

Lezione

PONTI E GRANDI STRUTTURE

Prof. Pier Paolo Rossi

Ing. Eugenio Ferrara

Università degli Studi di Catania

Dispositivi di appoggio

Dispositivi di appoggio

Definizione

Gli appoggi sono gli elementi strutturali che consentono la trasmissione dei carichi e facilitano l'assorbimento delle traslazioni e delle rotazioni.

Nei ponti realizzati mediante strutture composte, gli appoggi trasferiscono le azioni e consentono gli spostamenti causati da:

- Temperatura
- Ritiro e viscosità
- Sollecitazioni sismiche

e le rotazioni prodotte da:

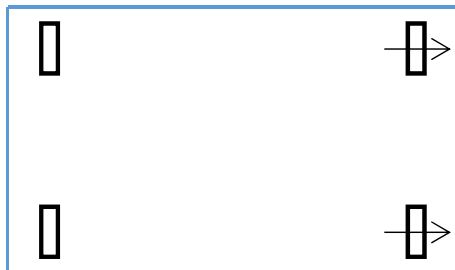
- Azioni in curva
- Carichi da traffico
- Carichi da vento
- Disallineamenti degli appoggi in fase di costruzione

Dispositivi di appoggio

Disposizione

La disposizione degli appoggi deve essere effettuata in modo che il flusso delle forze possa essere seguito senza ambiguità dalla sovrastruttura alla sottostruttura.

Il caso più semplice è quello della singola travata dove ad un'estremità sono presenti due appoggi fissi e all'altra estremità vi sono due appoggi mobili longitudinalmente.



Questa disposizione degli appoggi è accettabile solo se le dilatazioni trasversali dell'impalcato sono piccole.

In ogni caso è un errore ripartire le forze orizzontali in maniera uguale fra gli appoggi.

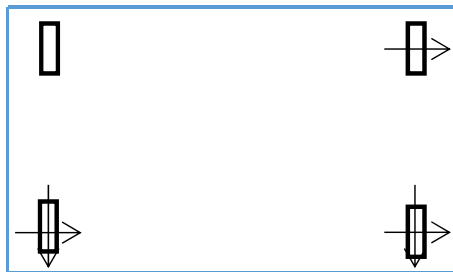
Pertanto, uno solo di essi dovrà essere progettato per resistere alla totalità della forza orizzontale.

Dispositivi di appoggio

Disposizione

La disposizione degli appoggi deve essere effettuata in modo che il flusso delle forze possa essere seguito senza ambiguità dalla sovrastruttura alla sottostruttura.

Ponte a travata semplicemente appoggiata
con deformazioni trasversali non trascurabili



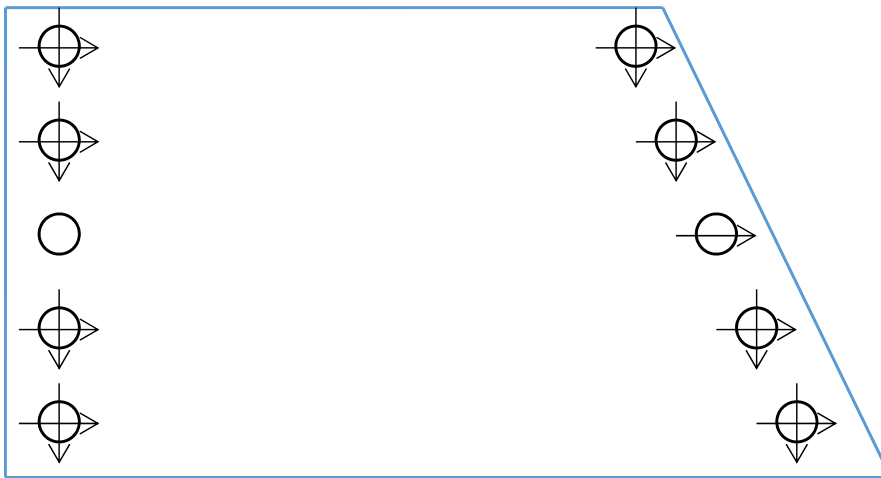
Ad una estremità del ponte una trave avrà un appoggio fisso ed uno mobile multidirezionale. Non si dispongono accanto ad un appoggio fisso uno o più appoggi mobili solo in senso trasversale.

Dispositivi di appoggio

Disposizione

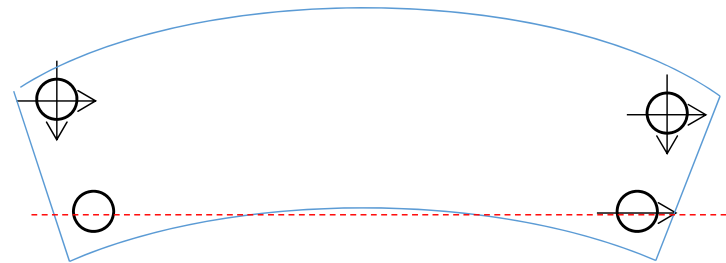
Casi particolari:

Solettone obliquo



L'asse di rotazione degli appoggi non è costante. Dovranno essere usati appoggi a cerniera sferica.
Si disporrà un solo appoggio fisso ed un solo appoggio unidirezionale.

Ponte curvo



La guida dell'appoggio unidirezionale deve essere diretta verso l'appoggio fisso, poiché la direzione dello spostamento non è perpendicolare all'asse di rotazione.

L'uso degli appoggi a rullo è consigliabile.

Si hanno movimenti radiali dovuti alle variazioni termiche e ritiro e movimenti tangenziali dovuti a precompressione e deformazioni viscosse.

Dispositivi di appoggio

Disposizione

Casi particolari:

Ponte continuo con curva



Movimenti radiali
dovuti a variazioni
termiche e ritiro



Movimenti tangenziali
dovuti a precompressione e
deformazioni viscosi

Nei ponti curvi continui si possono avere movimenti fra loro non congruenti, l'adozione di appoggi unidirezionali può fare insorgere forze indesiderate che si ripercuotono sulle sottostrutture.

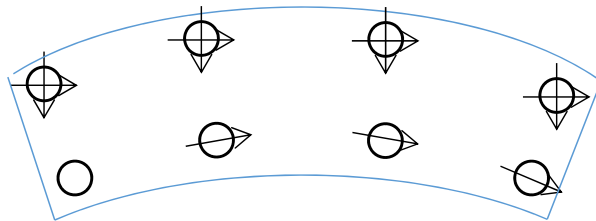
In entrambe le soluzioni nasceranno delle forze orizzontali in corrispondenza degli appoggi unidirezionali. Bisognerà tener conto di queste forze nel predimensionamento degli appoggi stessi e delle sottostrutture del ponte.

Dispositivi di appoggio

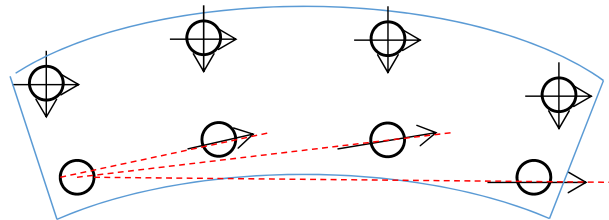
Disposizione

Casi particolari:

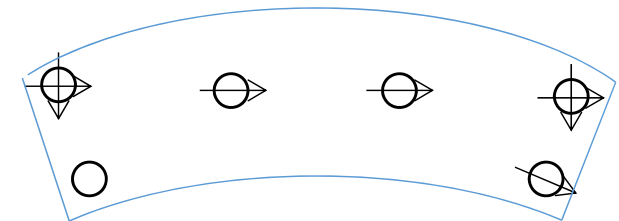
Ponte curvo con più serie di appoggi



Disposizione degli appoggi con le guide tangenziali. In genere si utilizza questa disposizione nei ponti con raggi di curvatura elevati nei quali i movimenti radiali sono di piccola entità.



Disposizione degli appoggi con le guide radiali. In genere si utilizza questa disposizione nei ponti con raggi di curvatura piccoli.



Se l'impalcato è resistente a torsione può essere conveniente prevedere gli appoggi intermedi del tipo a cerniera sferica. In tal modo le pile sono soggette a momenti limitati; i momenti torcenti sono riportati alle spalle.

Dispositivi di appoggio

Disposizione: note conclusive

- Non è possibile accoppiare sullo stesso asse d'appoggio appoggi che abbiano caratteristiche di deformabilità diverse.
- Gli appoggi in gomma andranno disposti col lato minore parallelo all'asse della trave per consentire una maggiore possibilità di rotazione.
- La disposizione degli appoggi in una struttura deve sempre tener conto della possibilità di ispezione e sostituzione degli stessi.

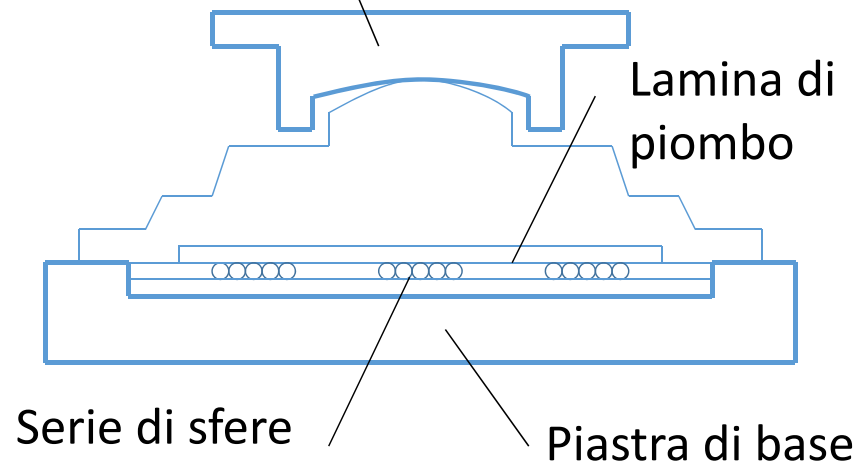
Dispositivi di appoggio

Storia

Prima della metà del XX sec. essi erano progettati come appoggi fissi o scorrevoli in una sola direzione.



Piastra superiore



Dispositivi di appoggio

Storia

Oggi sono concepiti come vincoli tridimensionali. Nelle zone sismiche agli apparecchi d'appoggio viene demandato il compito di isolare la struttura dal moto sismico.

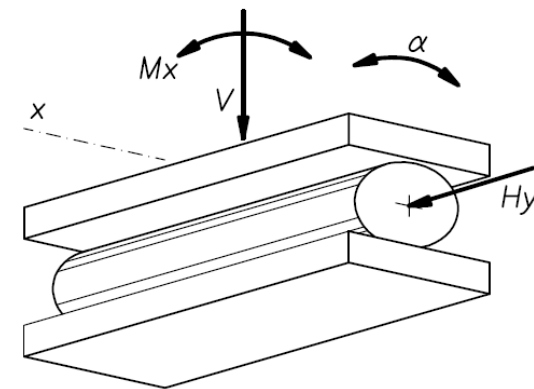
Gli appoggi si possono classificare in base a :

- Principio fisico utilizzato
- Gradi di libertà
- Trasmissione del carico
- Materiale

Dispositivi di appoggio

Classificazione: Principio fisico utilizzato

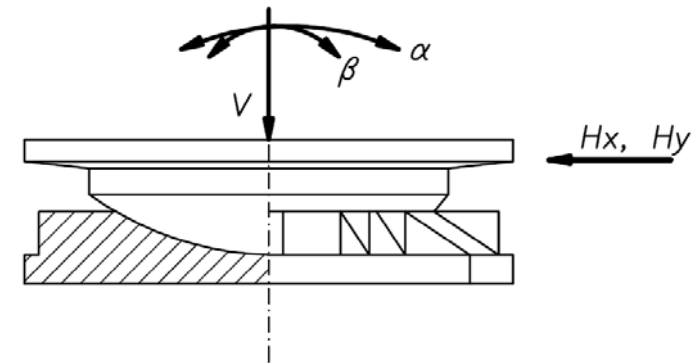
- Rotolamento
 - ❑ Mediante il rotolamento fra una superficie piana ed una cilindrica si ottiene la rotazione attorno alla generatrice lungo la quale le due superfici sono a contatto.
 - ❑ Se il rotolamento avviene tra una superficie piana ed una sferica (oppure tra due superfici sferiche, una convessa e l'altra maggiore della prima) a contatto fra loro in un punto, mediante il rotolamento si ottiene la rotazione relativa attorno ad un asse qualsiasi passante per il punto (due gradi di libertà)



Dispositivi di appoggio

Classificazione: Principio fisico utilizzato

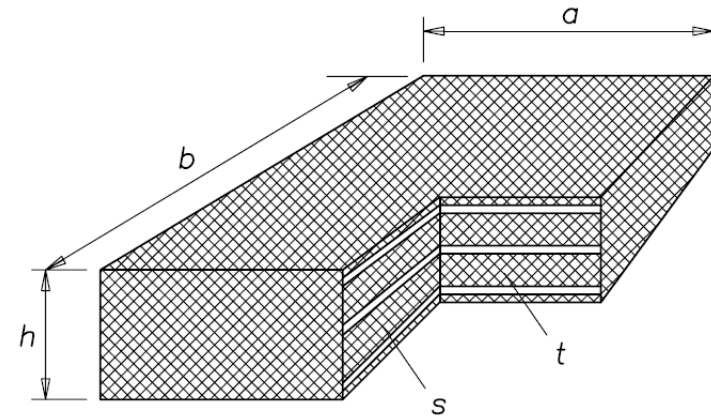
- Strisciamento
 - ❑ Mediante lo strisciamento fra due superfici sferiche, l'una concava e l'altra convessa si ottiene la rotazione attorno ad un asse qualsiasi (tre gradi di libertà).
 - ❑ Mediante lo strisciamento fra due superfici piane si ottiene lo spostamento in una direzione qualsiasi e la rotazione attorno alla perpendicolare ai piani (tre gradi di libertà)
 - ❑ Gli appoggi basati sul principio dello strisciamento vengono impiegati da quando sono stati scoperti materiali a bassissimo attrito, come il teflon. La prima applicazione risale al 1960.



Dispositivi di appoggio

Classificazione: Principio fisico utilizzato

- Deformazione
 - ❑ Mediante la deformazione di un elemento fatto di materiale idoneo si può ottenere sia la rotazione che la traslazione.
 - ❑ Il materiale che più comunemente si impiega oggi è la gomma.
 - ❑ Già nei tempi antichi però sono stati impiegati materiali deformabili, come il piombo, per consentire una migliore distribuzione dei carichi e permettere piccoli spostamenti relativi fra componenti strutturali



Dispositivi di appoggio

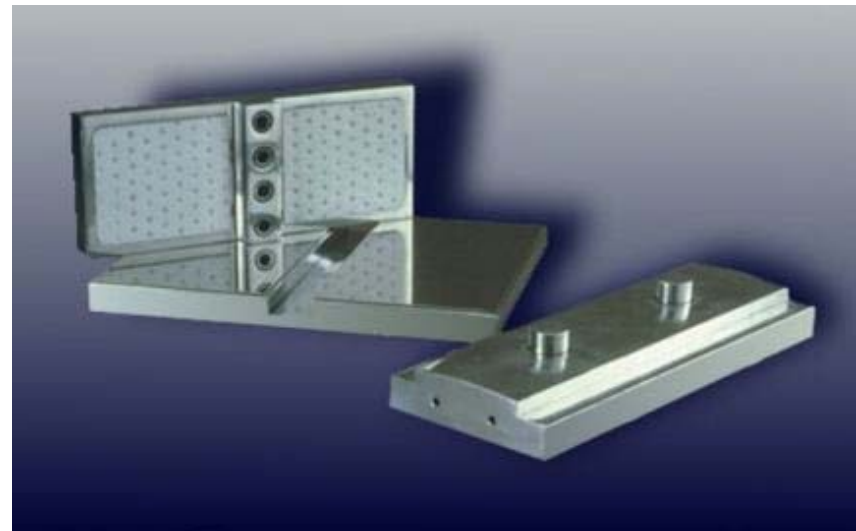
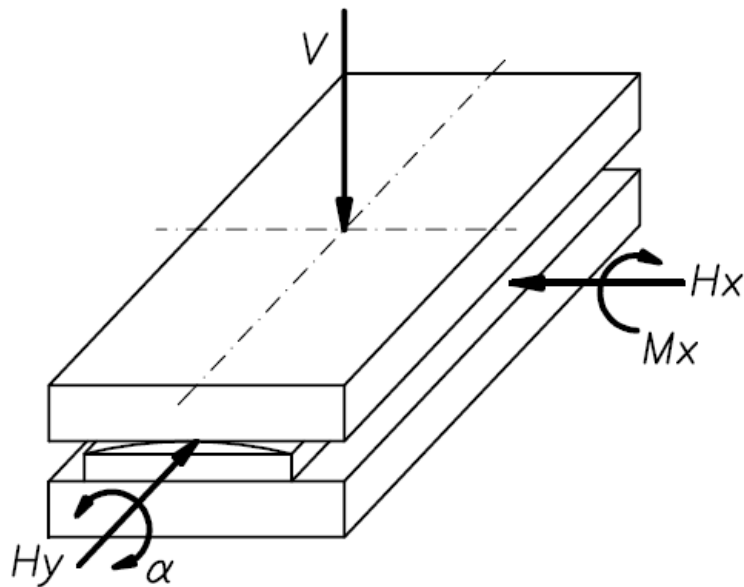
Classificazione: Gradi di libertà

- ❑ Si definiscono appoggi fissi quelli che trasmettono tutte le forze e pertanto non consentono alcun spostamento
 - Se consentono la rotazione attorno ad un asse orizzontale si chiamano appoggi a cerniera cilindrica
 - Se consentono la rotazione attorno a due assi orizzontali si dicono in tal caso a cerniera sferica
 - Il numero di gradi di libertà di un appoggio fisso può essere 1 o 2.
- ❑ Gli appoggi mobili consentono il movimento orizzontale secondo una direzione, nel qual caso si dicono unidirezionali o in due direzioni, nel quale si dicono multidirezionali:
 - Gli appoggi mobili possono essere a cerniera cilindrica o sferica a seconda che consentano la rotazione attorno ad un asse orizzontale determinato o qualsiasi
 - Gli appoggi mobili possiedono da 2 a 4 gradi di libertà

Dispositivi di appoggio

Appoggio fisso oscillante con contatto lineare

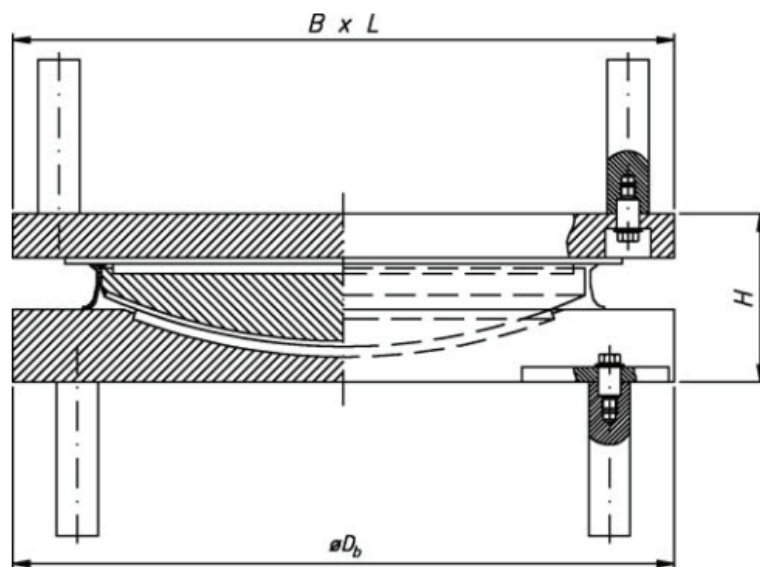
Basati sul principio del rotolamento è un appoggio che permette la rotazione attorno ad un asse: quelli in commercio sono in grado di resistere ad azioni verticali da 200 a 15000 kN



Dispositivi di appoggio

Appoggio fisso oscillante con contatto puntuale

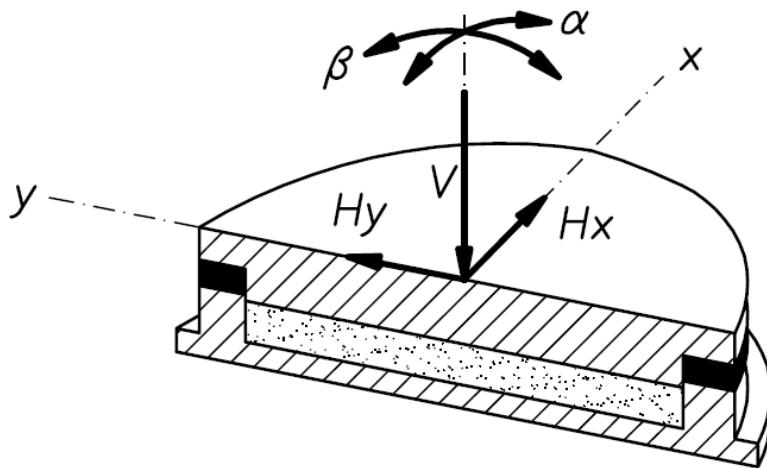
Basati sul principio del rotolamento è un appoggio che permette la rotazione attorno a qualsiasi asse in un piano: quelli in commercio sono in grado di resistere ad azioni verticali da 500 a 10000 kN



Dispositivi di appoggio

Appoggio fisso oscillante a disco elastomerico

Basati sul principio della deformazione è un appoggio che permette la rotazione attorno a qualsiasi asse in un piano: quelli in commercio sono in grado di resistere ad azioni verticali da 500 a 100000 kN

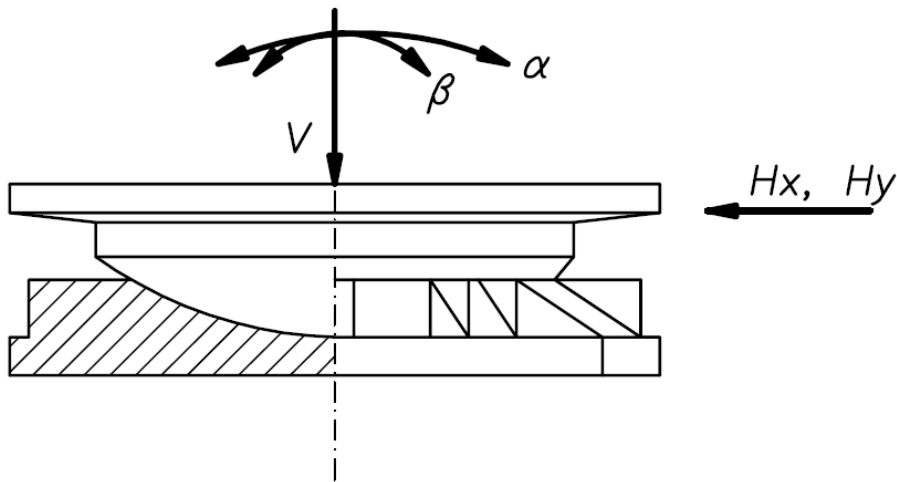


Dispositivi di appoggio

Appoggio fisso oscillante con superficie di scorrimento al PTFE

Basati sul principio dello strisciamento è un appoggio che permette la rotazione attorno a qualsiasi asse in un piano: quelli in commercio sono in grado di resistere ad azioni verticali da 500 a 50000 kN.

Consentono rispetto a quelli a disco elastomerico rotazioni più ampie ma a prezzo di un momento parassita più alto per le piccole rotazioni.



Dispositivi di appoggio

Appoggio mobile

Gli appoggi mobili si dividono in due categorie:

- ❑ **Gli appoggi mobili unidirezionali:** permettono lo spostamento in una sola direzione. Sono pertanto muniti di dispositivi atti a trasmettere le forze orizzontali nella direzione ortogonale a quella dello spostamento consentito. Tali dispositivi si chiamano barre di guida
- ❑ **Appoggi mobili multidirezionali:** permettono lo spostamento secondo una direzione qualsiasi.

Dispositivi di appoggio

Appoggio mobile

Gli appoggi scorrevoli a contatto puntuale o a disco elastomerico vanno utilizzati in quei casi in cui si possano avere nella struttura rotazioni attorno ad assi diversi:

Per i primi:

- Da 500 a 10000 kN
- Rotazioni ammissibili di 0.005 rad

Per i secondi:

- Da 500 a 100000 kN
- Rotazioni ammissibili di 0.015 rad

Gli appoggi a calotta sferica sono idonei per carichi da 500 a 50000 kN e consentono elevate rotazioni, dell'ordine dei 0.05 rad.

Dispositivi di appoggio

Appoggi in gomma

Gli appoggi in gomma costituiscono un caso particolare avendo caratteristiche comuni sia agli appoggi fissi che mobili.

Consentono rotazioni attorno ad un qualsiasi asse (tre gradi di libertà) e lo spostamento in 2 direzioni (due gradi di libertà)

Gli spostamenti impressi producono delle forze di richiamo che tendono a far riprendere agli appoggi la loro configurazione indeformata.

Dispositivi di appoggio

Appoggi in gomma

Essi sono costituiti da strati uniformi di materiale elastomerico (gomma naturale o sintetica) e piastre di acciaio legate da un processo di vulcanizzazione. Questo tipo di appoggi presentano elevata durata e richiedono poca manutenzione.

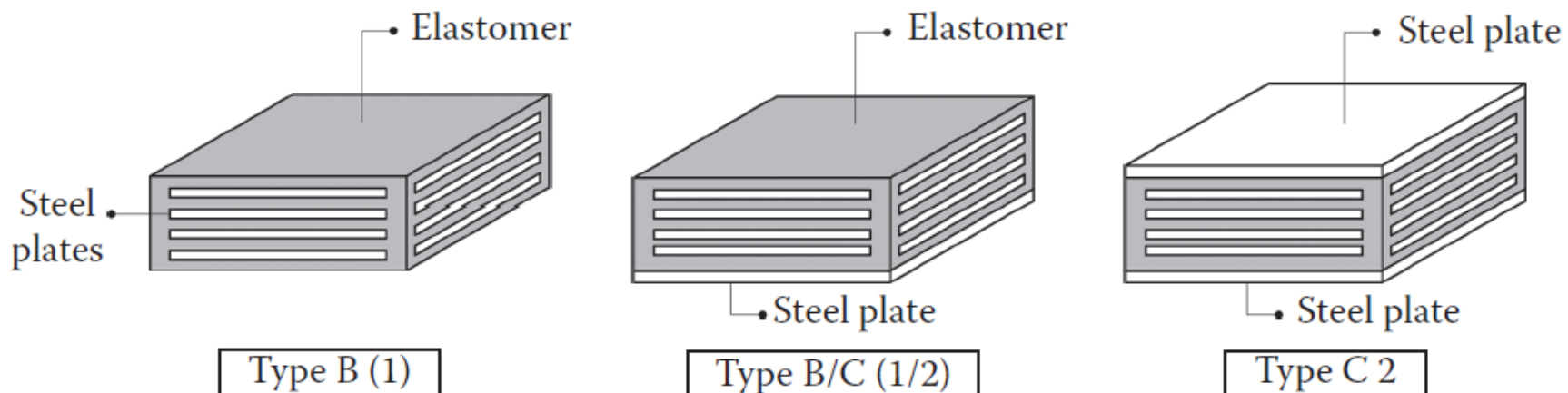
I principali tipi di appoggi, descritti nella EN 1337-3 sono:

- **Tipo B (1):** strati elastomerici sia in cima che alla base dell'appoggio
- **Tipo B/C (1/2):** strato elastomerico in cima e strato di acciaio alla base
- **Tipo C (2):** strati di acciaio sia in cima che alla base.

Dispositivi di appoggio

Appoggi in gomma

- **Tipo B (1):** Questi non sono sicuri contro lo slittamento. Tuttavia la compressione data dai carichi verticali e l'attrito offrono un minimo di resistenza.
- **Tipo B/C (1/2):** è sicuro contro lo slittamento in quanto lo strato di acciaio alla base risulta collegato alla sottostruttura tramite bulloni. L'ancoraggio in una sola direzione consente la facile installazione e sostituzione. Pertanto, in molti paesi è l'unico tipo di appoggio utilizzato per i ponti ferroviari.
- **Tipo C (2):** strati di acciaio sia in cima che alla base garantiscono resistenza contro lo slittamento in entrambe le direzioni.

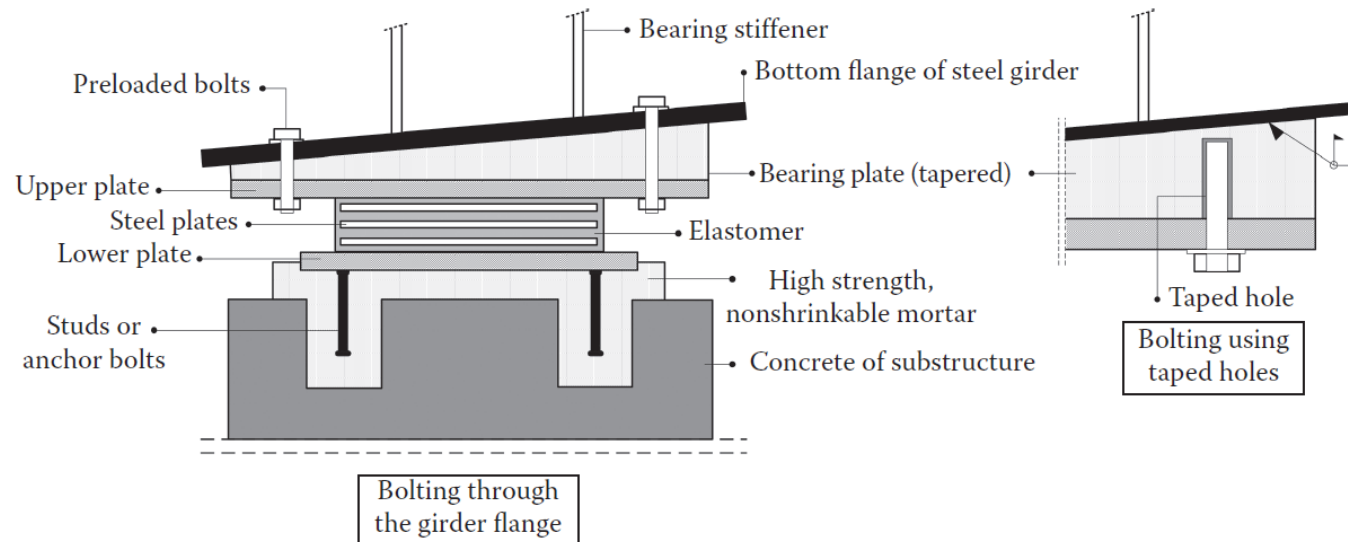


Dispositivi di appoggio

Appoggi in gomma

La base degli appoggi risulta connessa alla sottostruttura in c.a. tramite tirafondi, mentre la lastra superiore è connessa alla flangia inferiore della trave tramite bulloni precaricati.

In molti ponti la flangia inferiore della trave non risulta orizzontale. Pertanto, è necessario inserire un piatto cosicché le forze verticali non provochino azioni orizzontali.



Dispositivi di appoggio

Appoggi in gomma

Tuttavia, la soluzione di bullonare la flangia inferiore non risulta sempre la migliore poiché si possono verificare urti tra i bulloni e gli irrigidimenti della trave.

Un metodo molto usato è quello di saldare il piatto dell'appoggio alla flangia inferiore della trave in acciaio. I bulloni sono inseriti in degli appositi fori ma non sono presollecitati per non danneggiare il piatto.

È necessario comunque dire che:

- I bulloni utilizzati nei fori filettati non sono trattati nella EN 1993
- La saldatura con la flangia inferiore presenta problemi di durabilità. La rottura per fatica è probabile nel caso di ponti ferroviari
- Questo tipo di connessione è sconsigliabile in zona sismica

Dispositivi di appoggio

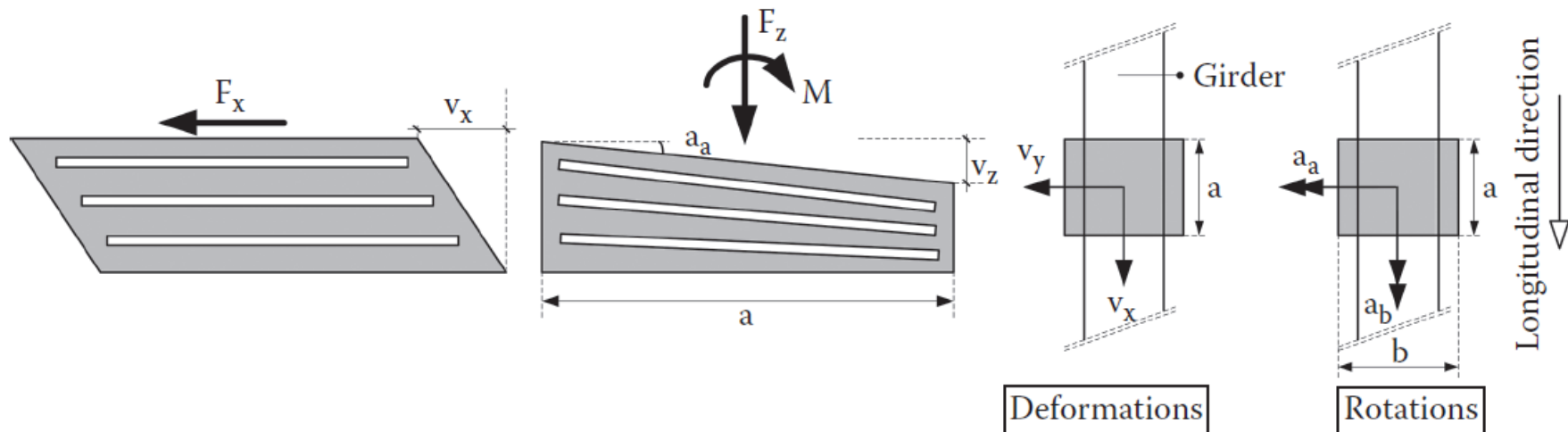
Appoggi in gomma

Il numero degli strati in acciaio dipende dall'altezza totale che varia dai 10 ai 400 mm, con un numero di strati di materiale elastomerico da 1 a 16.

Gli appoggi possono avere forma rettangolare o circolare.

Le loro dimensioni variano dai 200 ai 1200 mm.

Gli appoggi resistono alle forze orizzontali nelle stesse direzioni e le deformazioni sono limitate a circa 40 mm. Per questo motivo gli appoggi elastomerici non possono essere utilizzati come appoggi fissi.



Dispositivi di appoggio

Appoggi in gomma

La distorsione totale di progetto deve essere limitata a :

$$\varepsilon_{t,d} = K_L \cdot (\varepsilon_{c,d} + \varepsilon_{q,d} + \varepsilon_{a,d}) \leq 7.0$$

dove:

$\varepsilon_{c,d}$ è la distorsione causata dalla compressione

$\varepsilon_{q,d}$ è la distorsione causata dalla deformazione orizzontale

$\varepsilon_{a,d}$ è la distorsione causata dalla rotazione

K_L è un coefficiente che dipende dal tipo di carico (1.5 per i carichi variabili ed 1 per gli altri; in generale si raccomanda un valore pari ad 1)

Dispositivi di appoggio

Appoggi in gomma

- **Distorsione causata dalla compressione**

$$\varepsilon_{c,d} = \frac{1.5 \cdot F_{z,d}}{G \cdot A_r \cdot S}$$

dove:

$F_{z,d}$ è il carico verticale di progetto

G è il modulo di taglio dell'elastomero (in molti casi 0.9 Mpa)

A_r è l'area trasversale ridotta dell'appoggio

S è il fattore di forma

Dispositivi di appoggio

Appoggi in gomma

- **Distorsione causata dalla compressione**

$$A_r = A_1 \cdot \left(1 - \frac{v_{x,d}}{a'} - \frac{v_{y,d}}{b'} \right) \qquad S = \frac{a' \cdot b'}{2 \cdot t_i \cdot (a' + b')}$$

dove:

a', b' sono le dimensioni longitudinali e trasversali della piastra di acciaio

A_1 è l'area trasversale della piastra d'acciaio, ridotta dalla presenza di fori

v sono i massimi spostamenti trasversali y e longitudinali x

t_i è lo spessore di ogni strato di elastomero

Dispositivi di appoggio

Appoggi in gomma

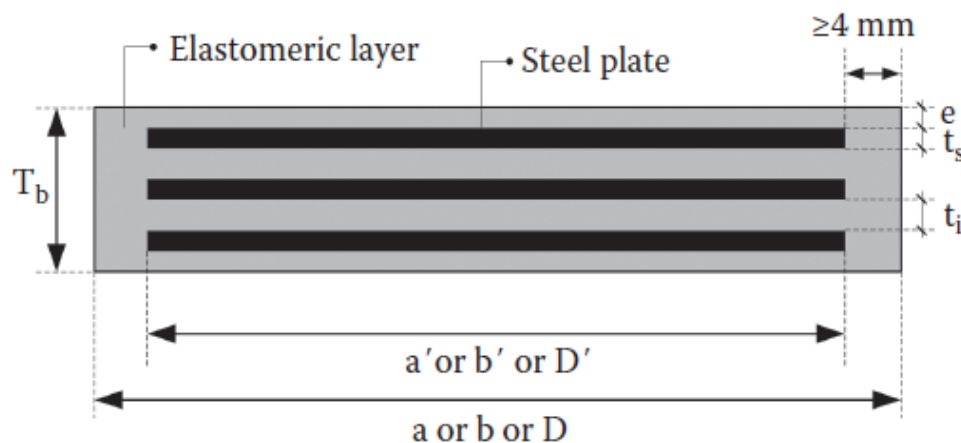
- **Distorsione causata dalla deformazione orizzontale**

$$\varepsilon_{q,d} = \frac{v_{xy,d}}{T_q} \leq 1$$

dove:

$v_{xy,d}$ è la deformazione tagliante $v_{xy,d} = \sqrt{v_{x,d}^2 + v_{y,d}^2}$

T_q è lo spessore nominale valutato come in figura



$$T_b = n \cdot (t_i + t_s) + t_s + 2 \cdot e$$

$$T_e = T_b - (n+1) \cdot t_s$$

$$T_q = T_e \quad \text{se } e > 2.5 \text{ mm}$$

$$T_q = n \cdot t_i \quad \text{se } e \leq 2.5 \text{ mm}$$

Dispositivi di appoggio

Appoggi in gomma

- **Distorsione causata dalla rotazione**

$$\varepsilon_{a,d} = \frac{a'^2 \cdot a_{a,d} + b'^2 \cdot a_{b,d}}{2 \cdot n \cdot t_i^2}$$

dove:

$a_{a,d}$ è l'angolo di rotazione lungo la lunghezza longitudinale a

$a_{b,d}$ è l'angolo di rotazione lungo la lunghezza trasversale b

n è il numero di strati elastomerici

Dispositivi di appoggio

Appoggi in gomma: limitazioni

Lo spessore delle piastre di acciaio, considerando costante lo spessore degli strati elastomerici, è ricavato dalla relazione:

$$t_s = \frac{K_p \cdot F_{z,d} \cdot 2 \cdot t_i \cdot K_h \cdot \gamma_m}{A_r \cdot f_{yk}} \geq 2 \text{ mm}$$

dove:

$$K_p = 1.3$$

K_h è uguale ad 1 per gli appoggi senza fori e 2 per gli appoggi con fori

γ_m fattore di sicurezza parziale assunto uguale ad 1. In zona sismica il valore raccomandato è 1.15

Dispositivi di appoggio

Appoggi in gomma: limitazioni

Un ulteriore limite è fornito dalle rotazioni che devono essere limitate in accordo alle relazioni:

Per appoggi rettangolari

$$\frac{F_{z,d} \cdot n \cdot t_i}{A_1} \cdot \left(\frac{1}{5 \cdot G \cdot S^2} + \frac{1}{E_b} \right) \geq \frac{a' \cdot a_{a,d} + b' \cdot a_{b,d}}{K_{r,d}}$$

Per appoggi circolari

$$\frac{F_{z,d} \cdot n \cdot t_i}{A_1} \cdot \left(\frac{1}{5 \cdot G \cdot S^2} + \frac{1}{E_b} \right) \geq \frac{D' \cdot a_{D,d}}{K_{r,d}}$$

dove:

$E_b = 2 \text{ GPa}$ modulo di compressione dell'elastomero

$K_{r,d} = 3$ coefficiente di rotazione che può essere assunto pari a 3

Dispositivi di appoggio

Appoggi in gomma: limitazioni

Inoltre, per assicurare la stabilità dovrà valere la seguente relazione :

$$\frac{F_{z,d}}{A_r} < \frac{2 \cdot \alpha' \cdot G \cdot S}{3 \cdot T_e}$$

Per evitare lo slittamento dell'appoggio, deve essere rispettata la seguente condizione:

$$F_{xy,d} < \mu_e \cdot F_{z,d,min}$$

e sotto i carichi permanenti

$$\frac{F_{z,Gmin}}{A_r} \geq 3 \text{ MPa}$$

dove:

$F_{xy,d}$ È la risultante delle forze orizzontali

$F_{z,min}$ È la minima forza verticale considerando la situazione di progetto o la situazione di carichi permanenti

Dispositivi di appoggio

Scelta degli apparecchi d'appoggio

La scelta dell'appoggio sarà condizionata dall'entità delle forze e degli spostamenti, in particolare:

- Carichi verticali
- Carichi orizzontali, compreso l'attrito
- Spostamenti orizzontali e numero di gradi di libertà
- Rotazioni e numero di gradi di libertà
- Azioni orizzontali trasmesse sugli appoggi fissi e sulle infrastrutture

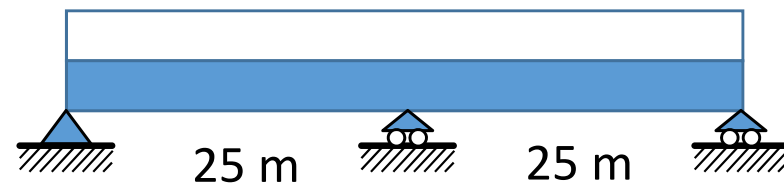
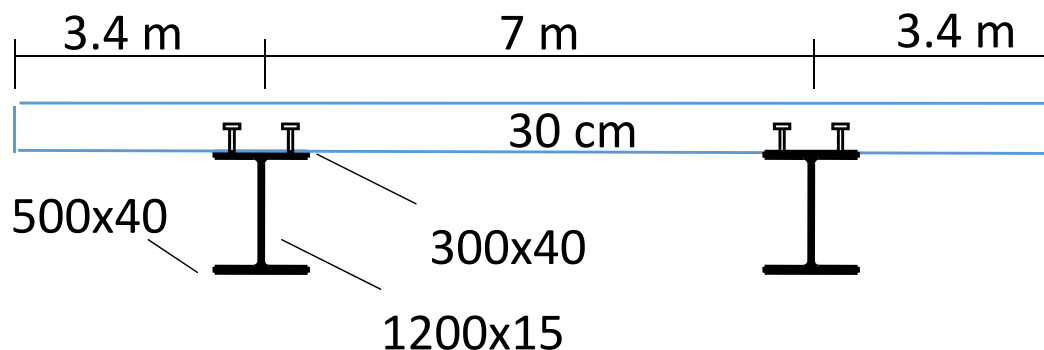
Per reazioni verticali superiori ai 10000 kN gli appoggi elastomerici sono i più idonei. Inoltre, la scelta degli appoggi dipende da :

- Tipo di costruzione, acciaio o calcestruzzo
- Spazio disponibile ed incidenza della manutenzione
- Estetica

Dispositivi di appoggio

Esempio: appoggio elastomerico B

La scelta dell'appoggio sarà condizionata dall'entità delle forze e degli spostamenti, in particolare :



	a (mm)	b (mm)	T_b (mm)	n	t_i	t_s	e (mm)
Appoggi interni	450	500	84	5	11	4	2.5
Appoggi esterni	250	400	63	5	8	3	2.5

Dispositivi di appoggio

Esempio: appoggio elastomerico B

Per gli appoggi interni lo spessore nominale dell'elastomero vale:

$$T_e = T_b - (n + 1) \cdot t_s = 84 - (5 + 1)4 = 60 \text{ mm}$$

Gli appoggi elastomerici sono introdotti come molle di costante K all'interno delle analisi, pertanto questa costante vale:

$$K_x = K_y = \frac{A \cdot G_b}{T_e} = \frac{2250 \cdot 0.09}{60} 1000 = 3375 \text{ kN/m}$$

Per gli appoggi di estremità lo spessore nominale dell'elastomero vale:

$$T_e = T_b - (n + 1) \cdot t_s = 63 - (5 + 1)3 = 45 \text{ mm}$$

$$K_x = K_y = \frac{A \cdot G_b}{T_e} = 2000 \text{ kN/m}$$

Dispositivi di appoggio

Esempio: appoggio elastomerico B

In un'analisi globale si considerano gli appoggi come molle agenti longitudinalmente (x) e trasversalmente (y), mentre gli spostamenti in direzione verticale z sono da considerarsi bloccati.

Verrà effettuata la verifica per gli appoggi interni:

$$A = a \cdot b = 45 \cdot 50 = 2250 \text{ cm}^2$$

Lunghezza piatto d'acciaio

$$a' = a - 2 \cdot 5 = 450 - 10 = 440 \text{ mm}$$

Larghezza piatto d'acciaio

$$b' = b - 2 \cdot 5 = 500 - 10 = 490 \text{ mm}$$

$$A_1 = a' \cdot b' = 44 \cdot 49 = 2156 \text{ cm}^2$$

Dispositivi di appoggio

Esempio: appoggio elastomerico B

Combinazione	P_z (kN)	P_x (kN)	P_y (kN)	$a_{a,d}$	$b_{b,d}$	$v_{x,d}$ (mm)	$v_{y,d}$ (mm)
1	5959	0	37.9	4.88	0.25	0	9.29
2	4775	0	63.8	3.9	0.184	0	15.6

Fattore di forma
$$S = \frac{a' \cdot b'}{2 \cdot t_i \cdot (a' + b')} = \frac{44 \cdot 49}{2 \cdot 11 \cdot (44 + 49)} \frac{1}{10} = 10.54$$

Area ridotta
$$A_r = A_1 \cdot \left(1 - \frac{v_{x,d}}{a'} - \frac{v_{y,d}}{b'} \right) = 2156 \left(1 - \frac{0}{44} - \frac{0.929}{49} \right) = 2115 \text{ cm}^2$$

Dovranno essere controllate le distorsioni, lo spessore dei piatti d'acciaio, e le altre verifiche elencate in precedenza

Dispositivi di appoggio

Esempio: appoggio elastomerico B

➤ Distorsioni

- Distorsioni causate dalla compressione

$$\varepsilon_{c,d} = \frac{1.5 \cdot F_{z,d}}{G \cdot A_r \cdot S} = \frac{1.5 \cdot 5959}{0.09 \cdot 2115 \cdot 10.54} = 4.46$$

Deformazioni tagliante

$$v_{xy,d} = \sqrt{v_{x,d}^2 + v_{y,d}^2} = \sqrt{0^2 + 0.929^2} = 0.929$$

- Distorsioni orizzontali

$$\varepsilon_{q,d} = \frac{v_{xy,d}}{T_q} = \frac{0.929}{6} = 0.15$$

- Distorsioni causate dalla rotazione

$$\varepsilon_{a,d} = \frac{a^2 \cdot a_{a,d} + b^2 \cdot a_{b,d}}{2 \cdot n \cdot t_i^2} = \frac{44^2 \cdot 4.88 + 49^2 \cdot 0.25}{2 \cdot 5 \cdot 11^2 \cdot 10} = 0.83$$

$$\varepsilon_{t,d} = K_L \cdot (\varepsilon_{c,d} + \varepsilon_{q,d} + \varepsilon_{a,d}) = 1.0 \cdot (4.46 + 0.15 + 0.83) = 5.44 \leq 7.0$$

Dispositivi di appoggio

Esempio: appoggio elastomerico B

➤ Tensione nel piatto d'acciaio

$$t_s = \frac{K_p \cdot F_{z,d} \cdot 2 \cdot t_i \cdot K_h \cdot \gamma_m}{A_r \cdot f_{yk}} = \frac{1.3 \cdot 5959 \cdot 2 \cdot 11 \cdot 1 \cdot 1}{2115 \cdot 23.5} = 3.4 \text{ mm} > 2 \text{ mm}$$

Utilizzando un piatto di 4 mm la verifica risulta soddisfatta

➤ Limiti alle rotazioni

$$\frac{F_{z,d} \cdot n \cdot t_i}{A_1} \cdot \left(\frac{1}{5 \cdot G \cdot S^2} + \frac{1}{E_b} \right) \geq \frac{a' \cdot a_{a,d} + b' \cdot a_{b,d}}{K_{r,d}}$$

$$\frac{5959 \cdot 5 \cdot 11}{2156 \cdot 10} \left(\frac{1}{5 \cdot 0.09 \cdot 10.54^2} + \frac{1}{200} \right) = 0.38 \geq \frac{44 \cdot 4.88 + 49 \cdot 0.25}{3 \cdot 10^3} = 0.076$$

Dispositivi di appoggio

Esempio: appoggio elastomerico B

➤ Controllo di stabilità

$$\frac{F_{z,d}}{A_r} < \frac{2 \cdot a' \cdot G \cdot S}{3 \cdot T_e} \Rightarrow \frac{5959}{2115} = 2.82 < \frac{2.44 \cdot 0.09 \cdot 10.54}{3.6} = 4.64$$

➤ Sicurezza contro lo slittamento

$$F_{z,Gmin} = F_{z,d,min} = 2231 \text{ kN} \quad \sigma_m = \frac{2231}{2250} = 0.99 \text{ kN/cm}^2 = 9.9 \text{ MPa}$$

$$\mu_e = 0.1 + \frac{1.5 K_r}{\sigma_m} = 0.1 + \frac{1.5 \cdot 0.6}{9.9} = 0.19$$

$$F_{xy,d} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} = \sqrt{0^2 + 37.9^2} = 37.9 \text{ kN} \leq 0.19 \cdot 2231 = 423.89 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{z,Gmin}}{A_r} = \frac{2231}{2115} \cdot 10 = 10.5 \text{ MPa} \geq 3 \text{ MPa}$$

FINE