1.2 PROVE DI CARICO DI VERIFICA

1.2.1 Premessa

Le prove di carico si distinguono in prove di VERIFICA e prove di ANALISI.

Le prime hanno lo scopo di verificare la corrispondenza dei risultati sperimentali con quelli derivanti dal calcolo teorico. Si eseguono sulle strutture di nuova costruzione o su strutture di cui si conoscono gli elementi costituenti (es. tipo di solaio, dimensione della trave, ecc.) ed i parametri caratteristici della forma (momento d'inerzia), del materiale (modulo d'elasticità) e delle condizioni di vincolo.

Le seconde si eseguono su strutture di cui non si conoscono con certezza i parametri geometrici e meccanici, si è in sostanza in assenza dei disegni e dei calcoli di progetto, o per le quali, per una serie di motivi (fessurazioni, materiali non rispondenti, danni dovuti da incendio o urti, vetustà, ecc.) le caratteristiche di progetto non sono garantite.

Nelle prove di carico eseguite con il sistema oleodinamico, si provoca la sollecitazione attraverso una forza concentrata su una striscia della struttura.

Nello sviluppo matematico che si affronterà, sarà ipotizzata una prova eseguita su un solaio, con l'applicazione del carico concentrato su una striscia di 1 metro nella direzione trasversale. Di seguito si affronteranno i casi di strutture diverse dai solai (travi, sbalzi, scale) o dove, per una migliore distribuzione dei momenti, si decide di applicare più forze concentrate.

1.2.2 Calcolo del carico concentrato – Metodo teorico

La forza equivalente $\boldsymbol{F_{eq}}$ è definita come:

forza applicata su una linea di 1 metro, in corrispondenza della mezzeria di un solaio, trasversalmente alle nervature, capace di indurre lo stesso momento massimo prodotto da un carico uniformemente distribuito q.

Per calcolare le F_{eq} partendo dal carico distribuito di prova q, si utilizza la formula:

$$\boldsymbol{F_{eq} = C_v \cdot b \cdot q \cdot L} \qquad (1)$$

dove:
C_v = coefficiente di vincolo;
b = fascia trasversale di solaio collaborante [m];
q = carico uniformemente distribuito di prova [daN/m^2];
L = luce del solaio [m].

Il concetto della forza equivalente è esteso anche all'applicazione di forze concentrate su più linee (ai terzi, ai quarti luce, ecc.), ed è intesa come *la forza somma di tutte le forze applicate*.

Il procedimento di calcolo del coefficiente C_v deriva dall'ipotesi di vincolo adottata. Per semplicità si ipotizzano vincoli eguali da entrambo i lati, mentre nell'eventualità di vincoli differenziati si adotterà la media dei valori ipotizzati.

Se con *P* si intende la forza gravante effettivamente su una striscia di 1 m, questa la si ottiene riducendo quella applicata F_{eq}, della quota sopportata dalla fascia trasversale di solaio collaborante *b*.

Pertanto $P = F_{eq}/b$ *e d*alla (1) otteniamo che $P = C_v \cdot q \cdot L$ dove C_v *si ricava dalle condizioni di vincolo ipotizzate.*

Caso di *semplice appoggio,* l'eguaglianza provoca:

$$\frac{PL}{4}=\frac{QL^2}{8} \qquad \text{da cui} \qquad P=\frac{1}{2}qL \qquad \text{determinando } \boldsymbol{C_v = 0{,}50}$$

in altre parole una forza pari a 0,5 qL determina in mezzeria lo stesso momento di un carico distribuito *q* su tutta la luce *L*.

Caso di *semincastro medio,* l'eguaglianza provoca:

$$\frac{PL}{4}-\frac{PL}{16}=\frac{qL^2}{4}-\frac{qL^2}{8}-\frac{qL^2}{24} \qquad \text{da cui} \qquad P=\frac{4}{9}qL \qquad \text{determinando } \boldsymbol{C_v = 0{,}44}$$

Caso di *incastro perfetto,* l'eguaglianza provoca:

$$\frac{PL}{4}-\frac{PL}{8}=\frac{qL^2}{4}-\frac{qL^2}{8}-\frac{qL^2}{12} \qquad \text{da cui} \qquad P=\frac{1}{3}qL \qquad \text{determinando } \boldsymbol{C_v = 0{,}33}$$

Tabella 1.1 - Valori di C_v per forza concentrata in mezzeria

Momento di estremità carico distribuito	*Momento di estremità carico concentrato*	*Freccia carico distribuito*	*Freccia carico concentrato*	C_v	
0	0	$\frac{5qL^4}{384EJ}$	$\frac{8PL^3}{384EJ}$	**0,50**	*semplice appoggio*
$-\frac{1}{48}qL^2$	$-\frac{1}{32}PL$	$\frac{4qL^4}{384EJ}$	$\frac{6{,}5PL^3}{384EJ}$	**0,48**	
$-\frac{1}{24}qL^2$	$-\frac{1}{16}PL$	$\frac{3qL^4}{384EJ}$	$\frac{5PL^3}{384EJ}$	**0,44**	
$-\frac{1}{16}qL^2$	$-\frac{1}{10{,}7}PL$	$\frac{2qL^4}{384EJ}$	$\frac{3{,}5PL^3}{384EJ}$	**0,40**	
$-\frac{1}{12}qL^2$	$-\frac{1}{8}PL$	$\frac{qL^4}{384EJ}$	$\frac{2PL^3}{384EJ}$	**0,33**	*incastro perfetto*

Il prodotto $b \cdot q \cdot L$ della formula (1) rappresenta l'entità del carico che si sarebbe utilizzato caricando con un carico distribuito la sola striscia di 1 m.

Il parametro b che rappresenta la fascia collaborante di solaio, può essere calcolato con la formula derivata dal metodo di Genel che individua la relazione:

$$b = 0{,}1 + 0{,}9 \cdot \delta \cdot \varphi \cdot L + \frac{0{,}23}{\delta} \cdot \varphi \cdot L \qquad (2)$$

Il valore di δ è calcolato mediante la formula:

$$\delta = 0{,}523 + 0{,}118\ \alpha' \qquad (3)$$

con α' che corrisponde al fattore moltiplicativo della formula generica di calcolo delle frecce dovute ai carichi distribuiti, valore che varia da un minimo di 1 per l'incastro perfetto a 5 nel caso del semplice appoggio.

Tabella 1.2 - Valori di δ

Freccia carico distribuito	α'	δ	
$\frac{5qL^4}{384EJ}$	5	1,11	*semplice appoggio*
$\frac{4qL^4}{384EJ}$	4	1,00	
$\frac{3qL^4}{384EJ}$	3	0,88	
$\frac{2qL^4}{384EJ}$	2	0,76	
$\frac{qL^4}{384EJ}$	1	0,64	*incastro perfetto*

Il termine φ della formula (2) rappresenta il rapporto tra i momenti di inerzia longitudinale e trasversale e varia con il tipo di solaio.

Tabella 1.3 - Valori di φ

$\varphi = J_y/J_x$	*Tipologia strutturale del solaio*
1,00	*solette in c.a.*
0,50	*solai in laterizio monolitici*
0,38	*solai in laterizio a camera d'aria*
0,25	*solai a camera d'aria con travi prefabbricate in cemento armato*

Nella tabella 1.4.1 ed 1.4.2 si riportano i valori di *b* calcolati con la (2).

Tabella 1.4.1 - Valori di *b* per solai in laterizio monolitici

		L [m]																				
φ = 0,5	***C_v***	**4,0**	**4,1**	**4,2**	**4,3**	**4,4**	**4,5**	**4,6**	**4,7**	**4,8**	**4,9**	**5,0**	**5,1**	**5,2**	**5,3**	**5,4**	**5,5**	**5,6**	**5,7**	**5,8**	**5,9**	**6,0**
Sem. app.	**0,50**	2,5	2,6	2,6	2,7	2,8	2,8	2,9	2,9	3,0	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,4	3,4	3,5	3,5	3,6	3,7	3,7
	0,48	2,4	2,4	2,5	2,5	2,6	2,6	2,7	2,8	2,8	2,9	2,9	3,0	3,0	3,1	3,2	3,2	3,3	3,3	3,4	3,4	3,5
	0,44	2,2	2,3	2,3	2,4	2,4	2,5	2,5	2,6	2,6	2,7	2,7	2,8	2,8	2,9	2,9	3,0	3,0	3,1	**3,2**	3,2	3,3
	0,40	2,1	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3	2,4	2,4	2,5	2,5	2,6	2,6	2,7	2,7	2,8	2,8	2,9	2,9	3,0	3,0	3,1
Inc. perf.	**0,33**	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,5	2,5	2,6	2,6	2,7	2,7	2,8	2,8	2,9	2,9

Tabella 1.4.2 - Valori di *b* per solai in laterizio a camera d'aria

		L [m]																				
φ = 0,38	***C_v***	**4,0**	**4,1**	**4,2**	**4,3**	**4,4**	**4,5**	**4,6**	**4,7**	**4,8**	**4,9**	**5,0**	**5,1**	**5,2**	**5,3**	**5,4**	**5,5**	**5,6**	**5,7**	**5,8**	**5,9**	**6,0**
Sem. app.	**0,50**	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,5	2,5	2,6	2,6	2,7	2,7	2,8	2,8	2,9
	0,48	1,8	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,6	2,6	2,7
	0,44	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,5	2,5
	0,40	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3
Inc. perf.	**0,33**	1,5	1,6	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2

Esempio di calcolo 1 – *Prova su solaio con una forza in mezzeria: metodo teorico*

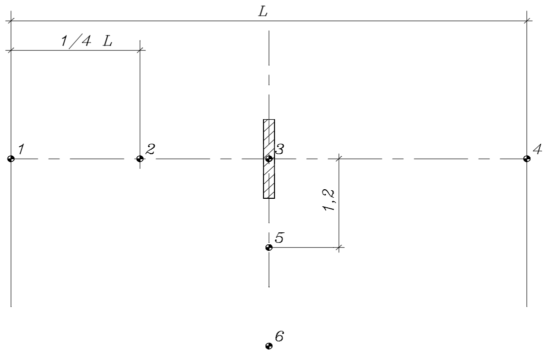
Si voglia calcolare la F_{eq} da applicare alla mezzeria di un solaio in laterizio di luce 5,8 m con un carico accidentale previsto in 250 daN/m^2.

Il valore di *b* dalla (2), tenendo conto di un'ipotesi di semincastro con $\delta = 0{,}88$ e $\varphi = 0{,}5$ risulta:

$$b = 0{,}1+0{,}9 \cdot \delta \cdot \varphi \cdot L+(0{,}23/\delta) \cdot \varphi \cdot L = 0{,}1+0{,}9 \cdot 0{,}88 \cdot 0{,}5 \cdot 5{,}8+(0{,}23/0{,}88) \cdot 0{,}5 \cdot 5{,}8 = 3{,}2 \text{ m}$$

Pertanto, dalla (1), la forza equivalente da applicare in mezzeria per simulare il carico distribuito risulta:

$$\boldsymbol{F_{eq}} = C_v \cdot b \cdot q \cdot L = 0{,}44 \cdot 3{,}2 \cdot 250 \cdot 5{,}8 = \mathbf{2.042\ daN}$$



Effettuando il calcolo della freccia teorica da confrontare con quella sperimentale, si dovrà adottare la formula del carico concentrato in modo che il confronto sia uniforme.

Nel calcolo si deve tener conto che la forza si distribuisce su una fascia virtuale di 3,2 m mentre il momento di inerzia è indicato per una fascia di solaio di 1 m. Pertanto se ad esempio il $J_x = 50.000\ cm^4$, assumendo un *modulo elastico* $E = 250.000\ daN/cm^2$ si ricava la freccia in mezzeria ponendo:

$$P = F_{eq}/b = 2042/3{,}2 = 638 \text{ daN/m}$$

$$f = \frac{5PL^3}{384EJ} = \frac{5 \cdot 638 \cdot 580^3}{384 \cdot 250000 \cdot 50000} = 0{,}130 \text{ cm}$$

Se si fosse voluto effettuare la prova di carico utilizzando il carico distribuito posto su una fascia di 1 metro, si sarebbe applicato un carico equivalente $q_{eq} = b \cdot q = 3{,}2 \cdot 250 = 800$ *daN/m*, facendo posare sul solaio un carico totale pari a $q_{eq} \cdot L = 4.640$ *daN* (pari a 186 sacchi di cemento da 25 daN).

La freccia teorica si sarebbe calcolata in:

$$f = \frac{3qL^4}{384EJ} = \frac{3 \cdot 2{,}50 \cdot 580^4}{384 \cdot 250000 \cdot 50000} = 0{,}177 \text{ cm}$$

1.2.3 Calcolo del carico concentrato – Metodo sperimentale

Il calcolo del carico concentrato equivalente F_{eq} si basa sulla conoscenza del grado di vincolo e del rapporto tra i momenti di inerzia longitudinale e trasversale (par.1.2.2), il primo per determinare C_v ed il secondo per determinare b della (1).

Spesso queste informazioni non sono note o si ritiene più opportuno basarsi sui rilievi sperimentali per valutare le reali condizioni di vincolo e di distribuzione del carico sulle fasce trasversali non caricate.

Nel seguito indicheremo la via sperimentale del calcolo del carico equivalente F_{eq} che si basa sul rilievo della deformata longitudinale e trasversale di mezzeria. Per semplicità espositiva ipotizziamo una deformata simmetrica.

Valutiamo innanzitutto il valore del coefficiente di vincolo C_v.

Definito il parametro R come rapporto tra la freccia a 1/4 luce $f_{1/4}$, e la freccia in mezzeria $f_{1/2}$:

$$R = \frac{f_{1/4}}{f_{1/2}} \qquad (4)$$

il valore di questo rapporto si può calcolare partendo dall'equazione generale:

$$f'' = -\frac{M_x}{EJ} \qquad (5)$$

Nel caso di forza concentrata in mezzeria:

$M_x = \dfrac{F \cdot x}{2} + M_a$ sostituendo nella (5) otteniamo $-EJ\,f'' = \dfrac{F \cdot x}{2} + M_a$

dove M_x è il momento flettente in corrispondenza della sezione generica e M_a è il momento d'incastro all'estremo.

Ponendo $M_a = \alpha FL$, con α variabile da -1/8 in caso d'incastro perfetto a 0 nel caso di semplice appoggio, e integrando due volte, calcolando le costanti d'integrazione attraverso le condizioni di orizzontalità della tangente al centro della deformata (per $x = 1/2\ L$ si ha $f' = 0$) e di freccia nulla all'estremo (per $x = 0$ si ha $f = 0$), si ottiene:

$$-\frac{EJ}{F} f = \frac{x^3}{12} + \frac{\alpha \cdot L \cdot x^2}{2} - \frac{L^2 x}{16} - \frac{\alpha L^2 \cdot x}{2}$$

Possiamo ora calcolare il rapporto R per $x = L/4$ e $x = L/2$ ottenendo:

$$R = \frac{f_{1/4}}{f_{1/2}} = \frac{11 + 72\alpha}{16 + 96\alpha} \qquad (6)$$

Da cui: per $\alpha = 0$ (semplice appoggio) $R = 0{,}69$;
per $\alpha = -1/8$ (incastro perfetto) $R = 0{,}50$.

Dalla relazione (6) si calcolano tutti gli R in funzione di α e da questo il corrispondente C_v in base alla Tabella 1.1.

Tabella 1.5 - Corrispondenza tra R e C_v

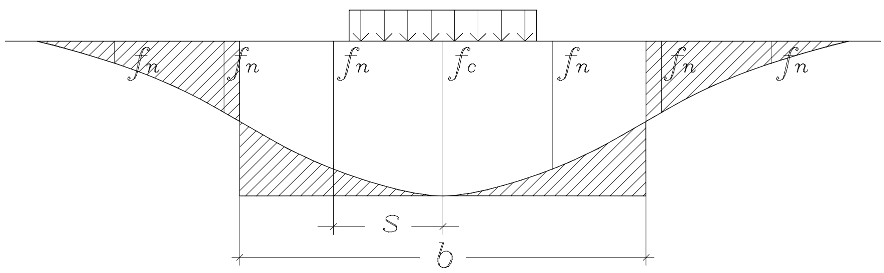
R	$M_a=\alpha FL$	f	$\boldsymbol{C_v}$	
0,69	/	$\frac{8PL^3}{384EJ}$	***0,50***	*semplice appoggio*
0,67	$-\frac{1}{32}PL$	$\frac{6{,}5PL^3}{384EJ}$	***0,48***	
0,65	$-\frac{1}{16}PL$	$\frac{5PL^3}{384EJ}$	***0,44***	
0,61	$-\frac{1}{10{,}7}PL$	$\frac{3{,}5PL^3}{384EJ}$	***0,40***	
0,50	$-\frac{1}{8}PL$	$\frac{2PL^3}{384EJ}$	***0,33***	*incastro perfetto*

Tabella che corrisponde all'equazione lineare:

$$C_v = 0{,}895\,R - 0{,}117 \qquad (7)$$

Procediamo ora alla determinazione del valore della fascia trasversale collaborante b.

Si faccia riferimento ad un solaio di dimensione trasversale indefinita. Caricando solo una porzione limitata di solaio, la deformata nella direzione trasversale sarà rappresentata da una sinusoide. La sezione collaborante b è quella che immaginariamente si deformerebbe della stessa ampiezza del punto centrale caricato, racchiudendo la stessa area della deformata trasversale reale.



Essendo $A = \sum f_n \cdot s = b \cdot f_c$ ne deriva che:

$$b = \frac{s \cdot \sum f_n}{f_c} \qquad (8)$$

Nell'ipotesi di deformata trasversale simmetrica si potranno ridurre i punti di misura ad un sola parte della deformata trasversale utilizzando la formula:

$$b = \frac{(f_c + 2\sum f_i)\cdot s}{f_c} \qquad (9)$$

dove con f_i sono intese tutte le frecce misurate solo su mezza deformata trasversale depurate del cedimento degli appoggi.

Per l'esecuzione di una prova di carico di un solaio si procede ponendo almeno quattro sensori longitudinali (due agli appoggi, quarto luce, in mezzeria) e due trasversali su un solo lato generalmente a distanza $s = 1{,}2\ m$. Si applica un carico minimo (generalmente 1000 daN), rilevando tutte le deformazioni indicate per calcolare C_v e b e da questi il rapporto tra q ed F_{eq}.

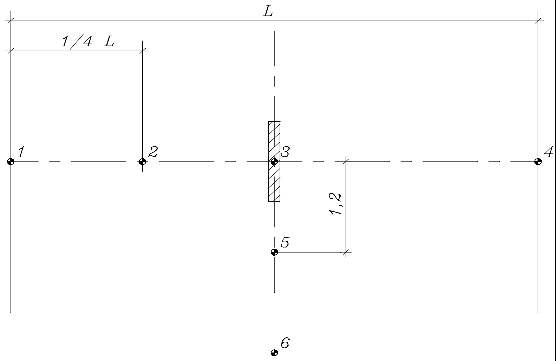
Si potrà quindi eseguire la prova di carico applicando la forza equivalente che determina lo stesso momento massimo del carico distribuito di prova.

Per una migliore determinazione del legame F_{eq} con q il calcolo sarà ripetuto al ciclo massimo applicando le eventuali variazioni dei rapporti tra le frecce.

Esempio di calcolo 2 – *Prova su solaio con una forza in mezzeria – Metodo sperimentale*

Si voglia calcolare, col metodo sperimentale, la F_{eq} da applicare alla mezzeria di un solaio, di luce 5,2 m, per un carico accidentale previsto in 400 daN/m^2.

Posizioniamo i sensori come in figura.



Applicato un carico di 3.000 daN si ottengono le frecce indicate in tabella.

Sensore n.	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
Freccia (mm)	0,02	1,04	1,53	0,04	1,08	0,46

Si può così calcolare il valore di *R* dalla (6) e da questo il C_v dalla tabella 1.5 o dalla formula (7). Va depurato il cedimento medio degli appoggi pari a 0,03 mm.

$$R = \frac{f_{1/4}}{f_{1/2}} = \frac{1{,}04 - 0{,}03}{1{,}53 - 0{,}03} = 0{,}67 \qquad \text{da cui } C_v = 0{,}48$$

Procediamo ora al calcolo del valore della fascia collaborante *b* attraverso la (9):

$$b = \frac{(f_c + 2\sum f_i)\cdot s}{f_c} = \frac{(1{,}50 + 2(1{,}05 + 0{,}43))\cdot 1{,}2}{1{,}50} = 3{,}6\ m$$

Pertanto, dalla (1), la forza equivalente da applicare in mezzeria per simulare il carico distribuito risulta:

$$\boldsymbol{F_{eq}} = C_v \cdot b \cdot q \cdot L = 0{,}48 \cdot 3{,}6 \cdot 400 \cdot 5{,}2 = \mathbf{3.594\ daN}$$

Effettuando il calcolo della freccia teorica da confrontare con quella sperimentale, si dovrà adottare la formula del carico concentrato in modo che il confronto sia uniforme.

Nel calcolo si deve tener conto che la forza si distribuisce su una fascia collaborante di 3,6 m mentre il momento di inerzia è indicato per una fascia di solaio di 1 metro. Pertanto se ad esempio il J_x = *48*.000 cm^4 , assumendo un *modulo elastico E = 250.000 daN/cm*^{2} si ricava la freccia in mezzeria ponendo $P = F_{eq}/b = 3594/3{,}6 = 998$ *daN/m*. Utilizzando la formula indicata in Tabella 1.5 al corrispondente C_v, si ottiene che:

$$f = \frac{6{,}5PL^3}{384EJ} = \frac{6{,}5 \cdot 998 \cdot 520^3}{384 \cdot 250000 \cdot 48000} = 0{,}198\ cm$$

1.2.4 Applicazione di più forze

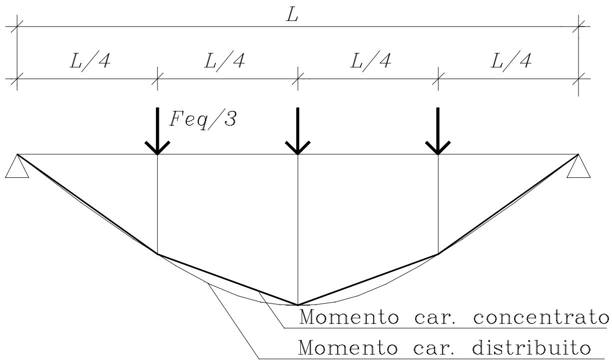
Quando la luce ed i carichi sono elevati (oltre 6 m e 400 daN/m2) si rende necessario l'applicazione di più forze, per evitare una concentrazione eccessiva sulla striscia caricata e per ottenere una migliore distribuzione del momento rendendolo, lungo la linea longitudinale, maggiormente aderente a quello del carico distribuito.

Si utilizza la formula (1) $F_{eq} = C_v \cdot b \cdot q \cdot L$

dove per F_{eq} va intesa la somma delle forze applicate in più punti su strisce di 1 metro.

Analizziamo in dettaglio l'applicazione di tre forze poste ai quarti luce ed in mezzeria, che risulta essere la metodologia più applicata.

Nel caso di semplice appoggio l'eguaglianza dei momenti in mezzeria diventa:



$$\frac{F_{eq}L}{4} - \frac{F_{eq}L}{12} = \frac{qL^2}{8}$$

da cui

$$F_{eq} = \frac{6}{8}qL$$

determinando il valore di $C_v = 0,75$

Se andiamo a confrontare i momenti ai quarti luce troviamo che il carico distribuito produce un momento pari a

$$M_{1/4} = \frac{qL^2}{8} - \frac{qL^2}{32} = \frac{3}{32}qL$$

e lo stesso valore si ottiene per i tre carichi concentrati

$$M_{1/4} = \frac{F_{eq}L}{8} = \frac{3}{32}qL$$

In altre parole il momento flettente dovuto ai tre carichi concentrati corrisponde, nei tre punti di applicazione, allo stesso momento provocato dal carico distribuito.

Nel caso di incastro perfetto l'eguaglianza dei momenti in mezzeria diventa:

$$\frac{5F_{eq}L}{384} = \frac{qL^2}{4} - \frac{qL^2}{8} - \frac{qL^2}{12}$$

da cui

$$F_{eq} = \frac{16}{25}qL$$

determinando $C_v = 0{,}64$.

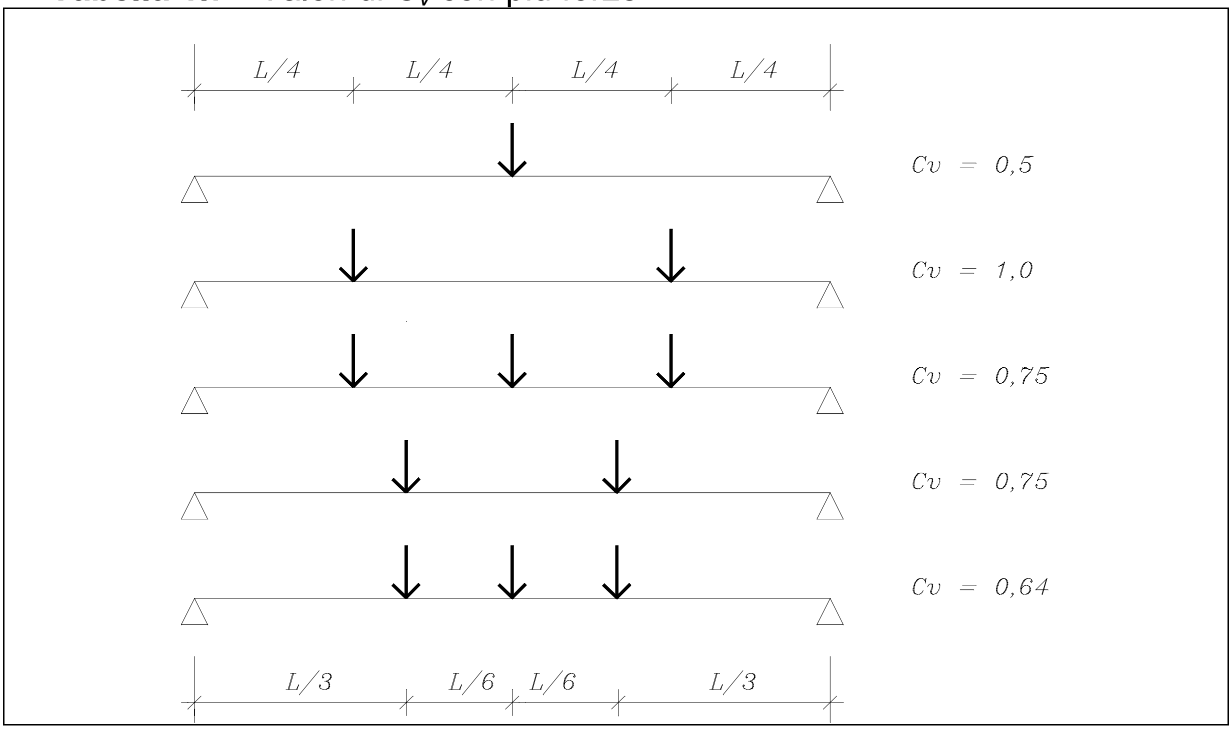
Prova a spinta con 7 forze

Tabella 1.6 - Valori di C_v con tre forze $P = F_{eq}/3b$ poste ai quarti luce

Momento di estremità carico distribuito	*Momento di estremità carico concentrato*	*Freccia carico distribuito*	*Freccia carico concentrato*	C_v	
/	/	$\frac{5qL^4}{384EJ}$	$\frac{17\,PL^3}{384\,EJ}$	**0,75**	*semplice appoggio*
$-\frac{1}{12}qL^2$	$-\frac{5}{16}PL$	$\frac{qL^4}{384EJ}$	$\frac{3{,}69PL^3}{384EJ}$	**0,64**	*incastro perfetto*

Il valore del coefficiente di vincolo C_v è calcolato per le diverse configurazioni di carico concentrato.

Tabella 1.7 - Valori di C_v con più forze

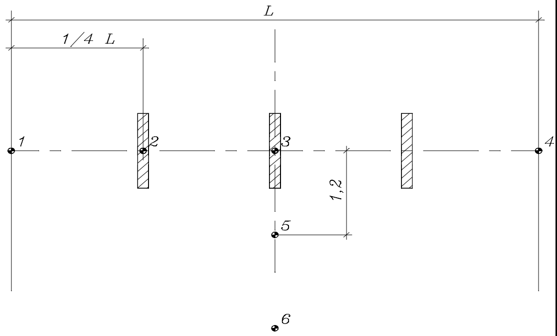


Esempio di calcolo 3 – *Prova su solaio con 3 forze*

Si voglia calcolare la F_{eq} da applicare ai quarti luce di un solaio in laterizio semplicemente appoggiato di luce 5,8 m con un carico accidentale previsto in 500 daN/m^2.

Il valore di C_v è pari a 0,75 mentre il valore di *b* si calcola col metodo sperimentale.

Applicato un primo carico di 500 daN per singola forza si ottengono, come esempio, le frecce indicate in tabella.



Sensore n.	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
Freccia (mm)	0,02	0,35	0,49	0,04	0,34	0,16

Procediamo al calcolo del valore della fascia collaborante *b* attraverso la (9).

Va depurato il cedimento medio degli appoggi pari a 0,03 mm.

$$b = \frac{(f_c + 2\sum f_i)\cdot s}{f_c} = \frac{(0{,}46 + 2(0{,}31 + 0{,}13))\cdot 1{,}2}{0{,}46} = 3{,}5\ m$$

Pertanto, dalla (1), la forza equivalente, somma delle tre forze concentrate da applicare per simulare il carico distribuito risulta:

$\boldsymbol{F_{eq}} = C_v \cdot b \cdot q \cdot L = 0{,}75 \cdot 3{,}5 \cdot 500 \cdot 5{,}8 = \mathbf{7.612\ daN}$ pari a 3 forze da 2.537 daN

Effettuando il calcolo della freccia teorica da confrontare con quella sperimentale, si dovrà adottare la formula del carico concentrato in modo che il confronto sia uniforme. Nel calcolo si deve tener conto che la forza si distribuisce su una fascia virtuale di 3,4 m mentre il momento di inerzia è indicato per una fascia di solaio di 1 metro. Pertanto se ad esempio il $J_x = 78.000\ cm^4$, assumendo un *modulo elastico* $E = 225.000\ daN/cm^2$ si ricava la freccia in mezzeria ponendo la singola forza pari a $P = F_{eq}/3b = 7612/3{\cdot}3{,}5 = 725\ daN/m$.

La formula per il calcolo della freccia teorica in mezzeria si può ottenere dalla somma degli effetti delle frecce provocate dalle singole forze.

Per quelle poste a ¼ luce $f = \frac{4{,}5PL^3}{384EJ}$ e per quella posta in mezzeria abbiamo $f = \frac{8PL^3}{384EJ}$

per la somma degli effetti otteniamo:

$$f = \frac{17PL^3}{384EJ} = \frac{17 \cdot 725 \cdot 580^3}{384 \cdot 225000 \cdot 78000} = 0{,}357\ cm$$

Se si fosse voluto effettuare la prova di carico utilizzando il carico distribuito posto su una fascia di 1 metro, si sarebbe applicato un carico equivalente $q_{eq} = b \cdot q = 3{,}5 \cdot 500 = 1.750\ daN/m^2$, facendo posare sul solaio un carico totale pari a $q_{eq}\ L = 10.150\ daN$.

La freccia teorica si sarebbe calcolata in:

$$f = \frac{5qL^4}{384EJ} = \frac{5 \cdot 5{,}00 \cdot 580^4}{384 \cdot 225000 \cdot 78000} = 0{,}420\ cm$$

1.2.5 Prova su scale

Per questo tipo di strutture la metodologia di calcolo adottata è la stessa. Si tratta di calcolare la forza equivalente F_{eq} che produce il massimo stato tensionale che in genere è il momento massimo.
La formula generale è sempre la (1) $F_{eq} = C_v \cdot b \cdot q \cdot L$.

Il calcolo è semplice quando si tratta di struttura appoggiata o incastrata sui due lati opposti. In questo caso C_v è sempre legato al grado di vincolo all'estremità della struttura stessa, mentre b è rappresentato dalla larghezza della scala.

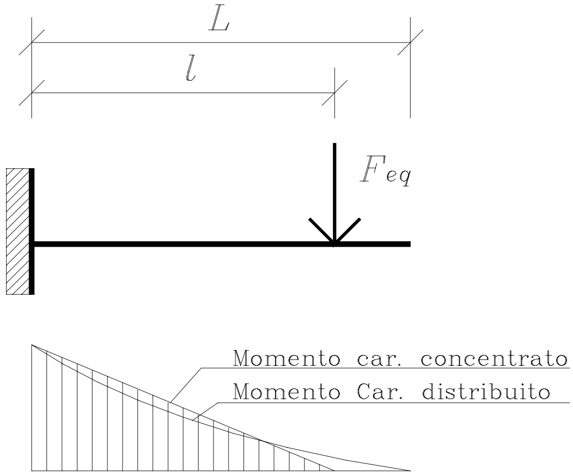
1.2.6 Prova su sbalzi

Prendiamo, quale esempio, il caso del balcone.

Nella formula generale, $F_{eq} = Cv \cdot b \cdot q \cdot L$ la b è rappresentata dalla larghezza del balcone nell'ipotesi che questo non sia eccessivamente largo. In caso contrario si misura b col metodo sperimentale (par. 1.2.3).

Il valore di C_v dipende dalla posizione della forza rispetto alla luce dello sbalzo.

Con P si intende la forza gravante su una striscia di 1 m, cioè $P = F_{eq}/b$ e q il carico distribuito per metro quadro:



$$Pl = \frac{qL^2}{2}$$

da cui

$$P = \frac{1}{2} q \frac{L^2}{l}$$

Nella formula generale il valore C_v si determina in base ad l:

per	$l = L/2$	comporta $C_v = 1{,}0$
per	$l = L$	comporta $C_v = 0{,}5$

Nella pratica delle prove sui balconi si tende ad usare più martinetti in modo da coprire quasi integralmente la larghezza, evitando il calcolo del b. Generalmente la forza è posta a $L/2$ ed il contrasto superiore è ottenuto piegando i martinetti e facendoli corrispondere con l'incastro del balcone superiore.

Con questa configurazione la forza complessiva da applicare corrisponde al carico totale $F_{eq} = Q = q \cdot L \cdot b$ dove b è tutta la larghezza del balcone. In questo modo di operare si ha il vantaggio che il taglio prodotto dal carico concentrato all'incastro corrisponde a quello prodotto dal carico distribuito.

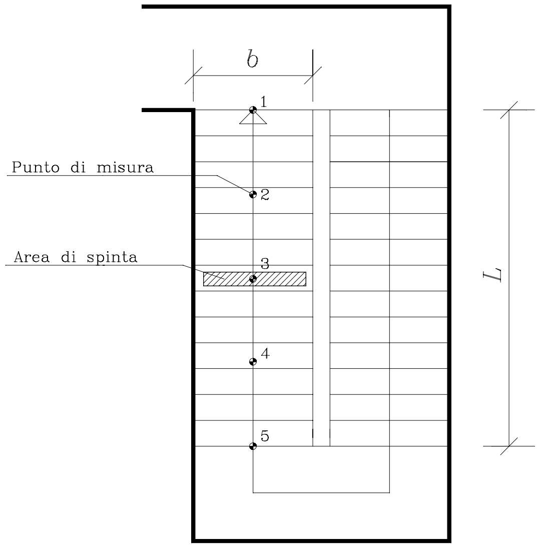
1.2.7 Prova su travi

Il caso della trave è assimilabile a quello del solaio dove la fascia collaborante va intesa come l'area di solaio che grava sulla trave. Nella formula generale, $F_{eq} = C_v \cdot b \cdot q \cdot L$, eseguendo la prova di carico su una trave intermedia, la b rappresenta la somma delle due metà dei solai gravanti.

Esempio di calcolo 4 – *Prova su una scala*

Si voglia calcolare la F_{eq} da applicare alla mezzeria di una scala incastrata sui pianerottoli di larghezza 1,2 m, luce $L = 4{,}16\ m$ con carico da applicare previsto in 600 daN/m^2 (400 daN/m^2 di accidentale e 200 daN/m^2 di pavimentazione mancante).

Il valore di C_v presunto è pari a 0,40 (Tabella 1.5) mentre il valore di b è pari a 1,2 m.



Pertanto, dalla (1), la forza equivalente da applicare in mezzeria per simulare il carico distribuito risulta:

$$\boldsymbol{F_{eq}} = C_v \cdot b \cdot q \cdot L = 0{,}40 \cdot 1{,}2 \cdot 600 \cdot 4{,}16 = \mathbf{1.198\ daN}$$

Volendo caricare con un'eccedenza di sicurezza di circa il 20% si decide di applicare 1.400 daN da raggiungere con 4 gradienti da 350 daN ciascuno.

La tabella a seguito riporta i valori di freccia rilevati nel III ciclo di carico.

	Frecce (mm)				
Forza (daN)	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*
350	0,02	0,12	0,18	0,13	0,02
700	0,04	0,25	0,38	0,26	0,04
1.050	0,06	0,39	0,58	0,40	0,07
1.400	**0,09**	**0,56**	**0,82**	**0,58**	**0,11**
1.050	0,07	0,41	0,59	0,42	0,08
700	0,05	0,27	0,40	0,28	0,06
350	0,02	0,13	0,20	0,14	0,02
0	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01

Sulla base dei risultati possiamo calcolare

$$R = \frac{f_{1/4}}{f_{1/2}} = \frac{0{,}57 - 0{,}10}{0{,}82 - 0{,}10} = 0{,}65$$

e dalla tabella 1.5 $C_v = 0{,}44$

In sostanza un incastro inferiore di quello previsto che comporta che il carico distribuito simulato è:

$$q = \boldsymbol{F_{eq}}/C_v \cdot b \cdot L = 1400 / (0{,}44 \cdot 1{,}2 \cdot 4{,}16) = 637\ daN/m^2$$

Se il J_x = 36.000 cm^4, assumendo un modulo elastico $E = 350.000\ daN/cm^2$, si ricava la freccia in mezzeria ponendo $P = F_{eq}/b = 1400/1{,}2 = 1.167\ daN/m$:

$$f = \frac{5PL^3}{384EJ} = \frac{5 \cdot 1167 \cdot 416^3}{384 \cdot 350000 \cdot 36000} = 0{,}087\ cm$$

Esempio di calcolo 5 – *Prova su balcone con due forze*

Si voglia calcolare la F_{eq} da applicare alla mezzeria di un balcone applicando **due** forze.

Sia $L = 1{,}6\ m$, $H = 3{,}0\ m$ per una larghezza del balcone pari a $b = 3{,}8\ m$, il carico da applicare previsto è di 600 daN/m^2 (400 daN/m^2 di accidentale e 200 daN/m^2 di pavimentazione mancante).

Nel caso specifico va calcolata la componente verticale della forza concentrata. Pertanto, dalla (1), la forza equivalente da applicare in mezzeria per simulare il carico distribuito risulta:

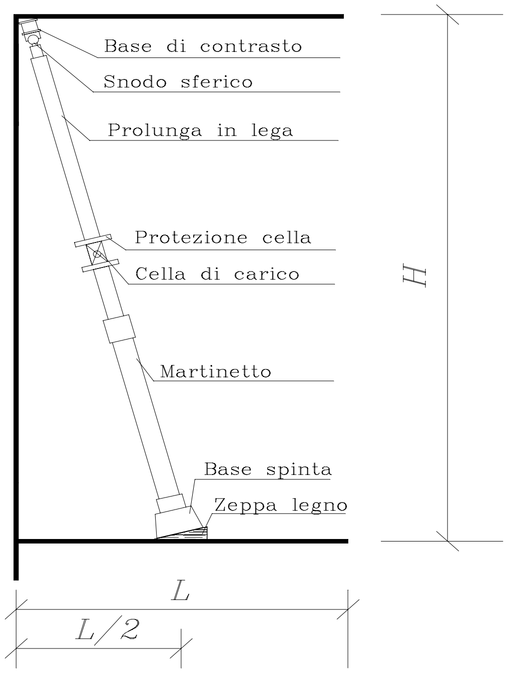
$$\boldsymbol{F_{eq}} = C_v \cdot b \cdot q \cdot L = 1{,}0 \cdot 3{,}8 \cdot 600 \cdot 1{,}6 = \boldsymbol{3.648\ daN}$$

Va però tenuto conto dell'inclinazione e pertanto, dalla componente verticale calcolata, si determina la forza da applicare ai martinetti:

$$F = Feq\sqrt{1+\left(\frac{L}{2H}\right)^2} = 3648\sqrt{1+\left(\frac{1{,}6}{2\cdot 3}\right)^2}$$

$$= 3.775\ daN$$

corrispondente a 1.888 daN per martinetto.

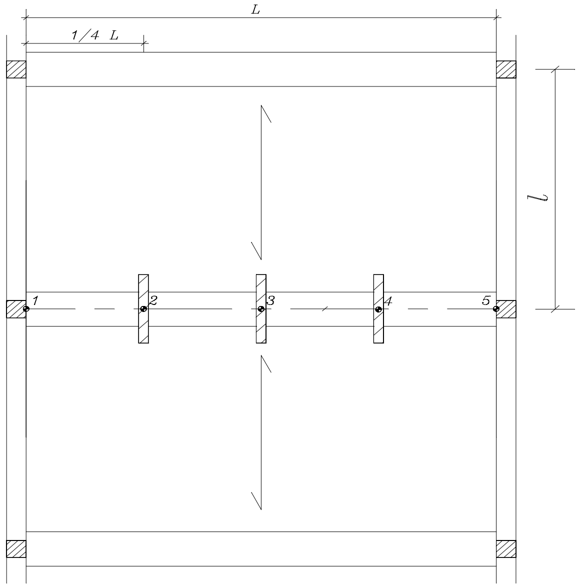


Se il J_x = 15.000 cm^4, con un *modulo elastico E* = 350.000 daN/cm^2, si ricava la freccia in mezzeria ponendo $P = F_{eq}/b$ = 3648/3,8 = 960 daN/m:

$$f = \frac{PL^3}{24EJ} = \frac{960 \cdot 160^3}{24 \cdot 350000 \cdot 15000} = 0{,}031\ cm$$

Esempio di calcolo 6 – *Prova su trave con 3 forze*

Si voglia calcolare la F_{eq} da applicare ai quarti luce di una trave in c.a. luce $L = 6{,}6\ m$ con solai gravanti di luce $L = 5{,}4\ m$ e carico da applicare previsto è di 450 daN/m^2 (250 daN/m^2 di accidentale e 200 daN/m^2 di pavimentazione mancante).



Dalla tabella 1.6 ricaviamo il valore di C_v che è pari a 0,64 mentre il valore di *b* è 5,4 m (somma delle due metà dei solai gravanti).

Pertanto, dalla (1), la forza equivalente, somma delle tre forze concentrate da applicare per simulare il carico distribuito risulta:

$$\boldsymbol{F_{eq}} = C_v \cdot b \cdot q \cdot L = 0{,}64 \cdot 5{,}4 \cdot 450 \cdot 6{,}6 = \boldsymbol{10.264\ daN}$$

Sia $J_x = 125.000\ cm^4$ *e assumendo un modulo elastico* $E = 300.000\ daN/cm^2$, la freccia teorica in mezzeria si può ottenere dalla somma degli effetti delle frecce provocate dalle singole forze $P = F_{eq}/3 = 10264 = 3.421\ daN/m$.

Per le forze poste a ¼ luce $f = \dfrac{0{,}844PL^3}{384EJ}$

e per quella posta in mezzeria abbiamo $f = \dfrac{2PL^3}{384\,EJ}$.

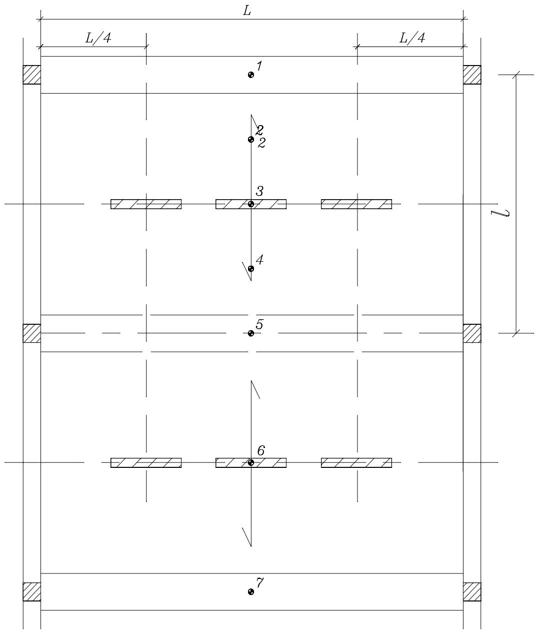
Per la somma degli effetti otteniamo:

$$f = \frac{3{,}69PL^3}{384EJ} = \frac{3{,}69 \cdot 3421 \cdot 660^3}{384 \cdot 300000 \cdot 125000} = 0{,}252\ cm$$

Volendo eseguire anche la prova a taglio massimo si potranno spostare le sole due forze laterali in prossimità dei pilastri, producendo una forza pari alla reazione corrispondente alla metà del carico totale:

$Q = b \cdot q \cdot L = 5{,}4 \cdot 450 \cdot 6{,}6 = 16.038\ daN$ corrispondente a 8.019 daN per martinetto.

Esempio di calcolo 7 – *Prova su trave con 6 forze*



Si voglia eseguire la prova di carico che solleciti contemporaneamente due solai e la trave dell'esempio n. 6.

La F_{eq} da applicare sui singoli solai in mezzeria si calcola assumendo il *b*, riferito al solaio, pari alla larghezza massima *L*. Assumendo provvisoriamente il coefficiente di vincolo del solaio pari a C_v = *0,44* (da modificare nel calcolo finale in base alle frecce sperimentali Par. 1.2.3) si ottiene:

$$\mathbf{F_{eq}} = C_v \cdot b \cdot q \cdot L = 0{,}44 \cdot 6{,}6 \cdot 450 \cdot 5{,}4 = \mathbf{7.057\ daN}$$

Si procede all'esecuzione della prova applicando un incremento per un totale di 9.000 daN corrispondente a 3.000 daN per martinetto da raggiungere con 4 gradienti da 750 daN ciascuno.

La tabella a seguito riporta i valori di freccia rilevati nel III ciclo di carico.

	Frecce rilevate (mm)						
P (daN)	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
750	0,24	0,43	0,62	0,74	0,51	0,60	0,24
1.500	0,50	0,97	1,26	1,56	1,05	1,24	0,49
2.250	0,78	1,50	1.91	1,88	1,60	1,88	0,77
3.000	1,04	2,00	2,64	2,56	**2,18**	2,60	1,02
2.250	0,81	1,55	1,95	1,92	1,65	1,92	0,80
1.500	0,53	1,01	1,30	1,59	1,09	1,27	0,51
750	0,25	0,46	0,65	0,77	0,54	0,62	0,26
0	0,01	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01

Per il calcolo del coefficiente sperimentale di vincolo del solaio dobbiamo innanzitutto depurare le frecce dal cedimento delle travi. Al carico massimo risulta:

	Frecce del solaio (mm)				
P (daN)	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*
3.000	0,00	0,68	**1,03**	0,66	0,00

Sulla base dei risultati possiamo calcolare, con la (6), *R* prendendo $f_{1/4}$ quale media dei due valori:

$R = \dfrac{f_{1/4}}{f_{1/2}} = \dfrac{0{,}67}{1{,}03} = 0{,}65$ e dalla tabella 1.5 ricaviamo $C_v = 0{,}44$. Abbiamo quindi simulato sui solai un carico distribuito di $q = \mathbf{F_{eq}} / C_v \cdot b \cdot L = 9.000 / (0{,}44 \cdot 6{,}6 \cdot 5{,}4) = 574\ daN/m^2$. La freccia teorica si calcolerà utilizzando la forza concentrata *P = Feq/b = 9000/6,6 = 1.364 daN/m*, e dalla tabella 1,5, con $J_x = 62.000\ cm^4$, assumendo un *modulo elastico* $E = 275.000\ daN/cm^2$ risulta:

$$f = \frac{3{,}5PL^3}{384EJ} = \frac{3{,}5 \cdot 1364 \cdot 540^3}{384 \cdot 275000 \cdot 62000} = 0{,}115\ cm$$

Sulla trave agiscono tre forze considerabili concentrate, con risultante ai quarti di luce e con gli stessi valori agenti sul solaio (derivante dalle due reazioni di forze uguali). Dalla tabella 1.6 $C_v = 0{,}64$ e pertanto risulta che il carico, per metro lineare, distribuito simulato risulta :

$$q = Feq/C_v \cdot L = 9000 / (0{,}64 \cdot 6{,}6) = 2.131\ daN/m$$

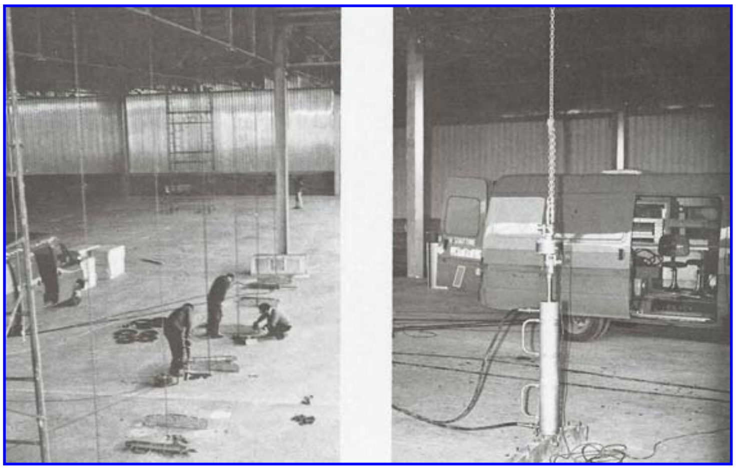
La freccia teorica, dalla tabella 1.6, risulta:

$$f = \frac{qL^4}{384EJ} = \frac{21{,}31 \cdot 660^4}{384 \cdot 300000 \cdot 125000} = 0{,}281\ cm$$

1.2.8 Prova su capriate

Nelle prove sulle capriate i carichi sono applicati direttamente sui nodi, generalmente quelli superiori, attraverso l'ancoraggio degli stessi a speciali catene che all'estremo inferiore vengono agganciate a martinetti oleodinamici di trazione, a loro volta fissati ad un opportuno contrasto.

Quando la pavimentazione è sufficientemente robusta, almeno 15 cm di calcestruzzo armato, i martinetti vengono bloccati a putrelle d'acciaio fissate al suolo tramite tasselli. In altre situazioni l'ancoraggio è costituito da normali pesi o da autocarri.



Questa tecnica ha il pregio di corrispondere alle effettive condizioni di progetto in quanto, il carico distribuito accidentale viene trasmesso, attraverso gli arcarecci, direttamente ai nodi sottoforma di carichi concentrati.

Per determinare il valore della forza *P* da applicare su ogni nodo caricato, il calcolo è il seguente:

$$P = \frac{q \cdot i \cdot L}{n} \qquad (10)$$

dove

q = carico accidentale di prova [kN/m^2];

i = interasse delle capriate [m];

L = luce della capriata [m];

N = numero di nodi su cui è applicata la forza P.

Nella pratica le capriate sono collaudate o analizzate quando la copertura è già in opera, ciò comporta che i carichi sono in parte ridistribuiti sulle capriate adiacenti tramite gli arcarecci, i controventi e la copertura stessa. L'ideale, pertanto, sarebbe quello di caricare contemporaneamente almeno tre capriate.

Prescindendo da questa dispendiosa possibilità si può considerare l'apporto collaborante delle capriate adiacenti.

Supponendo che la deformazione si fermi alle prime capriate adiacenti si dovrà incrementare la forza *P* della parte di carico distribuita lateralmente, attraverso il coefficiente di incremento *I* ricavato tramite la formula:

$$K = 1 + \frac{\sum Y_a}{Y_c} \qquad (11)$$

dove

K = coefficiente di incremento delle forze P;

Y_c = freccia centrale della capriata caricata;

Y_a = frecce centrali delle capriate adiacenti.

Il valore di Y_c e Y_a da introdurre nella (11) è rilevabile a qualunque entità di carico, in quanto K non dipende dal valore delle forze in gioco; questo ci consente una valutazione delle forze da applicare $P \cdot I$ anche al primo gradino di carico.

In linea preventiva si tenga conto che K si pone generalmente tra 1,2 ÷ 1,8.

Per depurare dalle misure gli inevitabili fenomeni di assestamento dei nodi la forza massima sarà raggiunta tramite almeno quattro cicli di carico e nel complesso seguendo lo schema ottimale riferito al carico $P \cdot K$ applicato:

I ciclo *0 - ¼ - 0*
II ciclo *0 - ¼ - ½ 0*
III ciclo *0 - ¼ - ½ - ¾ - 1 - 0*
IV ciclo *0 - ¼ - ½ - ¾ - 1 - ¾ - ½ - ¼ - 0*
V ciclo *0 - 1 - 0*

Nel caso delle prove di carico di capriate metalliche la semplice rilevazione della deformata non è sufficiente per garantire l'affidabilità della struttura, in quanto l'eventuale vicinanza del carico di collasso per carico di punta non si evidenzia dal valore delle frecce.

Sulla base di questa considerazione è consigliabile la contemporanea rilevazione di alcune tensioni almeno sugli elementi più caricati. Questa possibilità, fornita con rapidità dalle tecniche che si presenteranno nel proseguo (Cap. 2), ci consente l'esatta valutazione del grado di sicurezza della struttura.

Sensore posto su un nodo caricato

Contrasto dei martinetti con autocarri

Fissaggio martinetti alla pavimentazione

Per la misura delle frecce, con altezze all'intradosso fino a 6 m si possono utilizzare le aste telescopiche con i sensori differenziali montati in testa, al di là di questo limite è opportuno adottare il metodo inclinometrico (Cap. 3).

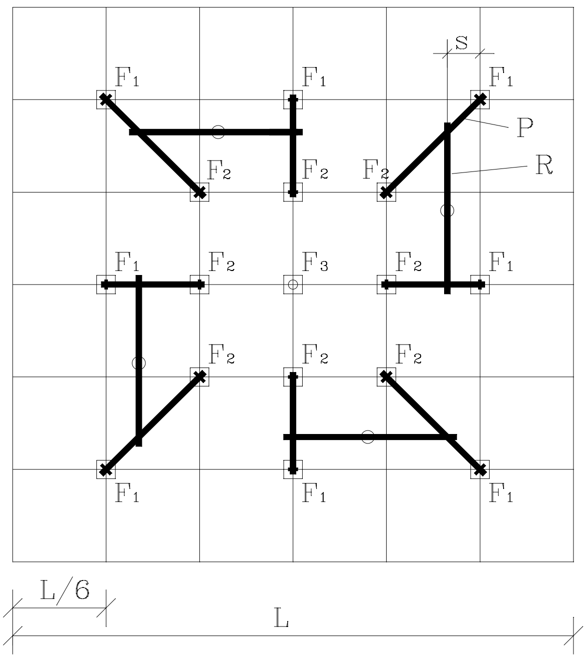
1.2.9 Prove con simulazione perfetta del carico distribuito

Si vuole eseguire una prova di carico su un solaio con forze concentrate prodotte da martinetti idraulici, in grado di ottenere una sollecitazione perfettamente eguale, sotto il profilo dell'andamento dei momenti, a quella dei carichi distribuiti.

La metodologia è sviluppata per soddisfare l'esigenza di condurre una prova su un solaio armato in tutte e due le direzioni e con carichi e luci elevate.

In queste condizioni non è facilmente praticabile la prova con carichi applicati attraverso gommoni o vasche d'acqua (si pensi a carichi oltre i 2.000 daN/m^2), inoltre, la doppia direzione delle armature, non consente di avere una singola linea di carico.

E' stata elaborata una tecnica che consente una perfetta simulazione del momento attraverso l'applicazione di soli 5 carichi concentrati (che diventano in realtà 17), ottenendo sulle sezioni caratteristiche un andamento del momento formato da una spezzata di sei elementi che si scostano dalla parabola del carico distribuito per un max del 3%. Nello schema è riportata la distribuzione dei carichi che sono costituiti da una forza nel centro F_3, 8 forze F_2 nel primo quadrato e 8 forze F_1 nel quadrato più esterno.



Applicando un martinetto al centro della trave R si producono due forze F_1 e due forze F_2 variabili, in valore, in base alla distanza S. Per una perfetta applicazione dei carichi tutte le putrelle appoggiano su un tondino saldato sull'asse delle piastre di dimensione 20x20x1 cm.

Il calcolo dei momenti e dei carichi concentrati equivalenti da applicare può essere effettuato tramite un programma agli elementi finiti.

Esempio di calcolo 8 – *Prova con simulazione perfetta del carico distribuito*

Piastra 605x570 cm; $q=1.350\ daN/m^2$.

Dal calcolo risulta:
$F_1 = 2.650\ daN$;
$F_2 = 1.400\ daN$;
$F_3 = 1.500\ daN$ che corrispondere una forza ai di 8.100 daN per martinetto.

Essendo l'andamento del momento tra carichi concentrati e carico distribuito praticamente identico, il calcolo delle forze equivalenti può essere effettuato esclusivamente per il caso del semplice appoggio, in quanto, l'eventuale incastro, produce solo uno slittamento verso l'alto del momento. I risultati sono riportati in tabella.

CONFRONTO TEORICO SPERIMENTALE

	Momenti (daN · m)		Frecce (mm)			
	Carico distr. s. appoggio	Carichi conc. s. appoggio	Carico distr. s. appoggio	Carichi conc. s. appoggio	Carichi conc. i. perfetto	Rilevazioni sperimentali
1/6 L	1.434	1.418	0,599	0,585	0,178	0,270
2/6 L	2.052	2.016	1,009	1,001	0,368	0,505
3/6 L	2.219	2.262	1,149	1,138	0,448	0,610

1.2.10 Prove con sacconi d'acqua

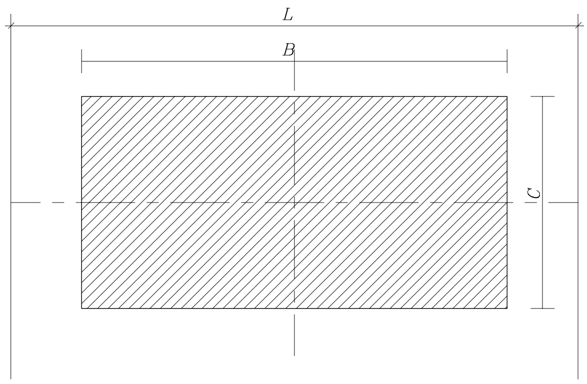
In casi particolari, dove non è possibile utilizzare i martinetti a spinta o tiro in quanto ci sono difficoltà di contrasto, si utilizzano dei sacconi in PVC, di dimensioni varie, che consentono di arrivare fino a 75 cm di altezza dell'acqua.

La prova consiste nel distendere i sacconi lungo la luce del solaio, riempirlo d'acqua fino ad un'altezza che consenta di arrivare al carico di prova e misurare la deformazione, sia longitudinale sia trasversale, attraverso la stessa strumentazione di misura descritta nei paragrafi precedenti.

Il calcolo del carico distribuito effettivamente applicato, carico di prova q, è complesso in quanto deve tener conto di diversi fattori.

<u>Variazione dell'impronta</u>

Il saccone, gonfiandosi a mano a mano che l'acqua aumenta di altezza, assume la forma bombata producendo un restringimento dell'impronta di carico, tanto che un saccone che a 10 cm d'acqua ha un'impronta di 6,5 x 3,4 m, quando raggiunge la massima altezza, pari a 75 cm, si riduce a circa 6,0 x 3,0 m.



Nella valutazione del carico applicato sarà quindi necessario misurare, attraverso un contatore di litri, l'effettiva quantità di acqua immessa, che divisa per l'impronta finale ci fornirà il carico distribuito prodotto dall'acqua.

La relazione è quindi:

$$q_a = Q/A_f \qquad (12)$$

dove:

q_a = carico distribuito dell'acqua [kN/m^2];
Q = quantità d'acqua immessa [hl = kN];
A_f = impronta finale del saccone [m^2].

Luce parzialmente caricata

I sacconi sono posizionati simmetricamente rispetto alla mezzeria cercando di coprire il più possibile l'intera luce del solaio. La condizione di carico che si sviluppa va confrontata con il carico distribuito di prova attraverso l'eguaglianza del momento in mezzeria.

Analizziamo i due casi estremi di semplice appoggio ed incastro perfetto.

Caso di *semplice appoggio* l'eguaglianza determina:

$$q_a \frac{BL}{4} - q_a \frac{B^2}{8} = q \frac{L^2}{4} - q \frac{L^2}{8}$$

da cui

$$q_a = \frac{qL^2}{2LB - B^2} \qquad (13)$$

Per il calcolo della freccia teorica si dovrà procedere con un confronto corretto inserendo il valore q_a nella formula:

$$f = \frac{q_a B}{96EJ}(2L^3 - LB^2 + \frac{B^3}{4}) \qquad (14)$$

Caso di *incastro perfetto* l'eguaglianza determina:

$$q_a \frac{BL}{4} - q_a \frac{B^2}{8} - q_a \frac{BL}{24}(3 - \frac{B^2}{L^2}) = q \frac{L^2}{4} - q \frac{L^2}{8} - q \frac{L^2}{12}$$

da cui

$$q_a = \frac{qL^2}{3LB - 3B^2 + \frac{B^3}{L}} \qquad (15)$$

Per il calcolo della freccia teorica si dovrà procedere con un confronto corretto inserendo il valore q_a nella formula:

$$f = \frac{q_a B}{384EJ}(2L^3 - 2LB^2 + B^3) \qquad (16)$$

Fascia collaborante

Anche in questo tipo di prova bisogna tener conto della fascia di solaio collaborante. Pertanto se *b* è la fascia sperimentale calcolata con la (9) il carico d'acqua dovrà essere incrementato del fattore *b/C*.

Procedura di prova

La procedura di prova cambia radicalmente in funzione della dimensione del saccone rispetto alla luce.

Se il saccone ha una dimensione longitudinale pari alla luce del solaio, sarà sufficiente tener conto dell'effetto della bombatura attraverso la (12) ed incrementare la portata in base al *b/C* sperimentale. Anche in questo caso, come con le forze concentrate, la freccia teorica va calcolata sulla base dell'effettivo carico distribuito gravante sull'impronta. Carico che si determina utilizzando la (12) e la (9) ottenendo :

$$q = \frac{Q}{bL} \; [kN/m^2] \text{ per } Q \text{ espresso in } [hl] \qquad (17)$$

Se non si è in grado di misurare la portata d'acqua immessa nel saccone, sarà necessario calcolare l'altezza media h_m del saccone, ed essendo 1 dm di altezza d'acqua pari al peso di 1 kN/m^2, si ottiene:

$$q = \frac{h_m C}{b} \; [kN/m^2] \text{ per } h_m \text{ espresso in [dm]} \qquad (18)$$

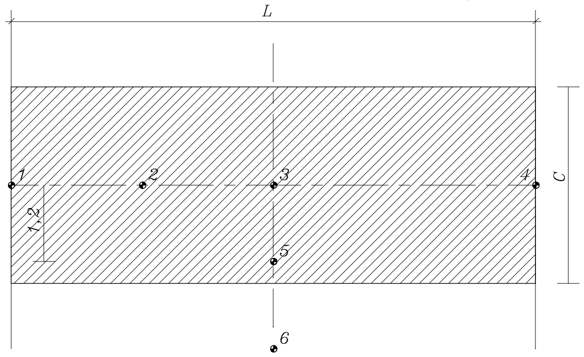
Il caso in cui, invece, la dimensione longitudinale del saccone è inferiore alla luce, la procedura di calcolo è complessa in quanto sarà necessario fare prima delle previsioni e poi procedere a ritroso per determinare il carico effettivamente applicato.

La procedura di calcolo è sintetizzabile come a seguito:
- calcolare un carico d'acqua per metro quadro ipotizzando una dimensione finale dell'impronta ed utilizzando la (13) che tiene conto dell'effetto bombatura del saccone;
- portare il livello di carico a circa il 50% e misurare il valore della fascia collaborante *b* in base alla (9);
- calcolare la portata finale incrementando il carico calcolato del valore *b/C*;
- raggiunto il carico massimo si rileverà sia l'impronta finale reale A_f, con i termini *B* e *C*, sia la fascia collaborante finale *b*;
- per il calcolo del carico uniformemente distribuito simulato *q*, si calcola prima il carico effettivo gravante sull'impronta q_a, dividendo Q sia per A_f sia per *b/C*, combinando la (12) e la (13) ottenendo:

$$q = \frac{Q(2L - B)}{L^2 b} \; [kN/m^2] \text{ per } Q \text{ espresso in [hl]} \qquad (19)$$

Esempio di calcolo 9 – *Prova con sacconi d'acqua con saccone lungo come la luce*

Si vuole eseguire una prova di carico su un solaio di luce *L = 6,2 m* e carico da applicare di 4,0 kN/m^2 utilizzando un saccone d'acqua che al massimo carico assume un'impronta di dimensioni longitudinali pari alla luce.



In prima approssimazione, ipotizzando di raggiungere un'altezza massima di circa 50 cm d'acqua, procediamo ad un primo carico per una altezza di 25 cm, procedendo, comunque, alla misura esatta del volume d'acqua inserito nel saccone.

Le deformazioni misurate a questo livello di carico sono:

Sensore n.	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
Freccia (mm)	0,01	0,32	0,68	0,01	0,56	0,18

Procediamo ora al calcolo del valore della fascia collaborante *b* attraverso la (9):

$$b = \frac{(f_c + 2\sum f_i)\cdot s}{f_c} = \frac{(0{,}67 + 2(0{,}55 + 0{,}17))\cdot 1{,}2}{0{,}67} = 3{,}78\ m$$

La quantità d'acqua da immettere per simulare il carico uniformemente distribuito *q* è determinabile dalla (17): *Q = q b L = 4,0 x 3,78 x 6,2 = 93,7 hL.*

Se invece si sta utilizzando una vasca a cielo aperto, dove non c'è ovviamente l'effetto forma del saccone, si misura l'altezza media del saccone, ottenendo dalla (18), se *C = 3,0 m:*

$h_m = q\ b / C = 4{,}0x3{,}78 / 3{,}0 = 5{,}04\ dm.$

Per una verifica certa che sia raggiunto il massimo carico si procede ad immettere 100 hl d'acqua.

A questa condizione di carico si ottengono le frecce riportate in tabella:

Sensore n.	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
Freccia (mm)	0,02	0,68	**1,43**	0,02	1,18	0,39

Il valore della fascia collaborante risulta pari a *b* = 3,80 m, pertanto il carico effettivamente applicato risulta dalla (17):

$$q = \frac{Q}{bL} = \frac{100}{3{,}8\cdot 6{,}2} = \mathbf{4{,}24\ kN/m^2}$$

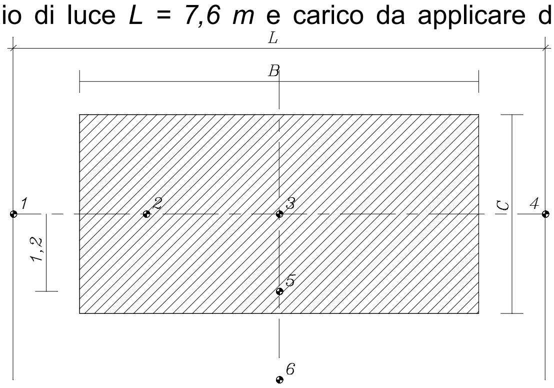
Sia J_x = 180.000 cm^4 *e* assumendo un *modulo elastico E = 2.800.000 N/cm², la* freccia teorica in mezzeria risulta:

$$f = \frac{5qL^4}{384EJ} = \frac{5\cdot 42{,}4\cdot 620^4}{384\cdot 2.800.000\cdot 180.000} = 0{,}162\ cm$$

Se il solaio fosse stato perfettamente incastrato, ipotizzando la stessa collaborazione trasversale, si sarebbe determinata una quantità d'acqua uguale, ottenendo però una freccia teorica di soli 0,032 cm.

Esempio di calcolo 10 – *Prova con sacconi d'acqua su una porzione di luce*

Si vuole eseguire una prova di carico su un solaio di luce L = *7,6 m* e carico da applicare di 5,0 kN/m^2, utilizzando un saccone d'acqua che al massimo carico assume, come ipotesi, un'impronta di dimensioni pari a 6,0 x 3,0 m.



Nell'ipotesi di semplice appoggio, tenuto conto che B = 6,0 m, per eguagliare il momento massimo, sarà necessario applicare un carico teorico q_a (senza la collaborazione trasversale) calcolato con la (13), di:

$$q_a = \frac{5,0 \cdot 7,6^2}{2 \cdot 7,6 \cdot 6,0 - 6,0^2} = 5,23\ kN/m^2$$

In prima approssimazione, ipotizzando di raggiungere un'altezza massima di circa 60 cm d'acqua, procediamo ad un primo carico per una altezza di 30 cm, procedendo, comunque, alla misura esatta del volume d'acqua inserito nel saccone.

Le deformazioni misurate a questo livello di carico sono:

Sensore n.	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
Freccia (mm)	0,01	0,38	0,74	0,01	0,66	0,20

Procediamo ora al calcolo del valore della fascia collaborante b attraverso la (9):

$$b = = \frac{(0,73 + 2(0,65 + 0,19)) \cdot 1,2}{0,73} = 3,96\ m$$

Pertanto, per tener conto della collaborazione trasversale dobbiamo incrementare il carico del valore $b/C = 3,96/3,0 = 1,32$ ottenendo un carico $q'_a = q_a \times b/C = 5,23 \times 1,32 = 6,91$ kN/m^2.

La quantità d'acqua che si deve immettere sarà, dalla (12), pari a:

$Q = q'_a \times A_f = 6,91 \times 6,0 \times 3,0 = 124\ kN$ (ettolitri).

Per una verifica certa che sia raggiunto il massimo carico si procede ad immettere 130 hl d'acqua.

A questa condizione di carico si ottengono le frecce riportate in tabella:

Sensore n.	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
Freccia (mm)	0,02	0,78	**1,54**	0,02	1,28	0,44

Si procederà ora alla verifica dell'impronta di carico che risulta essere di $A_f = 6,2 \times 3,1 = 19,2\ m^2$, pertanto il carico d'acqua applicato è, dalla (12): $q'_a = Q/A_f = 130/19,2 = 6,77\ kN/m^2$.

Per determinare il carico effettivamente agente sull'impronta è necessario ridurre il carico della collaborazione trasversale. Il valore della fascia collaborante risulta pari a b = 3,85 m ed essendo C=3,1 m otteniamo che $b/C = 3,85/3,1 = 1,24$ da cui $q_a = q'_a / 1,24 = 6,77/1,24 = 5,46$ kN/m^2.

Con questo carico d'acqua gravante, effettivamente sull'impronta, si simula un carico uniformemente distribuito su tutta la luce derivante dalla (13):

$$q = \frac{q_a(2LB - B^2)}{L^2} = \frac{5,46(2 \cdot 7,6 \cdot 6,2 - 6,2^2)}{7,6^2} = \mathbf{5,27\ kN/m^2}$$

Si arrivava allo stesso risultato utilizzando direttamente la (19).

Sia $J_x = 460.000\ cm^4$ e assumendo un *modulo elastico* $E = 3.000.000\ N/cm^2$, la freccia teorica in mezzeria si calcola attraverso la (14):

$$f = \frac{q_a B}{96EJ}(2L^3 - LB^2 + \frac{B^3}{4}) = \frac{52,7 \cdot 620}{96 \cdot 3.000.000 \cdot 460.000}(2 \cdot 760^3 - 760 \cdot 620^2 + \frac{620^3}{4}) = \mathbf{0,159\ cm}$$

E' interessante notare che se il solaio fosse stato perfettamente incastrato, supponendo la stessa collaborazione trasversale, si sarebbe determinata una quantità d'acqua per eseguire la prova di un valore pari a Q = 126 hl, ma ottenendo una freccia teorica di soli 0,033 cm.