

Corso di aggiornamento
Progettazione strutturale e
Norme Tecniche per le Costruzioni 2008

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

8 - Strutture con controventi eccentrici tradizionali
Criteri di progetto

Spoletto
11-12 maggio 2012
Aurelio Ghersi

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-colonna
- punti di travi o colonne in cui convergono altre diagonali.

Classificazione dei controventi in acciaio

1. STRUTTURE CON CONTROVENTI ECCENTRICI

Il controvento è costituito da un telaio controventato con diagonali che **non convergono** (ad entrambe le estremità):

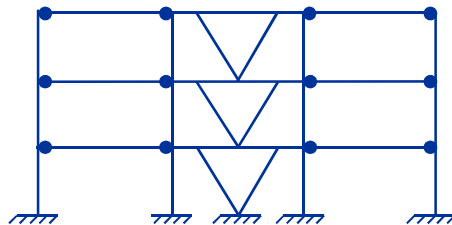
- in un nodo trave-colonna
- in punti di travi o colonne in cui converge un'altra diagonale.

Classificazione dei controventi in acciaio

1. STRUTTURE CON CONTROVENTI ECCENTRICI

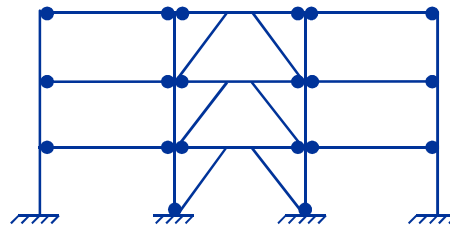
Le intersezioni delle diagonali con la trave individuano conci denominati Link

Caso 1



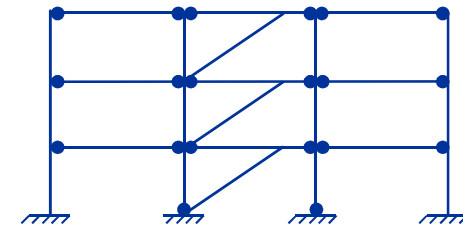
Link
orizzontale

Caso 2



Link
orizzontale

Caso 3



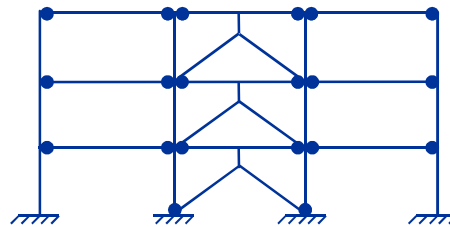
Link
orizzontale

Classificazione dei controventi in acciaio

1. STRUTTURE CON CONTROVENTI ECCENTRICI

Le intersezioni delle diagonali con la trave individuano conci denominati Link

Caso 4



Link verticale

Strutture con Controventi Eccentrici: Esempi



Controventi eccentrici nella
tipologia a K



Controventi eccentrici nella
tipologia a D

Strutture con Controventi Eccentrici: Esempi



Controventi eccentrici nella tipologia a K

Definizione del fattore di struttura (q_0)

	CD "B"	CD "A"
Strutture a telaio, con controventi eccentrici	4.0	$5.0 \alpha_u / \alpha_1$
Controventi concentrici a diagonale tesa attiva	4.0	4.0
Controventi concentrici a V	2.0	2.5

Per edifici regolari in pianta, a più piani e con controventi eccentrici $\frac{\alpha_u}{\alpha_1} = 1.2$

Spessori limite dei profili

REGOLA GENERALE (per tutte le strutture in acciaio)
per parti compresse e/o inflesse delle zone dissipative

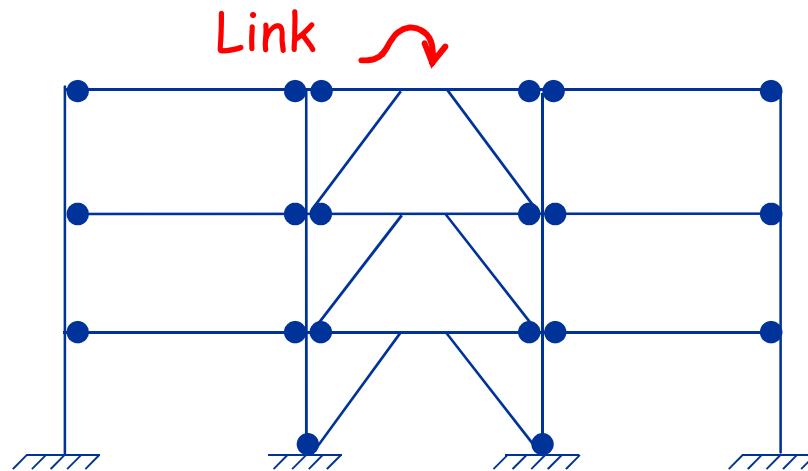
Garantire una duttilità locale sufficiente degli elementi che dissipano energia in compressione e/o flessione limitando il rapporto larghezza-spessore b/t secondo le classi di sezioni trasversali specificate nelle presenti norme, in funzione della classe di duttilità e del fattore di struttura q_0 usato in fase di progetto.

Classe di duttilità	Valore di riferimento del fattore di struttura	Classe di sezione trasversale richiesta
CD "B"	$2 \leq q_0 \leq 4$	1 oppure 2
CD "A"	$q_0 > 4$	1

Strutture con controventi eccentrici

I controventi eccentrici dividono le travi dei telai in due o più parti.

L'«elemento di connessione» o «link», ha il compito di dissipare l'energia sismica attraverso deformazioni plastiche cicliche taglienti e/o flessionali.



Configurazione geometrica del telaio con controventi eccentrici

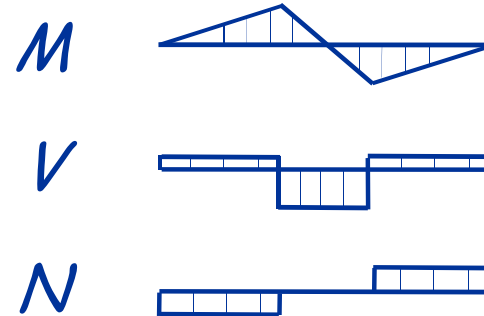
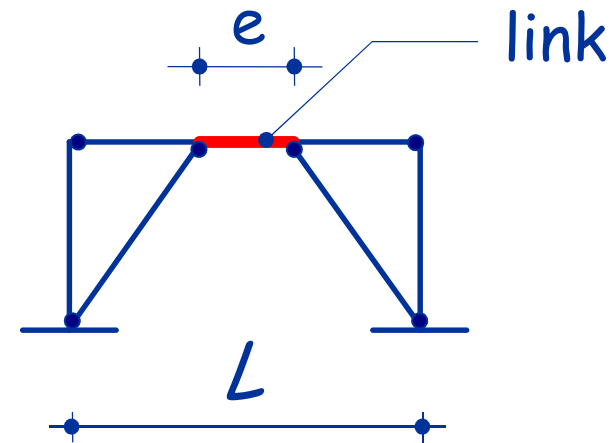
Tipologia a K

Vantaggi:

Il link non presenta collegamenti alle estremità
(è parte della trave)

Svantaggi:

Richiede lunghezze non
piccole della campata
controventata.



Configurazione geometrica del telaio con controventi eccentrici

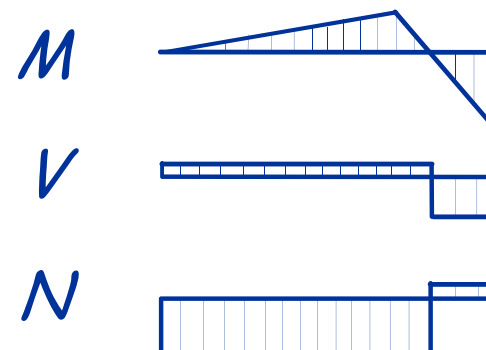
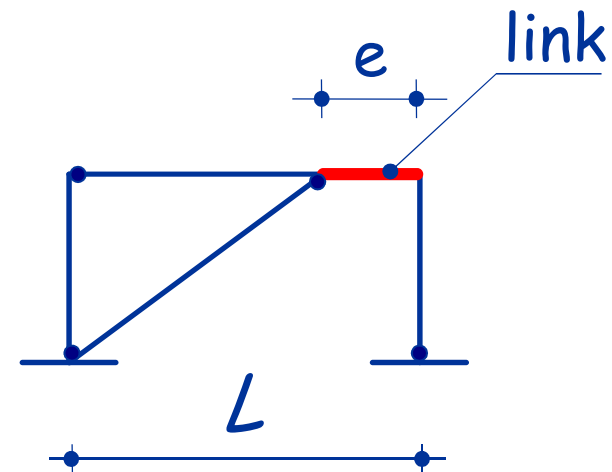
Tipologia a D

Vantaggi:

Non sono richieste lunghezze elevate della campata controventata.

Svantaggi:

- Il link e' soggetto anche a sforzo normale.
- Il collegamento del link alla colonna rappresenta il punto debole nel meccanismo resistente del link.



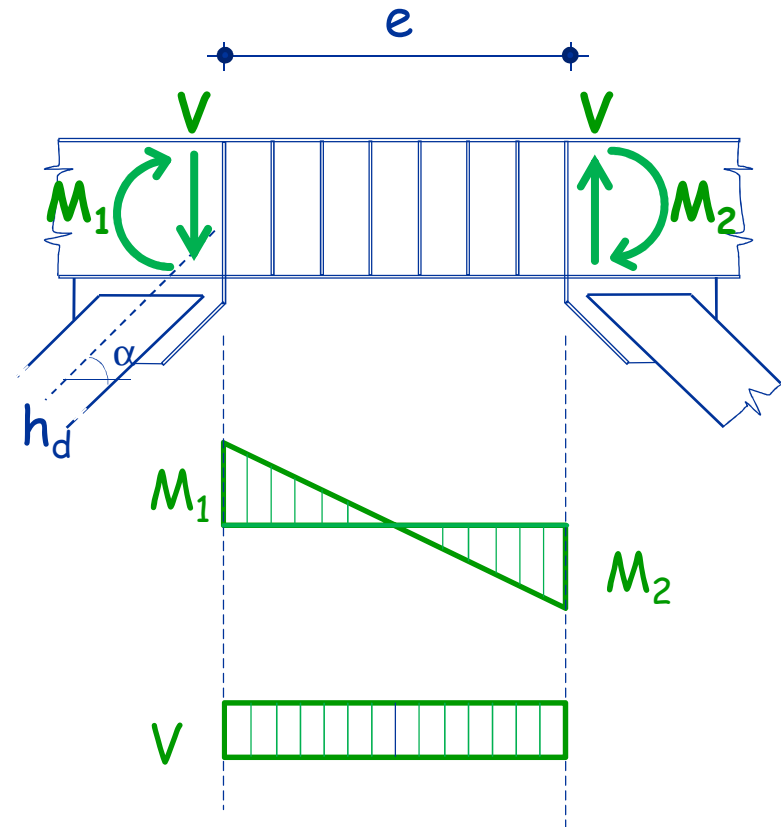
Caratteristiche della sollecitazione nei link

Le caratteristiche della sollecitazione sono collegate da una relazione di equilibrio alla rotazione

$$V = \frac{M_1 + M_2}{e}$$

Nella tipologia a K
(se si trascurano i momenti da carichi verticali) si ha:

$$V = \frac{2 M}{e}$$



Sollecitazione plastiche dei link

Il link si plasticizza per taglio o per flessione ?

Se :

$$\frac{V_{pl,Rd}}{V_{Ed}} < \frac{M_{pl,Rd}}{M_{Ed}}$$

il link si plasticizza per taglio

$$\frac{V_{pl,Rd}}{V_{Ed}} = \frac{M_{pl,Rd}}{M_{Ed}}$$

il link si plasticizza contemporaneamente
per taglio e per flessione





$$\frac{V_{pl,Rd}}{V_{Ed}} > \frac{M_{pl,Rd}}{M_{Ed}}$$

il link si plasticizza per flessione

Sollecitazione plastiche dei link

In virtù della relazione di equilibrio

$$V = \frac{2 M}{e}$$

$\frac{V_{pl,Rd}}{V_{Ed}} < \frac{M_{pl,Rd}}{M_{Ed}}$		$\frac{V_{pl,Rd}}{V_{Ed}} < \frac{2 M_{pl,Rd}}{e V_{Ed}}$		$\frac{e V_{pl,Rd}}{M_{pl,Rd}} < 2$
$\frac{V_{pl,Rd}}{V_{Ed}} = \frac{M_{pl,Rd}}{M_{Ed}}$				$\frac{e V_{pl,Rd}}{M_{pl,Rd}} = 2$
$\frac{V_{pl,Rd}}{V_{Ed}} > \frac{M_{pl,Rd}}{M_{Ed}}$				$\frac{e V_{pl,Rd}}{M_{pl,Rd}} > 2$

Sollecitazione plastiche dei link

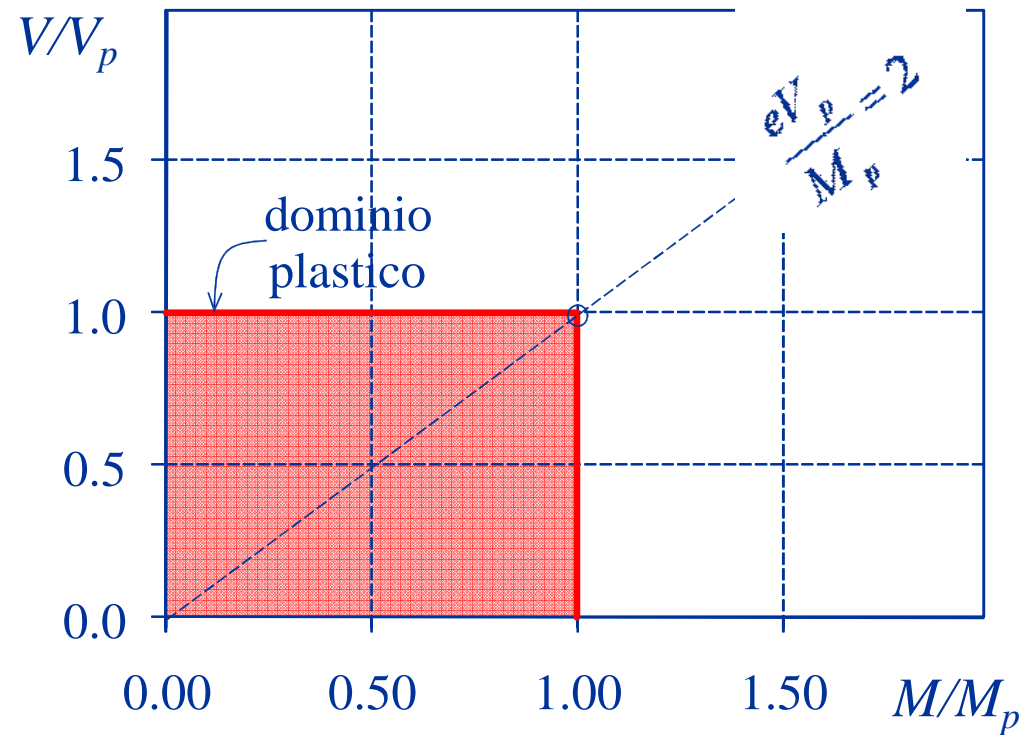
Il valore delle caratteristiche della sollecitazione corrispondenti alla piena plasticizzazione della sezione e' influenzato in modo trascurabile dall'interazione tra il taglio e il momento flettente

$$V_y = V_{pl,Rd} \quad e \quad M_y = \frac{e V_{pl,Rd}}{2} \quad \frac{e V_{pl,Rd}}{M_{pl,Rd}} < 2$$

$$V_y = \frac{2 M_{pl,Rd}}{e} \quad e \quad M_y = M_{pl,Rd} \quad \frac{e V_{pl,Rd}}{M_{pl,Rd}} > 2$$

Sollecitazione plastiche dei link

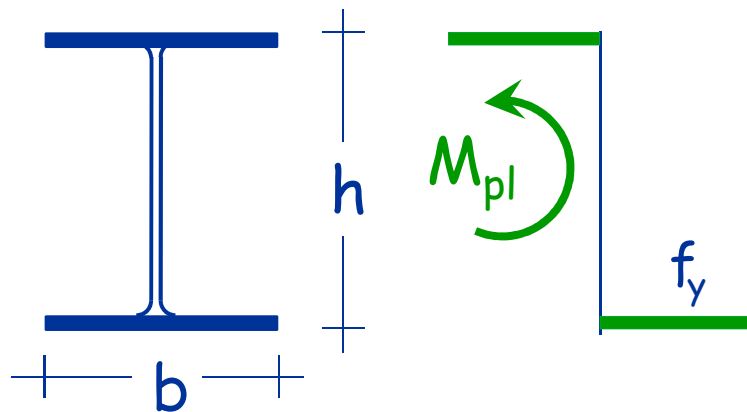
Dominio Plastico



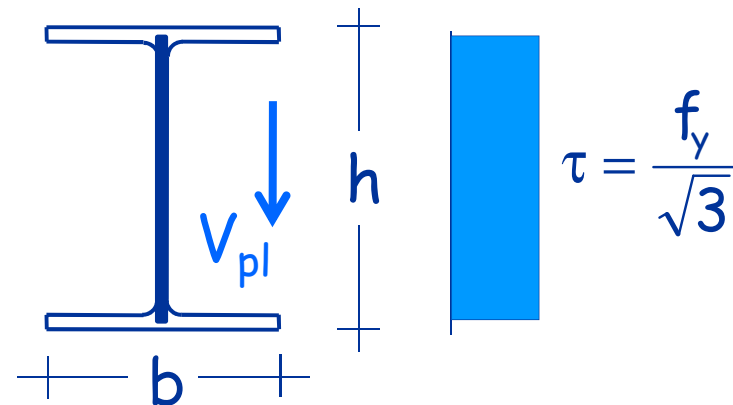
Resistenza plastica di normativa

Per le sezioni ad I, in assenza di sollecitazione assiale:

$$M_{pl,Rd} = f_y b t_f (h - t_f)$$



$$V_{pl,Rd} = \frac{f_y}{\sqrt{3}} t_w (h - t_f)$$



In presenza di $N_{Ed} > 15\% N_{pl,Rd}$ nel link va tenuta opportunamente in conto la riduzione della resistenza plastica a taglio, $V_{pl,Rd}$, e flessione, $M_{pl,Rd}$.

Sollecitazioni Ultime

La resistenza ultima dei link è maggiore dei valori di plasticizzazione (a causa dell'incrudimento, della partecipazione della soletta dell'impalcato e dell'aleatorietà della tensione di snervamento)

- Il taglio ultimo dei link con comportamento inelastico governato dal taglio è

$$V_u = 1.5 V_{pl,Rd}$$

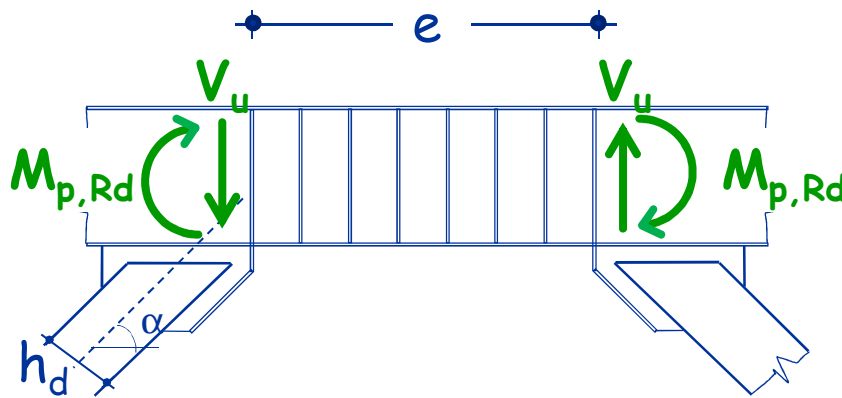
- Il momento ultimo dei link con comportamento inelastico governato dalla flessione è

$$M_u = 1.5 M_{pl,Rd}$$

Sollecitazioni Ultime

Il fatto che un link si plasticizzi prima per taglio non assicura che il link non presenti una plasticizzazione per flessione prima di pervenire a rottura.

Il valore della lunghezza meccanica al di sopra del quale il link presenta plasticizzazione anche per flessione è:

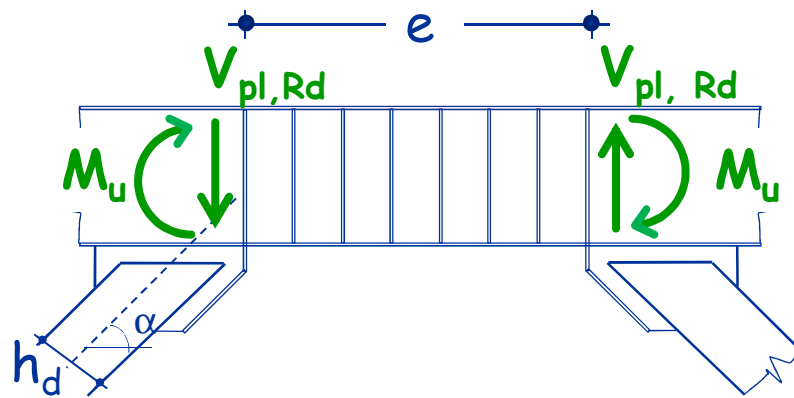


$$\frac{e V_u}{M_{pl,Rd}} = \frac{e \cdot 1.5 V_{pl,Rd}}{M_{pl,Rd}} = 2$$
$$\frac{e V_{pl,Rd}}{M_{pl,Rd}} = \frac{2}{1.5} = 1.33$$

Sollecitazioni Ultime

Il fatto che un link si plasticizzi prima per flessione non assicura che il link non presenti una plasticizzazione a taglio prima di pervenire a rottura.

Il valore della lunghezza meccanica al di sotto del quale il link presenta plasticizzazione anche per taglio è:

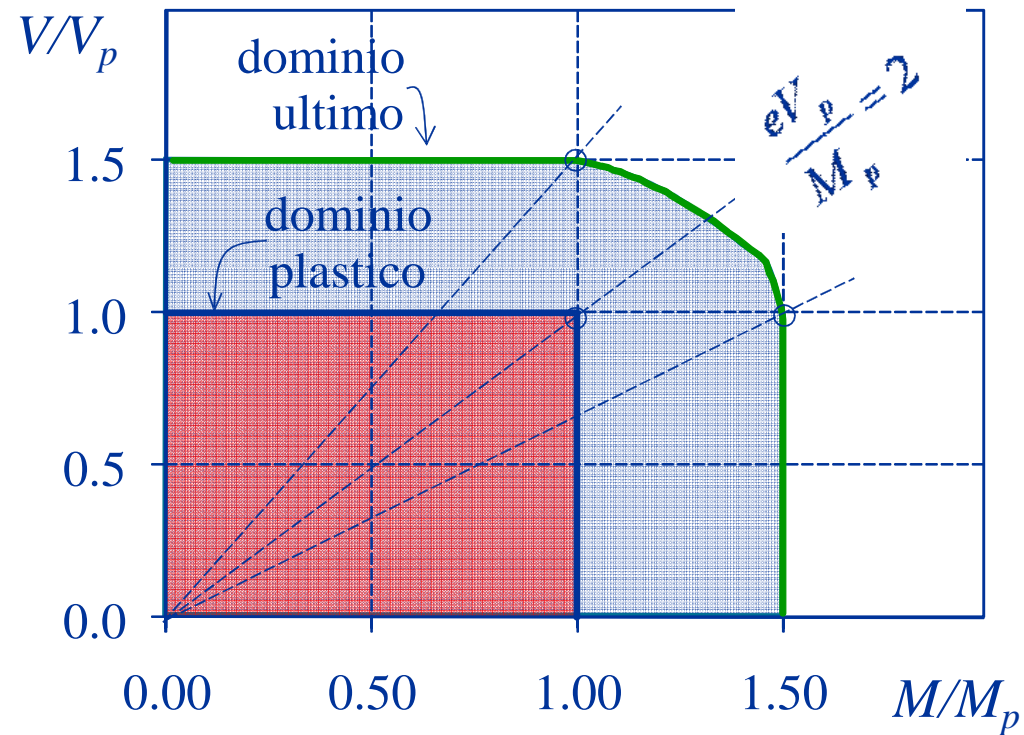


$$\frac{e V_{pl,Rd}}{M_u} = \frac{e V_{pl,Rd}}{1.5 M_{pl,Rd}} = 2$$



$$\frac{e V_{pl,Rd}}{M_{pl,Rd}} = 2 \cdot 1.5 = 3.0$$

Dominio Ultimo e Dominio Plastico del Link



Classificazione dei Link

In funzione del comportamento plastico i link sono generalmente suddivisi dalle normative in:

- CORTI plasticizzazione
taglio
- INTERMEDI plasticizzazione
taglio e flessione
- LUNGHI plasticizzazione
flessione

Tale classificazione è bene interpretata
dal parametro

$$\frac{e V_{pl,Rd}}{M_{pl,Rd}}$$

Classificazione meccanica di Normativa

In relazione alla lunghezza "e" del link, se i momenti di estremità sono eguali

$$e \leq 1.60 \frac{M_{pl,Rd}}{V_{pl,Rd}}$$

Link corti

$$1.60 \frac{M_{pl,Rd}}{V_{pl,Rd}} \leq e \leq 3.00 \frac{M_{pl,Rd}}{V_{pl,Rd}}$$

Link intermedi

$$e > 3.00 \frac{M_{pl,Rd}}{V_{pl,Rd}}$$

Link lunghi

$M_{pl,Rd}$ è la resistenza flessionale di progetto del link

$V_{pl,Rd}$ é la resistenza a taglio di progetto del link

Classificazione meccanica di Normativa

In relazione alla lunghezza "e" del link, se i momenti di estremità **non** sono eguali

$$e \leq 0.80 (1 + \alpha) \frac{M_{pl,Rd}}{V_{pl,Rd}} \quad \text{Link corti}$$

$$0.80 (1 + \alpha) \frac{M_{pl,Rd}}{V_{pl,Rd}} \leq e \leq 1.50 (1 + \alpha) \frac{M_{pl,Rd}}{V_{pl,Rd}} \quad \text{Link intermedi}$$

$$e > 1.50 (1 + \alpha) \frac{M_{pl,Rd}}{V_{pl,Rd}} \quad \text{Link lunghi}$$

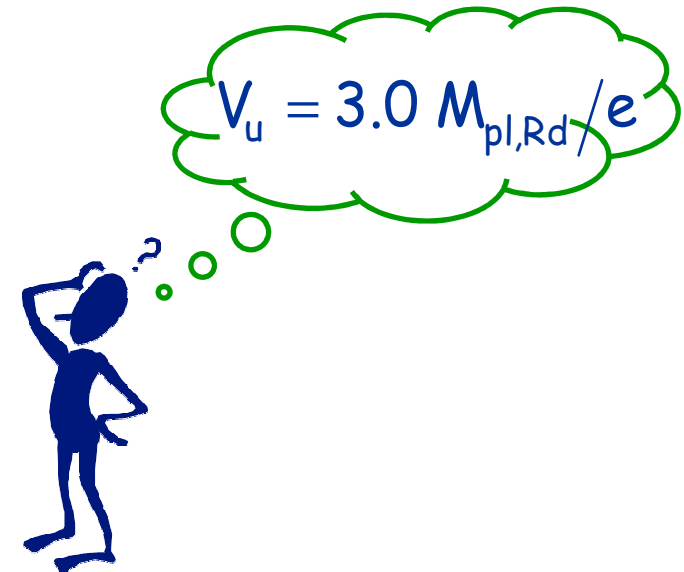
α è il rapporto tra il minore ed il maggiore dei momenti flettenti alle due estremità del link

Resistenza Ultima di Normativa

Le resistenze ultime dei link sono valutate dalla normativa attraverso le relazioni:

$$\text{Link corti} \left\{ \begin{array}{l} V_u = 1.5 V_{pl,Rd} \\ M_u = 0.75 e V_{pl,Rd} \end{array} \right.$$

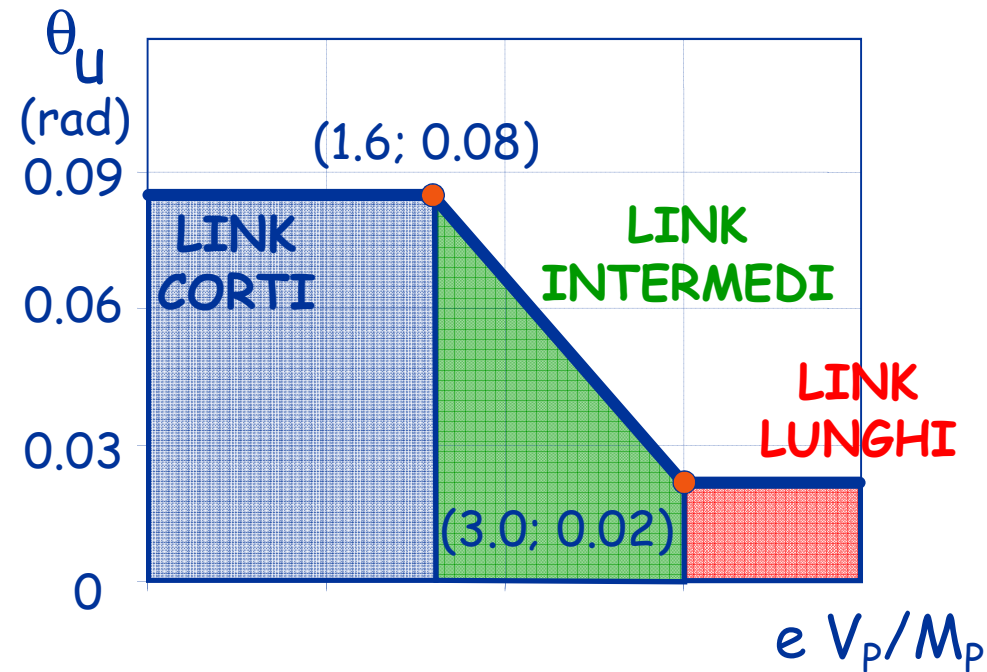
$$\text{Link lunghi} \left\{ \begin{array}{l} M_u = 1.5 M_{pl,Rd} \\ V_u = 2.0 M_{pl,Rd} / e \end{array} \right.$$



Per link «intermedi» la resistenza ultima può essere determinata per interpolazione.

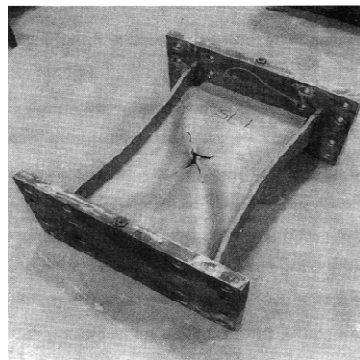
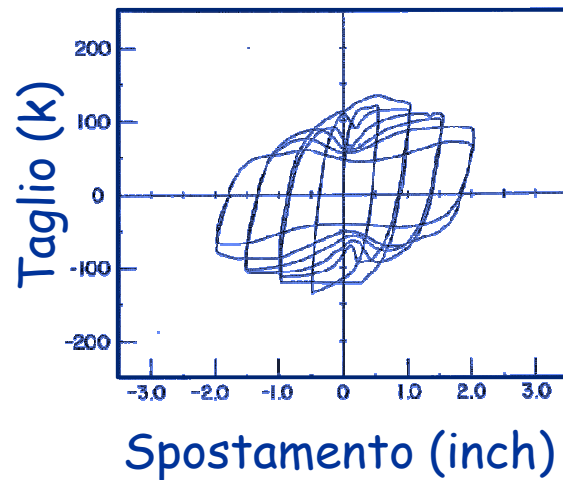
Capacità Rotazionale di Normativa

$$\theta_u = \gamma_p + \varphi_p$$

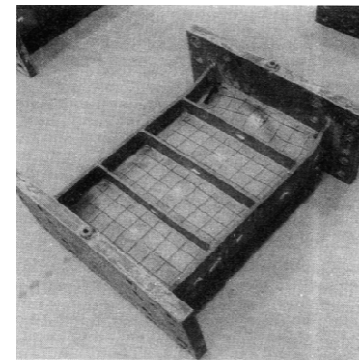
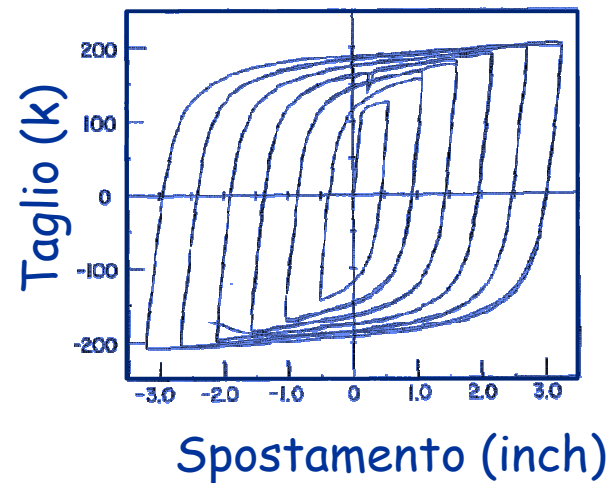


Irrigidimenti dei Link Corti

Link corto senza irrigidimenti trasversali



Link corto con irrigidimenti trasversali



Irrigidimenti dei Link Corti in Normativa

L'instabilità inelastica a taglio potrebbe limitare le capacità dissipative. Per migliorare la duttilità locale devono essere impiegati degli irrigidimenti d'anima.

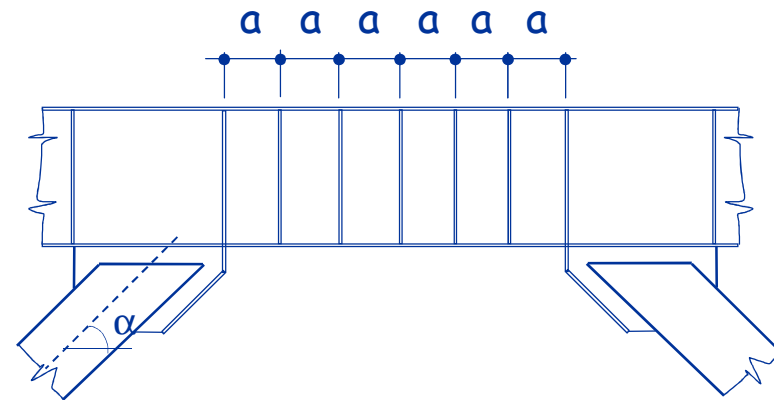
Gli irrigidimenti trasversali devono essere disposti da entrambi i lati del profilo.

Per link corti con $h_b < 600$ mm gli irrigidimenti possono essere disposti da un solo lato dell'anima,

$$h_i \geq \frac{3}{4} h_w.$$

$$t_i \geq t_w, t_i \geq 10 \text{ mm}$$

$$b_i = (b_f/2) - t_w.$$



Irrigidimenti dei Link Corti in Normativa

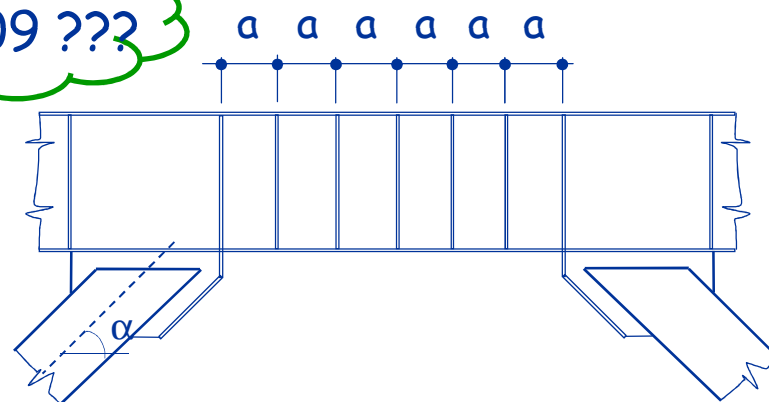
L'instabilità inelastica a taglio potrebbe limitare le capacità dissipative. Per migliorare la duttilità locale devono essere impiegati degli irrigidimenti d'anima.

$$a \leq 29 t_w - h_b/5 \quad \text{per } \gamma_p = \pm 0.09 \text{ rad}$$

$$a \leq 38 t_w - h_b/5 \quad \text{per } \gamma_p = \pm 0.06 \text{ rad}$$

$$a \leq 56 t_w - h_b/5 \quad \text{per } \gamma_p = \pm 0.03 \text{ rad}$$

.. 0.09 ???



dove :

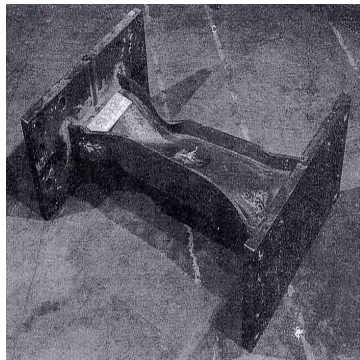
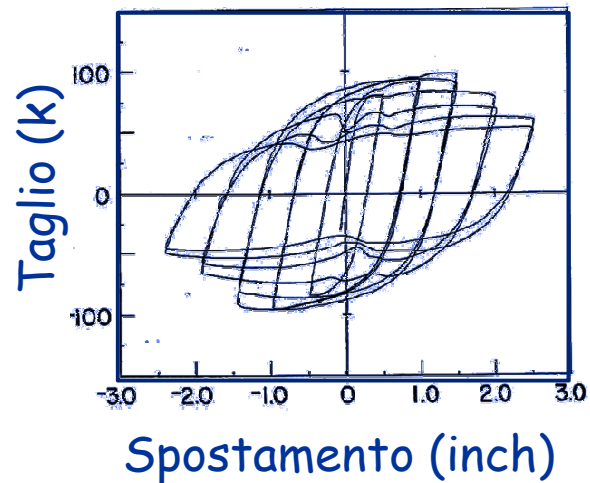
t_w è lo spessore dell'anima del link

h_b è l'altezza del profilo del link

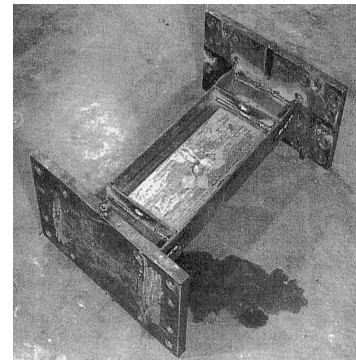
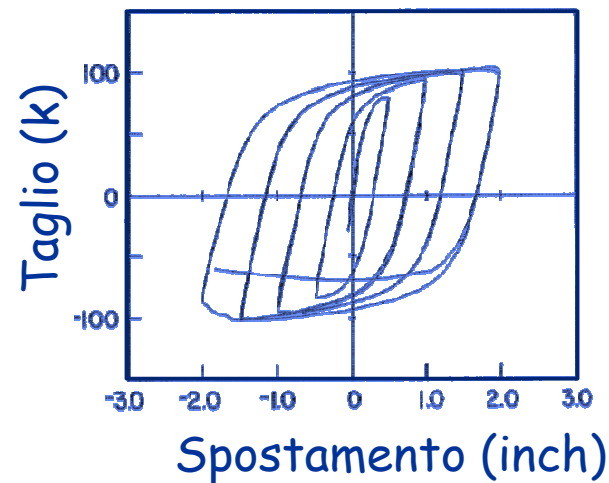
γ_p è la massima deformazione plastica a taglio

Irrigidimenti dei Link Lunghi

Link lungo senza irrigidimenti trasversali



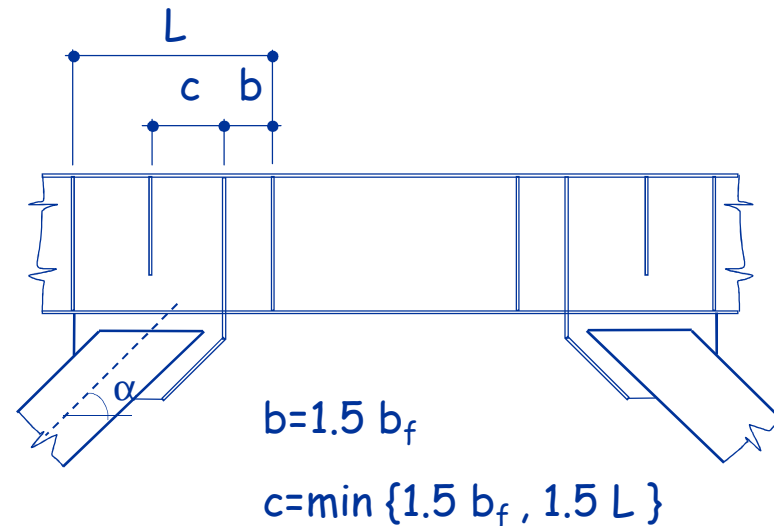
Link lungo con irrigidimenti trasversali



Irrigidimenti dei Link Lunghi in Normativa

Le modalità di collasso tipiche sono rappresentate dalla instabilità locale della piattabanda compressa e dalla instabilità flessio-torsionale.

Gli irrigidimenti devono impegnare l'intera altezza dell'anima.

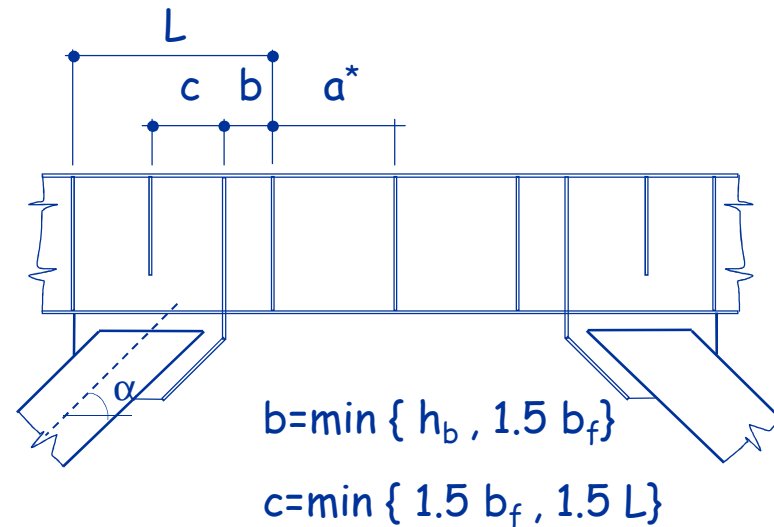


Irrigidimenti dei Link Intermedi

Il comportamento dei link lunghi è dominato dalla plasticizzazione per flessione e per taglio.

$$a^* = a \quad \text{per} \quad e = 1.60 \frac{M_{pl,Rd}}{V_{pl,Rd}}$$
$$a^* = \frac{3}{2} \left(\frac{M_{pl,Rd}}{V_{pl,Rd}} - b_f \right) \quad \text{per} \quad e = 3.00 \frac{M_{pl,Rd}}{V_{pl,Rd}}$$

per valori intermedi di "e" si
esegue un'interpolazione lineare



Sovreresistenza dei Link

I coefficienti Ω dei link sono definiti come:

Link corti $\Omega_i = 1.5 \frac{V_{pl,Rd}}{V_{Ed}}$

Link lunghi e intermedi $\Omega_i = 1.5 \frac{M_{pl,Rd}}{M_{Ed}}$

dove :

$M_{pl,Rd}$ è il momento resistente del link

$V_{pl,Rd}$ sono il taglio resistente del link

M_{Ed} è il momento di calcolo ottenuto dalla combinazione sismica

V_{Ed} è il taglio di calcolo ottenuto dalla combinazione sismica.



Sovreresistenza Limite dei Link

Per garantire un comportamento dissipativo omogeneo delle diagonali all'interno della struttura è richiesto che

$$\frac{\Omega_{\max}}{\Omega_{\min}} \leq 1.25$$

dove :

Ω_{\max} è il massimo coefficiente di sovreresistenza tra i link

Ω_{\min} è il minimo coefficiente di sovreresistenza tra i link

Progetto degli altri elementi

Le membrature che non contengono i link sono progettate in modo simile a quanto indicato per sistemi con controventi concentrici

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}(M_{Ed})} \leq 1$$

$N_{pl,Rd}$ è la resistenza nei confronti dell'instabilità in presenza il valore di progetto del momento

N_{Ed} è il valore di progetto dello sforzo normale nell'elemento $N_{Ed} = N_{Ed,G} + 1.1\gamma_{Rd}\Omega N_{Ed,E}$

Ω è il minimo dei coefficienti di sovraresistenza dei link



Progetto degli altri elementi

Considerazioni

Nel caso di link lunghi o con $\Omega_{\max} / \Omega_{\min} \approx 1.25$

$$N_{Rd}(M_{Ed}, V_{Ed}) \geq N_{Ed,G} + 1.1 \gamma_{Rd} \Omega N_{Ed,E}$$

non garantisce il rispetto dei principi del capacity design.



Il progetto di diagonali, colonne e travi andrebbe eseguito in accordo a regole di applicazione più severe

$$N_{Rd}(1.1 \gamma_{Rd} \Omega M_{Ed}, 1.1 \gamma_{Rd} \Omega V_{Ed}) \geq N_{Ed,G} + 1.1 \gamma_{Rd} \Omega N_{Ed,E}$$

Scelta dei Profili di Link e Diagonali

Per rendere coerente il modello numerico con il modello reale, si consiglia di scegliere i profili di link e diagonali in modo che gli assi si incontrino all'interno o al massimo alla fine del link.

$$H \leq h_d \cos \alpha \quad \Rightarrow \quad e_y \geq 0$$

