

Corso di aggiornamento

Progetto di edifici antisismici
con struttura controventata in acciaio

Telai con controventi concentrici

1 - Comportamento ciclico dei controventi

Spoletto

24-25 marzo 2017

Edoardo M. Marino

Strutture con elementi di controvento

Gli elementi di controvento sono sottostrutture sono molto più rigide delle altre sottostrutture presenti nell'edificio.

Le forze orizzontali sono sostanzialmente assorbite da "poche" sottostrutture verticali di controvento

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

Tipi di elementi di controvento

Le sottostrutture controventate possono essere :.

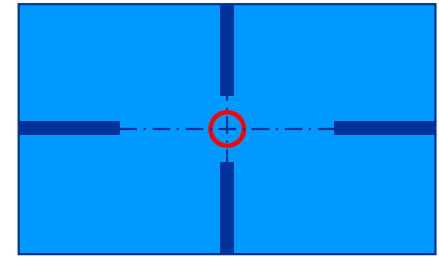
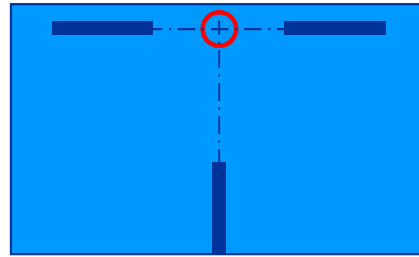
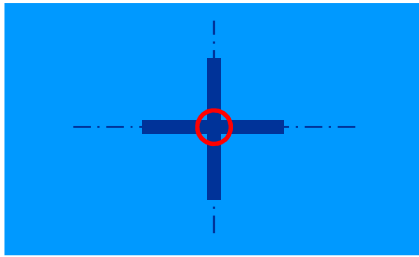
- **A PARETE PIENA**
(ad es. pareti in cemento armato)
- **RETICOLARI**
(ad es. telai controventati in acciaio)

Problematiche principali

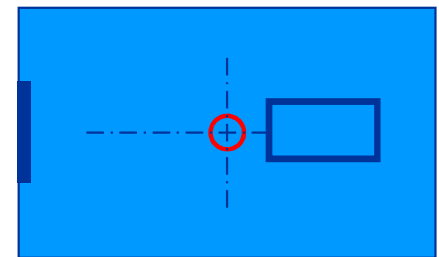
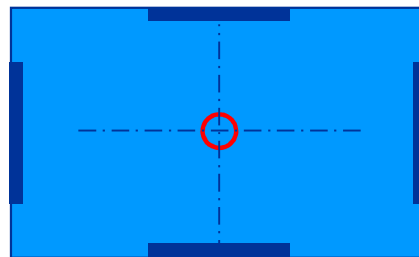
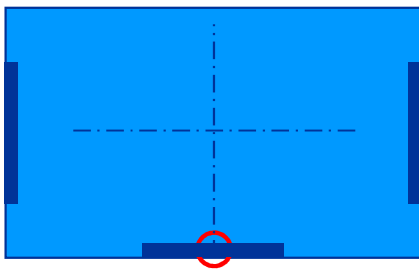
- Elevate sollecitazioni applicate alle fondazioni delle sottostrutture controventate
- Elevate sollecitazioni e deformazioni nell'impalcato
- Effetti torsionali

Stabilità torsionale

Sistemi instabili



Sistemi stabili



Rispetto ai telai a nodi rigidi ...

VANTAGGI

- Semplicità costruttiva dei nodi
- Elevata resistenza alle azioni laterali, sezioni trasversali più piccole
- Elevata rigidezza, riduzione degli spostamenti di interpiano

SVANTAGGI

- Bassa iperstaticità
- Minore duttilità
- Maggiori condizionamenti architettonici

Strutture con controventi concentrici
tradizionali

Telai con controventi concentrici

I collegamenti trave-colonna sono di norma a cerniera.

Rigidezza e resistenze alle azioni orizzontali sono conferite da elementi diagonali (controventi) convergenti nei nodi:

- nodi trave-pilastro
- punti di travi/pilastri dove convergono altre diagonali

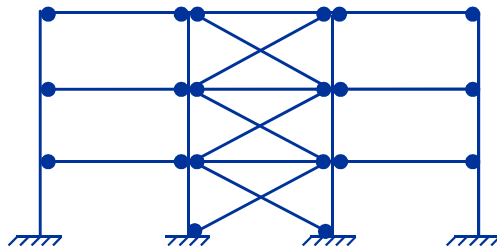
Secondo NTC08, i sistemi con controventi concentrici resistono alle forze laterali principalmente attraverso forze assiali nelle aste (controventi, travi e colonne).

Controventi concentrici

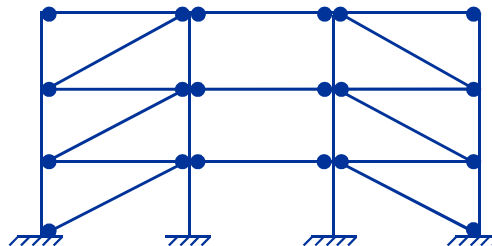
➤ CONTROVENTI CON DIAGONALE TESA ATTIVA

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

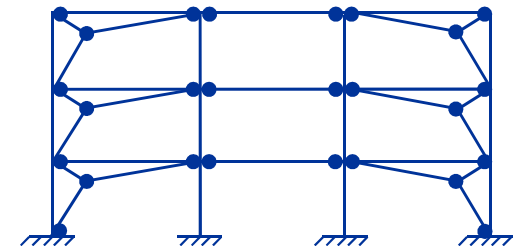
Caso 1



Caso 2



Caso 3

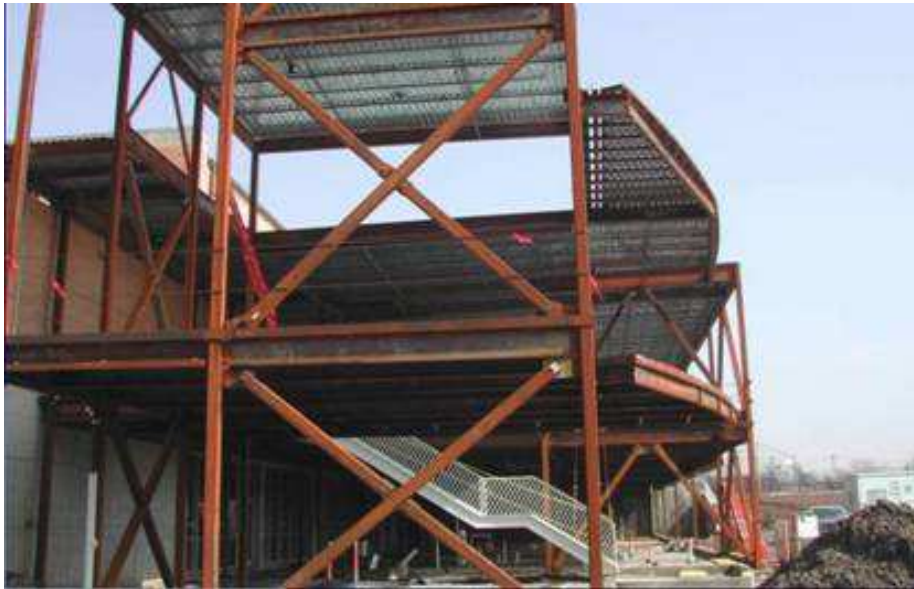


Controventi concentrici



Struttura con controventi concentrici ad X
(Caso 1)

Controventi concentrici



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



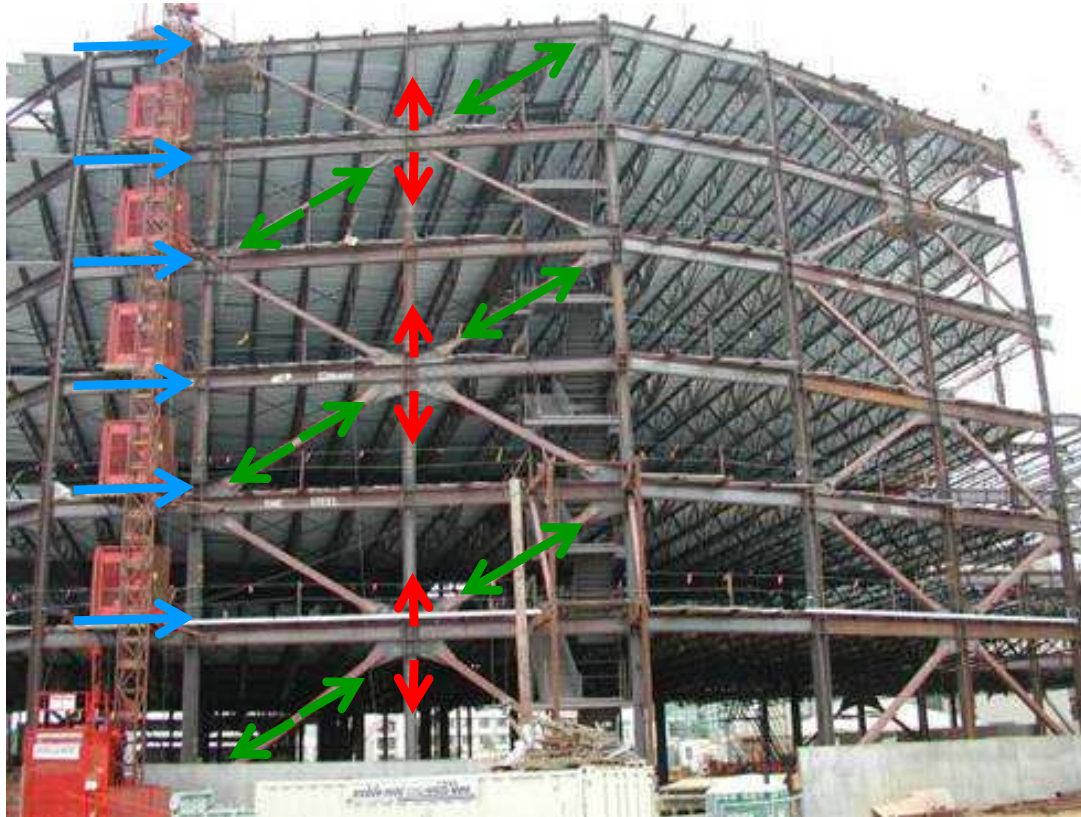
Struttura con controventi concentrici ad X (Caso 1) realizzata con profili angolari

Controventi concentrici



Strutture con controventi
concentrici
(Caso 2)

Controventi concentrici



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

Controventi concentrici



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

Controventi concentrici

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



Controventi concentrici



Campata controventata con
profili a doppio T
(Caso 2)



Campata controventata con
profili scatolari
(Caso 2)

Controventi concentrici



Campata controventata
con profili tubolari
(Caso 2)



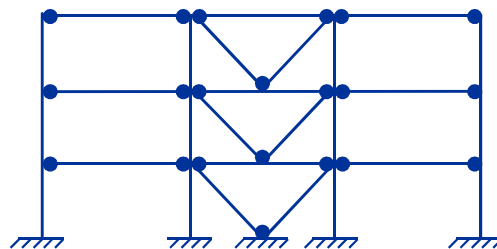
Controventi concentrici

➤ CONTROVENTI A V

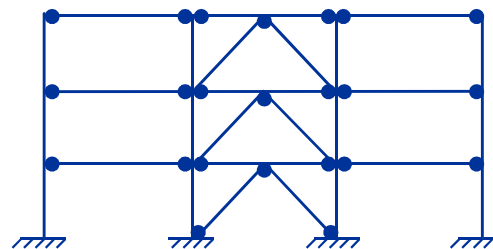
Le forze orizzontali devono essere assorbite considerando sia le diagonali tese che quelle compresse.

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

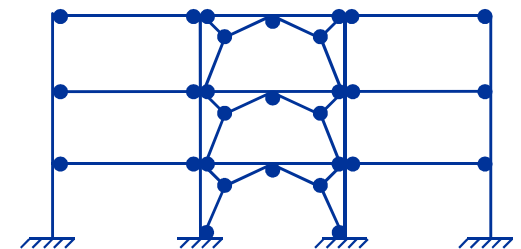
Caso 1



Caso 2



Caso 3

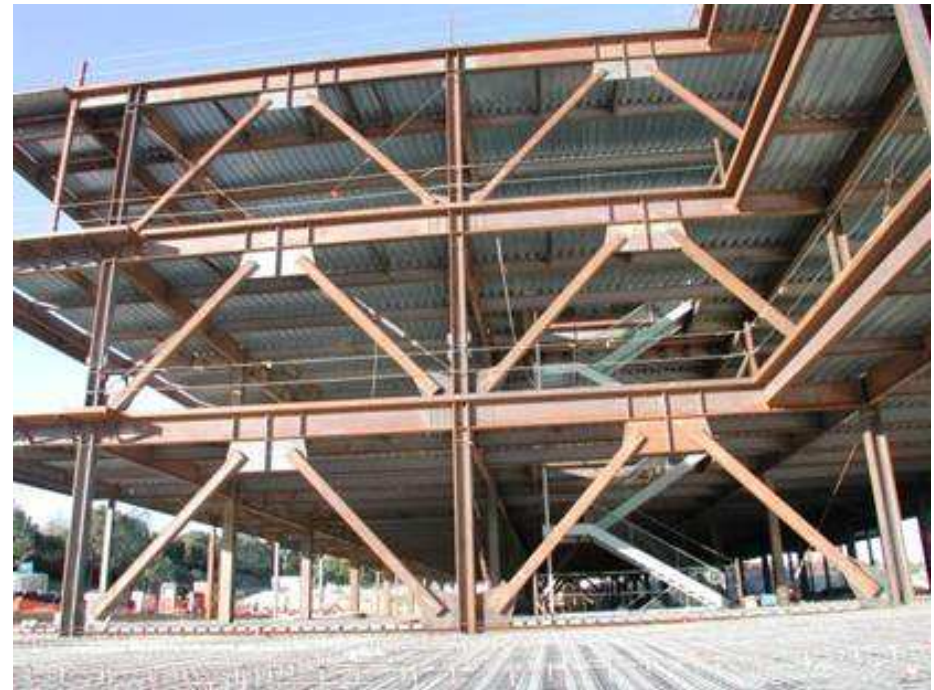


Controventi concentrici



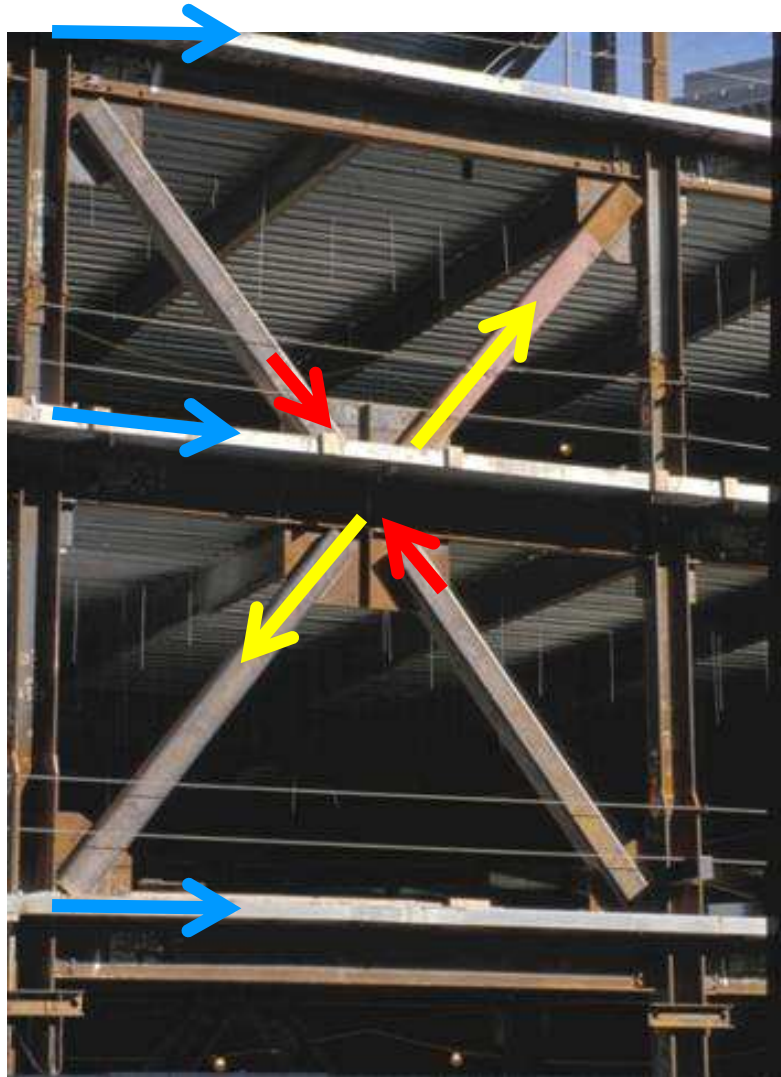
Struttura controventata
con controventi concentrici a V invertita
(Caso 2)

Controventi concentrici



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

Controventi concentrici



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

Controventi concentrici



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



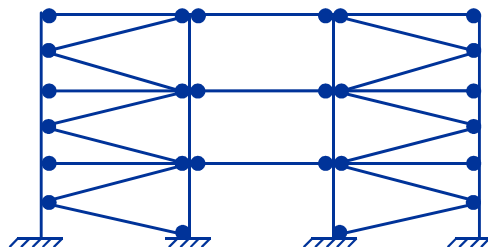
Controventi concentrici

➤ 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.



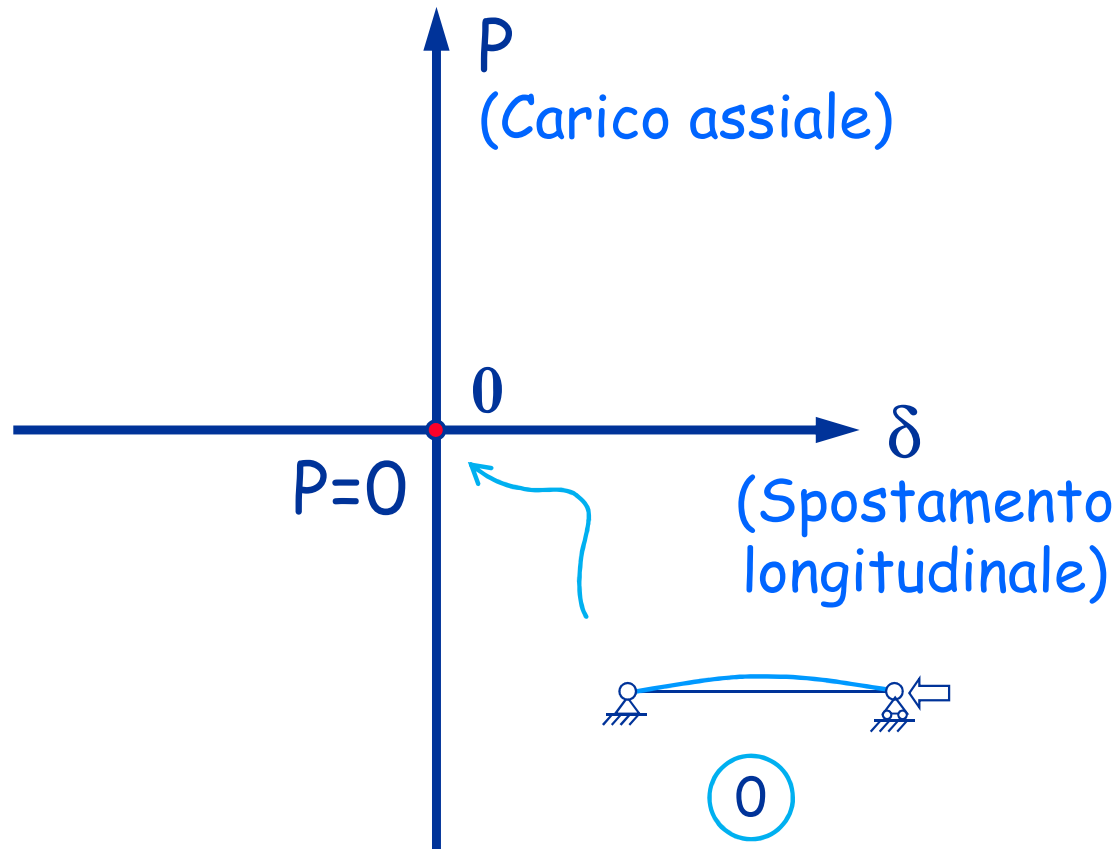
Principio di funzionamento

Le diagonali rappresentano gli elementi destinati a sviluppare il comportamento inelastico e dunque a dissipare energia.

Travi e colonne devono rimanere integre durante il sisma (non devono plasticizzarsi nè instabilizzarsi).

Il singolo controvento

Comportamento ciclico



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

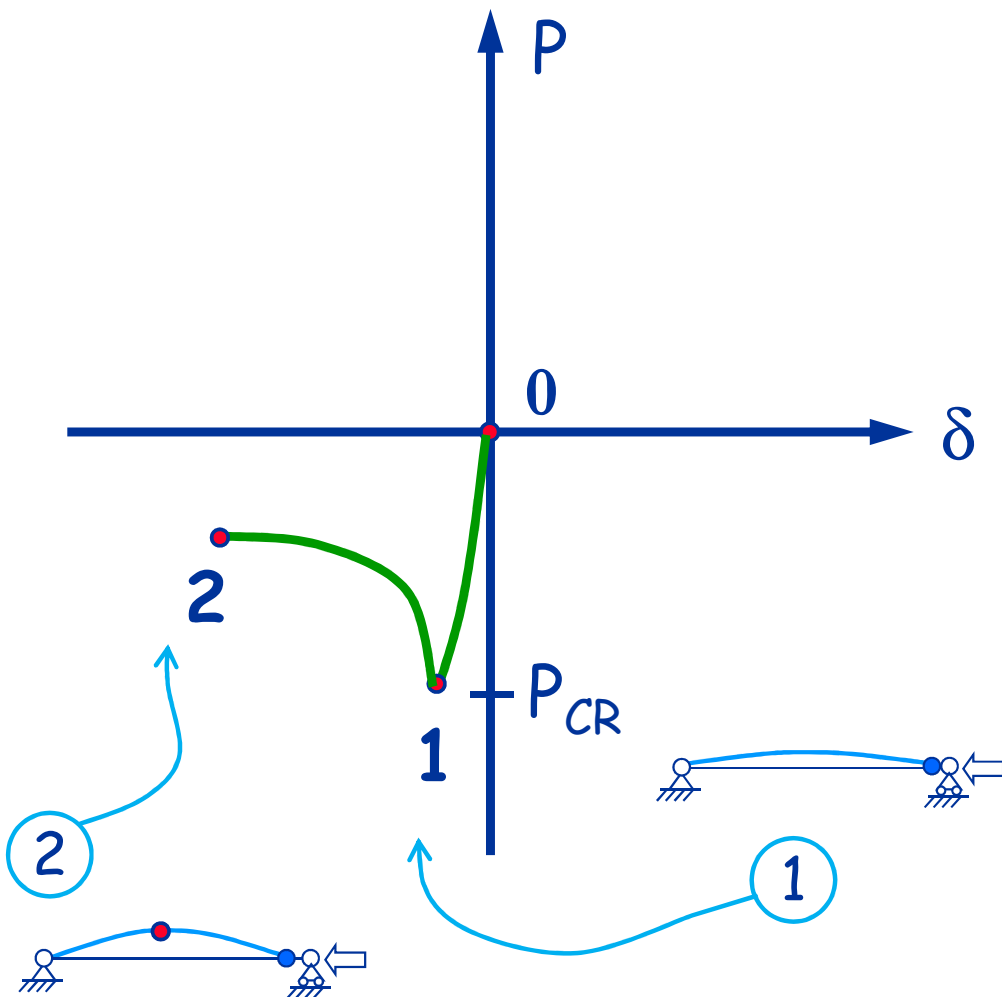
Nella configurazione iniziale l'asta non presenta spostamenti longitudinali e quindi sforzo normale.

Essa presenta, tuttavia, uno spostamento trasversale in mezzeria.

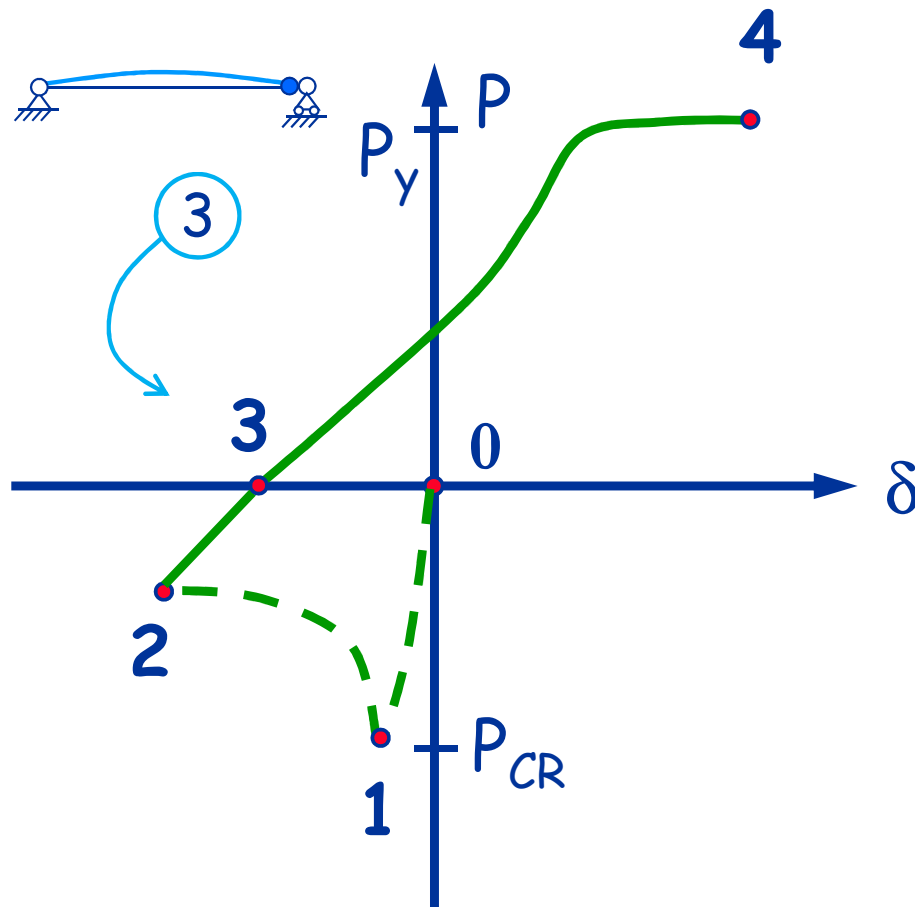
Comportamento ciclico

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

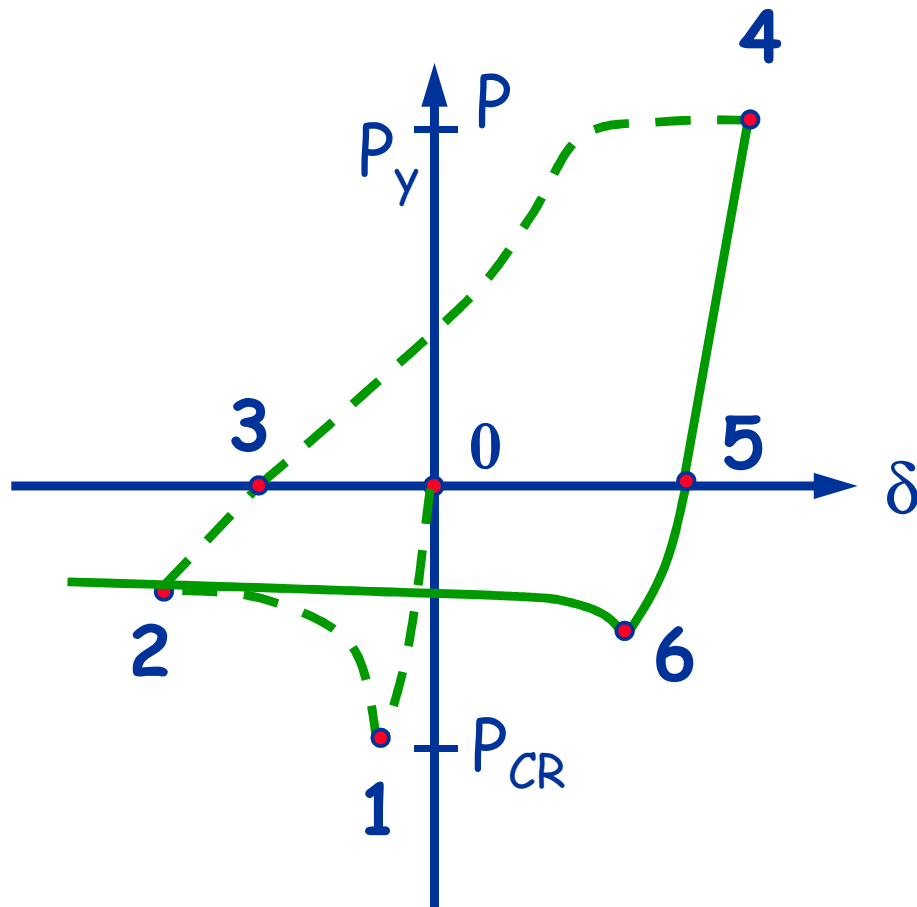


Comportamento ciclico



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

Comportamento ciclico



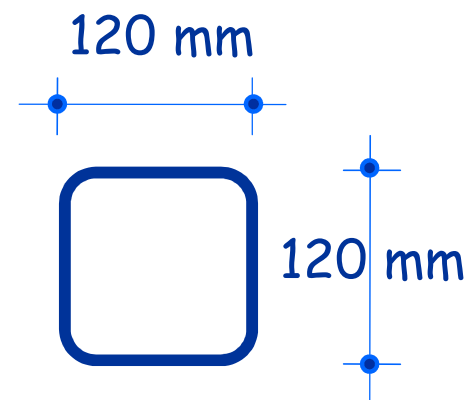
5. Riduce l'accorciamento dell'asta si trova una deformazione non nulla per $P=0$
6. Sollecitata a compressione l'asta perviene all'instabilità per $P < P_{CR}$

Comportamento ciclico

Esempio

Scatolare 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

Caso3

Lunghezza 8961.9 mm

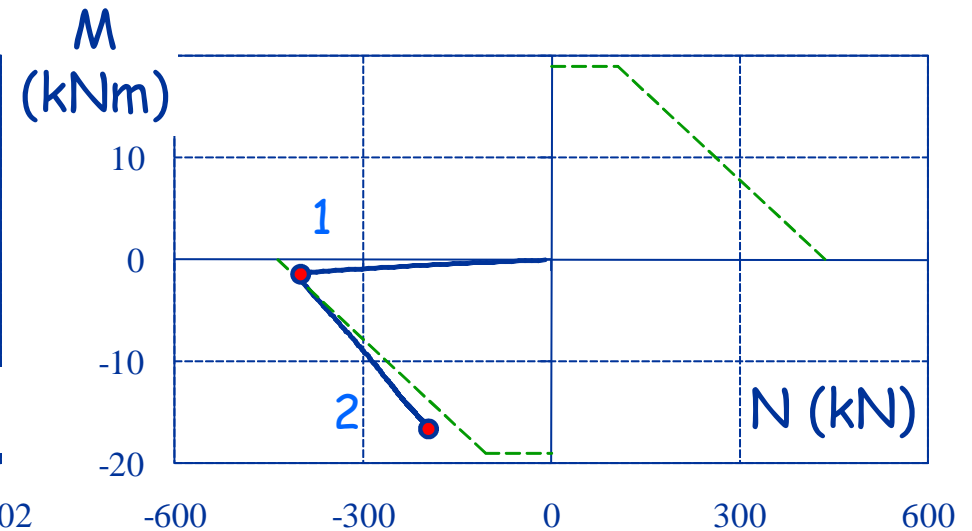
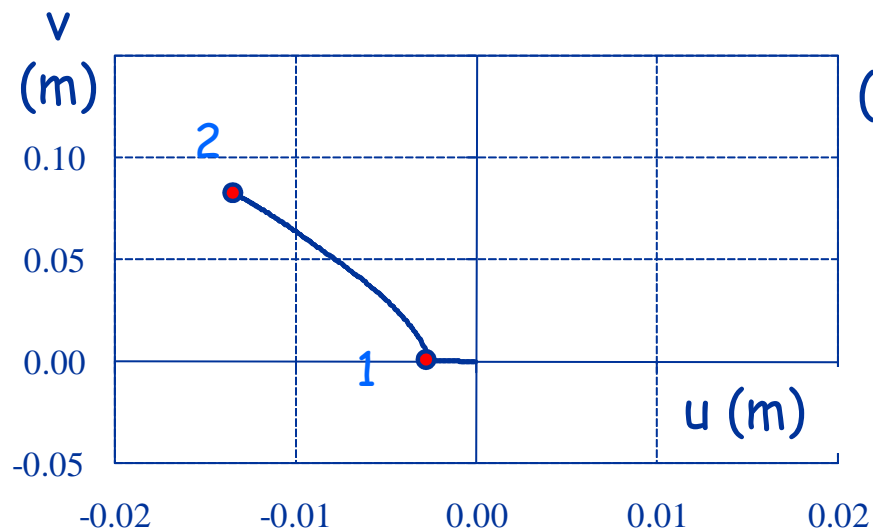
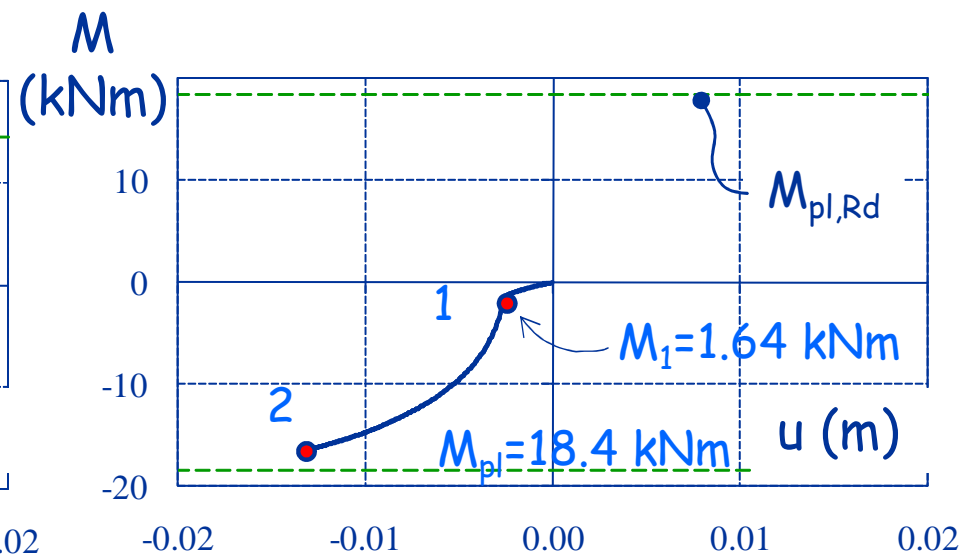
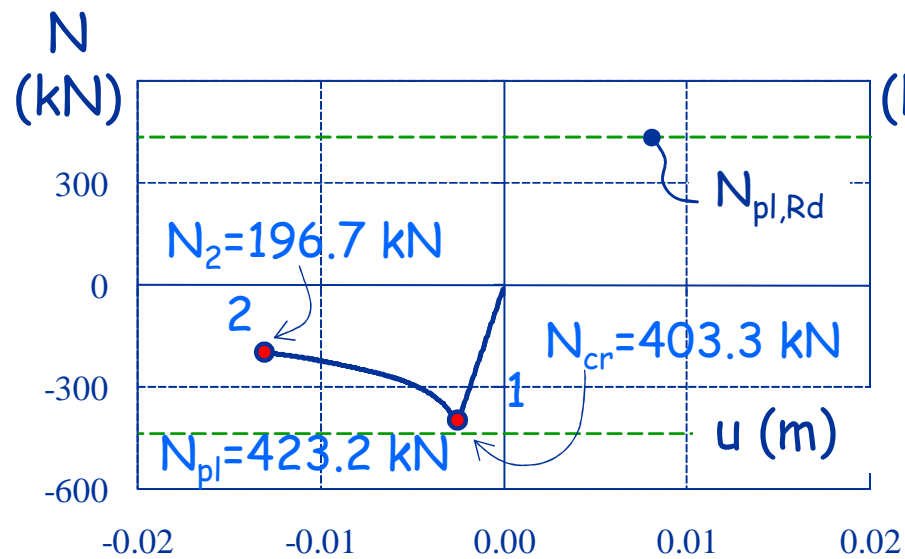
Snellezza 190.81

Snellezza limite 93.01
plastico

Snellezza 2.05
adimensionalizzata

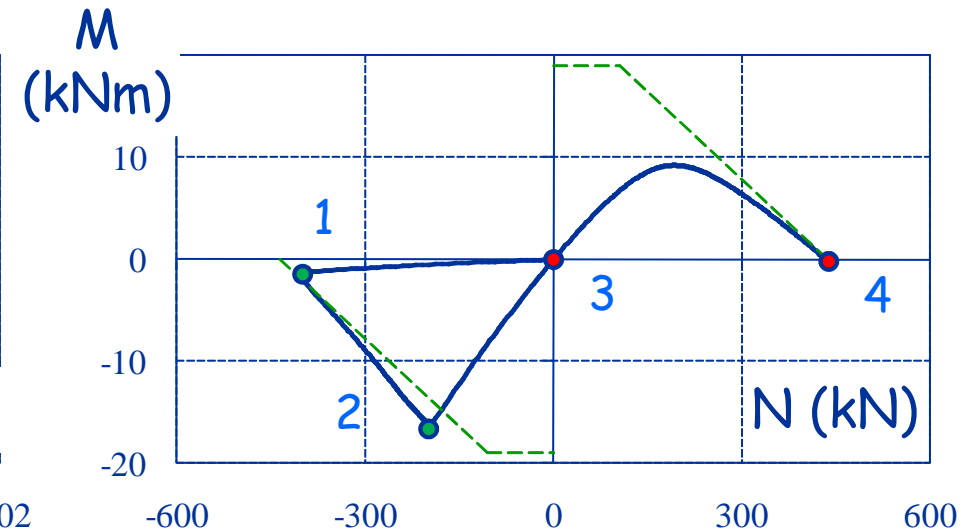
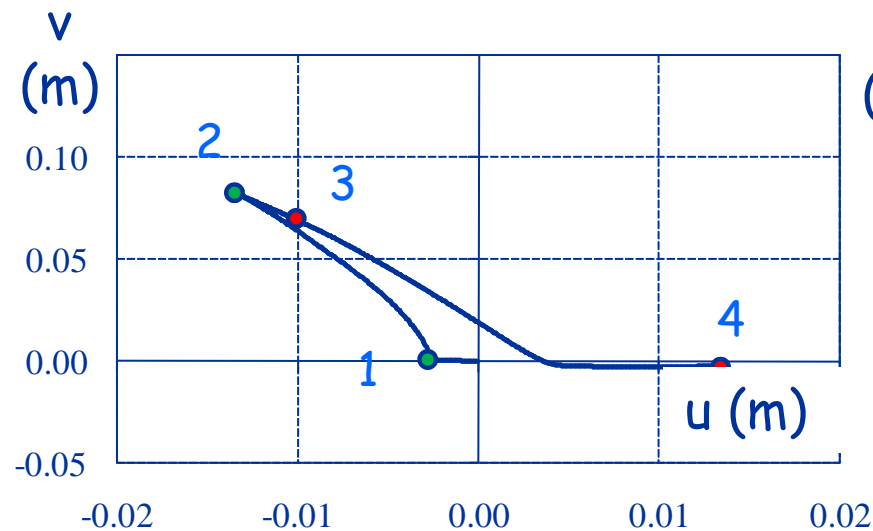
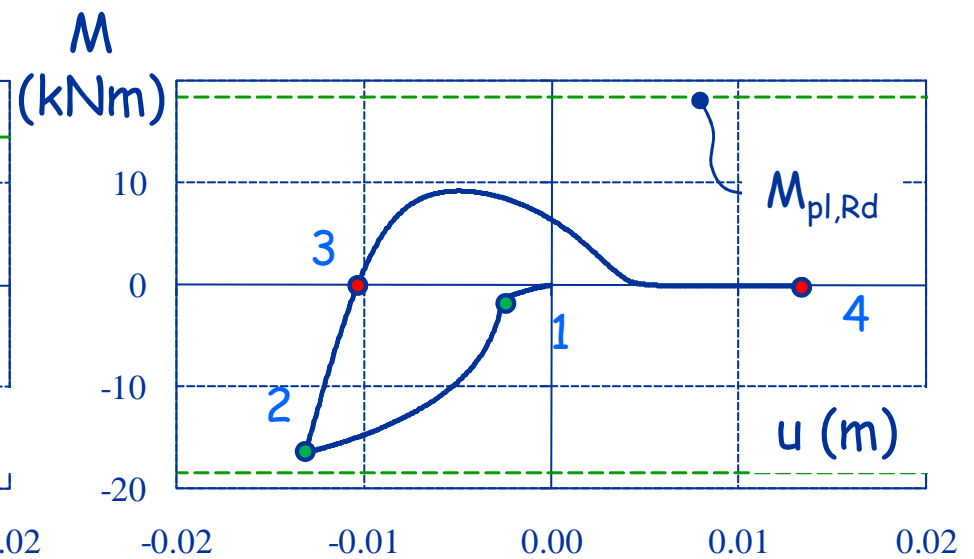
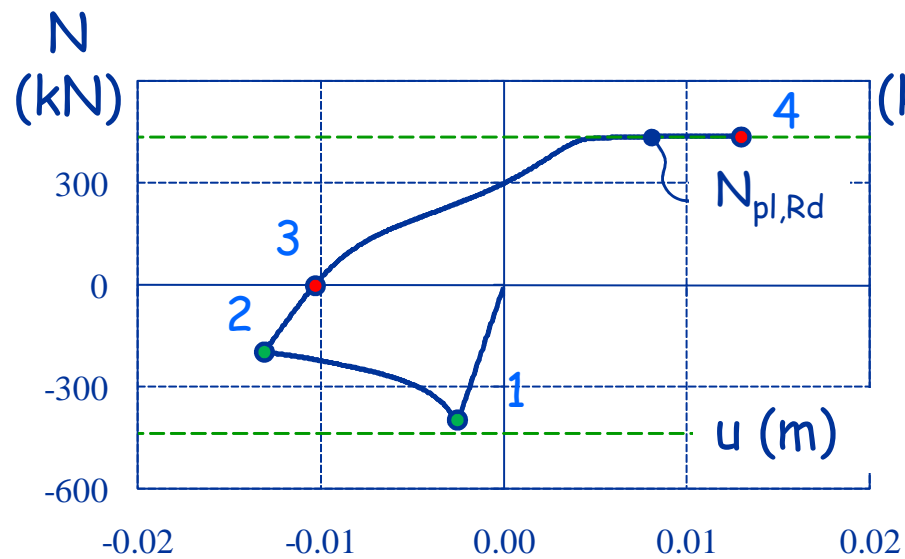
Comportamento ciclico

Esempio (snellezza normalizzata 0.55)



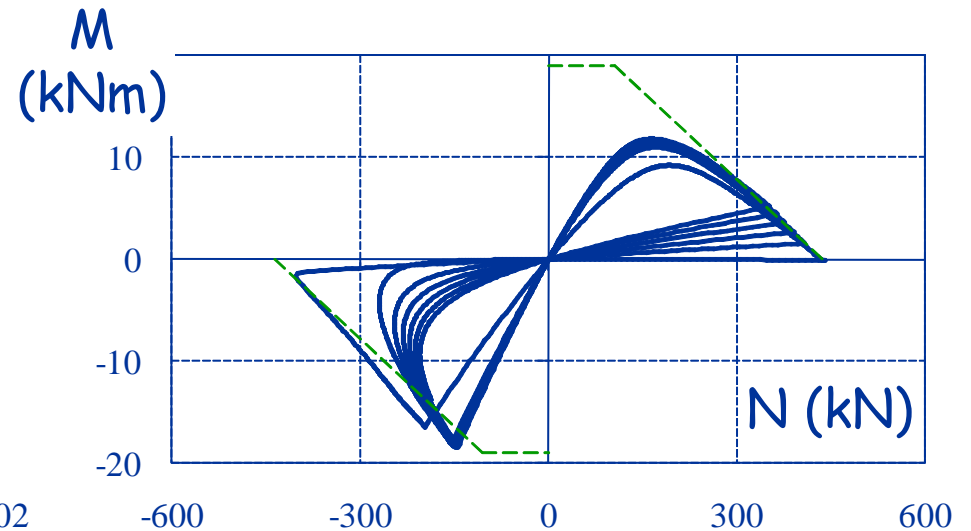
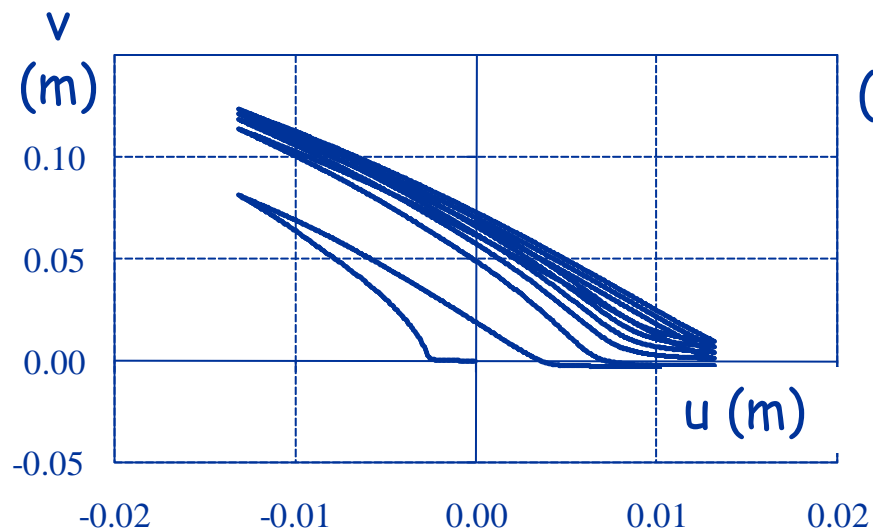
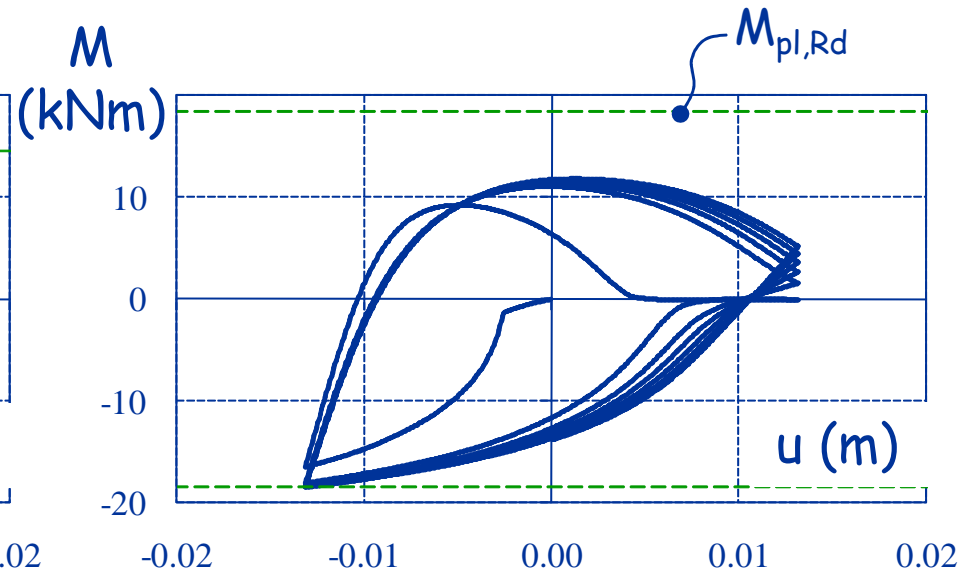
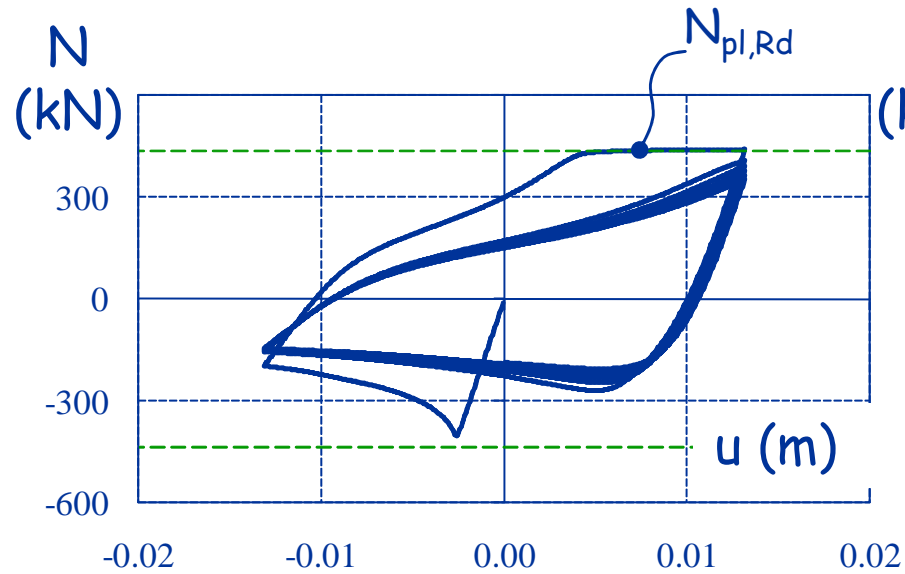
Comportamento ciclico

Esempio (snellezza normalizzata 0.55)



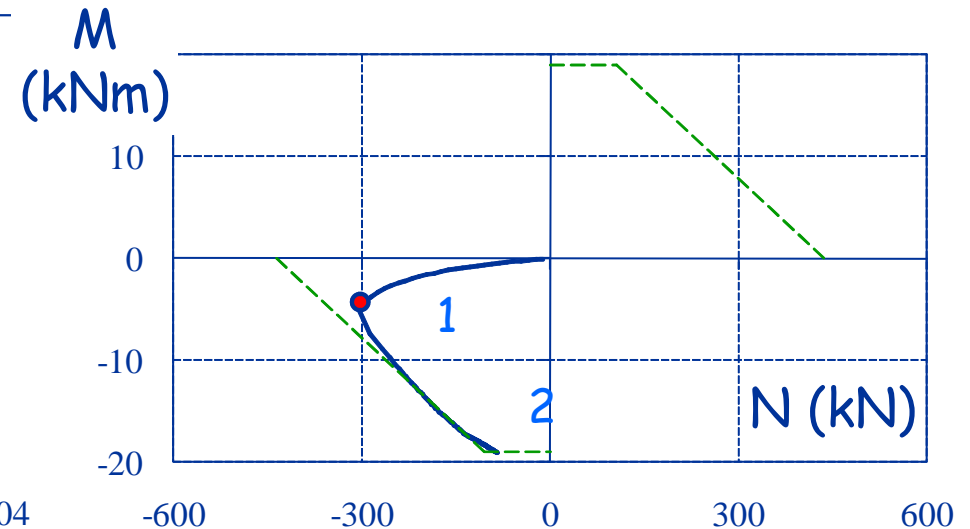
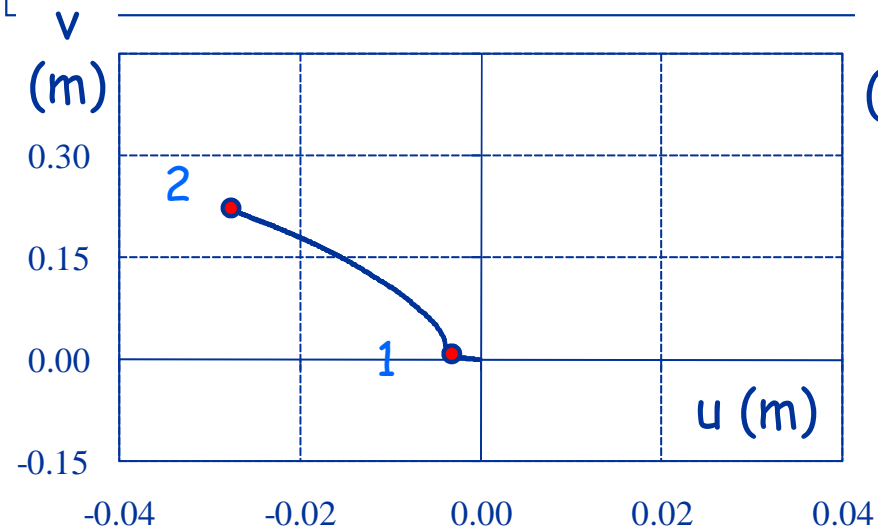
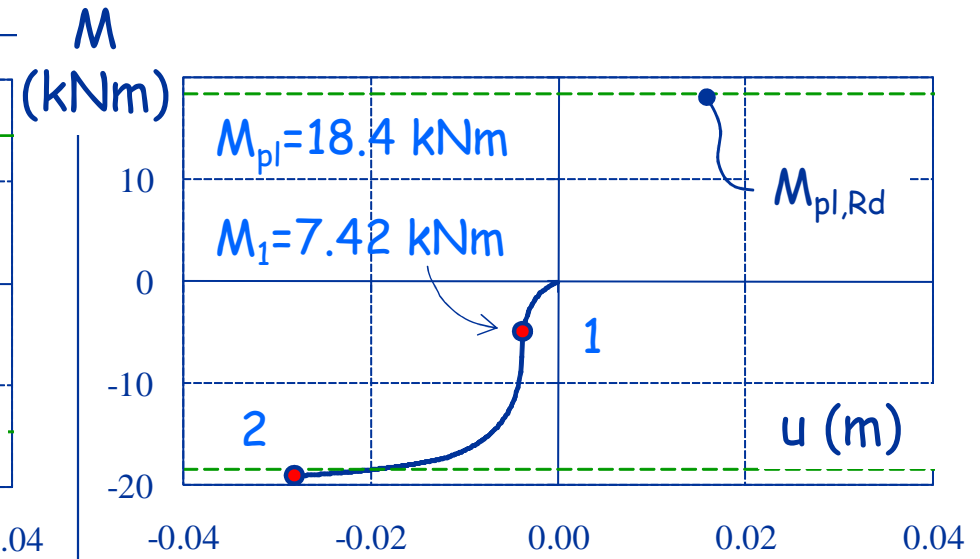
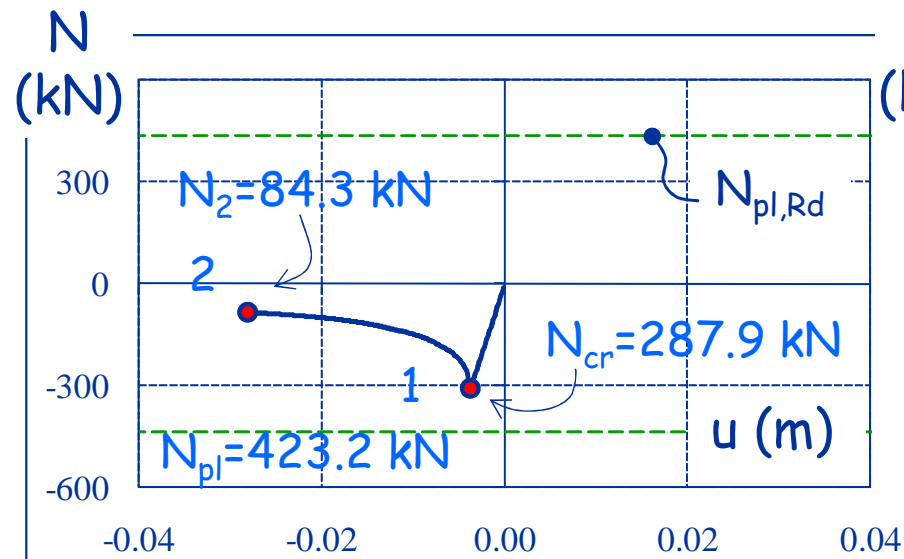
Comportamento ciclico

Esempio (snellezza normalizzata 0.55)



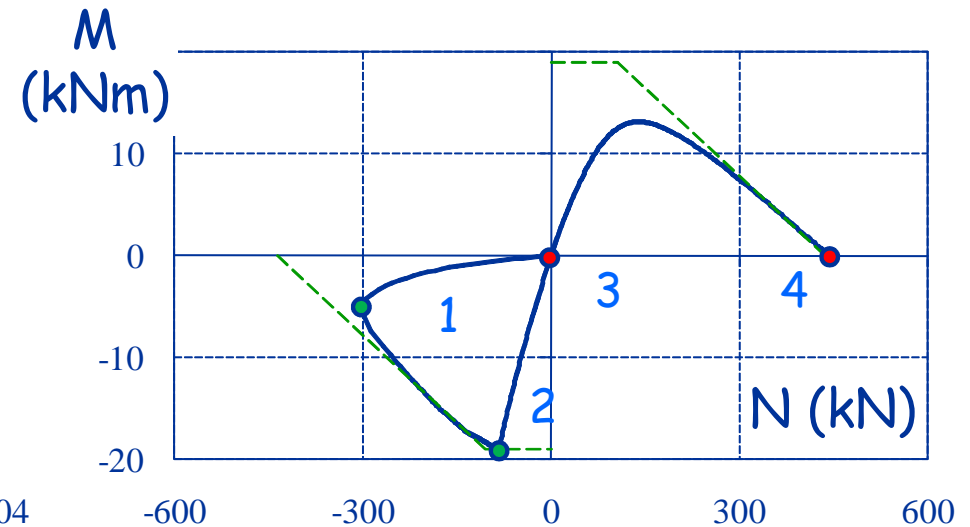
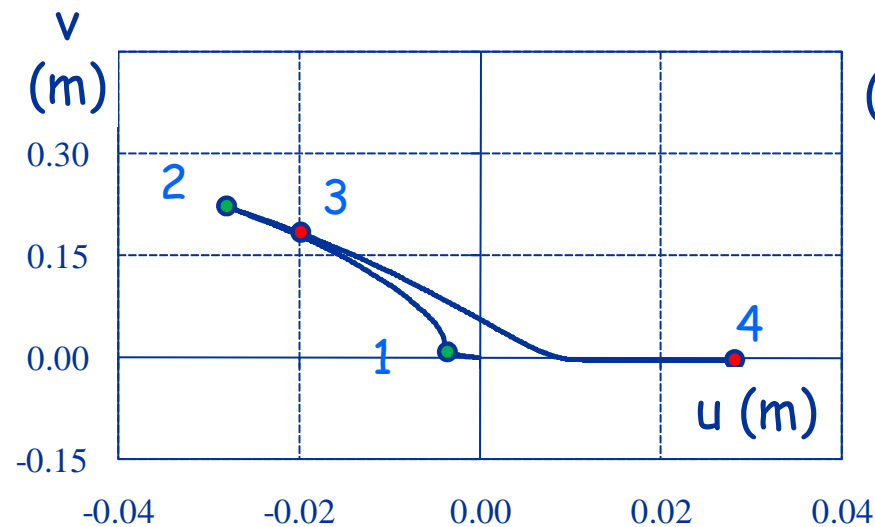
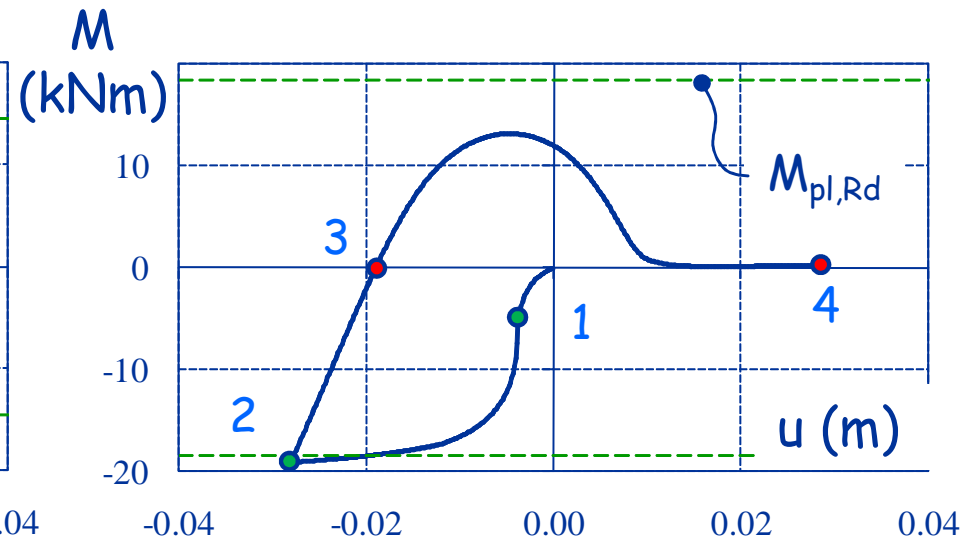
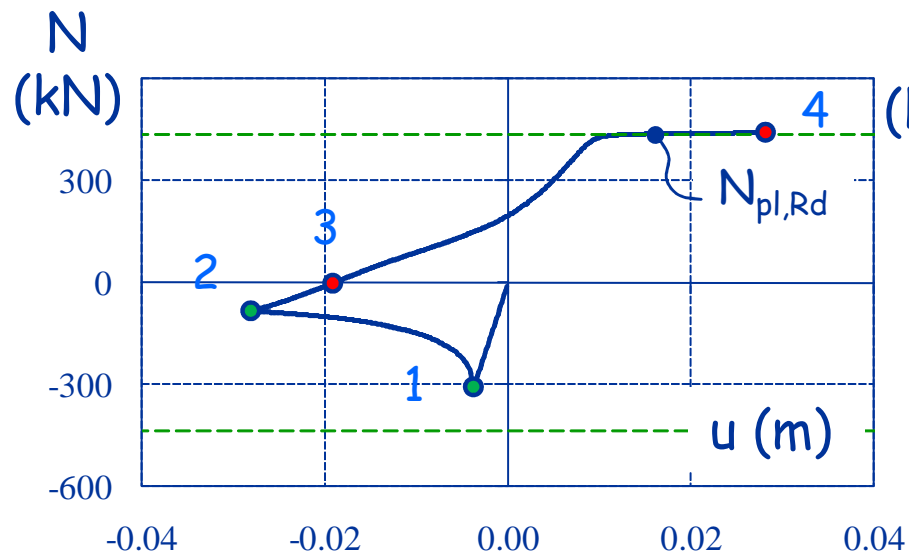
Comportamento ciclico

Esempio (snellezza normalizzata 1.05)



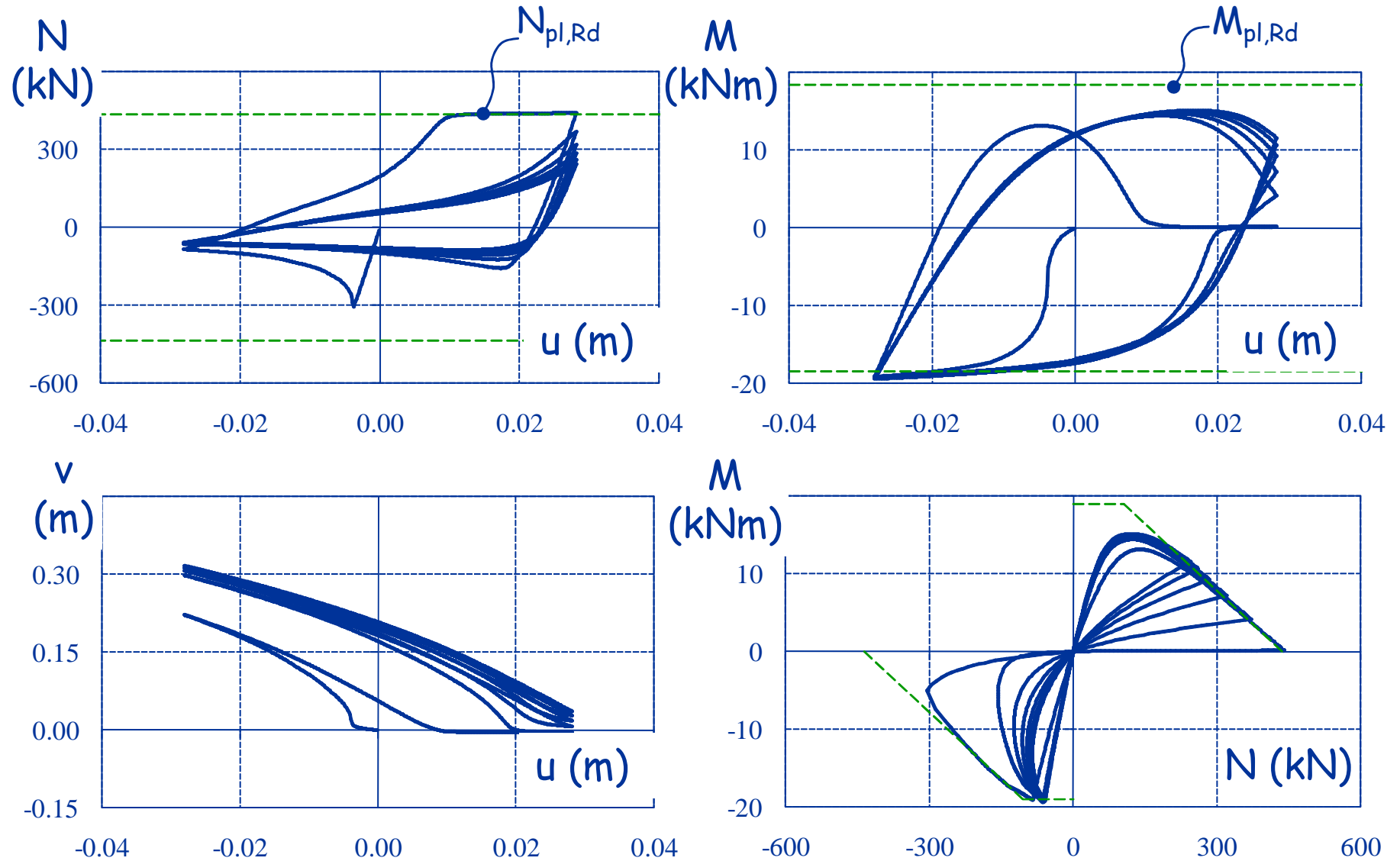
Comportamento ciclico

Esempio (snellezza normalizzata 1.05)



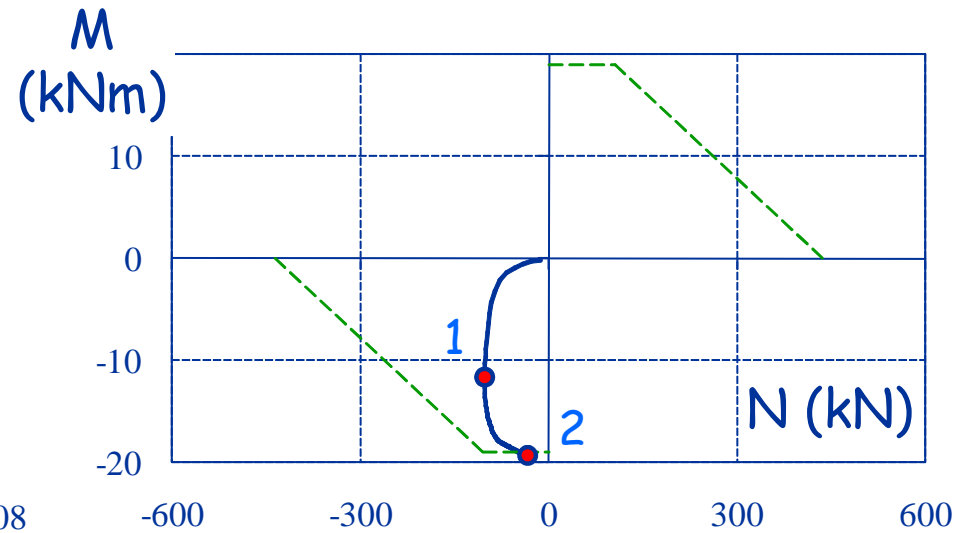
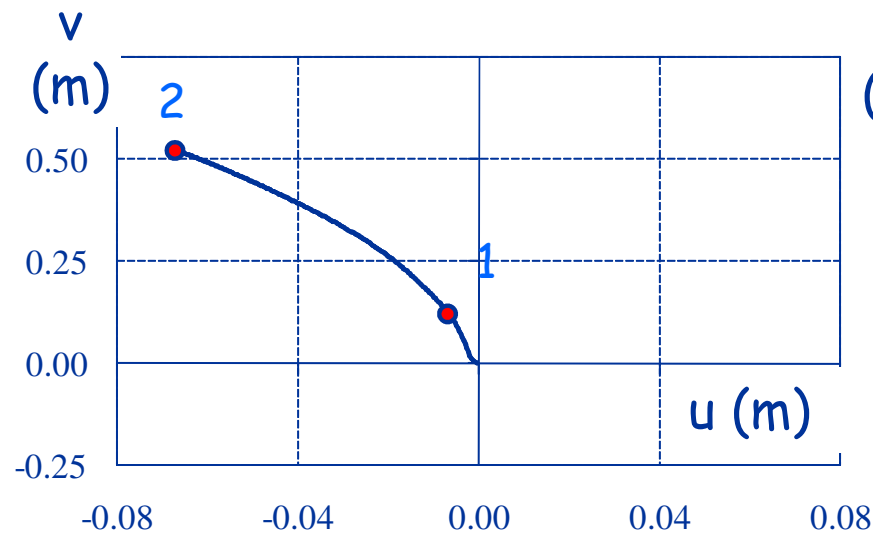
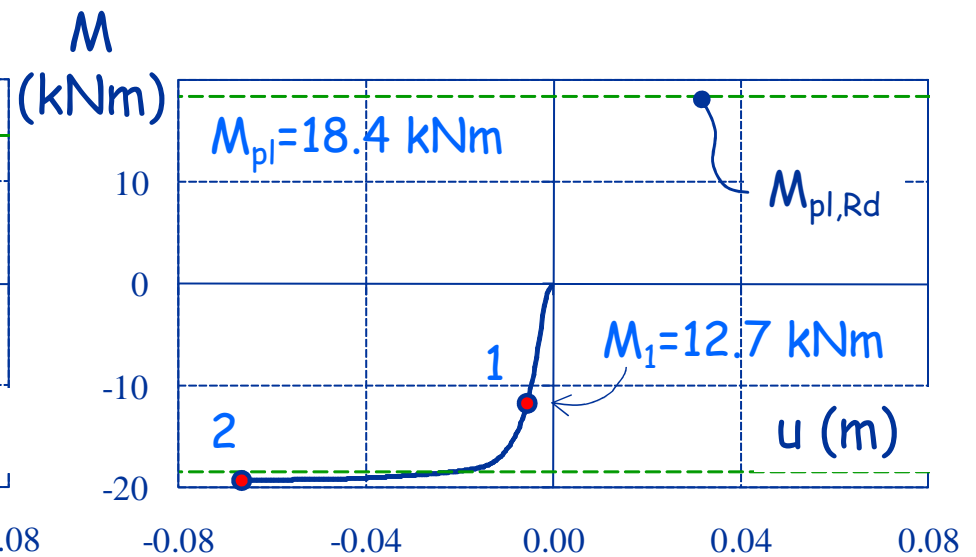
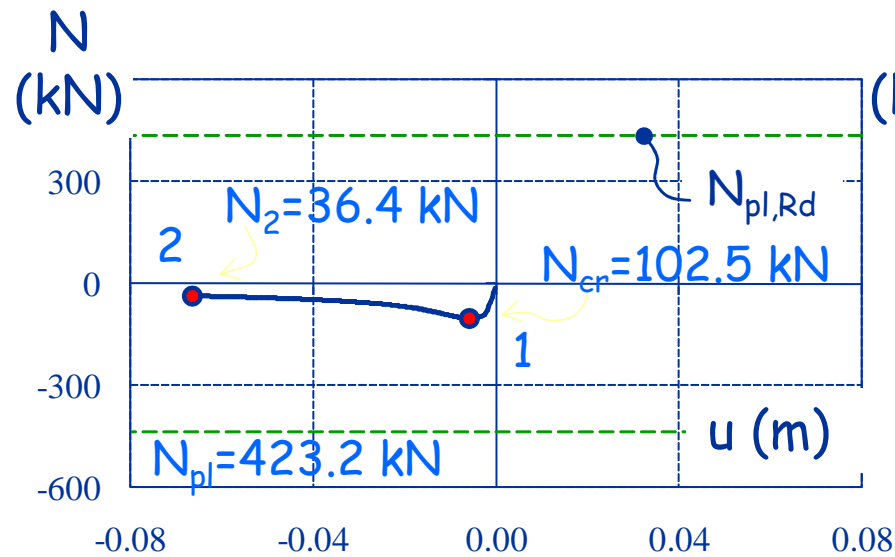
Comportamento ciclico

Esempio (snellezza normalizzata 1.05)



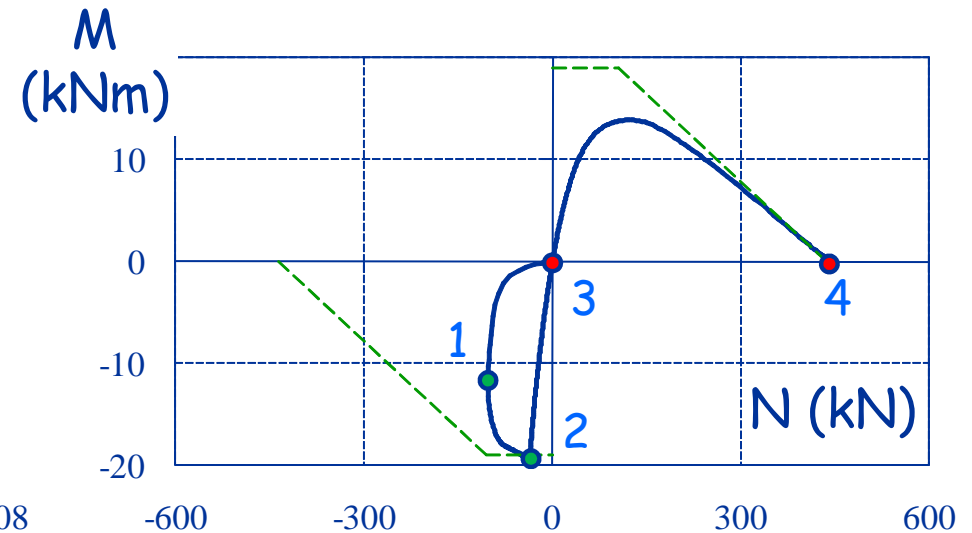
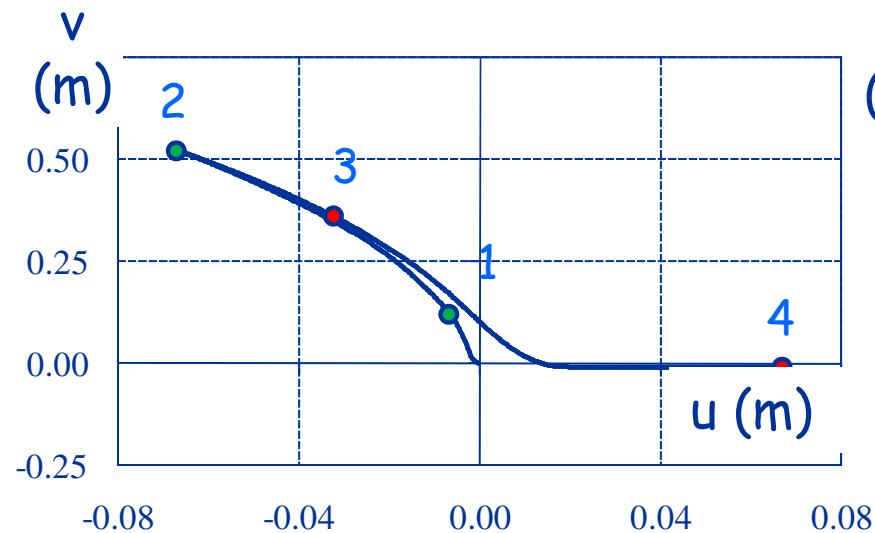
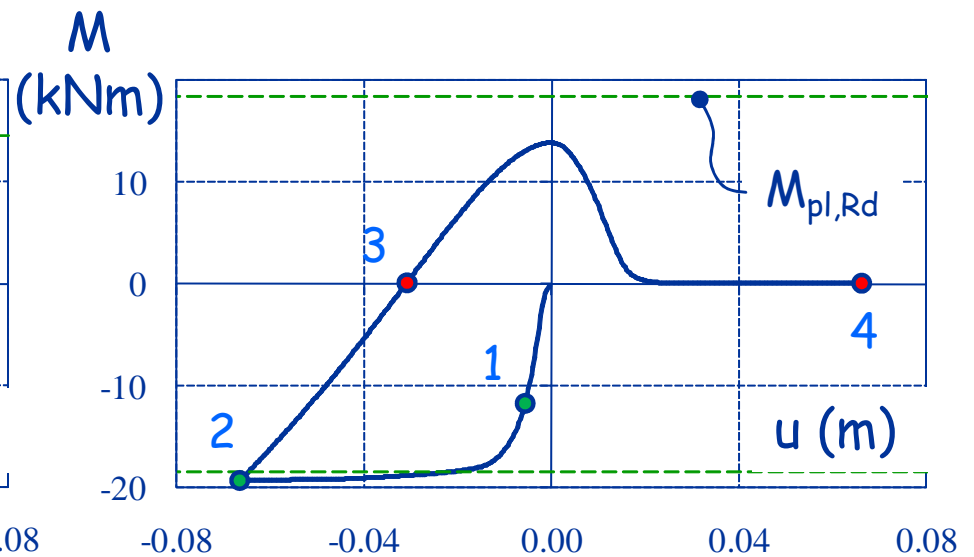
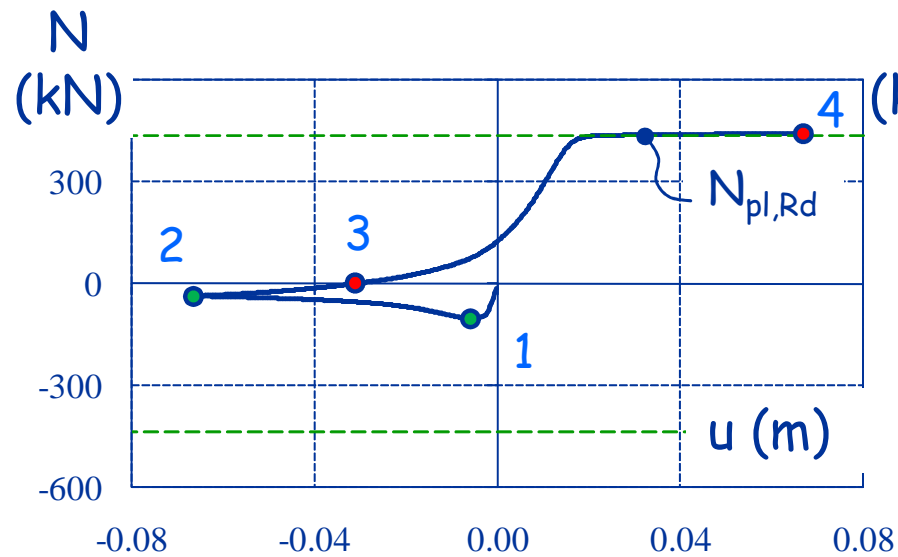
Comportamento ciclico

Esempio (snellezza normalizzata 2.05)



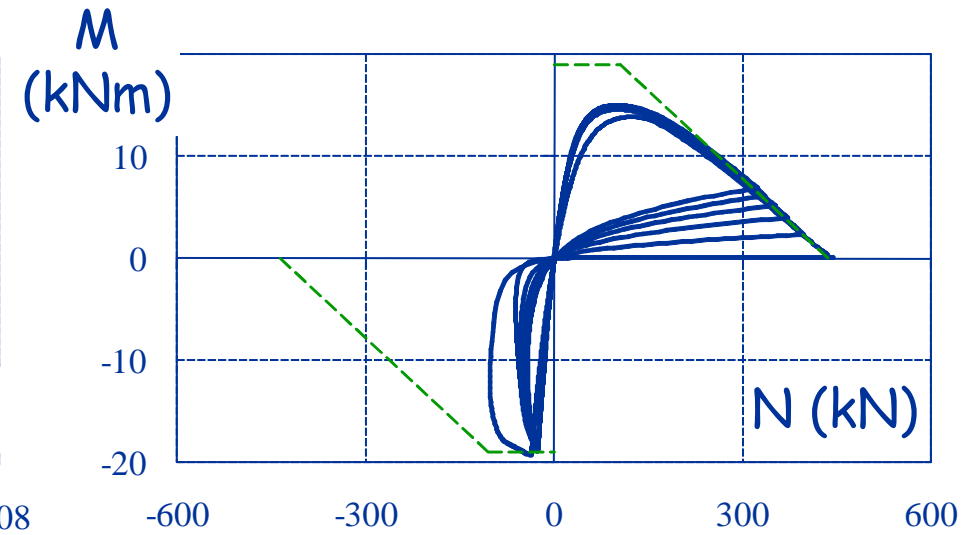
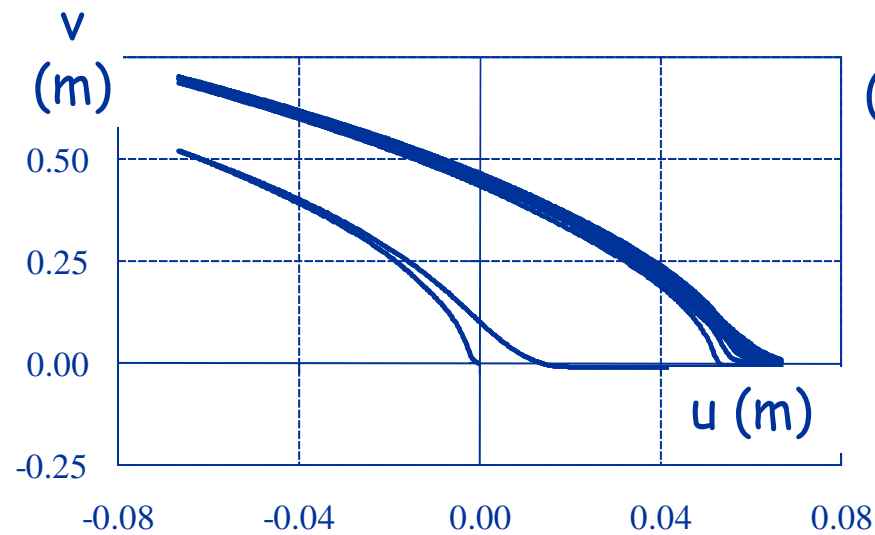
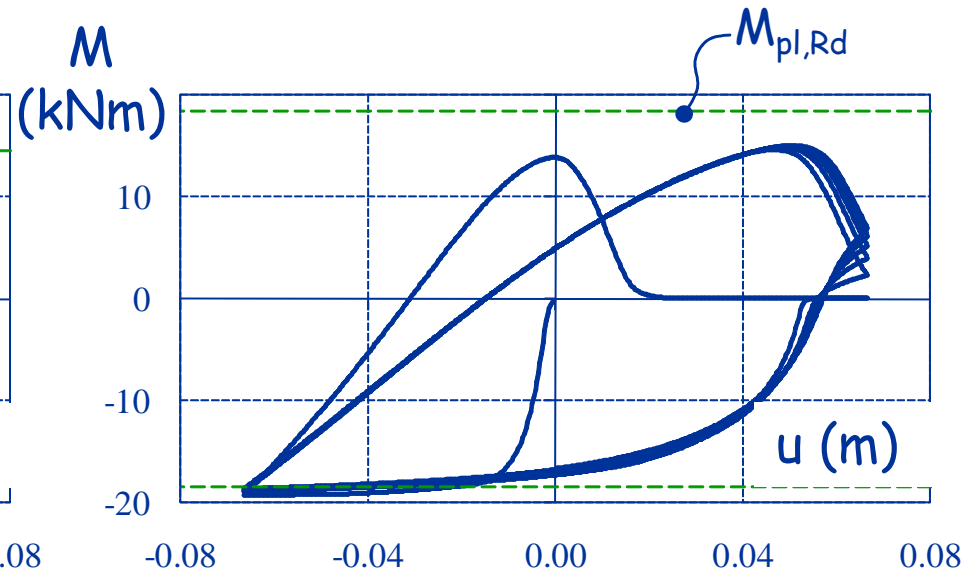
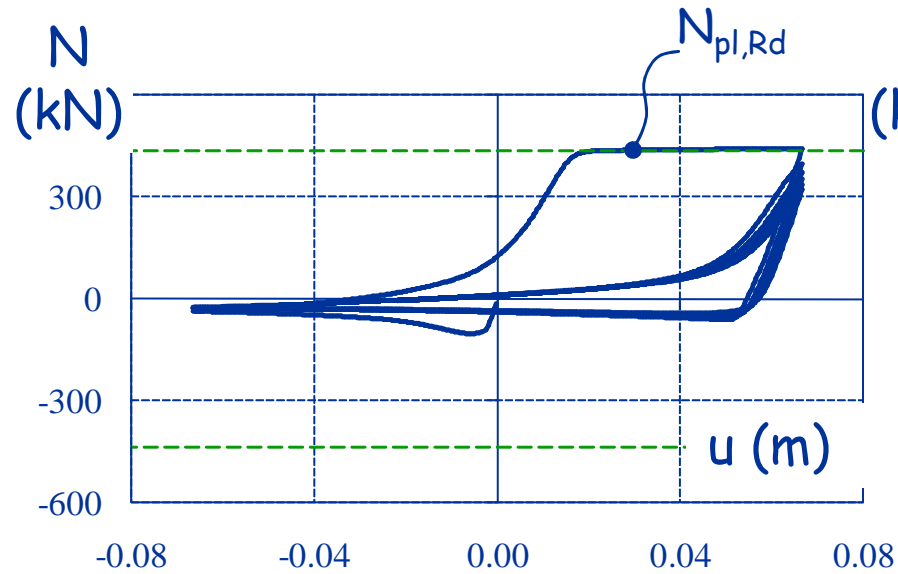
Comportamento ciclico

Esempio (snellezza normalizzata 2.05)



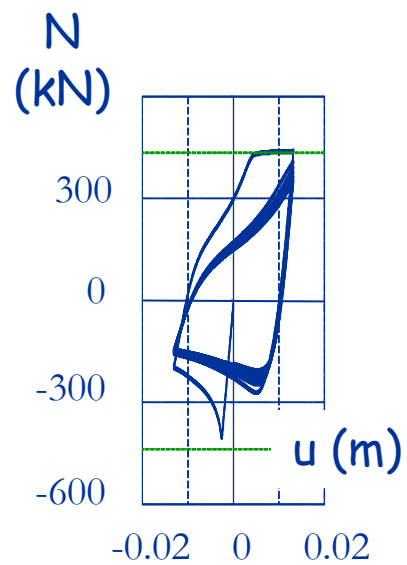
Comportamento ciclico

Esempio (snellezza normalizzata 2.05)

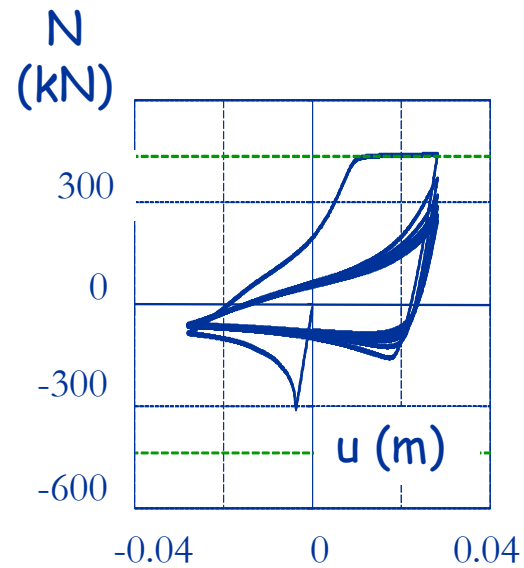


Comportamento ciclico

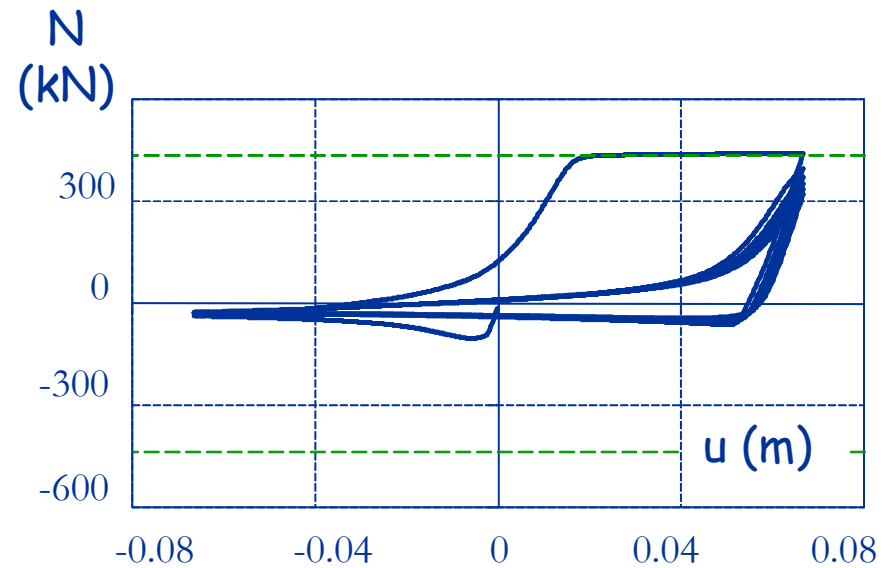
Esempio (controventi di diverse snellezza)



$\bar{\lambda} = 0.55$



$\bar{\lambda} = 1.05$



$\bar{\lambda} = 2.05$

Resistenza all'instabilità

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

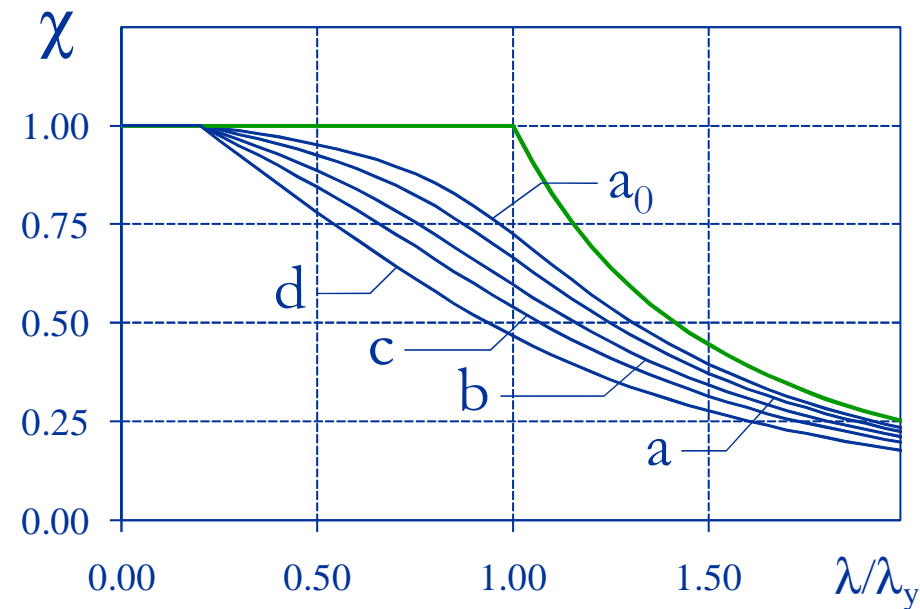
$$N_{b,Rd} = \chi A \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{per sezioni di classe 1, 2 e 3}$$

Non ammesse

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

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

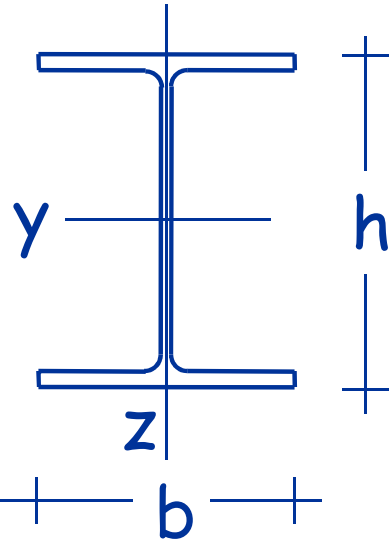

Resistenza all'instabilità



Curve d'instabilità considerate
dalle Norme Tecniche per le Costruzioni

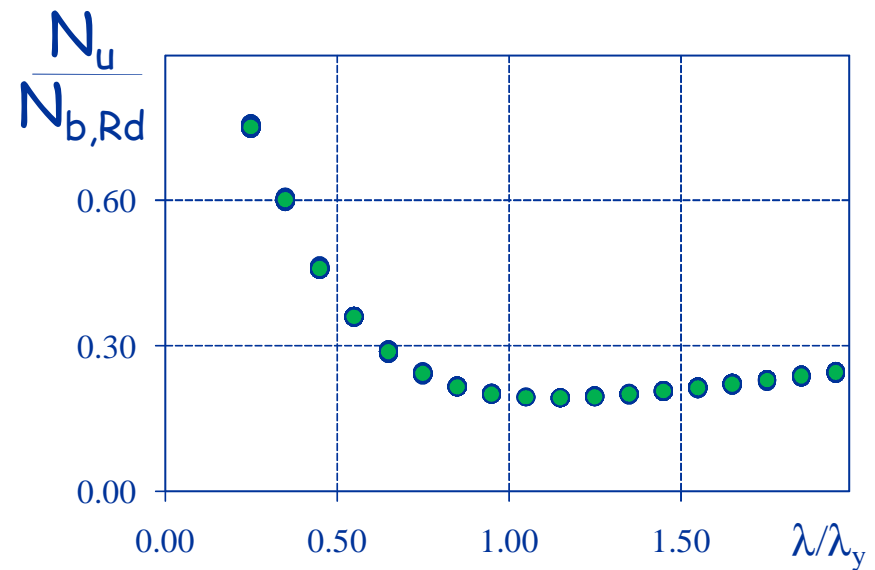
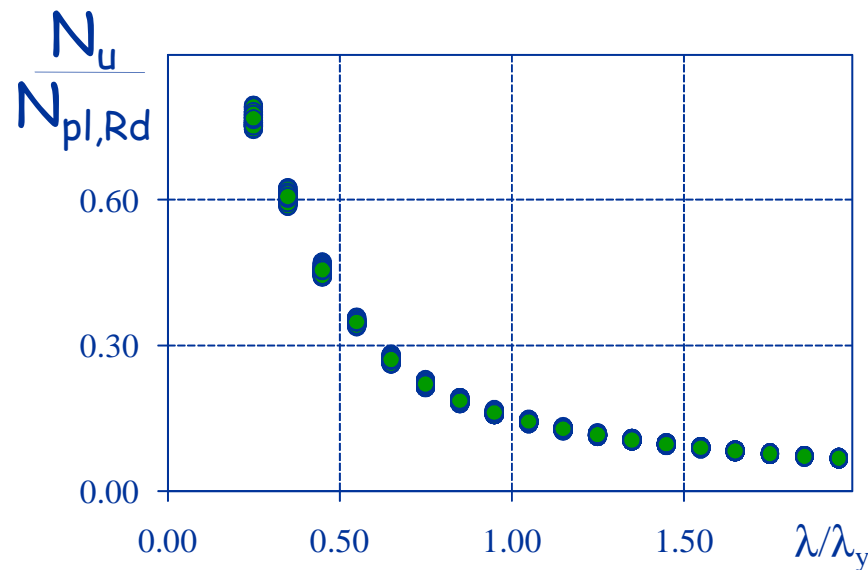
Curva d'instabilità	a_0	a	b	c	d
Fattore di imperfezione	0.13	0.21	0.34	0.49	0.765

Resistenza all'instabilità

Sezione trasversale		Limiti		Instabilità intorno all'asse	Curva	
					S235 S275 S355 S420	S460
Sezioni laminate		$h/b > 1.2$	$t_f \leq 40$ [mm]	y - y z - z	a b	a_0 a_0
			$40 < t_f \leq 100$ [mm]	y - y z - z	b c	a a
		$h/b \leq 1.2$	$t_f \leq 100$ [mm]	y - y z - z	b c	a a
			$t_f < 100$ [mm]	y - y z - z	d d	c c
Sezioni tubolari		Sezioni formata a caldo		qualunque	a	a_0
		Sezioni formata a freddo		qualunque	c	c

Resistenza post-critica

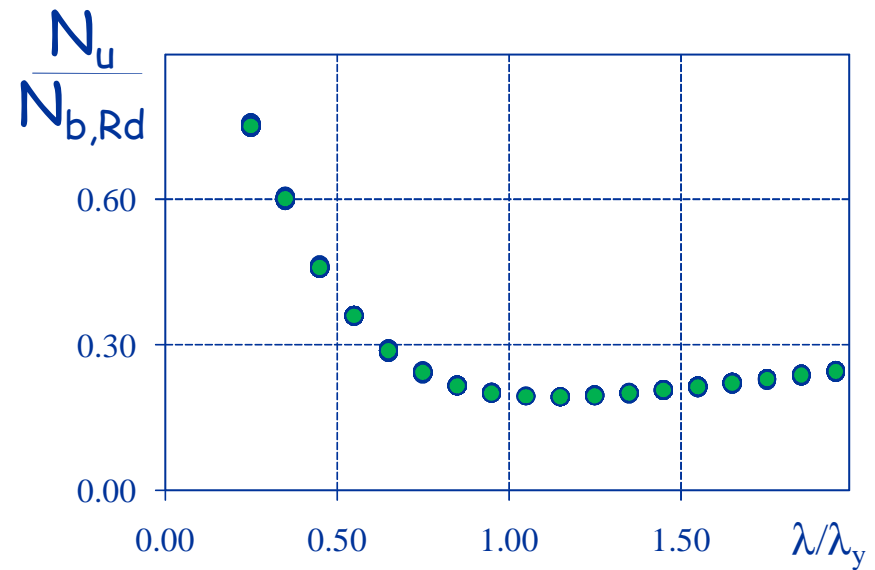
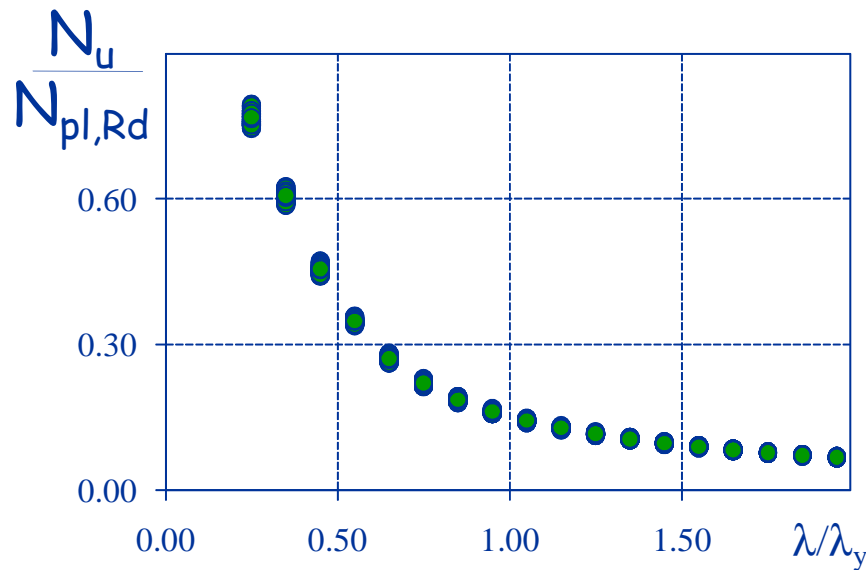
Scatolari quadrati (80X3 - 400X12)



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

Resistenza post-critica

Scatolari quadrati (80X3 - 400X12)



~~$N_{u,Rd} = \gamma_b N_{pl,Rd}$~~ oppure $N_{u,Rd} = \gamma_b N_{b,Rd}$?

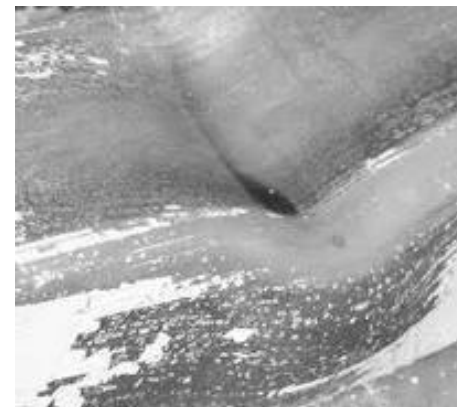
Spessori limite dei profili dei controventi

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 scatolare 46/65

Esempi d'instabilità dell'asta



Esempi d'instabilità dell'asta



Instabilità dell'asta



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

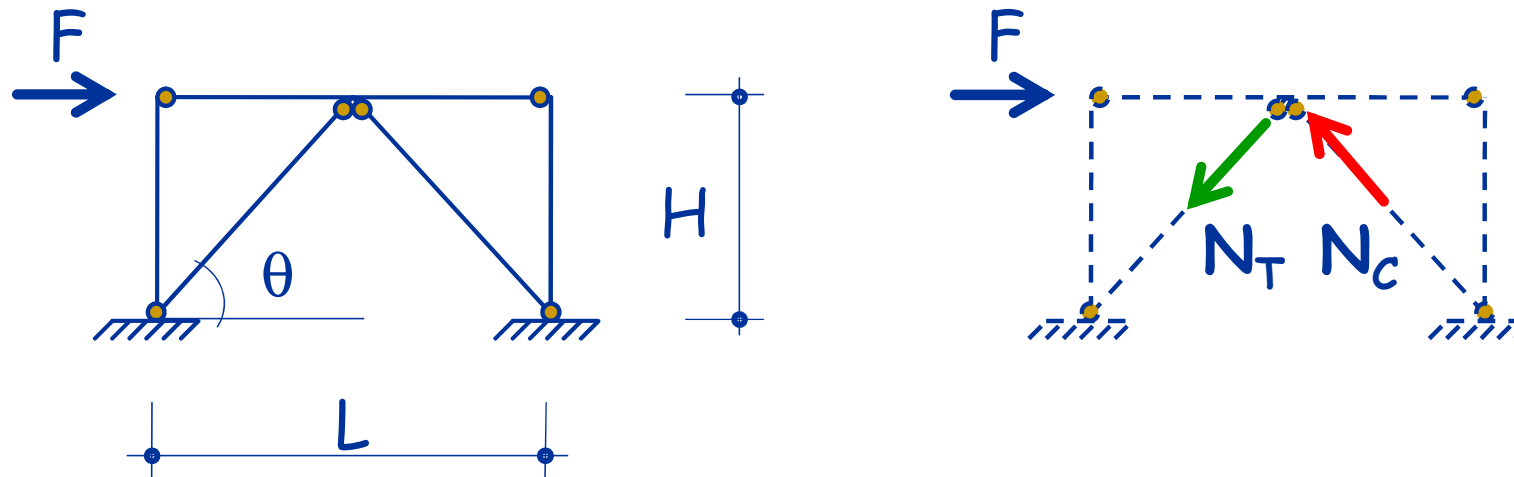


Coppia di controventi a V

Comportamento in occorrenza
di azioni laterali

Coppia di controventi a V

Comportamento sismico



Campo elastico

1. Le intensità delle due forze, N_T e N_C , sono eguali

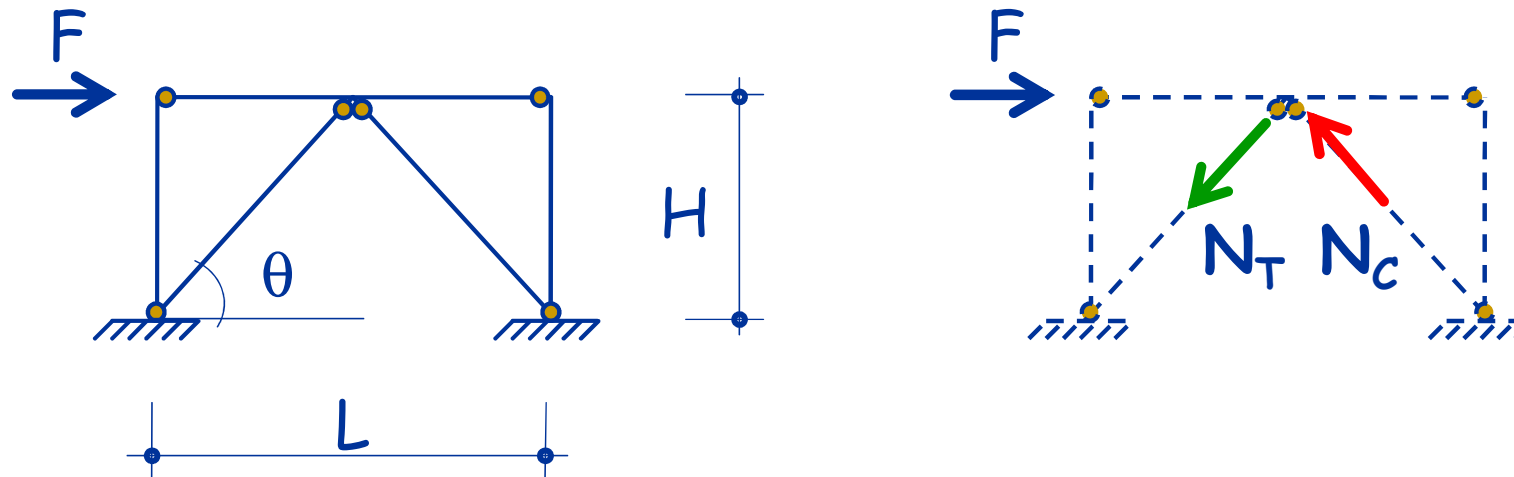
$$N_T = N_C = F / (2 \cos \theta)$$

2. Le componenti verticali sono eguali e contrarie

$$V_{trave} = M_{trave} = 0$$

Coppia di controventi a V

Comportamento sismico



Campo elastico

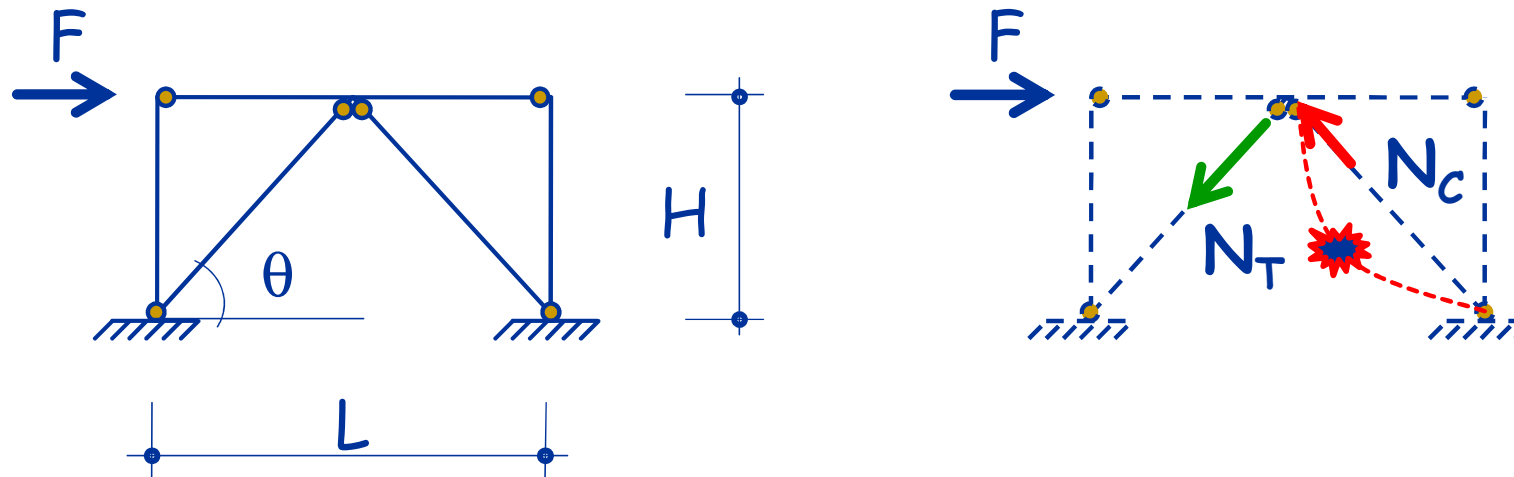
3. La rigidezza laterale di piano è

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

il contributo fornito dalle due aste diagonali è uguale

Coppia di controventi a V

Comportamento sismico

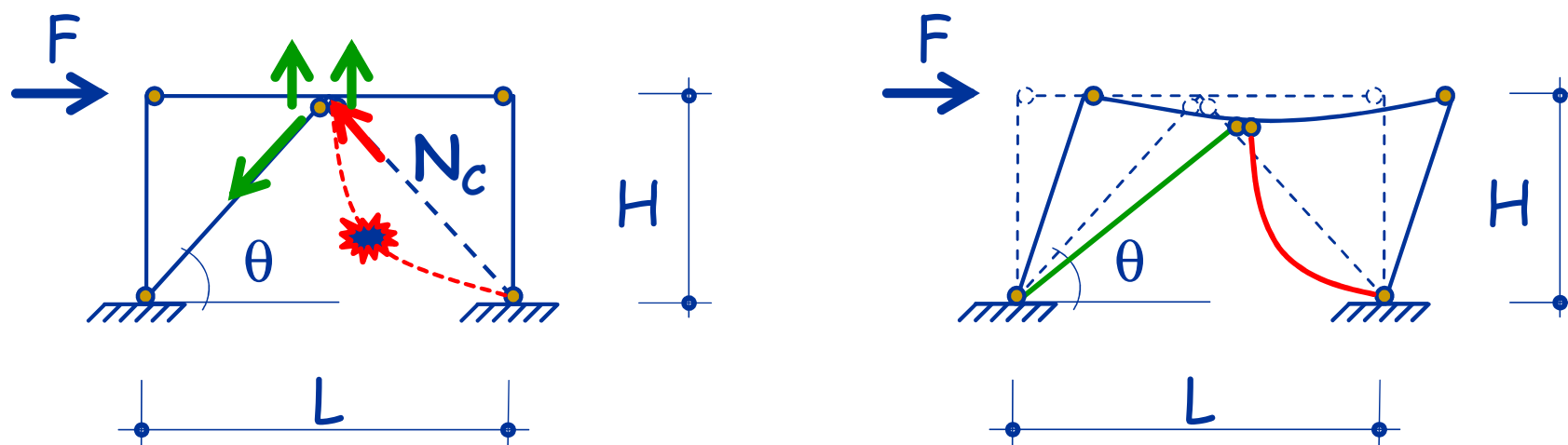


Ad instabilità avvenuta...

1. Le intensità delle due forze, N_T e N_C , non sono più uguali $N_T \neq N_C$
2. Si perde il contributo alla rigidezza laterale offerto dalla diagonale compressa

Coppia di controventi a V

Comportamento sismico

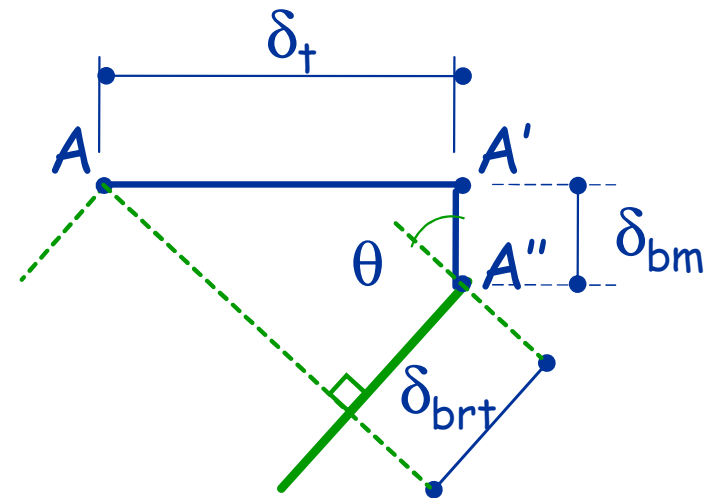
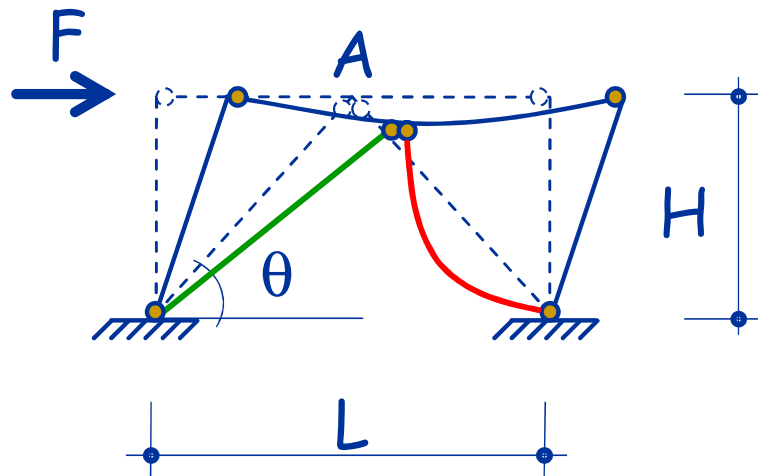


Ad instabilità avvenuta...

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

Coppia di controventi a V

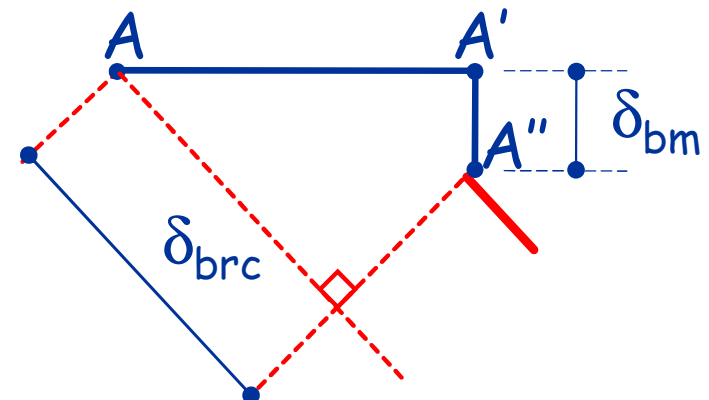
Comportamento sismico



Ad instabilità avvenuta...

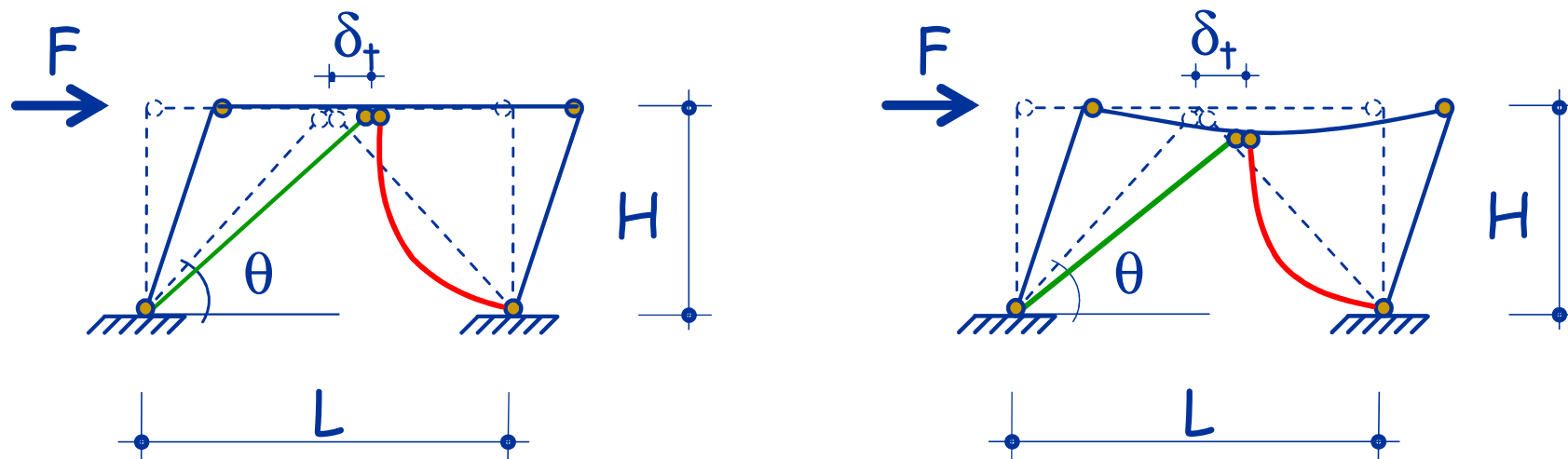
$$\delta_{brc} = \delta_{\dagger} \cos \theta + \delta_{bm} \sin \theta$$

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



Coppia di controventi a V

Comportamento sismico



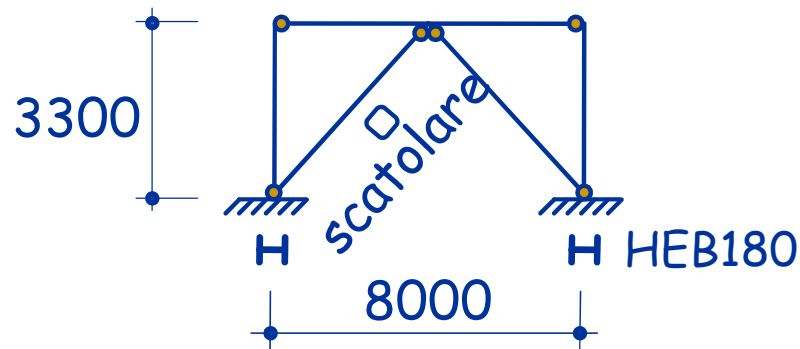
Ad instabilità avvenuta...

5. 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

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

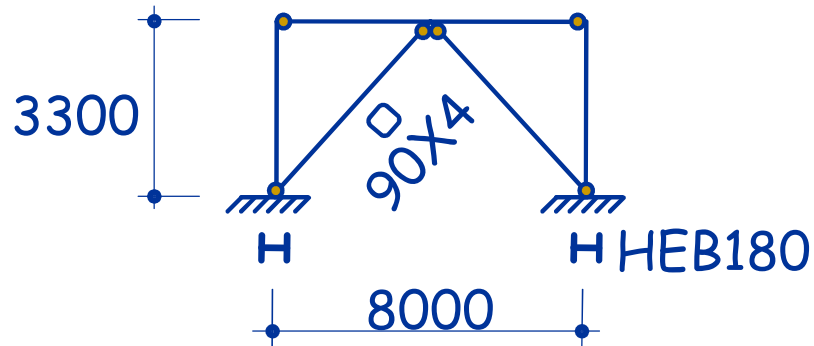
Snellezza 90.74

Snellezza limite plastico 93.01

Snellezza
adimensionalizzata 0.98

Coppia di controventi a V

Esempio 1: Trave infinitamente rigida

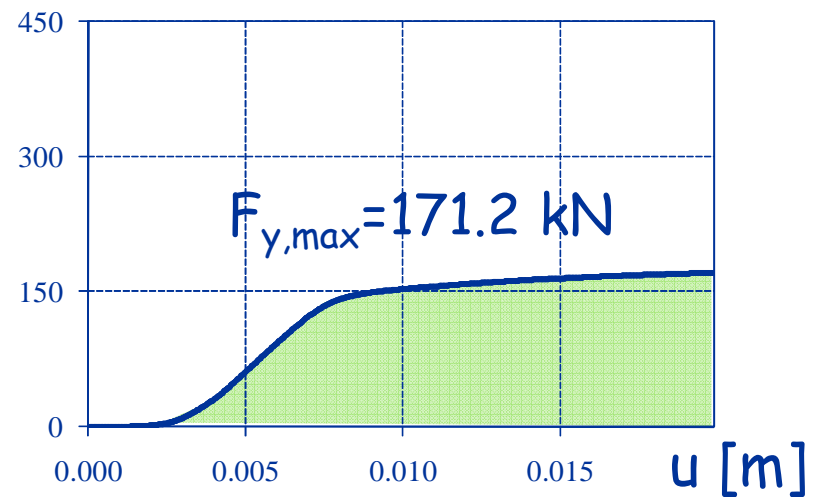
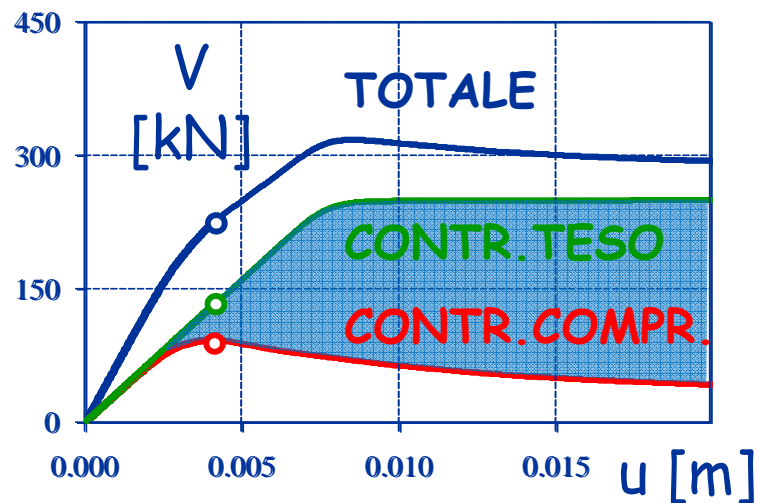


Controvento

Snellezza adimensionalizzata 1.61

Taglio esterno di prima instabilità 223.7 kN

Taglio esterno max 318.3 kN

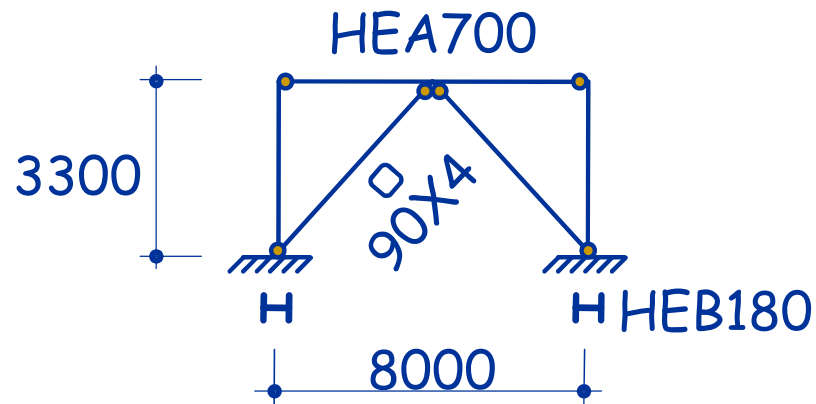


Tagli resistenti indotti dai controventi

Forza verticale squilibrata_{58/65}

Coppia di controventi a V

Esempio 1: Trave forte

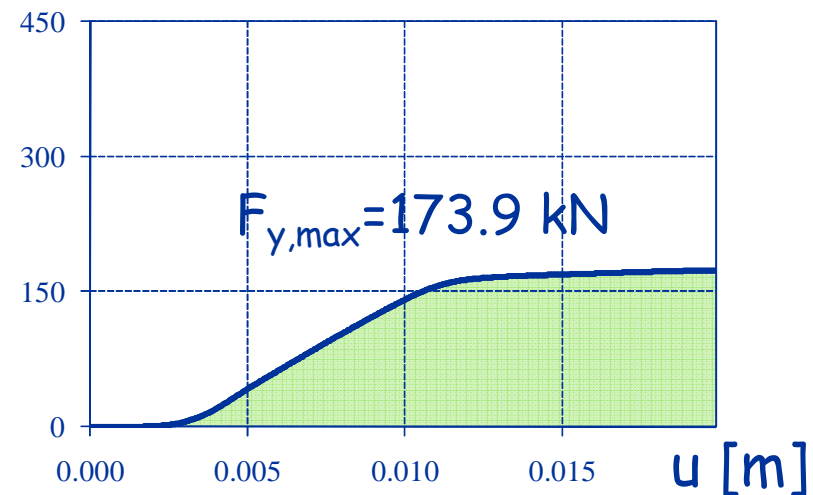
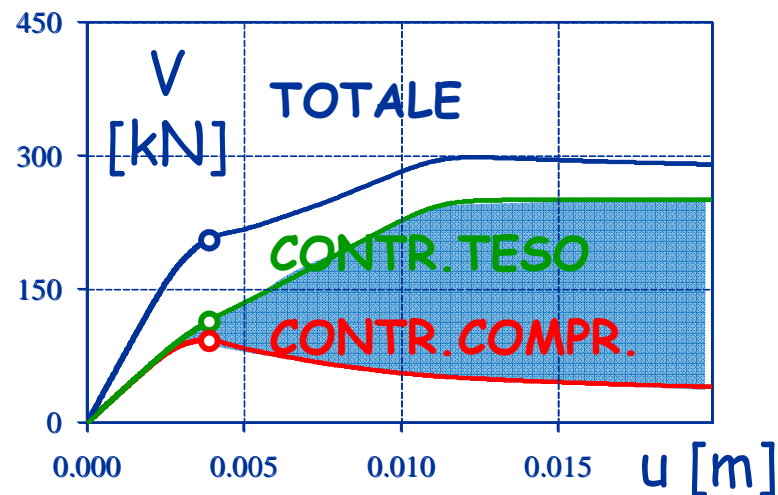


Controvento

Snellezza adimensionalizzata 1.61

Taglio esterno di prima instabilità 205.3 kN

Taglio esterno max 297.5 kN

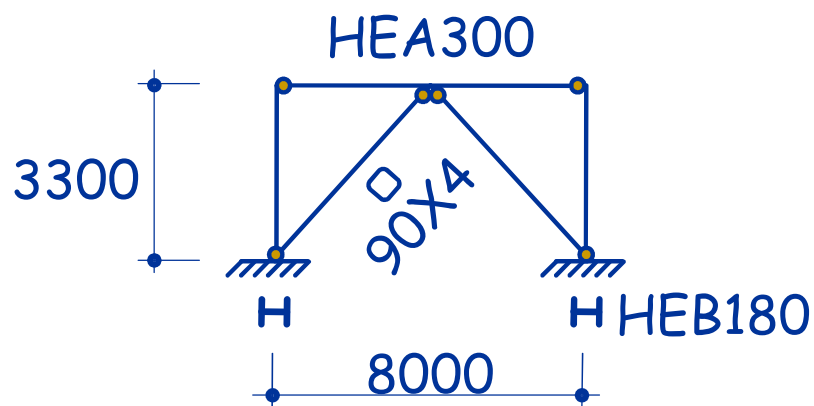


Tagli resistenti indotti dai controventi

Forza verticale squilibrata_{59/65}

Coppia di controventi a V

Esempio 1: Trave debole

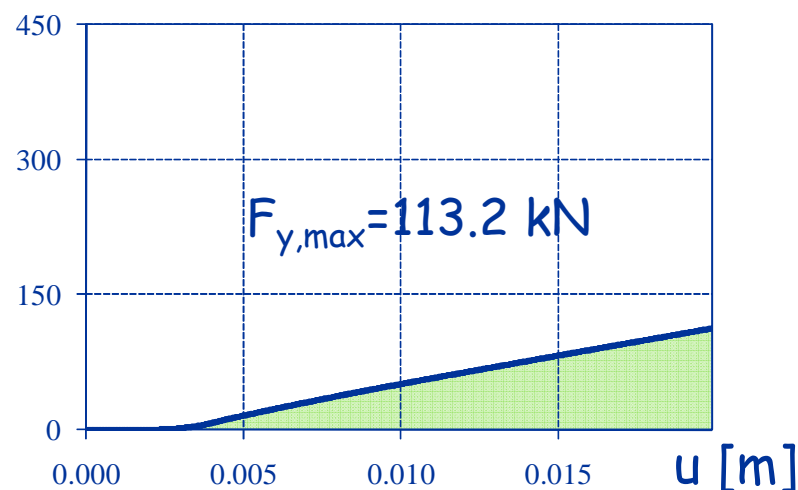
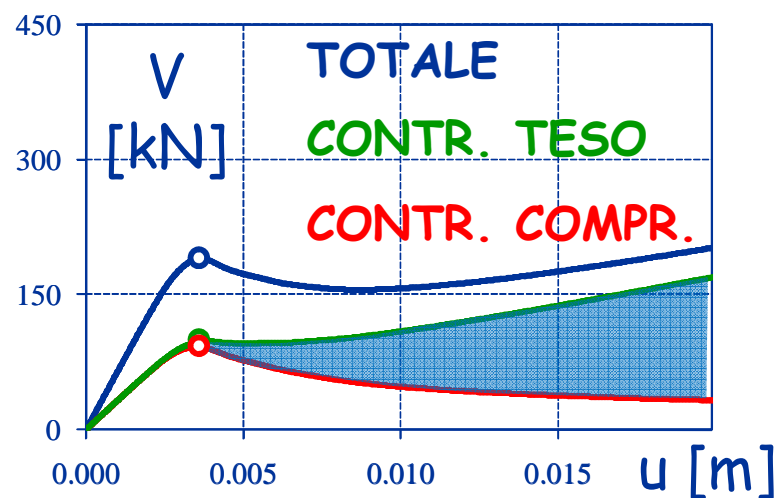


Controvento

Snellezza adimensionalizzata 1.61

Taglio esterno di prima instabilità 190.9 kN

Taglio esterno max 202.4 kN

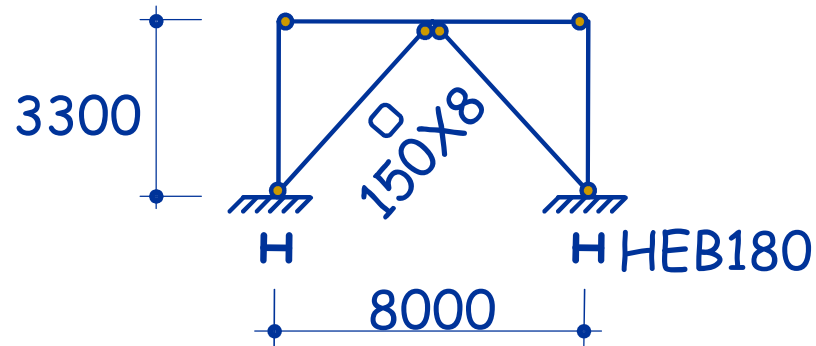


Tagli resistenti indotti dai controventi

Forza verticale squilibrata_{60/65}

Coppia di controventi a V

Esempio 2: Trave infinitamente rigida

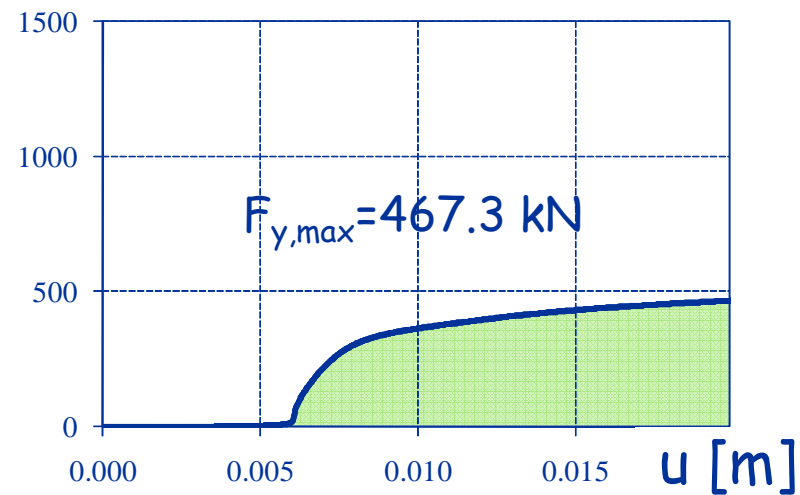
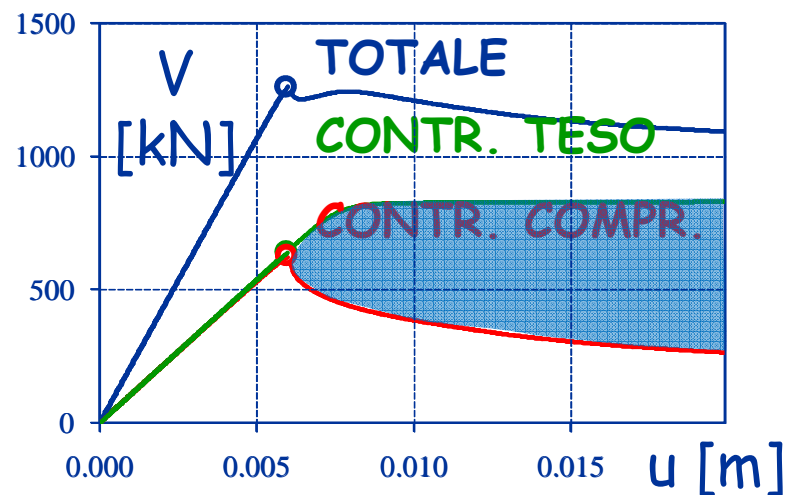


Controvento

Snellezza adimensionalizzata 0.98

Taglio esterno di prima instabilità 1263.3 kN

Taglio esterno max 1265.8 kN

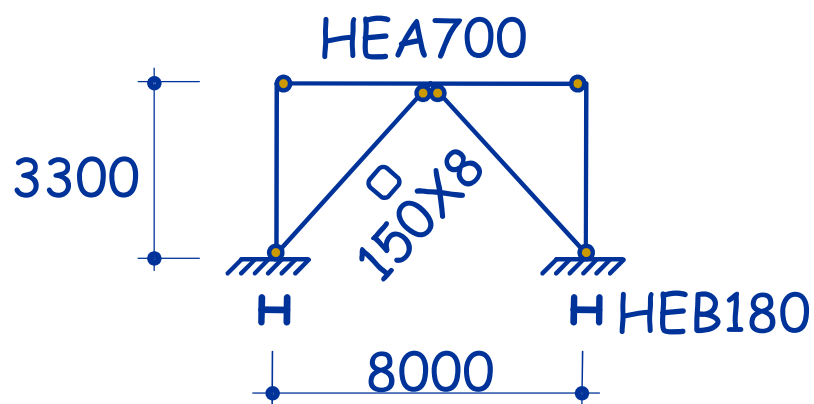


Tagli resistenti indotti dai controventi

Forza verticale squilibrata_{61/65}

Coppia di controventi a V

Esempio 2: Trave forte

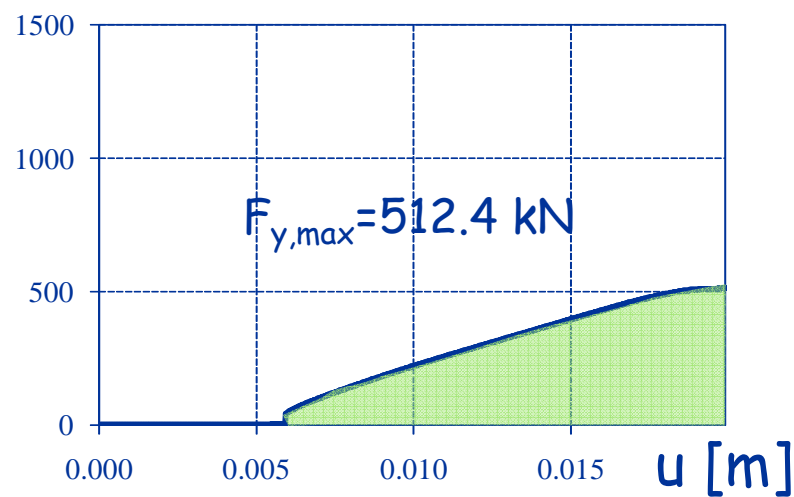
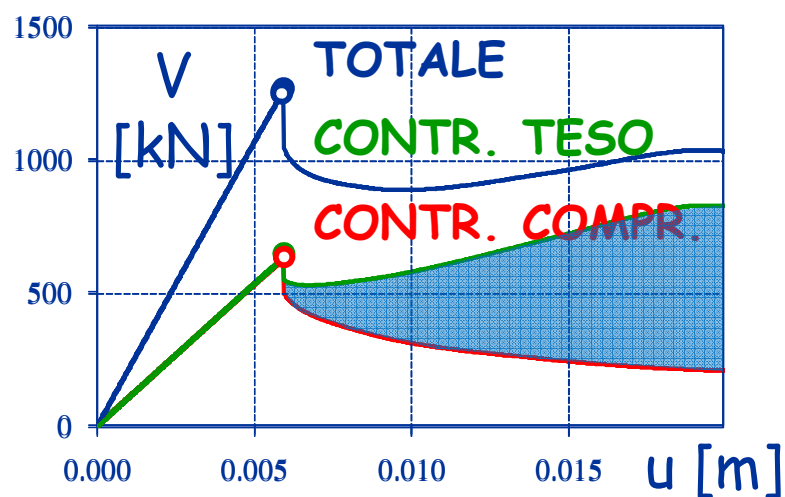


Controvento

Snellezza adimensionalizzata 0.98

Taglio esterno di prima instabilità 1249.2 kN

Taglio esterno max 1249.2 kN

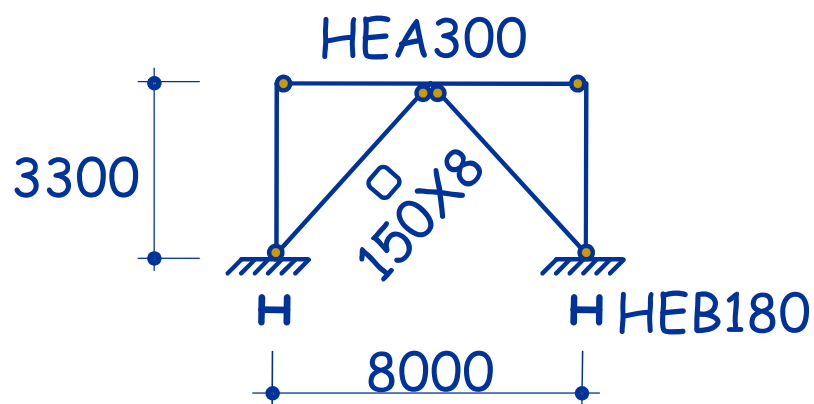


Tagli resistenti indotti dai controventi

Forza verticale squilibrata_{62/65}

Coppia di controventi a V

Esempio 2: Trave debole

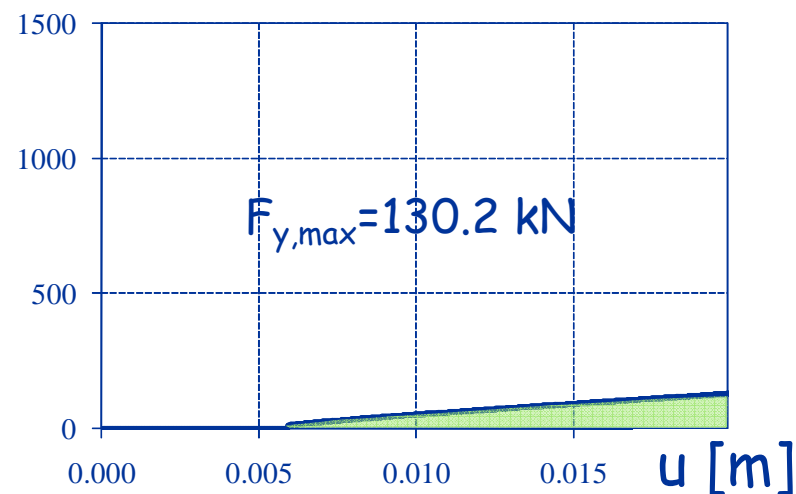
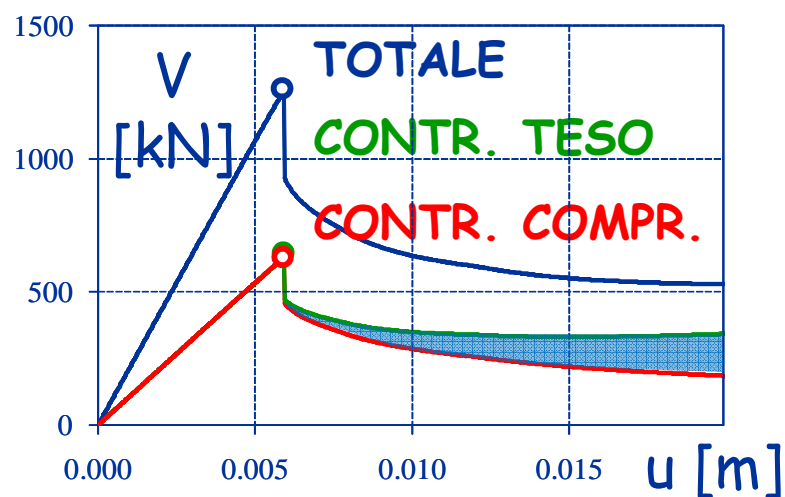


Controvento

Snellezza adimensionalizzata 0.98

Taglio esterno di prima instabilità 1245.6 kN

Taglio esterno max 1245.6 kN



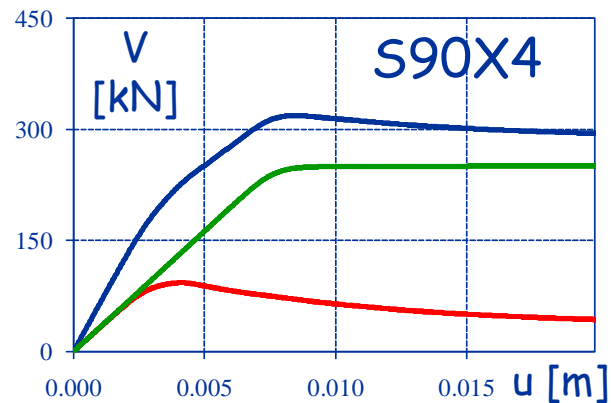
Tagli resistenti indotti dai controventi

Forza verticale squilibrata

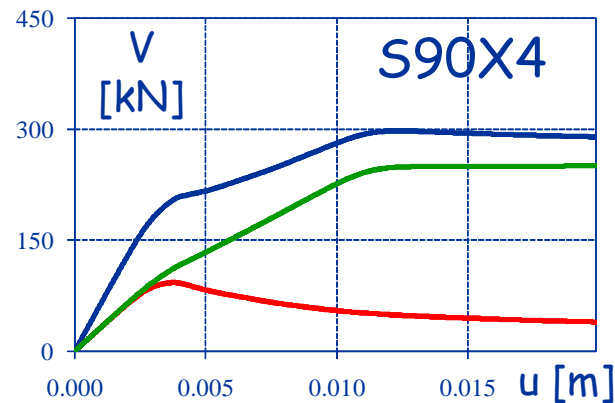
Coppia di controventi a V

Riepilogo

Trave infinit. rigida



Trave forte



Trave debole

