

Le ampiezze delle deformazioni a rottura non sono molto ampie.

Alla luce pertanto dei precedenti risultati sperimentali può ritenersi che, mentre per i sistemi isostatici l'applicazione del calcolo a rottura è senz'altro valida, per i sistemi iperstatici, data la piccolezza delle deformazioni a rottura, può risultare difficile la formazione degli  $n + 1$  snodi plastici necessari alla deformabilità cinematica del sistema, a meno che la formazione delle  $n + 1$  cerniere sia pressochè contemporanea.

### 7. Esperienze su travetti in cemento armato precompresso.

Si è cercato il dominio di plasticizzazione delle sezioni pressoinflesse in c.a.p., operando su sezioni con alta percentuale di armatura, 1,22 %. Dalle esperienze si è rilevato che il dominio teorico più vicino al vero è quello tracciato considerando lo sforzo di precompressione come una forza esterna invariabile fino a rottura, mentre la piccolezza delle deformazioni a rottura ha fatto dubitare sull'applicabilità del calcolo a rottura alle strutture iperstatiche.

Al fine di meglio indagare sul comportamento a rottura del c.a.p. si sono eseguite (*Barbarito e D'Agostino 1962*) prove su travetti, semplicemente appoggiati e continui su tre appoggi, in cemento armato precompresso col sistema a cavi aderenti, con diverse percentuali di armatura di precompressione.

Dalle esperienze si è rilevato un diverso comportamento a rottura delle sezioni in c.a.p. al variare della percentuale di armatura di precompressione, mentre per le travi appoggiate la lunghezza della campata può influire notevolmente sul comportamento a rottura. Con le prove su travetti continui su tre appoggi si è indagato sul comportamento a rottura delle strutture iperstatiche e si è osservata l'esistenza di una effettiva redistribuzione dei momenti.

Le prove sono state eseguite su quattro serie di travetti con sezione a T, le cui dimensioni si rilevano dalla fig. 8-52, in conglomerato cementizio con il seguente dosaggio:

pietrisco . . . . .	1000 Kg/mc
sabbia . . . . .	800 Kg/mc
additivo terra inerte . . . . .	200 Kg/mc
cemento tipo 680 . . . . .	400 Kg/mc
acqua . . . . .	120 litri/mc

vibrati per tre minuti. Le percentuali dell'armatura di precompressione variano dal 0,103 % al 0,721 % secondo il seguente schema:

serie	armatura in %
1	0,721
2	0,103
3	0,206
4	0,309

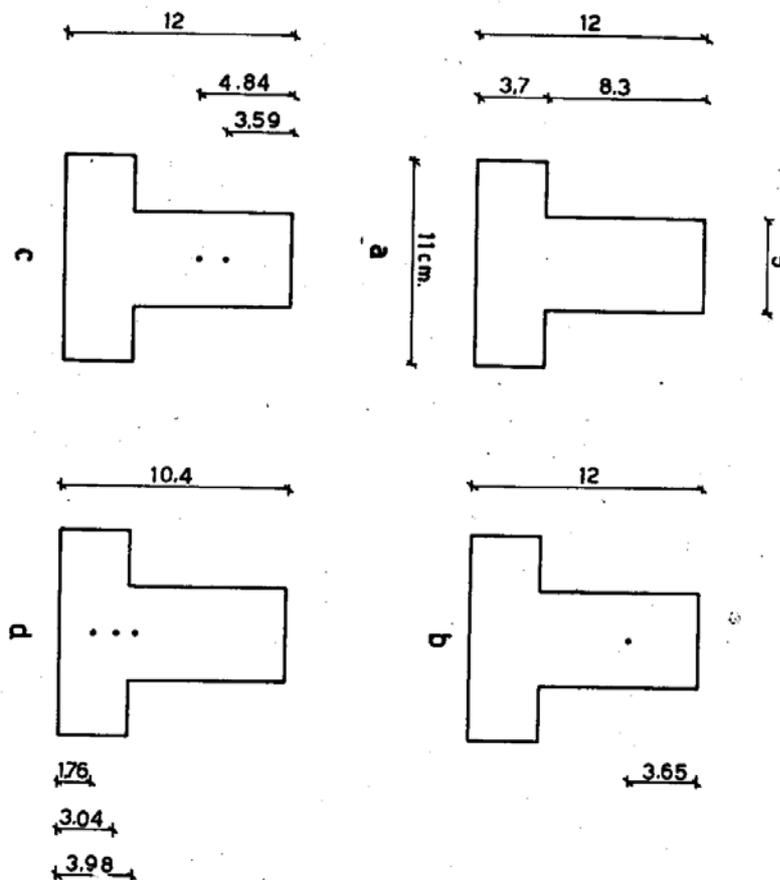


FIG. 8-52

La resistenza cubica a compressione a ventotto giorni, determinata con prove su cubetti di 16 cm di lato, preparati contemporaneamente ai travetti, è risultata:

serie 1	$\sigma_{R28} = 531,67 \text{ Kg cm}^{-2}$
serie 2-3-4	$\sigma_{R28} = 329,67 \text{ Kg cm}^{-2}$

La precompressione, del tipo a cavi aderenti, è stata realizzata mediante trecce di acciaio armonico sotto trazione, le cui caratteristiche,

uniformi per le quattro serie, si rilevano dal diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  della fig. 8.53.

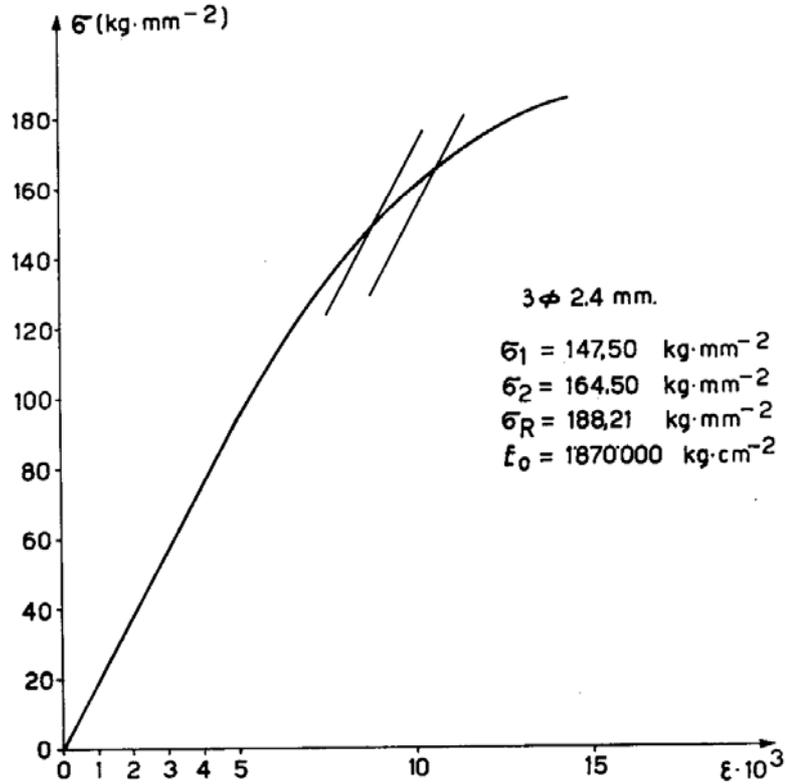


FIG. 8-53

Durante la maturazione dei travetti, avvenuta per le prime ventiquattro ore in ambiente di vapore a circa 70 gradi centigradi, si sono

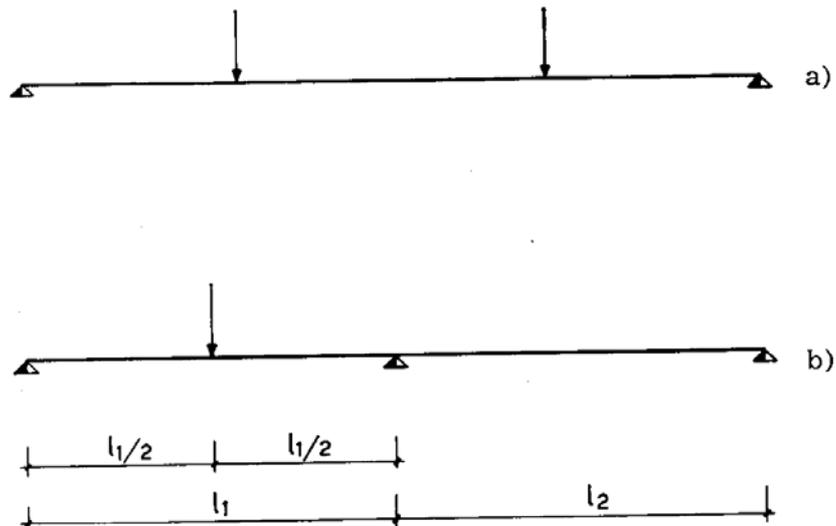


FIG. 8-54

misurati il modulo elastico del conglomerato e lo sforzo di precompressione.

Il carico sui travetti è stato realizzato mediante pressa idraulica; nelle prove su elementi semplicemente appoggiati si è realizzato un tratto di momento costante, secondo lo schema statico di fig. 8-54 a; mentre le

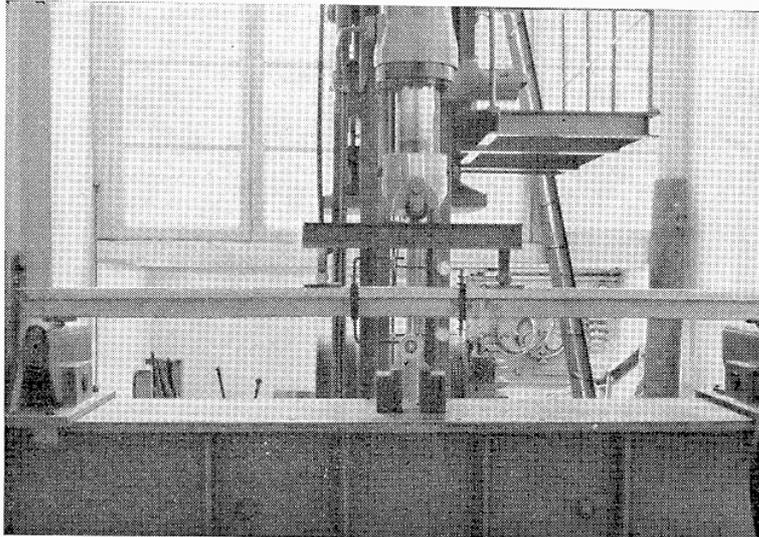


FIG. 8-55

travi continue su tre appoggi sono state sollecitate con una forza concentrata nella mezzeria di una campata (fig. 8-54 b).

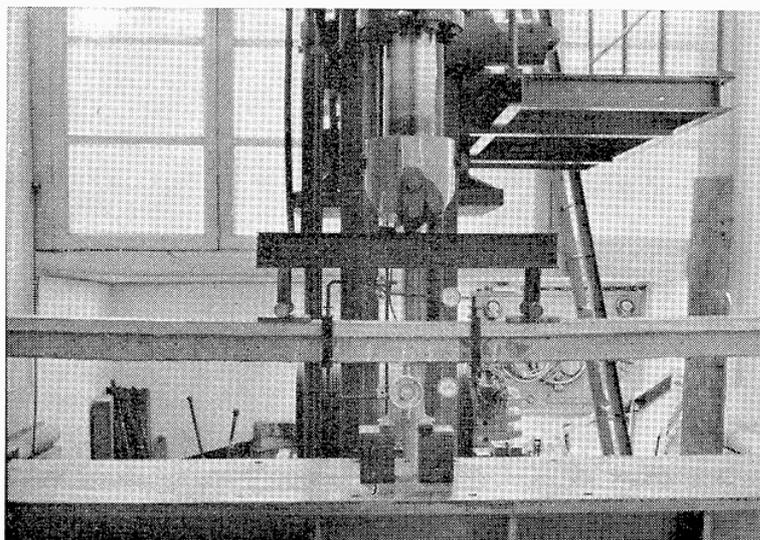


FIG. 8-56

Per le travi isostatiche si sono disposti un flessimetro nella mezzeria, al fine di rilevare il diagramma carico-deformazione, e due comparatori centesimali per rilevare il diagramma momento-curvatura (figg. 8-55 e 8-56).

Per le travi iperstatiche si sono disposti due flessimetri nelle mezzerie delle due campate, e, in corrispondenza della sezione di applicazione del

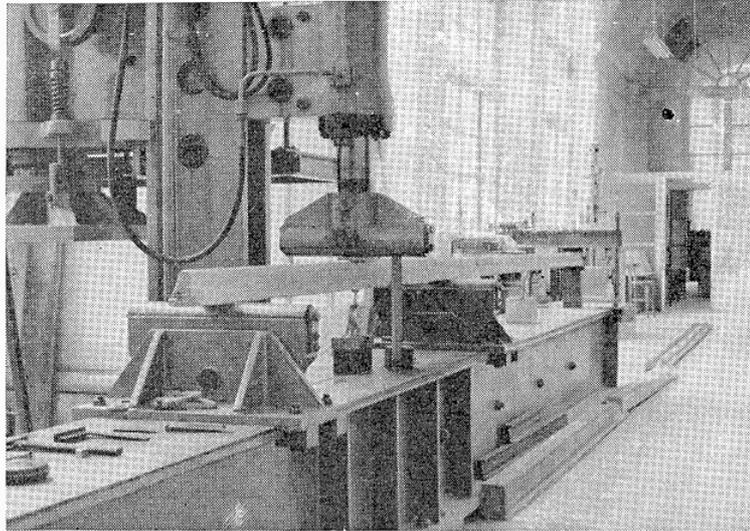


FIG. 8-57

carico, un regolo millesimale per rilevare il tratto discendente del diagramma carico-deformazione (figg. 8-57 e 8-58).

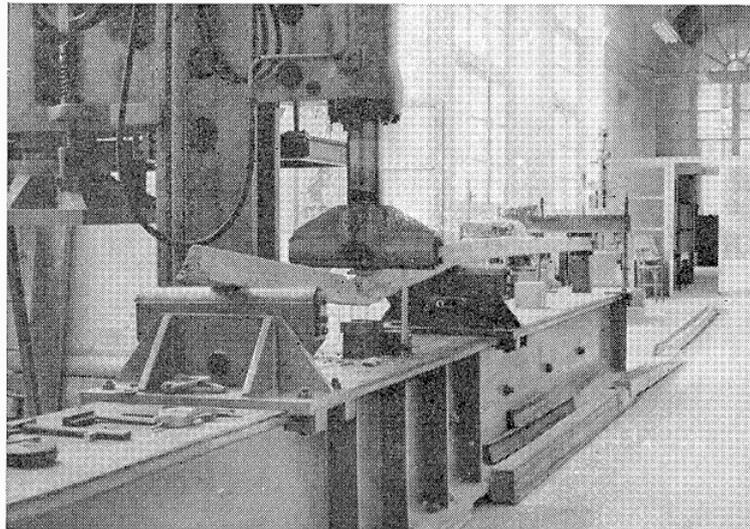


FIG. 8-58

Ciascuna prova ha avuto la durata media di quattro minuti e si fa esplicitamente rilevare che nell'eseguire le letture agli apparecchi di misura si sono trascurate le deformazioni a carico costante.

## a) Travi isostatiche.

La prima serie è costituita da dieci travetti di lunghezza variabile da 0,90 m a 3,00 m con percentuale di armatura di precompressione dello 0,721 %; i risultati sperimentali sono trascritti nella tabella XI, e come già previsto, in base ai risultati di precedenti indagini condotte nello

TABELLA XI

Lunghezza m	M <sub>R</sub> kg.m
0,90	590
0,90	585
1,40	630
1,40	610
1,90	600
1,90	555
2,40	480
2,40	620
3,00	450
3,00	575

stesso Istituto, il momento di rottura medio (\*) ricavato sperimentalmente  $M_R = 570 \text{ Kg m}$  è sensibilmente prossimo al momento di rottura teorico che si ottiene considerando lo sforzo di precompressione nell'acciaio come una forza esterna invariabile fino a rottura  $M_p = 610 \text{ Kg m}$ ; mentre il momento limite calcolato con plasticizzazione totale del conglomerato compresso e dell'acciaio teso è  $M_o = 933 \text{ Kg m}$ .

I risultati sperimentali per la serie 2, costituita da venti travetti le cui lunghezze variano da un minimo di 0,90 m ad un massimo di 2,70 m, con percentuale di armatura dello 0,103 %, (fig. 8-52 b) sono consegnati nella tabella XII, nella quale sono riportati: le lunghezze dei singoli travetti, i momenti  $M_o$  per i quali sono comparse le prime lesioni, il momento di rottura  $M_R$  nel significato precedentemente precisato, il tipo di rottura, il momento medio di rottura per le singole lunghezze  $M'_R$  ed il momento medio per i due tipi di collasso  $M''_R$ :

(\*) Con « momento di rottura » si indica il momento che agisce nella sezione sotto l'azione del carico massimo esercitato dalla pressa.

TABELLA XII

Lunghezza m	M <sub>L</sub> kg. m	M <sub>R</sub> kg. m	Tipo di rottura	M' <sub>R</sub> kg. m	M'' <sub>R</sub> kg. m
0,90	—	123,75	o	—	—
0,90	77,00	133,00	o	—	—
0,90	72,00	177,00	o	—	—
0,90	130,00	210,00	o	160,94	—
1,40	—	159,37	o	—	—
1,40	62,00	125,00	o	142,18	—
1,80	—	142,00	o	—	158,28
1,80	168,75	168,75	o	—	—
1,80	168,75	178,12	o	—	—
1,80	121,87	131,25	o	155,03	—
2,00	60,00	166,25	o	—	—
2,00	87,50	157,50	o	—	—
2,00	50,00	150,00	o	157,76	—
2,20	100,00	190,00	o	—	—
2,20	140,00	180,00	o	—	—
2,20	135,00	157,00	o	175,49	—
2,20	146,25	213,75	*	213,75	—
2,70	100,00	200,00	*	—	—
2,70	50,00	187,50	*	—	204,70
2,70	50,00	200,00	*	195,64	—

o Rottura per sfilamento dell'armatura di precompressione.

\* Rottura delle trecce di precompressione.

I momenti teorici calcolati come precedentemente detto sono:

$$M_p = 110,96 \text{ Kg m}$$

$$M_o = 204,24 \text{ Kg m .}$$

Si nota che mentre per lunghezze inferiori a m 2,20 la rottura avviene per sfilamento dell'acciaio di precompressione, per lunghezze di m 2,70 si riesce ad ottenere la rottura delle trecce di acciaio, il che presuppone la loro completa plasticizzazione.

La serie 3 i cui risultati sono raggruppati nella tabella XIII, è costituita da ventotto travetti le cui lunghezze variano da m 0,90 a m 2,70, con una percentuale di armatura dello 0,26 % (fig. 8-52 c).

I momenti teorici sono:

$$M_p = 200,98 \text{ Kg m}$$

$$M_o = 361,64 \text{ Kg m .}$$

Per questa serie di prove si riscontra rottura per sfilamento delle trecce di precompressione fino ad una lunghezza di m 1,80, mentre da m 1,90 in poi la rottura avviene con plasticizzazione dell'acciaio.

TABELLA XIII

Lunghezza m	$M_L$ kg. m	$M_R$ kg. m	Tipo di rottura	$M'_R$ kg. m	$M''_R$ kg. m
0,90	150,00	255,00	o		
0,90	150,00	322,50	o		
0,90	—	202,50	o		
0,90	240,00	311,25	o		
0,90	258,75	367,50	o		
0,90	165,00	330,00	o	299,40	
1,40	225,00	326,50	o		
1,40	—	287,50	o		
1,40	225,00	343,75	o		
1,40	140,00	320,00	o		
1,40	180,00	326,25	o	320,75	
1,80	245,00	288,75	o		
1,80	230,00	360,00	o	324,37	314,58
1,90	200,00	375,00	*		
1,90	187,50	368,75	*		
1,90	187,50	343,75	*		
1,90	212,50	325,00	*	353,12	
2,20	225,50	360,00	*		
2,20	160,00	370,00	*		
2,20	160,00	360,00	*		
2,20	160,00	380,00	*	367,50	
2,40	—	216,00	*		
2,40	—	437,50	*	326,57	
2,70	150,00	325,00	*		
2,70	—	362,50	*		
2,70	233,75	361,25	*		
2,70	—	382,50	*		
2,70	—	385,50	*	362,75	352,48

La serie 4 è di sei travetti, con percentuale di armatura di precompressione dello 0,30 %, (fig. 8-52 d); di essi i primi quattro sono stati caricati con l'ala disposta inferiormente e gli ultimi due con l'ala disposta superiormente; i risultati sperimentali sono riportati nella seguente tabella XIV: in cui  $M'_R$  ed  $M''_R$  sono rispettivamente i momenti medi di rottura per i due tipi di prova; i momenti limiti teorici sono:

TABELLA XIV

Lunghezza m.	$M_R$ kg. m	Tipo di rottura	$M'_R$ kg. m	$M''_R$ kg. m
0,90	221,25			
2,40	210,00	o		
2,70	233,75	o		
2,70	280,00	o	236,25	
1,90	82,50	o		
2,70	112,50	o		97,50

$$\begin{aligned} M'_p &= 255,88 \text{ Kg m} & M''_p &= 96,25 \text{ Kg m} \\ M'_o &= 394,44 \text{ Kg m} & M''_o &= 143,35 \text{ Kg m} . \end{aligned}$$

E' da osservare che la rottura è avvenuta sempre con sfilamento delle treccie di precompression e le lesioni nel conglomerato si sono presentate all'atto della rottura.

Nelle figg. da 8-59 a 8-72 sono riportati i diagrammi sperimentali momento-curvatura e carico-deformazione di sedici travetti.

#### b) Travi iperstatiche.

Si sono in ultimo eseguite sette prove su travetti continui a due cam-pate con vari rapporti tra le luci e con la stessa percentuale di armatura della serie 4.

I primi cinque sono stati provati con l'ala disposta inferiormente come mostra la figura 8-57 e gli ultimi due con l'ala disposta superiormente. Nella seguente tabella XV sono riportati la lunghezza delle singole cam-

TABELLA XV

$l_1$ m.	$l_2$ m.	Carico alla pressa kg.	FMP kg.	FMO kg.
2,20	3,50	550	553	847
3,50	2,20	375	347	533
3,50	2,20	400	347	533
3,90	1,80	350	312	478
4,20	2,50	250	289	433
2,20	3,50	600	407	620
2,20	3,50	700	407	620

pate di ciascun travetto, il carico massimo letto alla pressa, ed il valore dei carichi ricavati dall'applicazione del principio dei lavori virtuali al meccanismo di collasso, ponendo come momenti limiti rispettivamente  $M_p$  ed  $M_o$ .

Nelle figure da 8-73 a 8-77 sono riportati i diagrammi carico-deformazione di cinque travetti, nelle quali si rileva anche il tratto discendente del diagramma carico-deformazione.

I risultati delle esperienze precedentemente illustrate mostrano un diverso comportamento a rottura delle travi in c.a.p. al variare della percentuale di armatura di precompressione. Infatti per basse percentuali, serie 2 e 3, il momento di rottura è passivo a quello ricavato nell'ipotesi

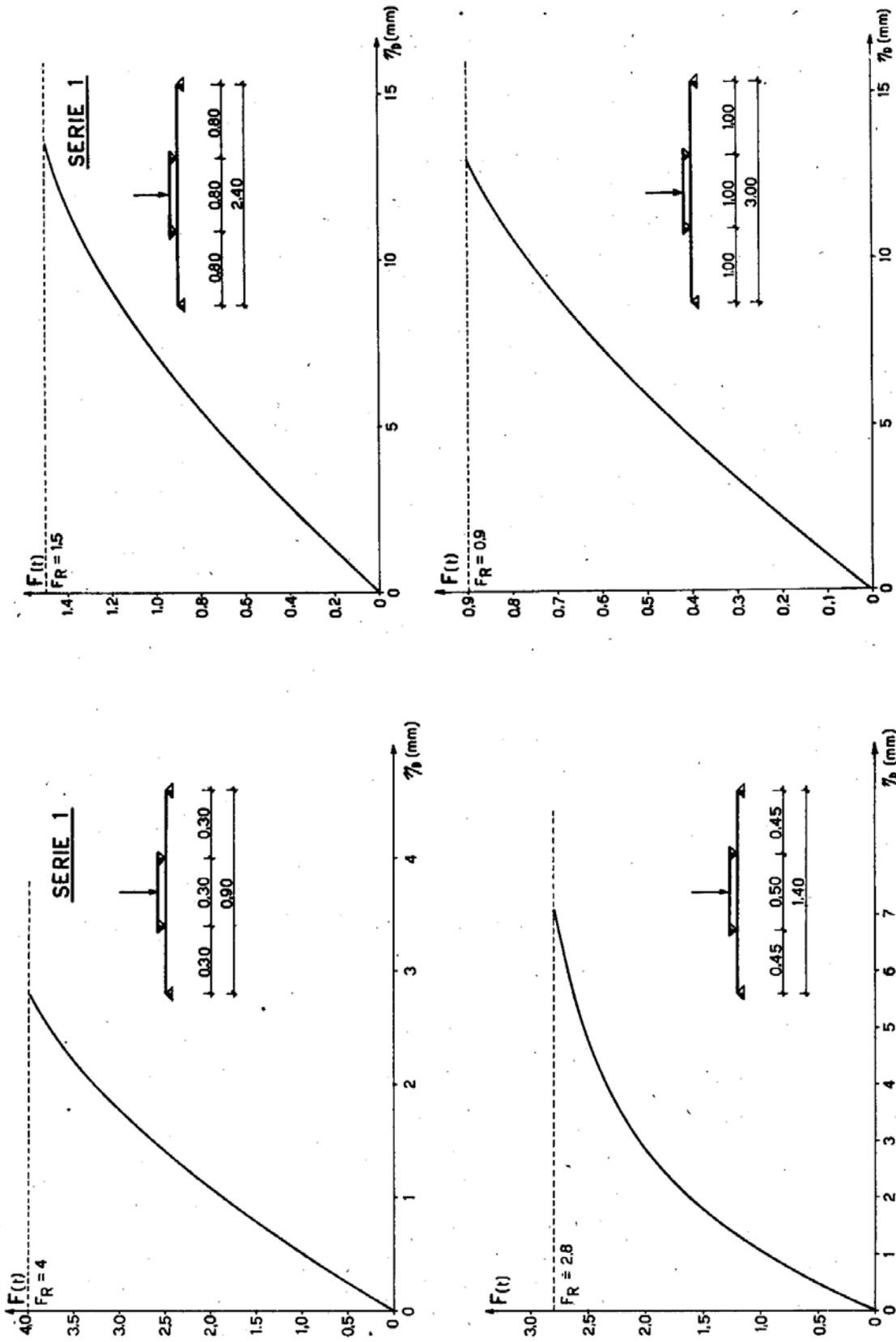


FIG. 8-60

FIG. 8-59

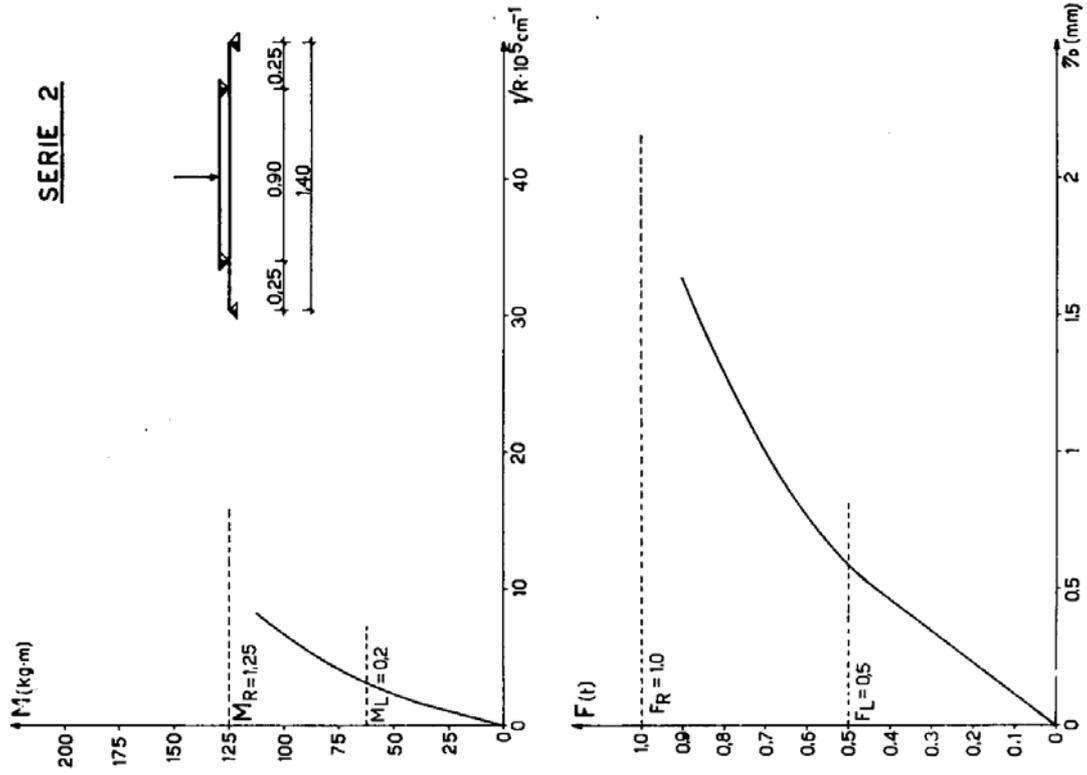


FIG. 8-62

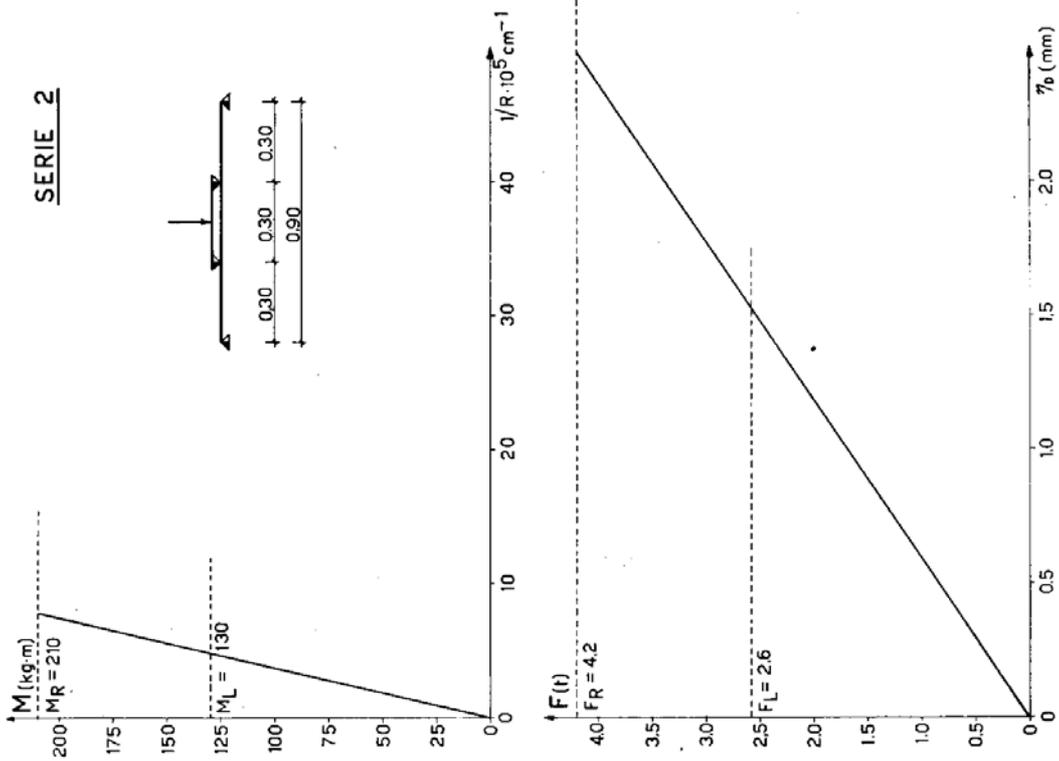


FIG. 8-61

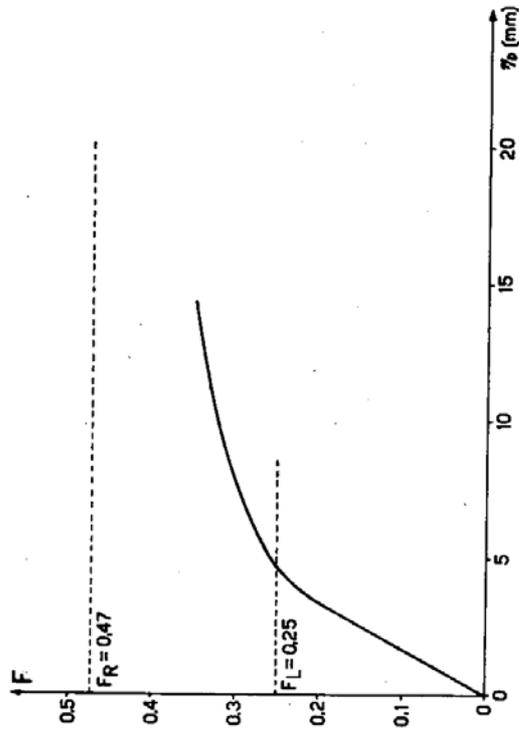
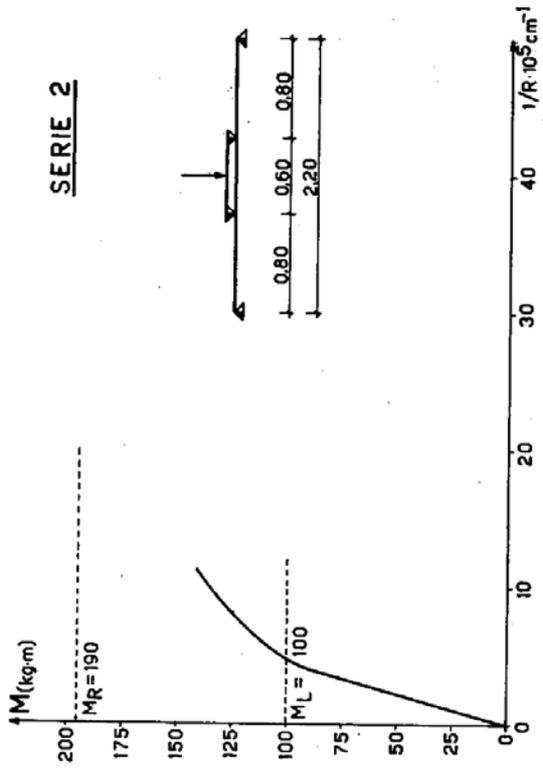


FIG. 8-64

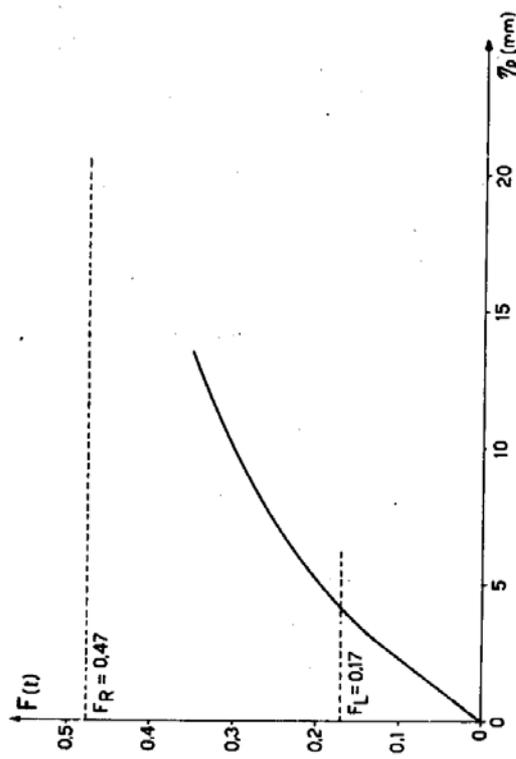
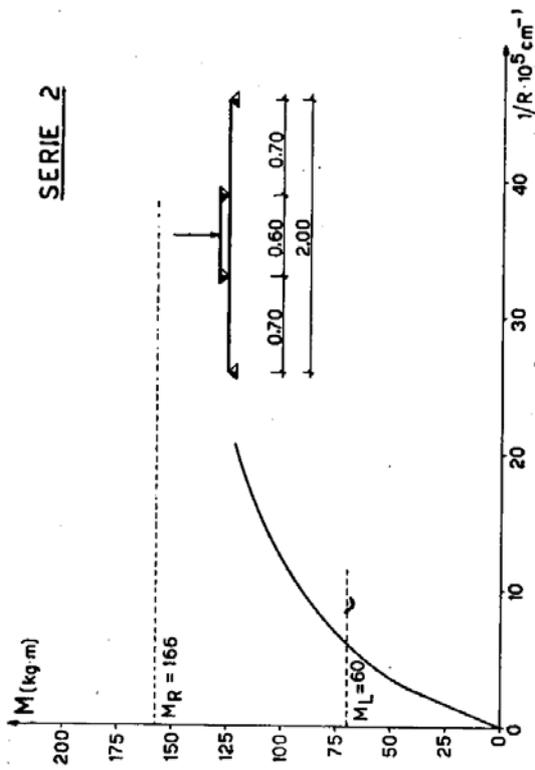


FIG. 8-63

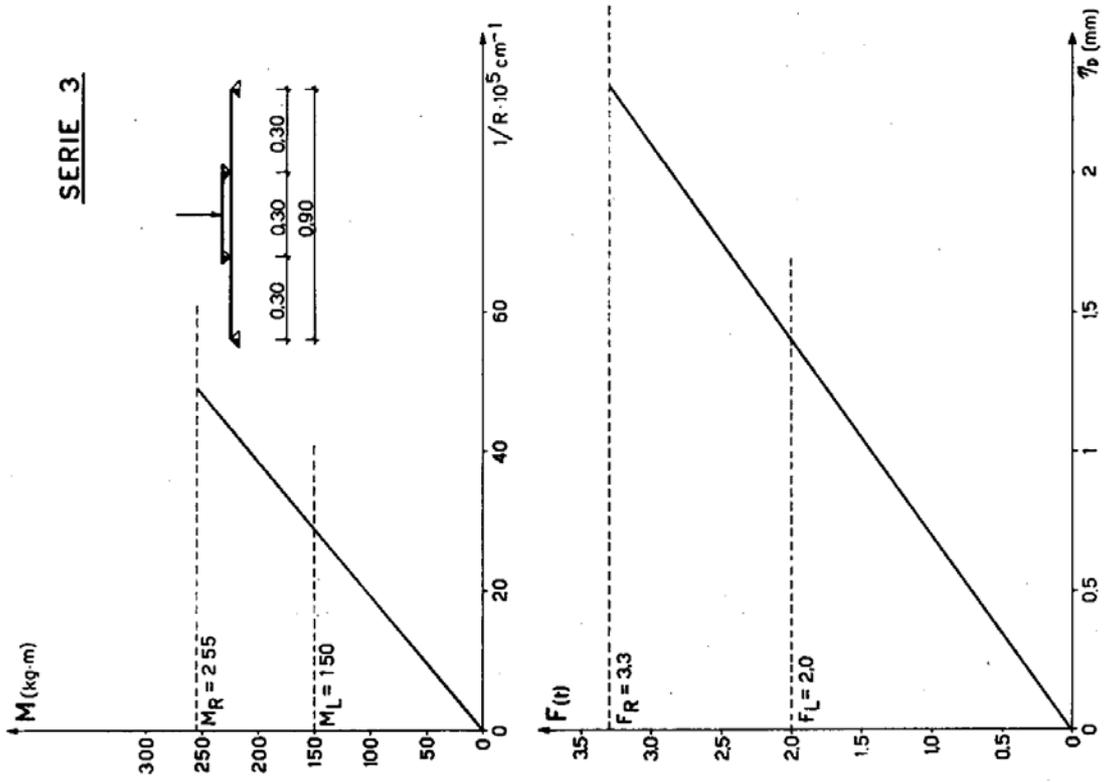


FIG. 8-66

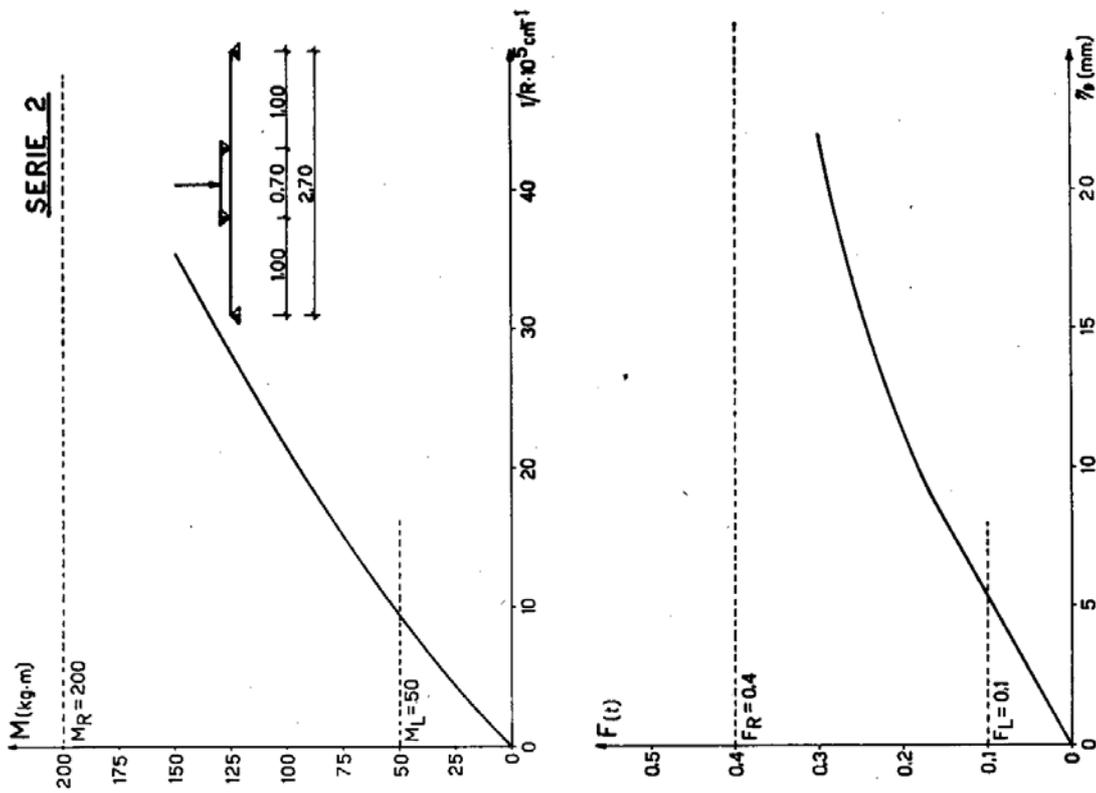


FIG. 8-65



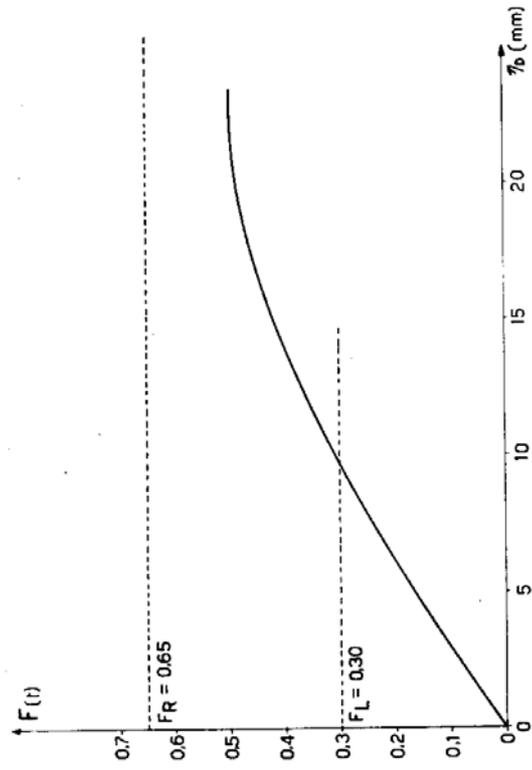
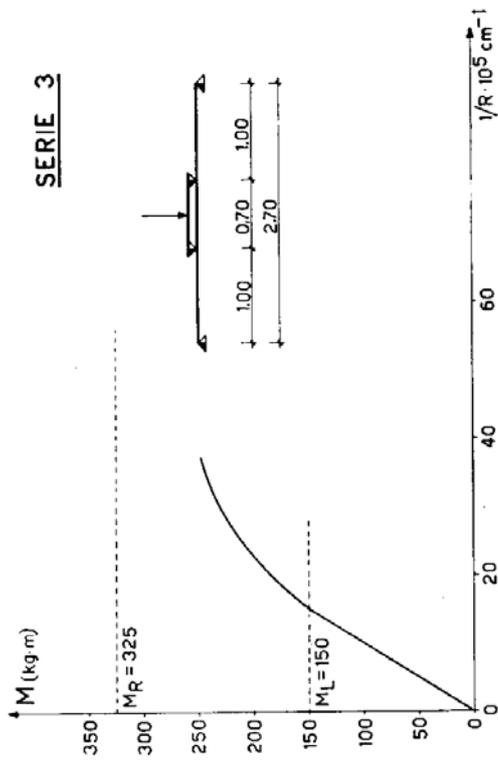


FIG. 8-70

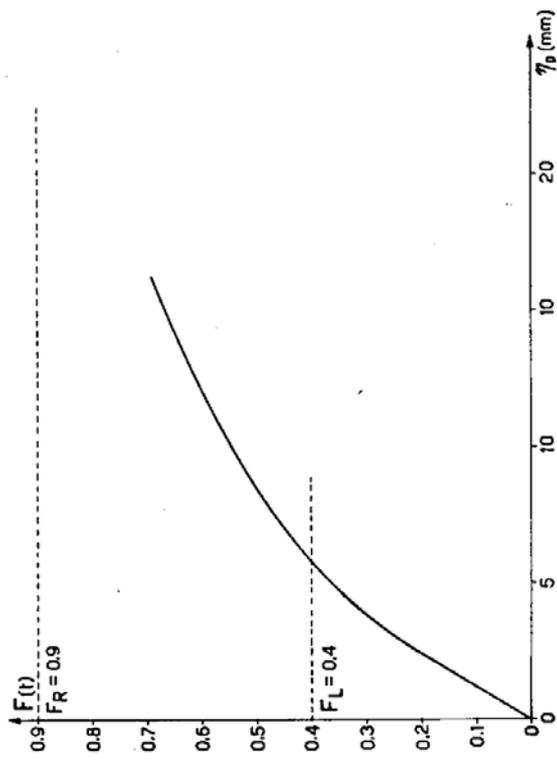
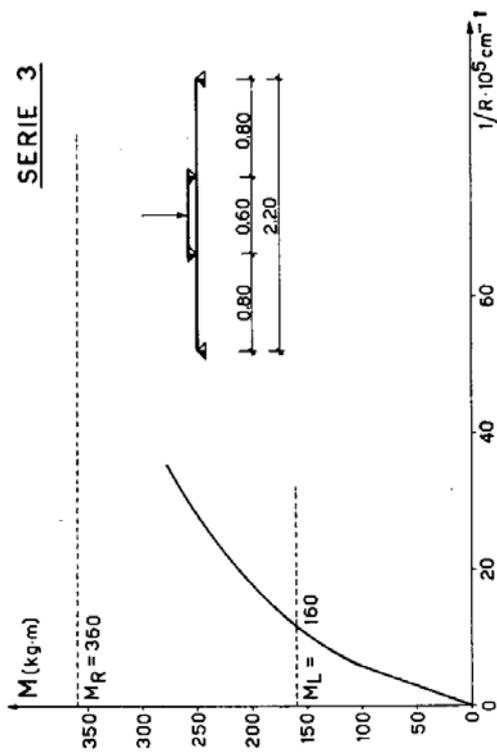


FIG. 8-69

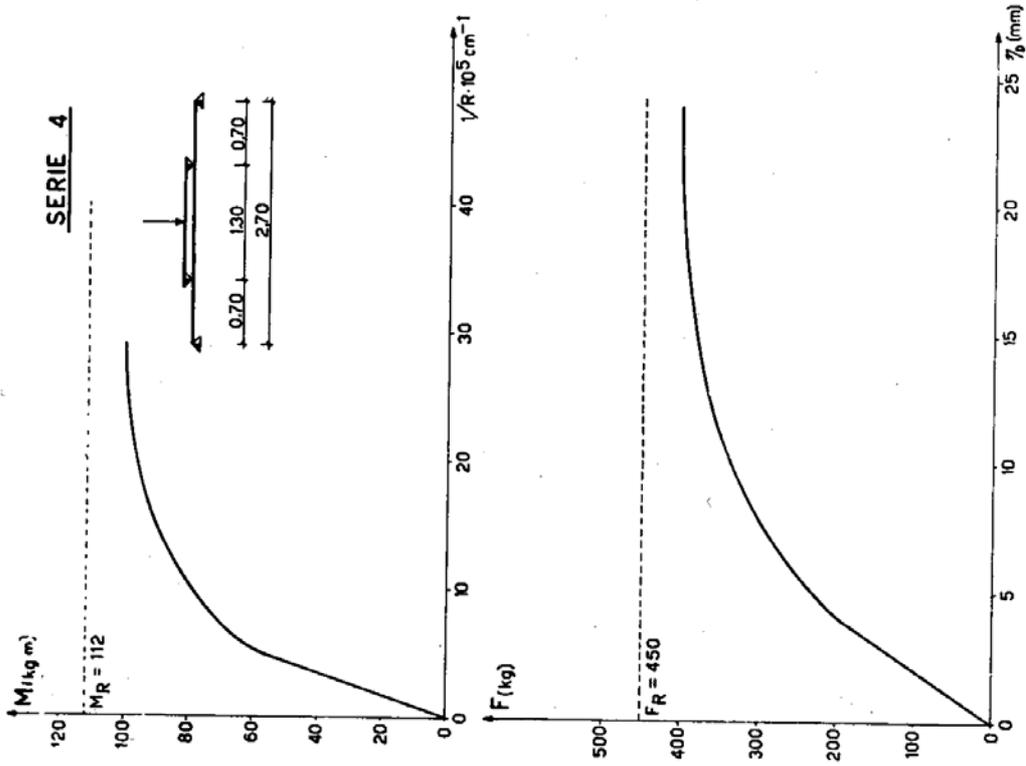


FIG. 8-71

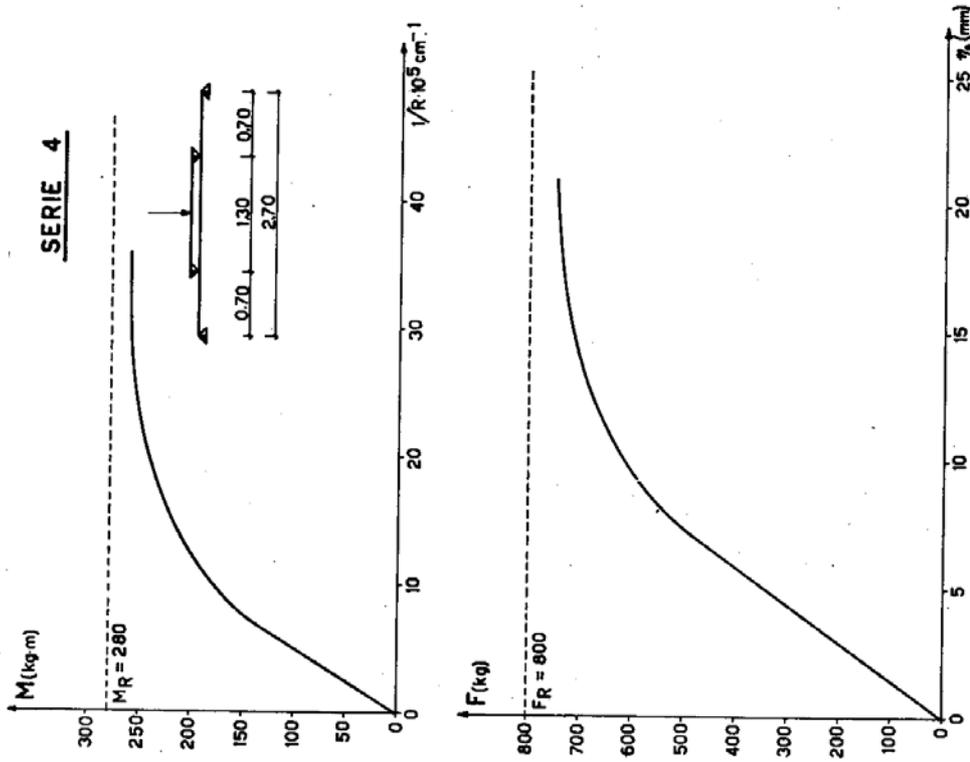


FIG. 8-72

della completa plasticizzazione del conglomerato compresso e dell'acciaio teso; per le medie ed alte percentuali, serie 1 e 4, il momento è vicino

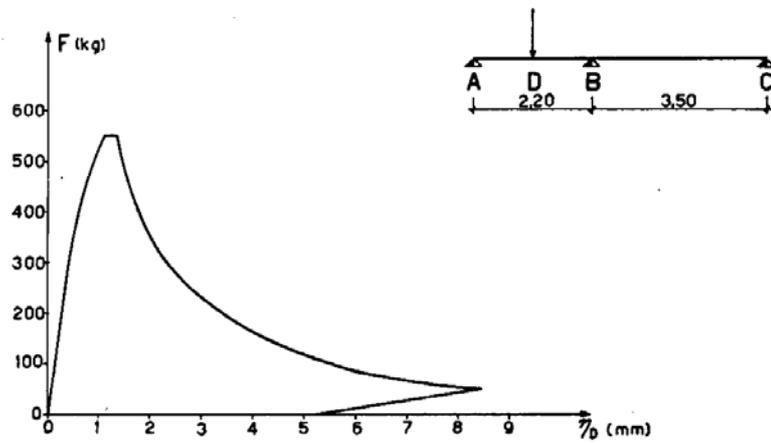


FIG. 8-73

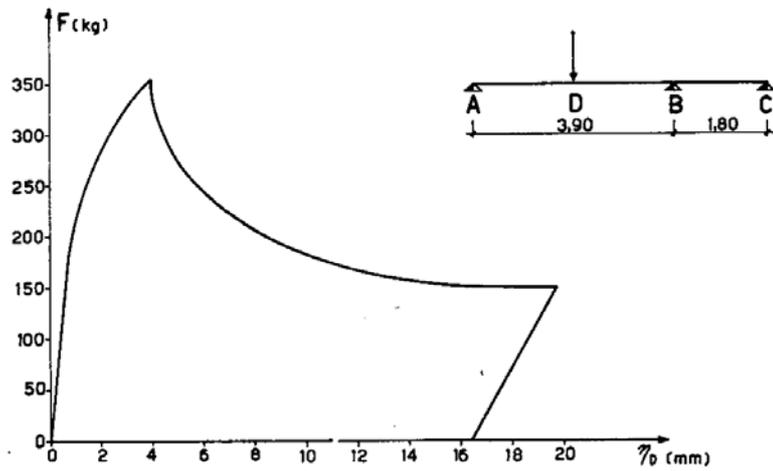


FIG. 8-74

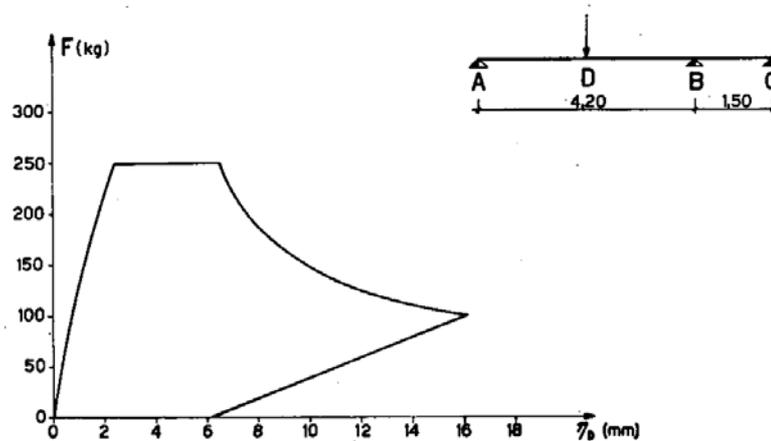


FIG. 8-75

a quello calcolato considerando lo sforzo di precompressione come una forza esterna invariabile fino a rottura. E' da notare inoltre che in travi

armate con basse percentuali, su detto comportamento influisce altresì la lunghezza della campata, e precisamente si osserva uno sfilamento per lunghezze mediamente inferiori a due metri, mentre per luci maggiori si riesce ad ottenere la rottura delle armature di precompressione; per le medie ed alte percentuali, invece, per qualsiasi lunghezza la rottura avviene sempre con sfilamento dei cavi.

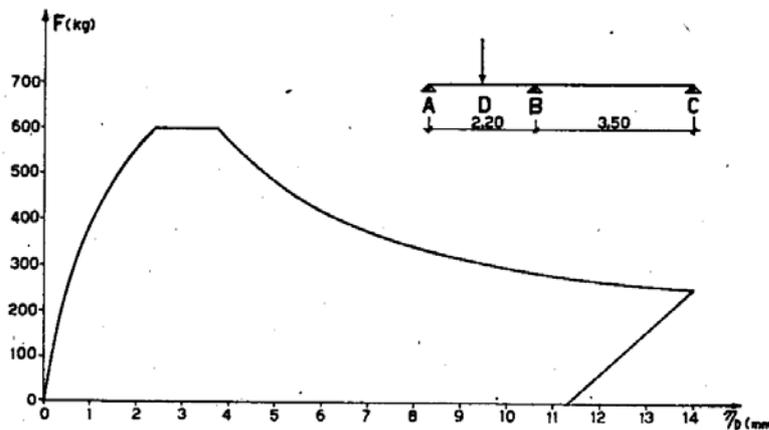


FIG. 8-76

Per le travi continue che hanno armatura identica a quella della serie 4, i momenti di rottura si devono calcolare considerando lo sforzo di precompressione come una forza esterna invariabilmente fino a rottura; si è notata poi una completa redistribuzione dei momenti, redistribuzione che peraltro può essere dovuta al basso grado di iperstaticità.

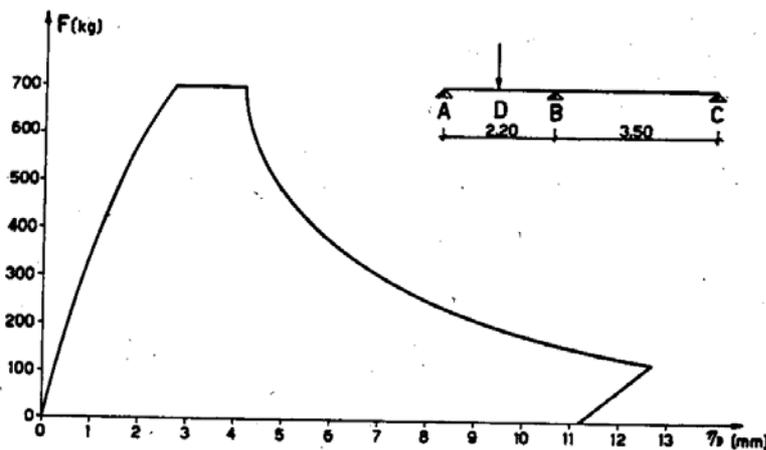


FIG. 8-77

E' poi da precisare che le esperienze condotte, mentre hanno consentito di individuare il comportamento in fase plastica delle travi in c.a.p. non consentono di precisare il fenomeno quantitativamente. E più precisamente restano da determinare: la percentuale di armatura per la quale si passa dall'uno all'altro tipo di rottura, ed il comportamento delle strut-

ture iperstatiche al variare della percentuale di armatura ed all'aumentare del grado di iperstaticità. A tal fine è programmata un'ampia ricerca sperimentale da eseguire su un notevole numero di travi con sezione rettangolare e con percentuali di armatura variabili dallo 0,1 % allo 0,5 %.

### 8. Esperienze relative allo shake down su travetti continui.

Lo *Sparacio* ha eseguito, nel 1960, interessanti esperienze sul comportamento di travetti iperstatici in conglomerato armato ed in acciaio ai carichi ripetuti.

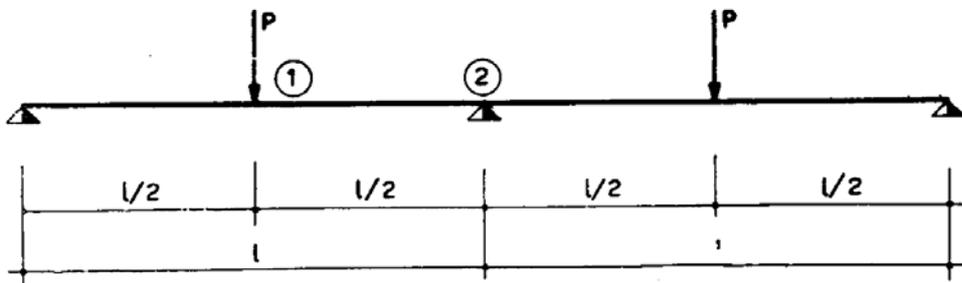


FIG. 8-78 a

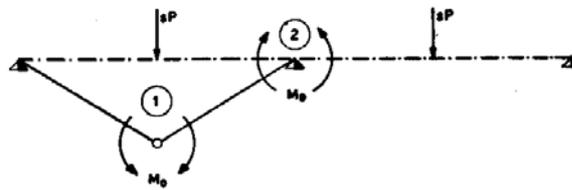


FIG. 8-78 b

Lo schema è quello della fig. 8-78 a. Il coefficiente di sicurezza è fornito

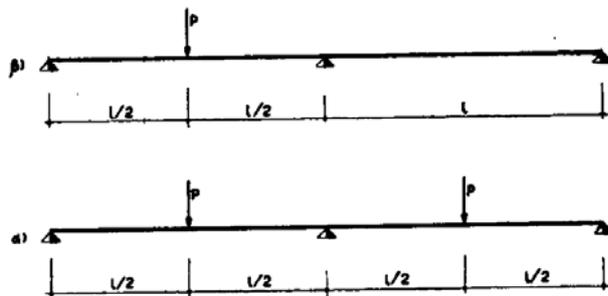


FIG. 8-79

nel caso del collasso statico dal meccanismo della fig. 8-78 b, ed è pari, per  $M'_0 = -M''_0$ , a

$$s = \frac{6 M_0}{P l} \quad (a)$$

Supposto possibile l'alternarsi delle due condizioni di carico  $\alpha$  e  $\beta$  indicate in fig. 8-79 e assumendo lo stesso meccanismo della fig. 8-78 per il collasso incrementale (è l'unico possibile) si ottiene (vedi tab. XVI) dalla 3-21:

$$s_c = \frac{-3 M_0}{-\frac{38}{64} P l} = 0,842 s \quad (b)$$

TABELLA XVI

Sezione	$M_{\max}$	$M_{\min}$	$\theta$	$M_{\max} \theta^{(-)}$	$M_{\min} \cdot \theta^{(+)}$
1	$\frac{13}{64} P l$	—	— 2	$-\frac{26}{64} P l$	—
2	—	$-\frac{12}{64} P l$	+ 1	—	$-\frac{12}{64} P l$
				$\Sigma_1 = -\frac{26}{64} P l$	$\Sigma_2 = -\frac{12}{64} P l$

## a) PROVE SU TRAVETTI METALLICI.

Lo schema statico e le caratteristiche della sezione trasversale si rilevano nella fig. 8-80.

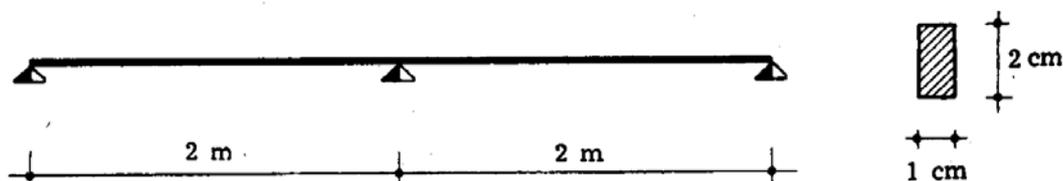


FIG. 8-80

Il momento limite  $M_0$ , ricavato sperimentalmente, è pari a 2,720 Kg cm.

Tale determinazione si è effettuata su trave appoggiata di 80 cm di luce, con carico P concentrato in mezzeria. Il diagramma relativo è ri-

portato in fig. 8-81. Poichè è  $P = 136$  Kg (carico di collasso, che non tiene conto dell'incrudimento del materiale dopo la plasticizzazione), risulta

$$M_o = 136 \times \frac{80}{4} = 2720 \text{ Kg cm .}$$

Il valore teorico del carico di collasso statico, fornito dalla (a) è

$${}_s P = \frac{6 M_o}{l} = \frac{6 \times 2720}{200} = 81,60 \text{ Kg .}$$

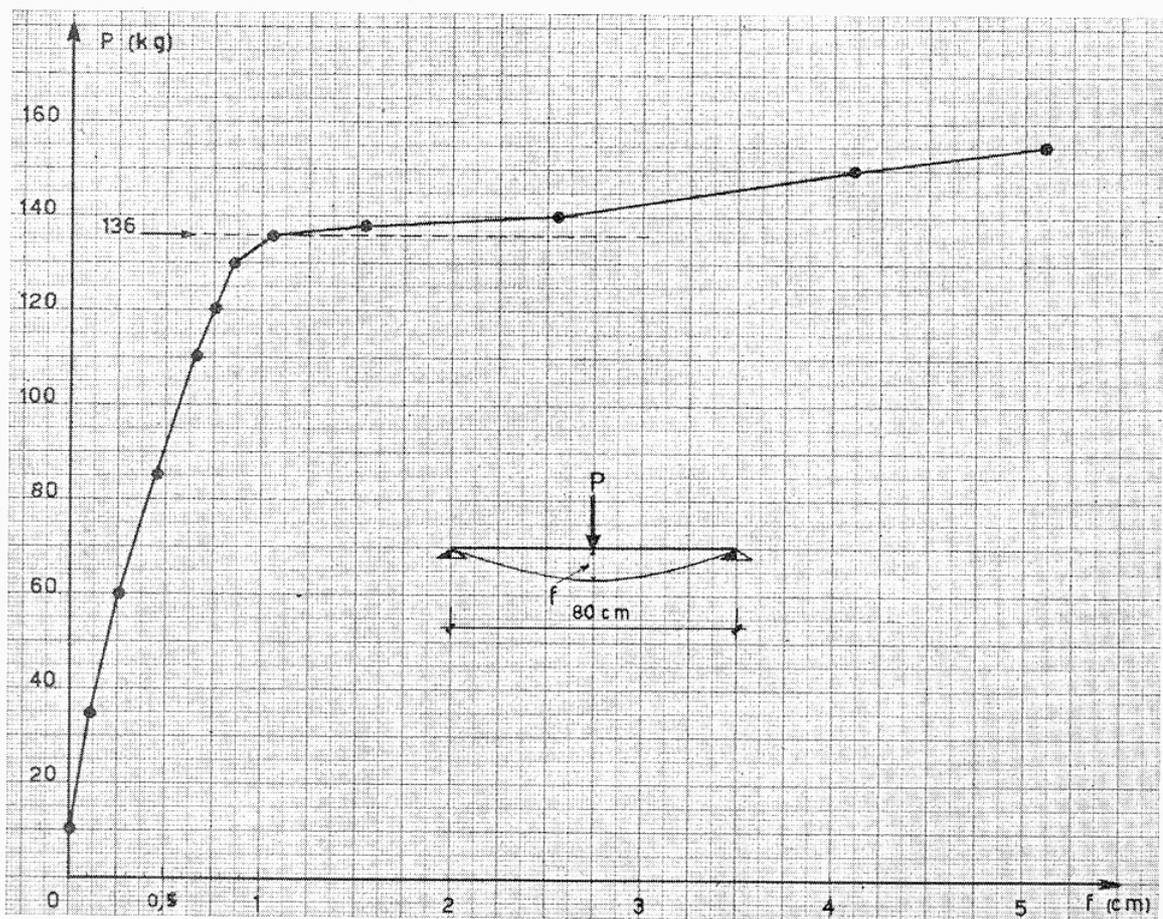


FIG. 8-81

Il diagramma di fig. 8-82, ove sono riportati sulle ordinate i carichi  $P$  corrispondenti allo schema della fig. 8-79 e sulle ascisse la freccia in mezzeria della prima campata, costituisce una buona conferma di tale valore.

Per quanto riguarda il collasso incrementale, la (b) fornisce:

$${}_s P = 0,842 \times 81,60 = 68,707 \text{ Kg .}$$

Si sono fatti crescere i due carichi  $P$  (schema in fig. 8-78 a) dal valore 0 al valore di 72 Kg, di poco superiore al valore del carico teorico di collasso incrementale. A partire da tale valore dei carichi, che si è mantenuto costante, si sono realizzati 10 cicli completi di carico, alternando, per ciascun ciclo, alla condizione di carico  $\alpha$  la condizione di carico  $\beta$ . Nella fig. 8-83 si sono riportati sulle ascisse i valori degli abbassamenti

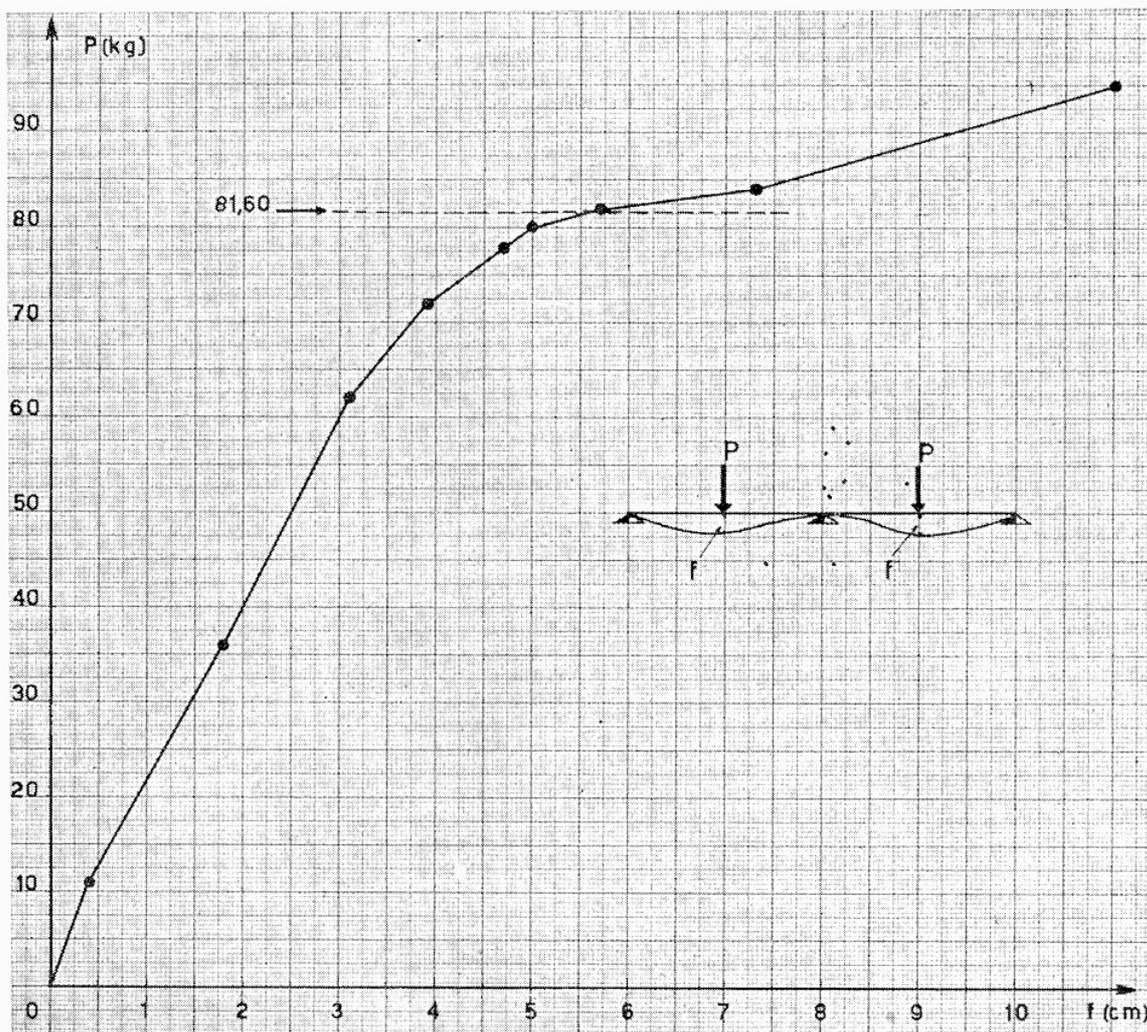


FIG. 8-82

letti nella mezzeria della campata sinistra, e sulle ordinate i valori del carico (nella parte inferiore) per seguire il crescere delle deformazioni col carico, e il numero dei cicli di ripetizione dei due schemi  $\alpha$  e  $\beta$ . Su un'altra barra, le cui caratteristiche elastiche sono risultate identiche alla precedente, si è invece iniziata l'alternanza delle due condizioni  $\alpha$  e  $\beta$  per un valore del carico pari a 67 Kg. In fig. 8-84 appare perfettamente verificato il comportamento dello « shake down ».

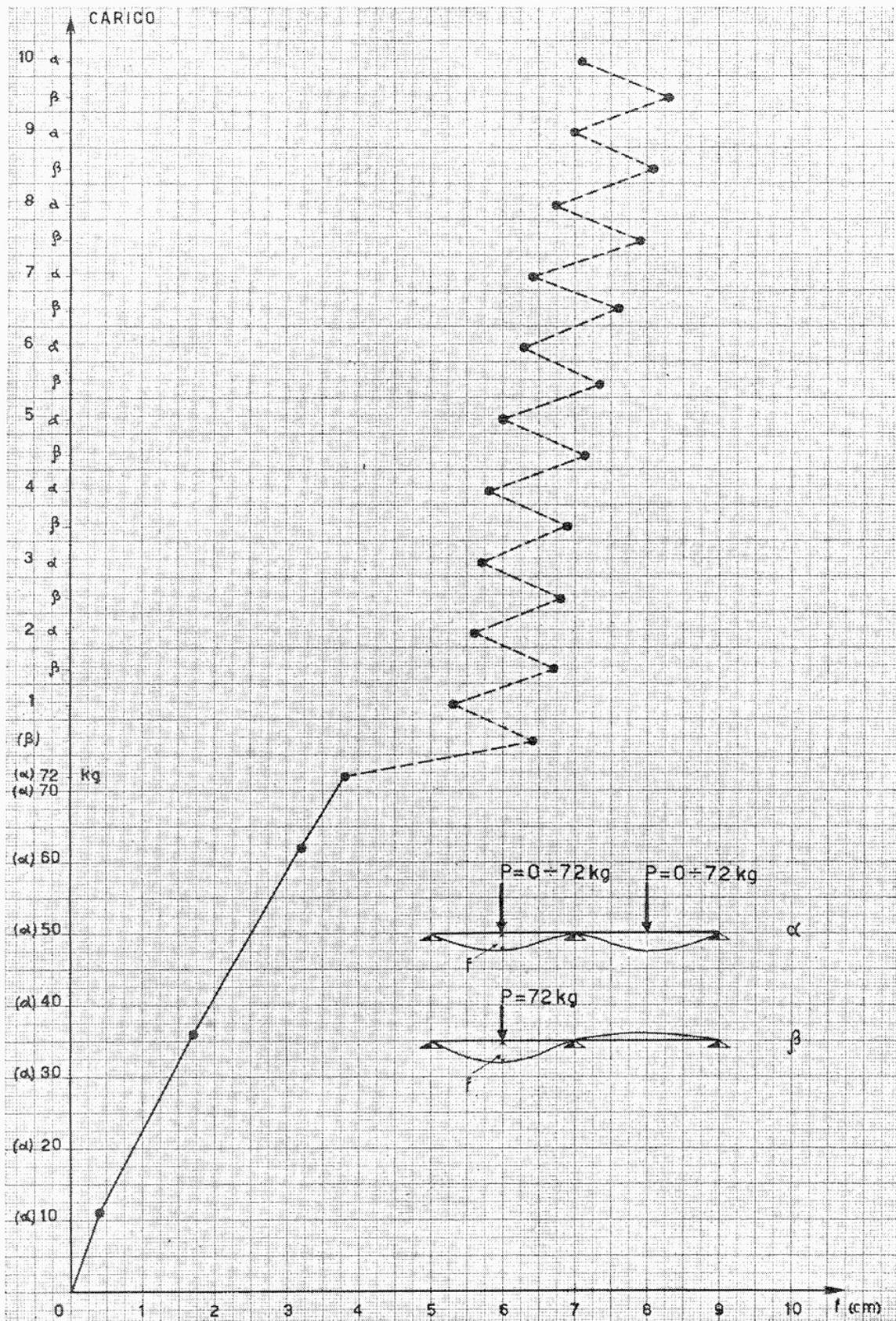


FIG. 8-83