Norme Tecniche per le Costruzioni

25/65

Criteri fondamentali di progetto

Nelle strutture con controventi concentrici, le diagonali rappresentano gli elementi destinati a sviluppare il comportamento inelastico e dunque a dissipare energia.



Importanza del comportamento inelastico dei controventi

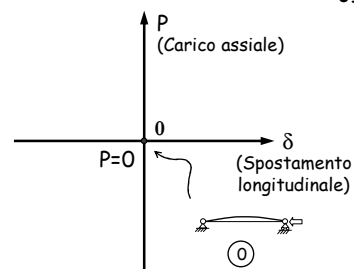
26/65

Il singolo controvento

Comportamento in occorrenza di azioni assiali cicliche

27/65

Comportamento del controvento concentrico

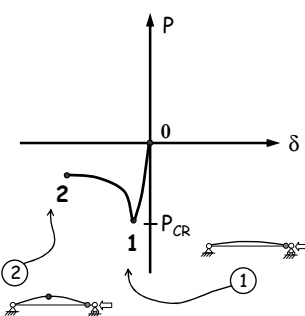


0. Si consideri un'asta imperfetta, ovvero dotata di inflessione iniziale, sottoposta ad un ciclo di spostamenti longitudinali

Nella configurazione iniziale l'asta non presenta spostamenti longitudinali e quindi sforzo normale. Essa presenta, tuttavia, uno spostamento trasversale in mezzzeria.

28/65

Comportamento del controvento concentrico



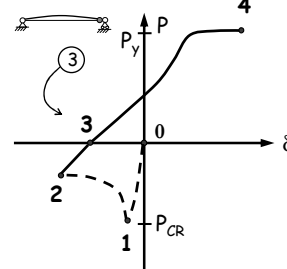
1. Sottoposta ad accorciamento crescente l'asta si instabilizza in corrispondenza del "carico critico"

2. Se si aumenta l'accorciamento dell'asta lo sforzo normale si riduce

Si forma una cerniera in mezzzeria per effetto del momento flettente

29/65

Comportamento del controvento concentrico

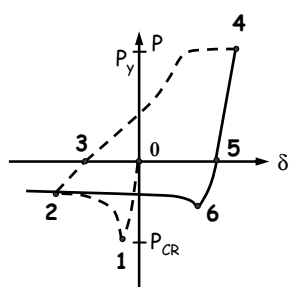


3. Se si riduce l'accorciamento dell'asta si trova una deformazione non nulla per $P=0$

4. Sollecitata a trazione l'asta giunge alla plasticizzazione

30/65

Comportamento del controvento concentrico



5. Riduce l'accorciamento dell'asta si trova una deformazione non nulla per $P=0$

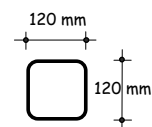
6. Sollecitata a compressione l'asta perviene all'instabilità per $P < P_{CR}$

31/65

Comportamento del controvento concentrico Esempio

Scalare quadrato 120X4

Raggio d'inerzia 46.96 mm



Caso 1

Lunghezza 2404.4 mm

Snellezza 51.19

Snellezza limite 93.01
plastico

Snellezza 0.55
adimensionalizzata

Caso 2

Lunghezza 4590.3 mm

Snellezza 97.03

Snellezza limite 93.01
plastico

Snellezza 1.05
adimensionalizzata

Caso 3

Lunghezza 8961.9 mm

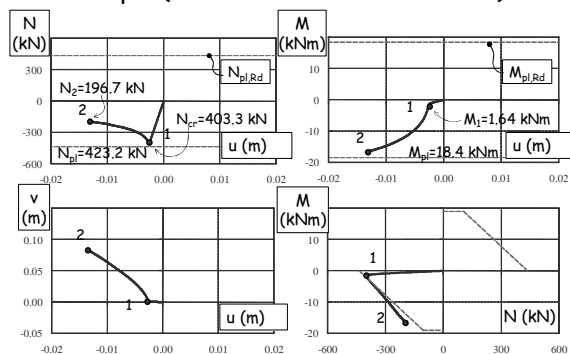
Snellezza 190.81

Snellezza limite 93.01
plastico

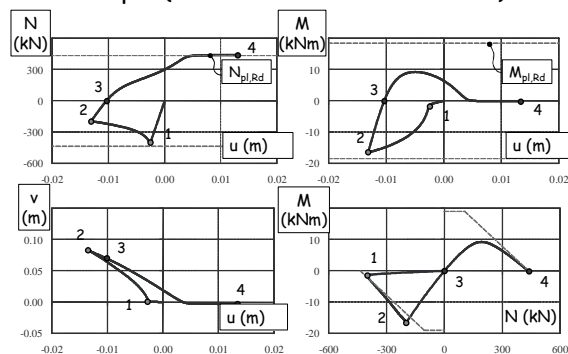
Snellezza 2.05
adimensionalizzata

32/65

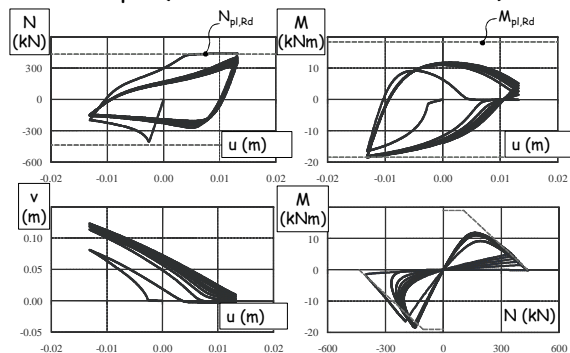
Comportamento del controvento concentrico Esempio (snellezza normalizzata 0.55)



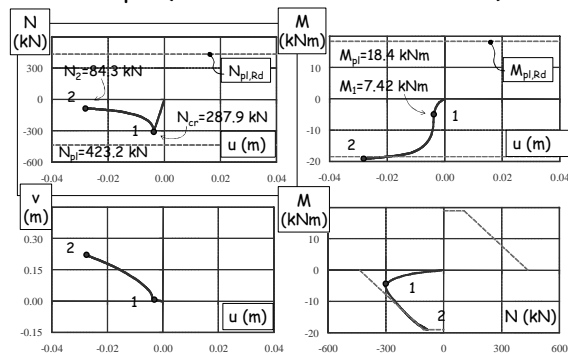
Comportamento del controvento concentrico Esempio (snellezza normalizzata 0.55)



Comportamento del controvento concentrico Esempio (snellezza normalizzata 0.55)

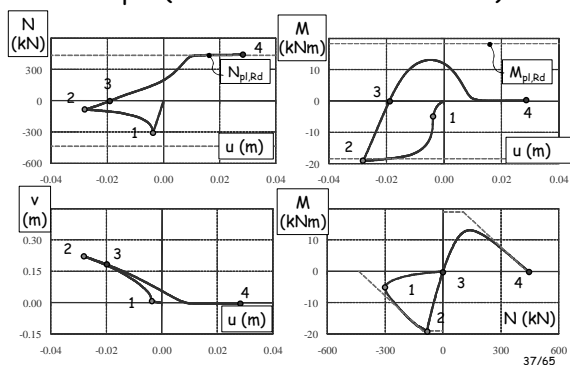


Comportamento del controvento concentrico Esempio (snellezza normalizzata 1.05)

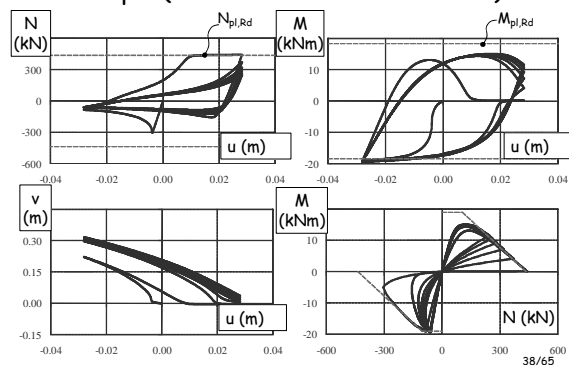


36/65

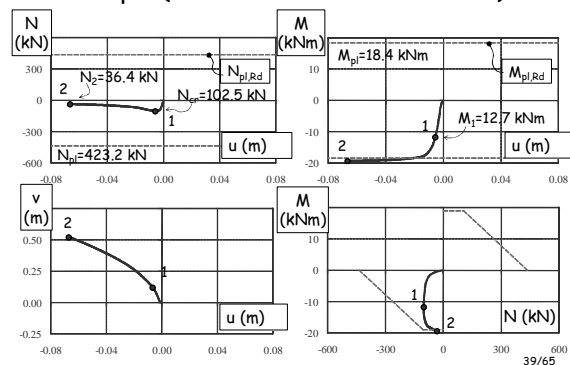
Comportamento del controvento concentrico Esempio (snellezza normalizzata 1.05)



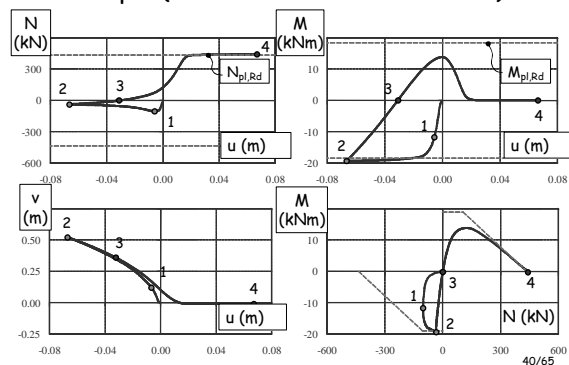
Comportamento del controvento concentrico Esempio (snellezza normalizzata 1.05)



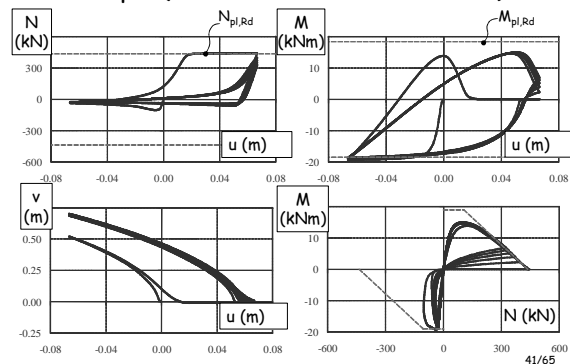
Comportamento del controvento concentrico Esempio (snellezza normalizzata 2.05)



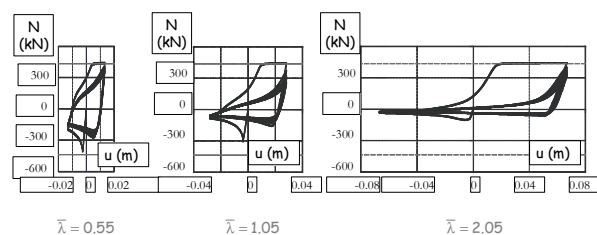
Comportamento del controvento concentrico Esempio (snellezza normalizzata 2.05)



Comportamento del controvento concentrico Esempio (snellezza normalizzata 2.05)



Comportamento del controvento concentrico Esempio (controventi di diverse snellezza)



Sforzo normale critico

Lo sforzo normale di progetto corrispondente all'instabilità dell'asta è valutato mediante le relazioni:

$$N_{b,Rd} = \chi A \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{per sezioni di classe 1, 2 e 3}$$

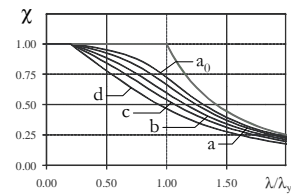
$$N_{b,Rd} = \chi A_{eff} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{per sezioni di classe 4}$$

il fattore di riduzione χ dipende dalla snellezza normalizzata e dal fattore di imperfezione.

D.M. 14/01/2008 Norme Tecniche per le Costruzioni

43/65

Sforzo normale critico



Curve d'instabilità considerate dalle Norme Tecniche per le Costruzioni

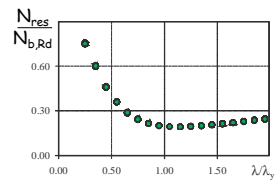
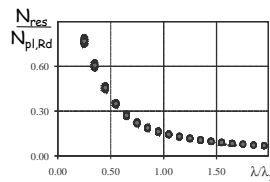
Curva d'instabilità	a ₀	a	b	c	d
Fattore di imperfezione	0.13	0.21	0.34	0.49	0.76

Sforzo normale critico

Sezione trasversale		Limiti	Instabilità introno all'asse	Curva		
				S235 S275 S355 S420	S460	
Sezioni laminare		$t_f \leq 40$ [mm]	y-y	a	a ₀	
		$40 < t_f \leq 100$ [mm]	z-z	b	a ₀	
			y-y	b	a	
			z-z	c	a	
		$t_f \leq 100$ [mm]	y-y	b	a	
			z-z	c	a	
Sezioni tubolari		$t_f \leq 100$ [mm]	y-y	d	c	
			z-z	d	c	
		Sezioni formata a caldo		qualunque	a	a ₀
		Sezioni formata a freddo		qualunque	c	c

Sforzo normale residuo

Scalari quadrati (80X3 - 400X12)



Sforzi normali residui dopo cinque cicli di spostamento di ampiezza massima pari allo spostamento disponibile del controvento

46/65

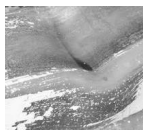
Spessori limite dei profili dei controventi

Elevate deformazioni si sviluppano all'atto dell'instabilità locale negli spigoli della sezione trasversale. La prima lesione si forma in queste zone e si propaga attraverso la sezione in occorrenza di carichi ciclici.

L'instabilità locale è influenzata

- dal rapporto tra larghezza e spessore delle flange
- dalla storia di carico.

C'è anche una dipendenza dalla snellezza dell'asta, (per un dato livello di deformazione le maggiori curvature insorgono in cerniere plastiche nelle aste con bassa snellezza).



Instabilità locale nella zona centrale di un controvento a sezione scalare

Instabilità dell'asta



Per avere una discreta duttilità di piano è opportuno che le sezioni di estremità del controvento possano ruotare liberamente fuori piano



Esempi d'instabilità dell'asta



49/65

Esempi d'instabilità dell'asta



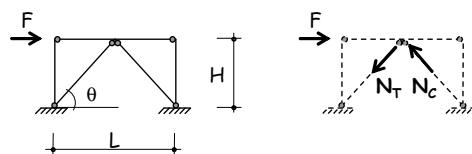
50/65

Coppia di controventi a V

Comportamento in occorrenza di azioni laterali

51/65

Coppia di controventi a V Comportamento sismico

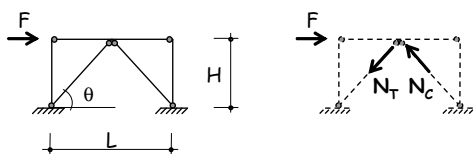


Campo elastico

1. Le intensità delle due forze, N_T e N_C , sono eguali $N_T = N_C = F / (2 \cos \theta)$
2. Le componenti verticali sono eguali e contrarie $V_{trave} = M_{trave} = 0$

52/65

Coppia di controventi a V Comportamento sismico



Campo elastico

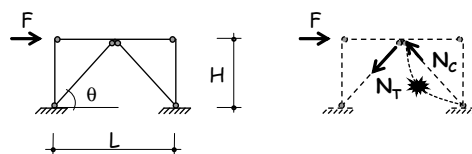
3. La rigidità laterale di piano è

$$K_L = 2 \left(\frac{AE}{L} \right)_{br} \cos^2 \theta = 2 k_e \cos^2 \theta$$

il contributo fornito dalle due aste diagonali è uguale

53/65

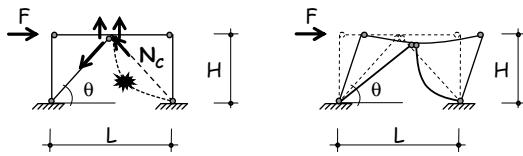
Coppia di controventi a V Comportamento sismico



Ad instabilità avvenuta...

1. Le intensità delle due forze, N_T e N_C , non sono più eguali $N_T \neq N_C$
2. Si riduce il contributo alla rigidità laterale offerto dalla diagonale compressa (diventa negativo)

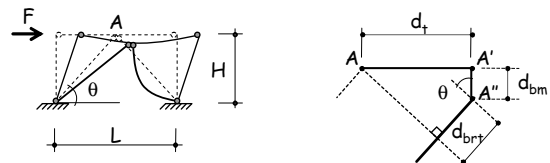
Coppia di controventi a V Comportamento sismico



Ad instabilità avvenuta...

- Le intensità delle due forze, N_T e N_C , non sono più eguali $V_{trave} \neq 0$; $M_{trave} \neq 0$
- Lo squilibrio tra le componenti verticali delle forze N_T e N_C , sollecita flessionalmente la trave

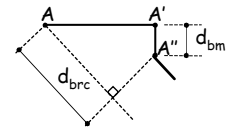
Coppia di controventi a V Comportamento sismico



Ad instabilità avvenuta...

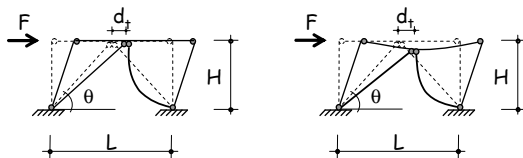
$$\delta_{brc} = \delta_t \cos \theta + \delta_{bm} \sin \theta$$

$$\delta_{brt} = \delta_t \cos \theta - \delta_{bm} \sin \theta$$



56/65

Coppia di controventi a V Comportamento sismico

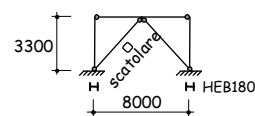


Ad instabilità avvenuta...

- Fissato un valore dello spostamento orizzontale del traverso, l'inflessione della trave determina un accorciamento di entrambe le diagonali.
Riduzione dello sforzo normale nella diagonale tesa, ulteriore accorciamento della diagonale compressa

57/65

Coppia di controventi a V Esempio



Diagonale
Lunghezza 5186 mm

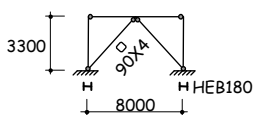
Scatolare quadrato 90X4

Raggio d'inerzia 34.7 mm
Snellezza 149.42
Snellezza limite plastico 93.01
Snellezza adimensionalizzata 1.61

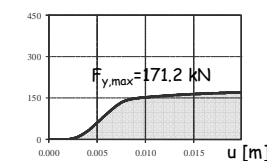
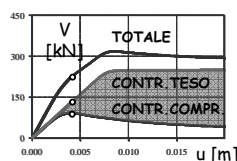
Scatolare quadrato 150X8

Raggio d'inerzia 57.1 mm
Snellezza 90.74
Snellezza limite plastico 93.01
Snellezza adimensionalizzata 0.98

Coppia di controventi a V Esempio 1: Trave infinitamente rigida

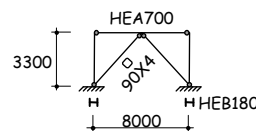


Controvento
Snellezza adimensionalizzata 1.61
Taglio esterno di prima instabilità 223.7 kN
Taglio esterno max 318.3 kN

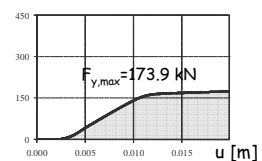
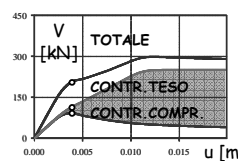


Tagli resistenti indotti dai controventi Forza verticale squilibrata

Coppia di controventi a V Esempio 1: Trave forte

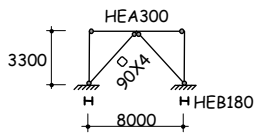


Controvento
Snellezza adimensionalizzata 1.61
Taglio esterno di prima instabilità 205.3 kN
Taglio esterno max 297.5 kN



Tagli resistenti indotti dai controventi Forza verticale squilibrata

Coppia di controventi a V Esempio 1: Trave debole

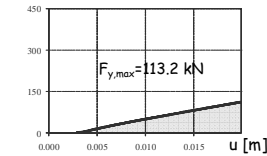
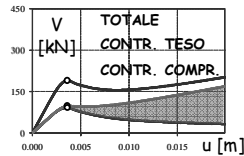


Controvento

Snellezza adimensionalizzata 1.61

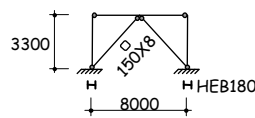
Taglio esterno di prima instabilità 190.9 kN

Taglio esterno max 202.4 kN



Tagli resistenti indotti dai controventi Forza verticale squilibrata

Coppia di controventi a V Esempio 2: Trave infinitamente rigida

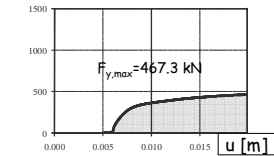
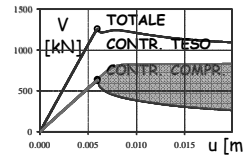


Controvento

Snellezza adimensionalizzata 0.98

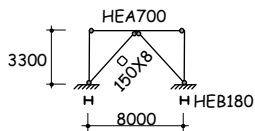
Taglio esterno di prima instabilità 1263.3 kN

Taglio esterno max 1265.8 kN



Tagli resistenti indotti dai controventi Forza verticale squilibrata

Coppia di controventi a V Esempio 2: Trave forte

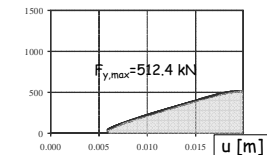
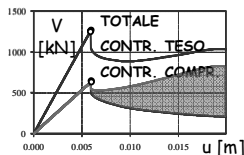


Controvento

Snellezza adimensionalizzata 0.98

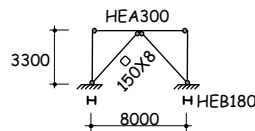
Taglio esterno di prima instabilità 1249.2 kN

Taglio esterno max 1249.2 kN



Tagli resistenti indotti dai controventi Forza verticale squilibrata

Coppia di controventi a V Esempio 2: Trave debole

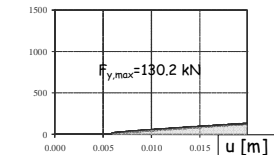
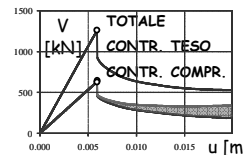


Controvento

Snellezza adimensionalizzata 0.98

Taglio esterno di prima instabilità 1245.6 kN

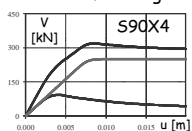
Taglio esterno max 1245.6 kN



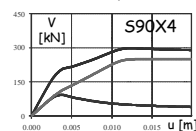
Tagli resistenti indotti dai controventi Forza verticale squilibrata 6/65

Coppia di controventi a V Riepilogo

Trave infinit. rigida



Trave forte



Trave debole

