ACTA
Vol. VI .. N. 31

IL PROBLEMA DEI MARGINI DI SICUREZZA NELLE STRUTTURE IPERSTATICHE IN STATO DI COAZIONE (*)

(Con nove figure)

GUSTAVO COLONNETTI
Accademico Pontificio

SVMMARIVM. — Auctor, exemplo utens, declarat quibus rationibus (quas plane differre demonstrat a rationibus quibus hodie uti solent constructionum professores) supputari debeat quanto solidiores, quam omnino oporteat, extruendae sint yperstaticae structurae sub coactione positae, quo maior sit operum stabilitas.

In una mia Nota su *Teoria e calcolo delle travi con armature preventivamente tese* (1) ho avuto incidentalmente occasione di accennare a certi particolari criterii con cui va trattato il problema dei margini di sicurezza nella moderna tecnica delle costruzioni.

Più recentemente, in uno studio sui *Serbatoi sferici a sospensione funicolare* (2) ho, nello stesso ordine di idee, formulati alcuni rilievi la cui portata esorbitava dal problema particolare di cui mi stavo occupando ed investiva in pieno il problema, assai più vasto e più generale, delle strutture iperstatiche in stato di coazione.

Ritorno ora sull'argomeuto per chiarire meglio la portata di quei rilievi e per metterne in luce la fondamentale importanza.

* * *

(*) Nota presentata il 21 settembre 1942.

(1) GUSTAVO COLONNETTI, *Teoria e calcolo delle travi con armature preventivamente tese* (Il problema della sezione parzializzata). Pontificia Academia Scientiarum, « Acta », 1940.

(2) GUSTAVO COLONNETTI, *Serbatoi sferici a sospensione funicolare.* Pontificia Academia Scientiarum, « Acta », 1942.

Mi riferirò, per fissar le idee, ad un caso concreto; e precisamente al caso di una trave semplicemente appoggiata agli estremi, accoppiata con una sospensione funicolare nel modo schematicamente indicato in fig. 1.

FIG. 1.

I varii aspetti del fenomeno che io mi propongo qui di illustrare possono, nello studio di questo particolarissimo problema, essere messi in evidenza con facilità estrema e singolare semplicità di mezzi.

Sia l la lunghezza della trave, h la sua altezza (costante), J il momento d'inerzia (pure costante) della sua sezione retta, ed A la sezione (ancor essa costante) della sospensione.

Supporrò che questa sia inizialmente disposta secondo una parabola ad asse verticale (coincidente colla verticale di mezzo della trave) e che la freccia f di questa parabola sia abbastanza piccola perchè la lunghezza della curva si possa praticamente confondere colla luce l e la tensione lungo di essa si possa ovunque ritenere eguale alla sua componente orizzontale.

Mi limiterò, nella presente trattazione, a considerare carichi Q uniformemente ripartiti, e supporrò che uniformemente ripartite siano anche le frazioni Q_s e Q_t di tali carichi che, in ciascun caso concreto, verranno a gravare rispettivamente sulla sospensione e sulla trave.

È doveroso avvertire che quest'ultima ipotesi implica il mantenimento (per qualsiasi valore dell'intensità del carico) della forma parabolica della sospensione; ciò che, a rigore, non si verifica. L'errore che si viene così a commettere è però molto piccolo, e rientra nei limiti di approssimazione di cui ci si suole accontentare nella trattazione dei problemi di questo genere.

Così stando le cose, nell'equazione generale (1) dell'equilibrio elastico

$$[1] \qquad \int_V \left[(\varepsilon_x + \bar{\varepsilon}_x)\, \delta\sigma_x + (\varepsilon_y + \bar{\varepsilon}_y)\, \delta\sigma_y + \ldots + (\gamma_{xy} + \bar{\gamma}_{xy})\, \delta\tau_{xy} \right] dV = 0$$

(1) GUSTAVO COLONNETTI, *Scienza delle Costruzioni*. Torino, ed. Einaudi, 1941, pag. 369.

cinque dei sei gruppi di termini sotto integrale scompaiono se, nello studio della trave, premesse le solite ipotesi di De Saint-Venant, si conviene di prescindere dalla influenza degli sforzi di taglio.

Delle sei componenti speciali di tensione solo quella normale, avente la direzione dell'asse geometrico della trave, resta infatti, in tal caso, non identicamente nulla.

Assunta come incognita iperstatica del sistema la tensione X nella sospensione, lo stato di equilibrio che al sistema stesso compete, sotto l'azione di una ben determinata condizione di carico, si potrà pertanto sempre caratterizzare imponendo

[2] $$\int_V (\varepsilon + \bar{\varepsilon}) \frac{\partial \sigma}{\partial X} \, dV = 0$$

In questa equazione

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

se E è il modulo di elasticità normale del materiale.

Quanto alle $\bar{\varepsilon}$ noi ci limiteremo qui ad attribuir loro un valore costante nella sospensione; le riterremo identicamente nulle in tutto il resto della struttura.

Tenuto conto che nella sospensione

$$\sigma = \frac{Q_s \, l}{8 f A}$$

mentre nella trave

$$\sigma = \frac{Q_t \, z \, (l - z) \, y}{2 \, l \, J}$$

e che Q_s e Q_t sono legate all'incognita X dalle relazioni

$$Q_s = Q - Q_t = \frac{8f}{l} X$$

la [2] si può facilmente ridurre alla forma

[3] $$\frac{Q_s l}{8 f A} - \frac{Q_t f l}{15 J} + E \bar{\varepsilon} = 0$$

Di qui, per $\bar{\varepsilon} = 0$, si ricava subito

[4] $$\frac{Q_s}{Q_t} = \frac{8 f^2 A}{15 J}$$

In assenza di deformazioni impresse, il rapporto $\frac{Q_s}{Q_t}$ di ripartizione del carico riesce dunque completamente determinato in funzione delle sole caratteristiche geometriche del sistema. Resterà quindi anche determinato in conseguenza il rapporto tra le massime tensioni unitarie nella sospensione e nella trave.

Se pertanto queste due parti della struttura sono state costruite col medesimo materiale, non è detto affatto che il limite di elasticità venga in esse raggiunto contemporaneamente; il massimo carico praticamente ammissibile sulla struttura in condizioni di normale esercizio — quello cioè che si designa abitualmente col nome di *carico di sicurezza* della costruzione — dovrà perciò venire fissato in relazione a quella delle due parti della struttura in cui il limite di elasticità verrà raggiuto per primo.

Tanto per fare un esempio, poniamo

$$\begin{aligned} l &= 2000 \text{ cm.} \\ f &= 125 \text{ cm.} \\ A &= 12 \text{ cm}^2 \\ J &= 500.000 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

L'equazione [3] diviene

[5] $$\frac{Q_s}{6} - \frac{Q_t}{30} + E \bar{\varepsilon} = 0$$

e per $\bar{\varepsilon} = 0$

[6] $$\frac{Q_s}{Q_t} = \frac{1}{5}$$

Supponiamo che la trave abbia un'altezza costante

$$h = 100 \text{ cm.}$$

La tensione unitaria massima, ai bordi della sezione in mezzeria, sarà

$$\sigma' = \frac{Q_t\, l\, y'}{8\, J} = \frac{Q_t}{40}$$

Se il materiale impiegato nella costruzione possiede un limite di elasticità pari a 2,50 t/cm² questo non verrà raggiunto (nella trave) se non per

$$Q_t = 100 \text{ t.}$$

Ma nella sospensione, dove

$$\sigma = \frac{Q_s\, l}{8\, f A} = \frac{Q_s}{6}$$

lo stesso limite verrà raggiunto per

$$Q_s = 15 \text{ t.}$$

ciò che si verifica già quando

$$Q_t = 75 \text{ t.}$$

L'aggiunta della sospensione — se i limiti di elasticità dovessero davvero essere ovunque rispettati — si tradurrebbe quindi in una *limitazione del carico* che la trave avrebbe potuto sopportare da sola.

Qualunque sia infatti il margine n di sicurezza che si vuol adottare, il carico di sicurezza che, per la trave presa da sola, sarebbe stato di

$$\frac{100}{n} \text{ t.}$$

dovrebbe, per il sistema costituito dall'accoppiamento della trave con la sospensione, venire ridotto a sole

$$\frac{15 + 75}{n} = \frac{90}{n} \text{ t.}$$

Ora chiunque abbia pensato di aggiungere alla trave la sospensione lo avrà fatto certamente coll'idea di trarne un vantaggio, vale a dire di accrescere il carico che la struttura può utilmente portare. Non potrà quindi certamente accontentarsi di un simile risultato.

In realtà noi sappiam bene quel che accade.

Raggiunte le 90 t., la sospensione entra in regime plastico; al crescere ulteriore del carico la frazione di questo che vien sopportata dalla sospensione cessa di crescere, ma continua a crescere la frazione sopportata dalla trave; e ciò senza inconvenienti di sorta, almeno fino a che le deformazioni plastiche della sospensione non divengono troppo grandi, e fino a che la trave si mantiene in regime di perfetta elasticità; vale a dire fino a che la frazione del carico che essa sopporta non raggiunge le 100 t.

Nulla ci vieta dunque di adottare come carico di sicurezza la somma dei carichi di sicurezza delle due parti della struttura prese separatamente, cioè

$$\frac{15 + 100}{n} = \frac{115}{n} \text{ t.}$$

se siamo disposti ad ammettere il tempestivo intervento di deformazioni plastiche nella misura occorrente perchè sia verificata la [5] epperò si abbia

$$\mathrm{E}\,\bar{\varepsilon} = \frac{Q_t}{30} - \frac{Q_s}{6} = \frac{100}{30} - \frac{15}{6} = 0{,}833 \text{ t.}$$

Per $\mathrm{E} = 2080$ t/cm^2 si trova così un allungamento plastico

$$\bar{\varepsilon} = \frac{0{,}4}{1000}$$

che qualunque buon acciaio dolce da costruzione può sicuramente sopportare senza danno.

* * *

Del resto non è neppur detto che questo allungamento debba proprio necessariamente essere il risultato di una deformazione plastica.

Questa può anzi essere del tutto evitata se si provvede ad introdurre l'allungamento di cui si tratta, all'atto stesso del montaggio della sospensione, attribuendo alla fune una lunghezza maggiore di quella che geometricamente le spetterebbe (nella misura di quattro decimi di millimetro per metro lineare di lunghezza).

Tra i due casi v'è solo una differenza; ed è che, se la deformazione precede la messa in carico della struttura, la sospensione non entrerà effettivamente in funzione se non quando il carico avrà raggiunto il valore capace di determinare nella trave quella deformazione elastica che il gioco della sospensione consente.

Se invece la fune è stata montata senza gioco, la ripartizione del carico tra sospensione e trave avverrà, fin dall'inizio, nel rapporto fisso 1:5.

Pei valori del carico ammissibili in condizioni di normale esercizio della struttura, le tensioni unitarie massime potranno dunque risultare, nei due casi, assai diverse. Nella trave esse saranno maggiori nel primo caso che nel secondo; l'opposto accadrà nella sospensione.

Ma a questo si limitano, in ultima analisi, le conseguenze del fatto che le $\bar{\varepsilon}$ vengono, nella prima ipotesi, impresse preventivamente, mentre nell'altra ipotesi faranno la loro tempestiva comparsa solo in caso di bisogno.

Pel fatto che queste $\bar{\varepsilon}$ sono, in definitiva, le stesse, lo stesso sarà, nei due casi, il margine di sicurezza della struttura.

* * *

S'intende che di deformazioni impresse non v'è più bisogno alcuno se le due parti della struttura vengono costruite con materiali differenti, aventi limiti di elasticità appropriati.

Immaginiamo infatti che, fermo restando il limite elastico dell'acciaio con cui è fatta la trave a 2,50 t/cm², venga adottato nella costruzione della sospensione un acciaio il quale abbia per limite elastico 3,33 t/cm².

È facile constatare che i due limiti di elasticità verranno in questo caso raggiunti simultaneamente nella sospensione e nella trave quando i rispettivi carichi raggiungeranno (simultaneamente) i valori

$$Q_s = 20 \text{ t.}$$
$$Q_t = 100 \text{ t.}$$

Si potrà perciò adottare senz'altro come carico di sicurezza della struttura

$$\frac{120}{n} \text{ t.}$$

Noi siamo così condotti a prospettarci come vantaggiosa, nei sistemi iperstatici, l'adozione di materiali dotati di limiti di elasticità differenti; nel caso concreto, l'adozione, nella sospensione, di un acciaio di qualità sensibilmente più elevata di quella dell'acciaio impiegato nella costruzione della trave.

* * *

Da un razionale uso degli acciai di qualità e degli stati di coazione preventivamente impressi, si possono d'altronde ricavare ben altri vantaggi.

Supponiamo infatti di impiegare nella costruzione della sospensione un acciaio avente un limite elastico ancor più elevato, per esempio 12,50 t/cm^2 (cinque volte più grande del limite elastico dell'acciaio impiegato nella costruzione della trave).

Una utilizzazione integrale della resistenza dei due materiali si potrà evidentemente ottenere solo se

$$Q_s = 75 \text{ t.}$$

mentre

$$Q_t = 100 \text{ t.}$$

ciò che autorizzerebbe l'adozione di un carico di sicurezza pari a

$$\frac{175}{n} \text{ t.}$$

Ora una siffatta ripartizione del carico tra sospensione e trave si verifica effettivamente se

$$E\bar{\varepsilon} = \frac{Q_t}{30} - \frac{Q_s}{6} = \frac{100}{30} - \frac{75}{6} = -9{,}167 \text{ t.}$$

cioè se

$$\bar{s} = -\frac{4,4}{1000}$$

Si tratta dunque semplicemente di attuare una *messa in tensione preventiva* della sospensione attribuendo alla fune, all'atto del montaggio, una lunghezza minore di quella che geometricamente le competerebbe (nella misura di quarantaquattro decimi di millimetro per metro lineare di lunghezza).

* * *

Una sola obbiezione potrebbe farsi all'utile impiego di simili stati di coazione – e potrebbe essere fonte di ben ragionevoli riserve – se i risultati a cui siam giunti fossero inderogabilmente connessi con la perfetta esecuzione delle operazioni di montaggio, e con la perfetta conservazione degli stati di coazione che nel montaggio si sono creati.

Ma non è così.

La plasticità dei materiali è sempre là per rimediare, automaticamente ed entro larghi limiti, ai possibili inconvenienti, e per correggere i possibili errori, realizzando in ogni caso le condizioni più favorevoli per la resistenza della struttura.

Questa volta è la plasticità della trave quella che può esser chiamata ad intervenire.

Supponiamo infatti che, per un errore di montaggio, o per un successivo cedimento di ancoraggi, la deformazione impressa alla sospensione sia, o divenga, inferiore al valore prefisso.

Le cose procederanno allora, al crescer del carico, nel modo seguente: la frazione di carico assunta dalla sospensione sarà minore di quella dianzi indicata; maggiore riuscirà quindi in definitiva la frazione gravante sulla trave; in questa perciò i limiti di elasticità verranno raggiunti quando la resistenza della sospensione non è ancora integralmente utilizzata.

Accadrà così che nella trave si determineranno le prime deformazioni plastiche; il carico da essa sopportato cesserà allora di crescere; gli ulteriori incrementi di carico si riporteranno tutti e soltanto sulla sospensione, e ciò fino al momento in cui in essa pure si sarà raggiunto il limite di elasticità del materiale.

In quel momento le condizioni statiche da noi dianzi definite si saranno automaticamente ripristinate.

Attraverso un processo opposto (consistente in una deformazione plastica della sospensione) lo stesso identico risultato si raggiungerebbe, non meno automaticamente, se l'errore di montaggio fosse stato di segno contrario, se cioè alla sospensione fosse stata attribuita una tensione iniziale eccessiva.

Sembra pertanto lecito assumere in ogni caso come carico di sicurezza della struttura il valore ottenuto sommando i carichi di sicurezza proprî della sospensione e della trave separatamente considerate; e valersi dell'equazione generale dell'equilibrio elastico al solo scopo di determinare l'entità delle deformazioni impresse necessarie, nonchè le caratteristiche dello stato di coazione che da esso deriva; facendo poi assegnamento sulla plasticità dei materiali per la produzione di tali deformazioni (se esse non sono eccessivamente grandi) o quanto meno per la correzione degli errori in cui si può incorrere nell'imporle preventivamente e per la compensazione delle variazioni a cui esse possono andare successivamente soggette.

* * *

Di regola l'adozione delle deformazioni impresse preventivamente è da considerarsi come nettamente preferibile.

E ciò non soltanto per la ragione, ovvia, che con essa si evita (o, in ogni caso, si limita) l'intervento dei fenomeni plastici, ma anche e sopratutto per un'altra ragione che merita di essere tenuta nella massima considerazione; ed è la inversione di sollecitazioni che le deformazioni impresse preventivamente determinano nella trave per tutte le condizioni di carico inferiori ad un certo limite.

Questa inversione si spinge spesso a tal segno che le condizioni più sfavorevoli per la stabilità della trave si vengono a verificare a trave scarica.

Così accade per esempio nel caso da noi testè considerato; il carico *negativo* che viene a gravare sulla trave in seguito alla messa in tensione preventiva della sospensione è infatti eguale a tonnellate 45,8 mentre quello *positivo* che graverà su di essa in condizioni normali di esercizio, se si adotta un margine di sicurezza eguale a due, non dovrà mai superare le tonnellate 27,1.

Ciò è quanto dire che, se un qualunque cedimento anormale dovesse per avventura prodursi nelle membrature della trave – poniamo, per esempio, in dipendenza di una insufficienza di resistenza al carico di punta – esso dovrebbe se mai verificarsi non già sotto carico (quando il fatto potrebbe avere conseguenze gravi) bensì a trave scarica (quando le conseguenze non potrebbero consistere che in una immediata riduzione dello stato di coazione con conseguente assestamento automatico dell'intera struttura).

* * *

La conclusione si può evidentemente compendiare nei tre punti già accennati nella nota che ho citata da principio (1); punti che enunceremo ora più esattamente e più generalmente così:

1) possibilità di raggiungere in ogni caso, con un razionale impiego degli stati di coazione, la utilizzazione integrale delle caratteristiche di resistenza dei materiali impiegati;

2) opportunità di adottare, nella costruzione di certe ben determinate parti della struttura, materiali di qualità; e possibilità di raggiungere in essi (pur senza rinunciare ai consueti doverosi margini di sicurezza) valori delle tensioni anche molto elevati, cioè molto prossimi al loro limite di elasticità;

3) possibilità che certe condizioni più particolarmente sfavorevoli alla stabilità si vengano a verificare a carico nullo, vale a dire sotto l'azione del solo stato di coazione iniziale.

Io penso che questi tre punti meritino tutta l'attenzione degli studiosi: l'ultimo di essi in modo particolarissimo.

La circostanza a cui esso si riferisce – e che è stata qui illustrata con un esempio – è infatti suscettibile di dare al costruttore ed al progettista un senso nuovo di sicurezza che, se io non mi inganno, verrà presto annoverato tra i maggiori pregi della nuova tecnica delle costruzioni.

---

(1) GUSTAVO COLONNETTI, *Serbatoi sferici a sospensione funicolare*. Pontificia Academia Scientiarum, « Acta », 1942.

ALLEGATO

Diagrammi di ripartizione del carico

A documentazione ed illustrazione di quanto sopra esposto si può utilmente ricorrere alla seguente rappresentazione grafica.

I carichi verranno portati come ascisse su di un asse orizzontale OQ*; come ordinate, a partire da questo medesimo asse, verranno portate:*

verso l'alto *le frazioni* Q_s *sopportate dalla sospensione*

verso il basso *le frazioni* Q_t *sopportate dalla trave.*

In regime elastico ed in assenza di deformazioni impresse il diagramma di ripartizione verrà delimitato, superiormente ed inferiormente dalle due rette OS *ed* OT *le cui inclinazioni sull'asse delle ascisse stanno nel rapporto (costante) dato dalla* [4].

Tale diagramma dovrà intendersi limitato a quel valore del carico per cui il limite di elasticità del materiale viene in qualche punto, per la prima volta, raggiunto (fig. 2).

Se si ammette l'intervento di deformazioni plastiche il diagramma può venire esteso come in fig. 3. In questo caso la linea di ripartizione continua a coincidere coll'asse delle ascisse solo fino a quel punto P *per cui il limite di elasticità del materiale è per la prima volta raggiunto nella sospensione. A partire da questo punto il carico gravante sulla sospensione deve mantenersi costante; si dovrà perciò assumere come nuova fondamentale la parallela ad* OS *condotta per* P. *La linea di ripartizione verrà così ad assumere l'andamento di una bilatera* OPR.

Reciprocamente, dato il carico ST, *somma dei carichi* RS *ed* RT *che operando separatamente sulla sospensione e sulla trave vi determinano il raggiungimento del limite di elasticità del materiale, conducendo da* R *la parallela ad* OS *fino ad incontrare in* P *l'asse delle ascisse, si verrà a determinare così l'inizio come l'entità del fenomeno plastico.*

Ove poi si voglia prevenire questo fenomeno con deformazioni preventivamente impresse, basterà (come in fig. 4) condurre da R *la parallela all'asse delle ascisse, ed assumere questa parallela come nuovo asse di riferimento, cioè contare a partire da essa le ordinate di* OS *e di* OT.

L'ordinata AO *in corrispondenza dell'origine, dovrebbe rappresentare il carico (negativo sulla sospensione) all'atto del montaggio.*

S'intende che se, per ragioni costruttive, carichi negativi non sono ammissibili — come accade quando la sospensione è fatta per funzionare solo in tensione — si dovrà prescindere da essi ed assumere come linea di ripartizione la bilatera OBR *costituita da un primo tratto della retta* OS *e successivamente da un secondo tratto dell'asse* AR.

Veniamo ora all'ipotesi che le due parti della struttura siano state costruite con materiali differenti, dotati di limiti di elasticità tali che il loro raggiungimento si verifichi, nelle due parti, simultaneamente. L'utilizzazione integrale delle caratteristiche dei materiali si ottiene allora spontaneamente, vale a dire senza bisogno di deformazioni impresse, nel modo indicato in fig. 5.

Le figure seguenti si riferiscono finalmente al caso in cui per la sospensione sia stato impiegato un acciaio ad altissima resistenza. L'utilizzazione integrale delle sue caratteristiche si intende assicurata da opportune deformazioni impresse.

In fig. 6 si è supposto che queste intervengano, per effetto del carico, sotto forma di deformazioni plastiche della trave. La linea di ripartizione si dispone allora secondo la bilatera OPR.

In fig. 7 si è invece supposto che le stesse deformazioni vengano impresse preventivamente per mezzo di una messa in tensione della sospensione all'atto del montaggio. L'asse di riferimento si sposta parallelamente a se stesso in AR.

Nella fig. 8 si è poi fatta l'ipotesi che questa tensione preventiva della sospensione sia stata, all'atto del montaggio (o sia divenuta in seguito) insufficiente. Nella fig. 9 invece si è supposta una tensione preventiva eccessiva. Nel primo caso l'errore verrà corretto sotto carico da una opportuna deformazione plastica della trave; nell'altro caso da una deformazione plastica della sospensione.

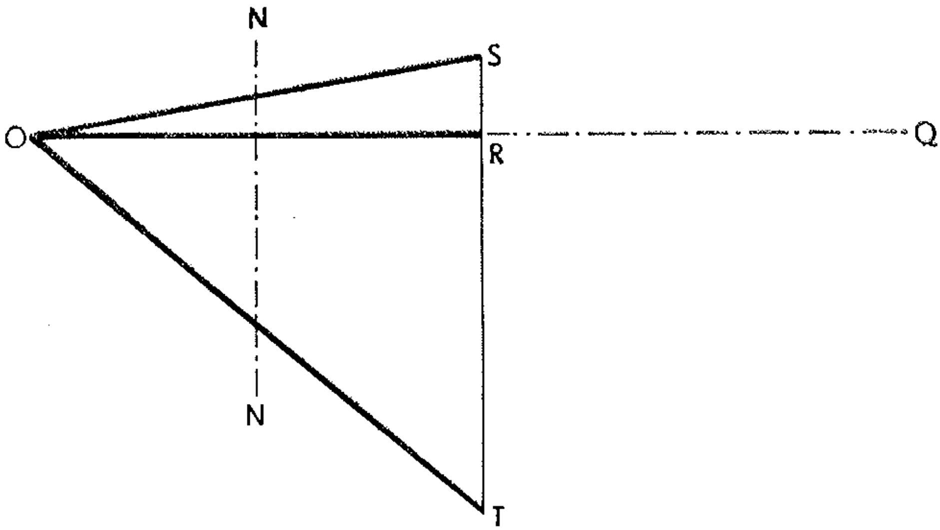

FIG. 2.

	SOSPENSIONE in acciaio **dolce** (lim. elastico **2.50** t/cm²)		TRAVE in acciaio **dolce** (lim. elastico **2.50** t/cm²)	
Q carico totale applicato alla struttura t	Q_s frazione del carico gravante sulla sospensione t	tensione unitaria massima nella sospensione t/cm²	Q_t frazione del carico gravante sulla trave t	tensioni unitarie massime nella trave t/cm²
0	**0**	**0**	**0**	**0**
45	**7.5**	**1.25**	**37.5**	± **0.94**
90	**15**	**2.50**	**75**	± **1.88**

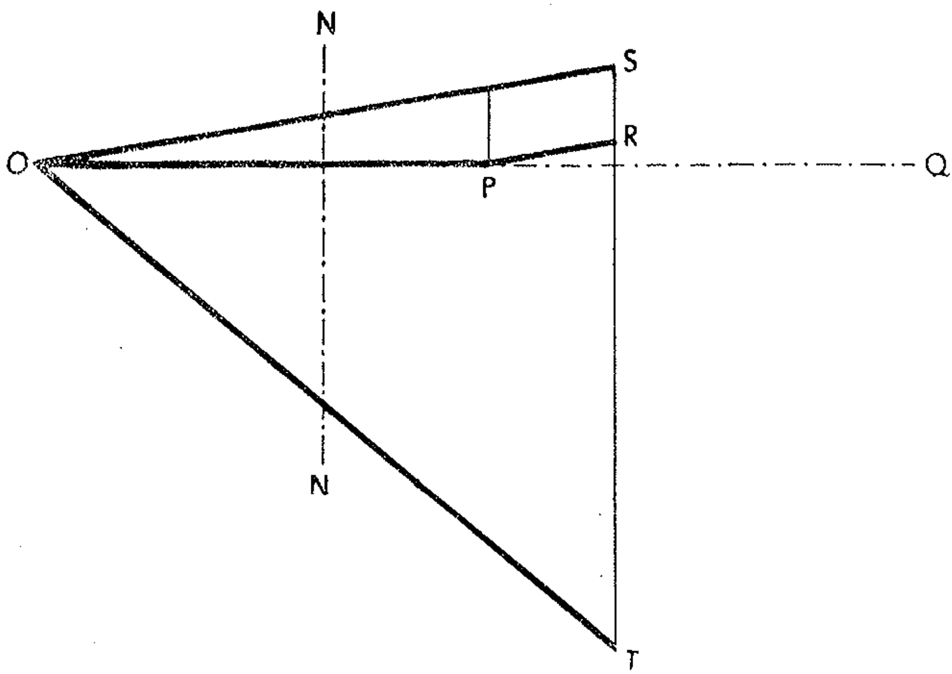

FIG. 3.

Q carico totale applicato alla struttura t	SOSPENSIONE in acciaio **dolce** (lim. elastico **2.50** t/cm²) Q_s frazione del carico gravante sulla sospensione t	tensione unitaria massima nella sospensione t/cm²	TRAVE in acciaio **dolce** (lim. elastico **2.50** t/cm²) Q_t frazione del carico gravante sulla trave t	tensioni unitarie massime nella trave t/cm²
0	**0**	**0**	**0**	**0**
57.5	**9.5**	**1.53**	**48**	**± 1.20**
115	**15**	**2.50**	**100**	**± 2.50**

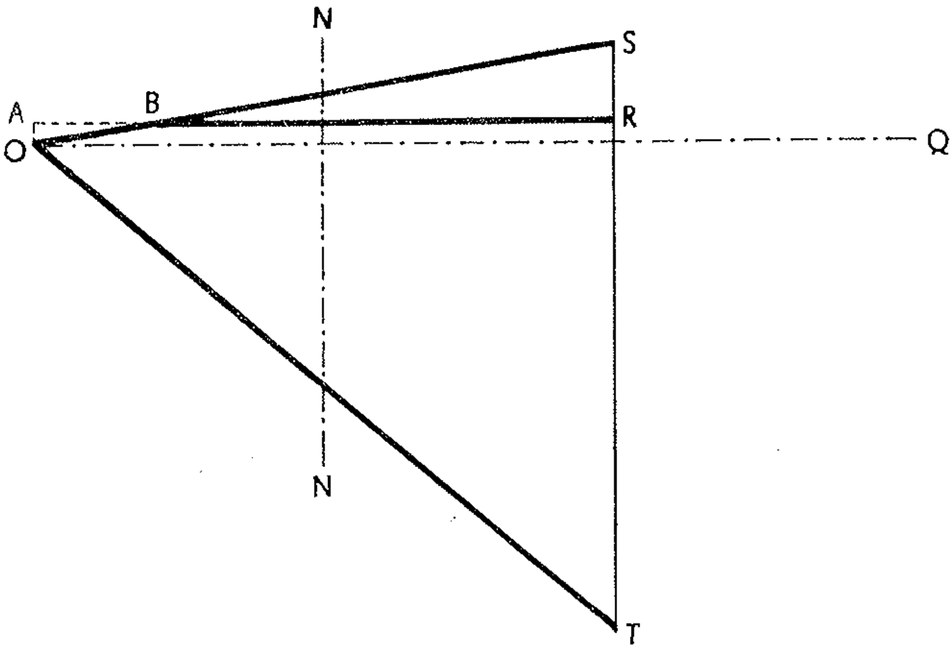

FIG. 4.

	SOSPENSIONE in acciaio **dolce** (lim. elastico **2.50** t/cm²)		TRAVE in acciaio **dolce** (lim. elastico **2.50** t/cm²)	
Q carico totale applicato alla struttura t	Q_s frazione del carico gravante sulla sospensione t	tensione unitaria massima nella sospensione t/cm²	Q_t frazione del carico gravante sulla trave t	tensioni unitarie massime nella trave t/cm²
0	**4.2**	**0.69**	— **4.2**	$\mp$ **0.10**
57.5	**6**	**1.00**	**51.5**	$\pm$ **1.29**
115	**15**	**2.50**	**100**	$\pm$ **2.50**

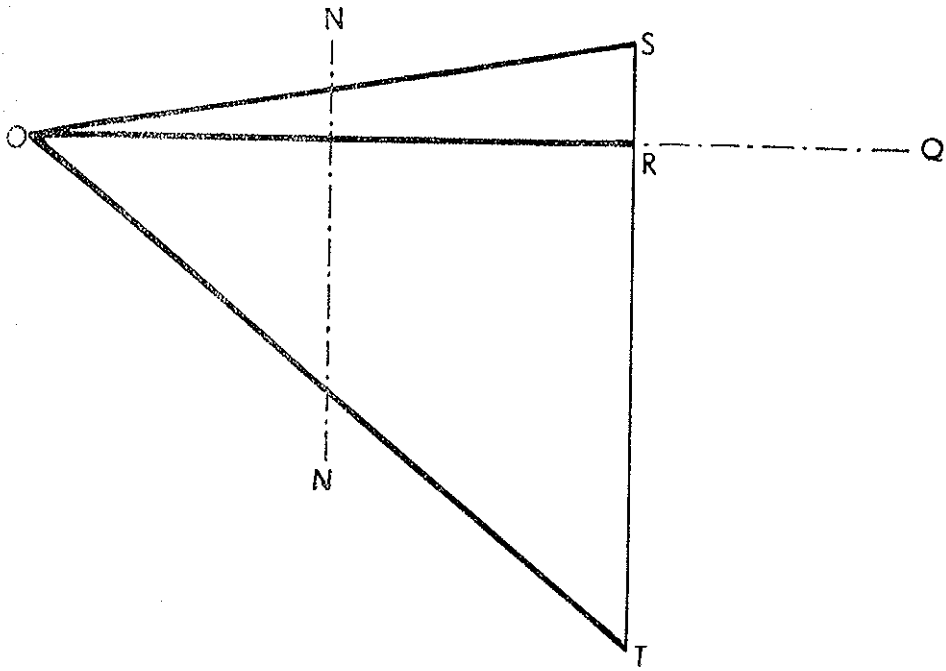

FIG. 5.

Q carico totale applicato alla struttura t	SOSPENSIONE in acciaio **semiduro** (lim. elastico **3.33** t/cm²) Q_s frazione del carico gravante sulla sospensione t	tensione unitaria massima nella sospensione t/cm²	TRAVE in acciaio **dolce** (lim. elastico **2.50** t/cm²) Q_t frazione del carico gravante sulla trave t	tensioni unitarie massime nella trave t/cm²
0	**0**	**0**	**0**	**0**
60	**10**	**1.67**	**50**	**± 1.25**
120	**20**	**3.33**	**100**	**± 2.50**

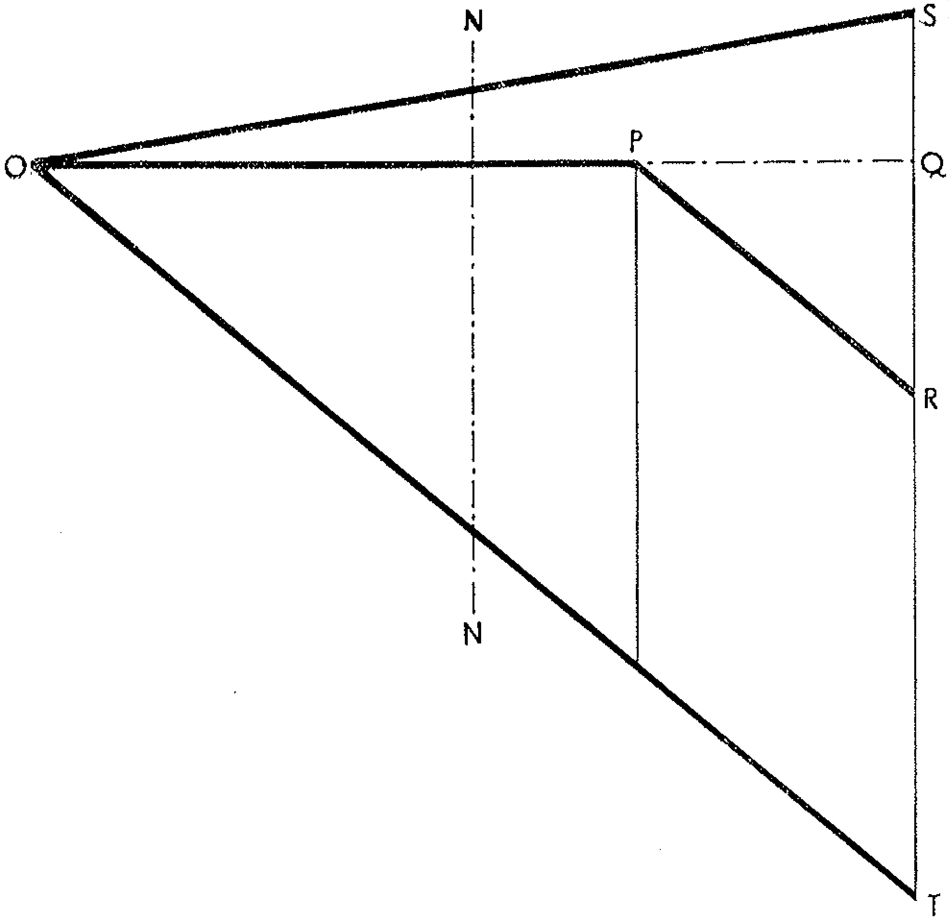

FIG. 6.

Q carico totale applicato alla struttura t	SOSPENSIONE in acciaio **di qualità** (lim. elastico **12.50** t/cm²)		TRAVE in acciaio **dolce** (lim. elastico **2.50** t/cm²)	
	Q_s frazione del carico gravante sulla sospensione t	tensione unitaria massima nella sospensione t/cm²	Q_t frazione del carico gravante sulla trave t	tensioni unitarie massime nella trave t/cm²
0	**0**	**0**	**0**	**0**
87.5	**15**	**2.50**	**72.5**	**± 1.81**
175	**75**	**12.50**	**100**	**± 2.50**

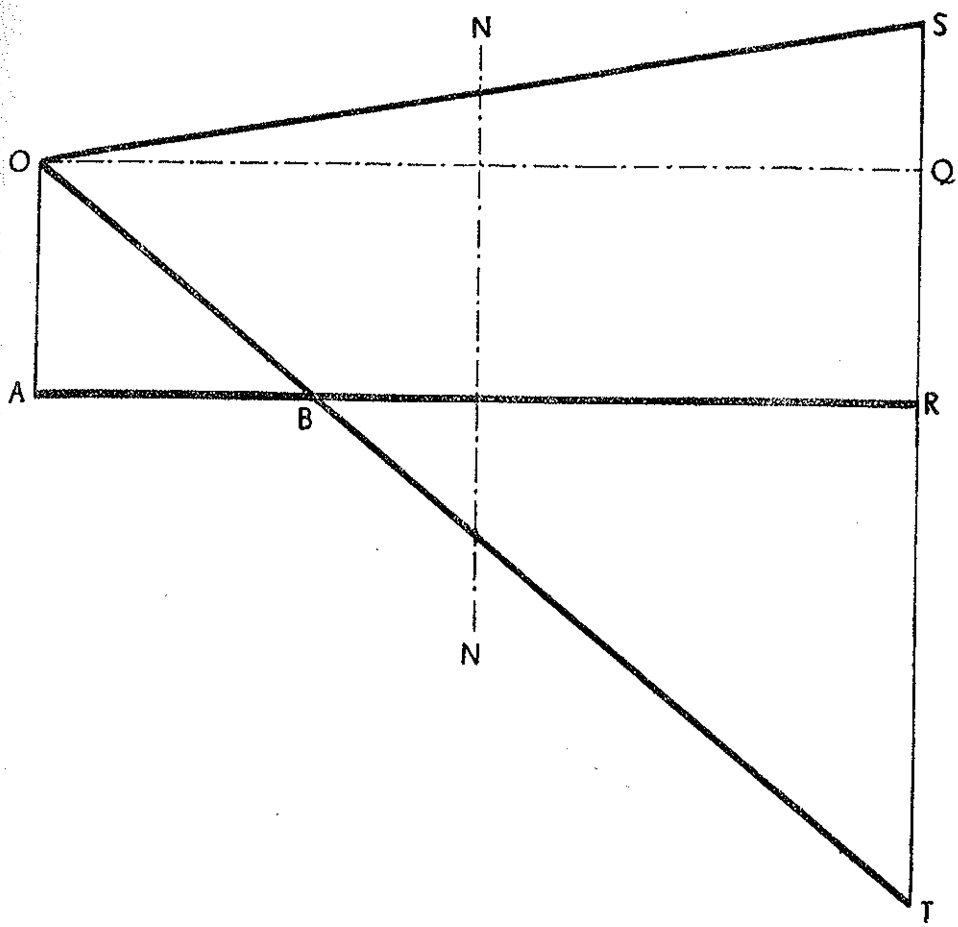

FIG. 7.

Q carico totale applicato alla struttura t	SOSPENSIONE in acciaio **di qualità** (lim. elastico **12.50** t/cm²)		TRAVE in acciaio **dolce** (lim. elastico **2.50** t/cm²)	
	Q_s frazione del carico gravante sulla sospensione t	tensione unitaria massima nella sospensione t/cm²	Q_t frazione del carico gravante sulla trave t	tensioni unitarie massime nella trave t/cm²
0	**45.8**	**7.64**	— **45.8**	$\mp$ **1.16**
87.5	**60.4**	**10.07**	**27.1**	$\pm$ **0.67**
175	**75**	**12.50**	**100**	$\pm$ **2.50**

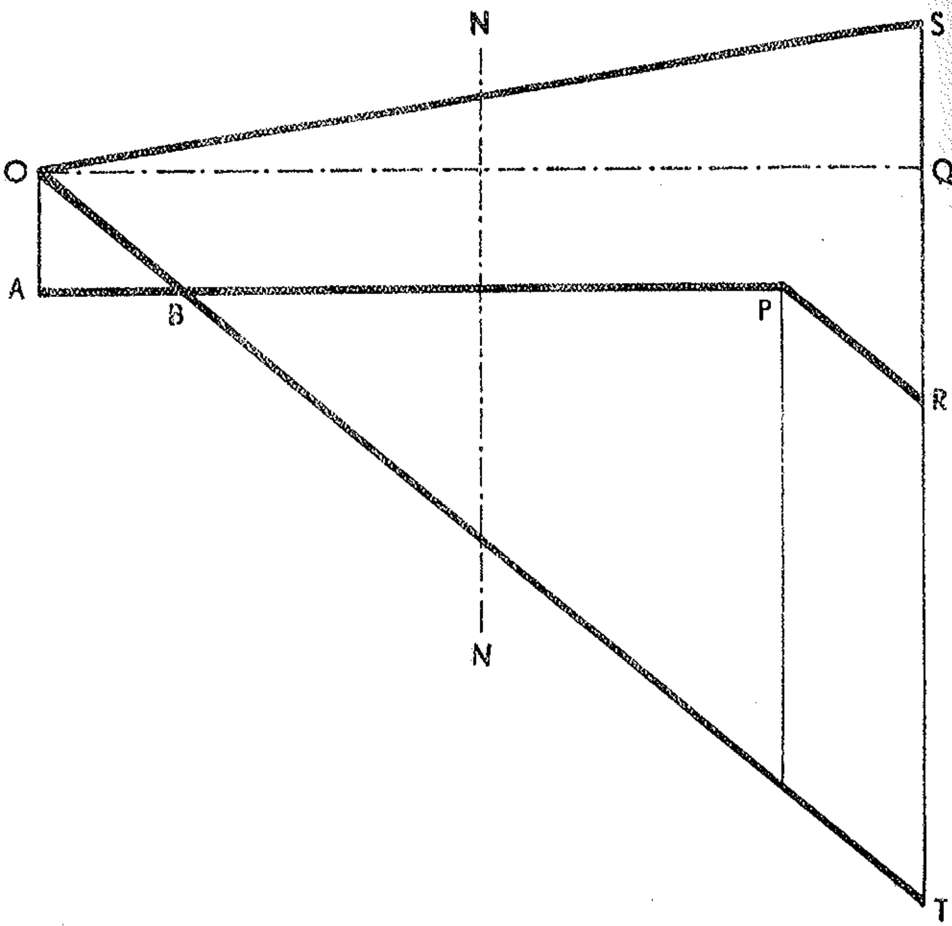

FIG. 8.

Q carico totale applicato alla struttura t	SOSPENSIONE in acciaio **di qualità** (lim. elastico **12.50** t/cm²) — Q_s frazione del carico gravante sulla sospensione t	SOSPENSIONE — tensione unitaria massima nella sospensione t/cm²	TRAVE in acciaio **dolce** (lim. elastico **2.50** t/cm²) — Q_t frazione del carico gravante sulla trave t	TRAVE — tensioni unitarie massime nella trave t/cm²
0	**23**	**3.83**	**— 23**	**± 0.57**
87.5	**50**	**8.33**	**37.5**	**± 0.94**
175	**75**	**12.50**	**100**	**± 2.50**

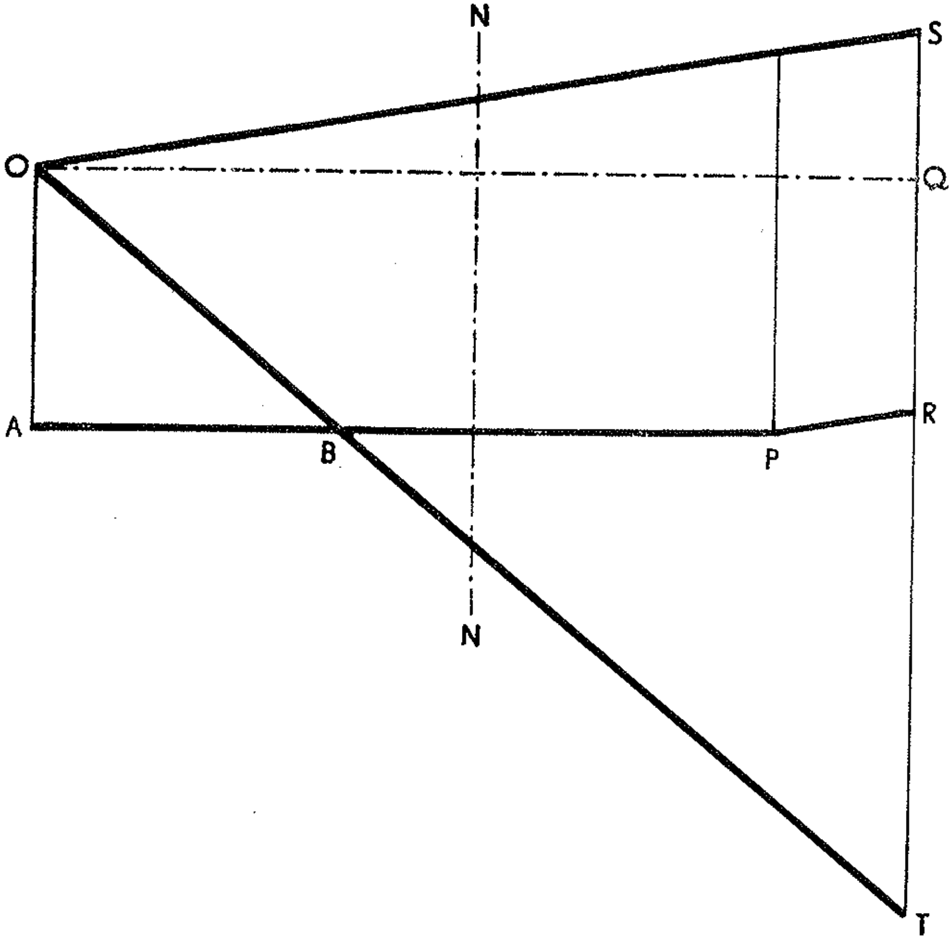

FIG. 9.

Q carico totale applicato alla struttura t	SOSPENSIONE in acciaio **di qualità** (lim. elastico **12.50** t/cm²)		TRAVE in acciaio **dolce** (lim. elastico **2.50** t/cm²)	
	Q_s frazione del carico gravante sulla sospensione t	tensione unitaria massima nella sospensione t/cm²	Q_t frazione del carico gravante sulla trave t	tensioni unitarie massime nella trave t/cm²
0	**51**	**8.50**	**— 51**	$\mp$ **1.32**
87.5	**65.5**	**10.91**	**22**	$\pm$ **0.55**
175	**75**	**12.50**	**100**	$\pm$ **2.50**