



## Teoria e Progetto di Ponti

A. Recupero

1

## CONTENUTI e INDICE

- LA CLASSIFICAZIONE;
- LE AZIONI
- LA NORMATIVA ITALIANA;
- GLI EFFETTI REOLOGICI;
- L'IMPALCATO A GRATICCIO;
- L'IMPALCATO A CASSONE;
- LA PRECOMPRESSIONE ESTERNA;
- LA SISMICA

2

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

3

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

- L'impalcato dei ponti a graticcio è formato da più elementi longitudinali rettilinei, le travi propriamente dette, collegate tra loro dalla soletta e, in molti casi, da elementi trasversali comunemente indicati come traversi;

4

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

- Le travi longitudinali possono essere sia isostatiche (travi semplicemente appoggiate, travi Gerber) sia iperstatiche (travi continue) e le sollecitazioni in esse presenti sono sostanzialmente di flessione e taglio, diversamente dai ponti ad arco in cui sono prevalenti gli sforzi assiali;

5

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

- Questa tipologia di ponte ha avuto una rapidissima diffusione negli ultimi anni grazie alla prefabbricazione che può anche essere totale; per questo motivo essi hanno praticamente sostituito i ponti ad arco che richiedono in genere costose opere provvisorie;

6

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

- Il campo di impiego dei ponti a graticcio è quello delle luci piccolo-medie (fino a 40-50 m), preferendosi in genere per luci maggiori le sezioni a cassone.
- Lo schema statico più usato è quello più semplice della trave appoggiata perché consente operazioni agevoli di montaggio nel caso della prefabbricazione, spesso con la soletta continua sugli appoggi;

7

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

- Nel seguito si danno alcuni criteri di calcolo prescindendo dal materiale con cui è fatto il graticcio, essendo questo schema ampiamente usato sia nel caso di cemento armato ordinario e precompresso, sia nel caso di strutture miste acciaio-calcestruzzo.

8

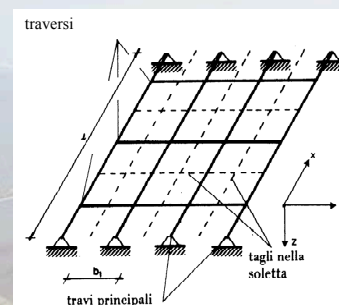
## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Schematizzazione di calcolo

- Per come sono stati definiti, i ponti a graticcio risultano formati da uno o due ordini di travi solidali ad una piastra piana superiore, la soletta.
- Si tratta quindi di una struttura spaziale complessa che viene usualmente schematizzata come un sistema piano costituito da sole travi, pensando di effettuare dei tagli ideali nella soletta parallelamente alle nervature

9

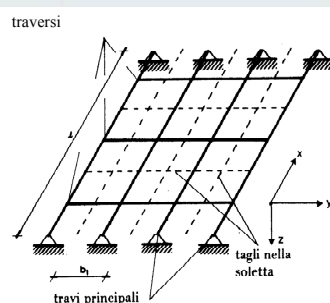
## GLI IMPALCATI A GRATICCIO



10

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

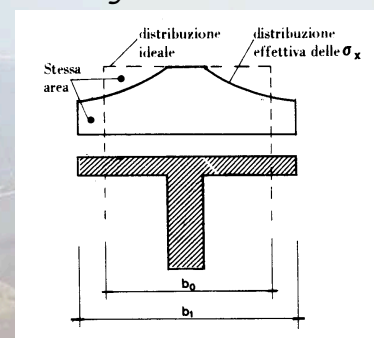
In questo modo si tiene conto della soletta, oltre che negli effetti "locali" anche nel funzionamento della struttura principale in quanto essa funge da corrente superiore delle travi e dei traversi



11

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Larghezza collaborante

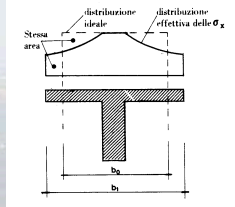


12

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Larghezza collaborante

- Non tutto l'interasse  $b_1$  può essere considerato nei calcoli, ma solo una parte di esso  $b_0 \leq b_1$ , detta larghezza collaborante, definita come la larghezza di una flangia ideale che trasmette la stessa forza complessiva di compressione o di trazione della soletta, ma con una distribuzione uniforme di  $\sigma_x$  pari al valore massimo effettivo.

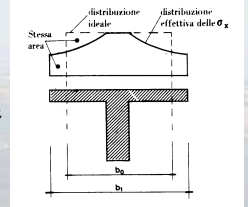


13

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Larghezza collaborante

- I Regolamenti forniscono criteri semplificati per valutare  $b_0$ , che dovrà comunque essere inferiore od uguale all'interasse  $b_1$  delle travi. Ciò conduce ad ammettere lungo i tagli fittizi discontinuità nelle tensioni  $\sigma_x$  della soletta, ma comunque accettati per la semplicità di calcolo e per il buono accordo dei risultati con i dati sperimentali.



14

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Metodi di analisi

- Una volta riportato lo schema statico a quello di un graticcio, il problema è di semplice soluzione grazie alla disponibilità odierna di numerosi programmi di calcolo automatico finalizzati all'analisi di queste strutture
- Nel passato, invece, la necessità di svolgere i calcoli manualmente ha portato a fare ulteriori ipotesi semplificative che hanno condotto a metodi di calcolo approssimati.

15

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Metodi di analisi

- Questi sistemi, specie i più semplici, hanno ancora oggi una loro validità sia per i calcoli di massima necessari nella fase preliminare di un progetto, sia per far capire il ruolo che giocano le varie rigidità nel ripartire il carico

16

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Metodi di analisi

Le vie che si possono seguire sono due:

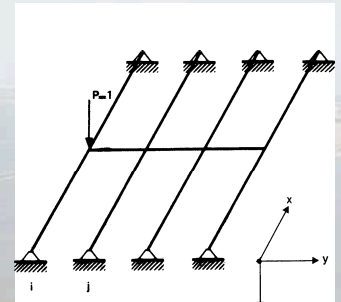
- ridurre ulteriormente il grado di complessità del problema, trasformandolo da piano (graticcio) a monodimensionale (trave): sono questi i metodi che si basano sulla ripartizione trasversale dei carichi;
- riportare il graticcio ad una struttura equivalente continua (piastra ortotropa) di cui si conosce la soluzione in forma chiusa, e quindi facilmente di tabella.

17

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Metodi di analisi

- Si consideri il caso elementare di un graticcio formato da  $n$  travi ed un solo trasverso ed immaginiamo il carico  $P$  unitario agente su un nodo.



18

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Metodi di analisi

- Si definisce coefficiente di ripartizione trasversale  $r_{i,j}$  la quota parte del carico che grava sulla nervatura  $j$  quando  $P = 1$  si trova sulla nervatura  $i$ . I coefficienti  $r_{i,j}$  quindi coincidono con le reazioni mutue verticali che si scambiano le travi ed il traverso

19

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Metodi di analisi

Dalla definizione deriva che

- $\sum r_{i,j} = 1$  per l'equilibrio alla traslazione del traverso;
- $P_j = r_{i,j} P_i$  se  $P_i \neq 1$ , per il principio di sovrapposizione effetti;

20

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Fattori che influenzano la ripartizione trasversale

- Per comprendere l'influenza delle rigidità dei vari elementi costituenti il graticcio sulla ripartizione trasversale si esaminano alcuni casi limite relativi alla sezione trasversale di un ponte, sempre nel caso di un unico traverso
- Poiché l'abbassamento di ciascuna trave dipende dal carico da esse portato, la deformata del traverso sarà proporzionale, a meno delle rigidità delle travi, al diagramma dei coefficienti di ripartizione trasversale

21

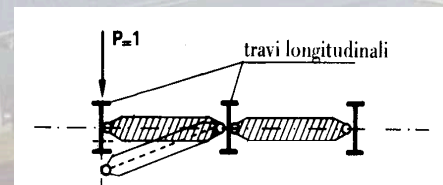
## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Traverso privo di rigidità flessionale

- Tutto il carico è sopportato dalla trave su cui agisce:

$$r_{i,i} = 1$$

$$r_{i,j} = 0 \text{ se } i \neq j$$

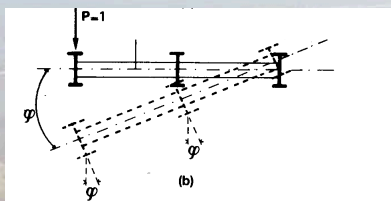


22

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Traverso con rigidità flessionale infinita

- La deformata trasversale del ponte deve essere rettilinea, mentre le travi ruotano dell'angolo  $\varphi$ . Il carico interessa, in misura diversa, tutte le travi.

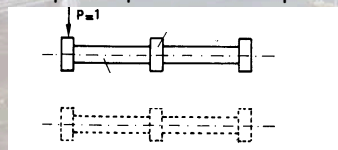


23

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Traverso con rigidità flessionale infinita e travi con rigidità torsionale anch'essa infinita

- La rotazione torsionale delle travi non è possibile, allora la deformata della sezione trasversale del ponte non può che consistere in un abbassamento uniforme; siamo nel caso ideale di ripartizione uniforme del carico, qualunque sia la sua posizione, cioè



$$r_{i,j} = \frac{1}{n}$$

24



## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Osservazioni

- Da quanto visto risulta chiaro come la rigidità flessionale dei trasversi e quella torsionale delle travi siano i fattori che incidono maggiormente sulla ripartizione del carico;
- Nel caso di più trasversi, anche le rigidità torsionali di questi influenzano il comportamento del graticcio;

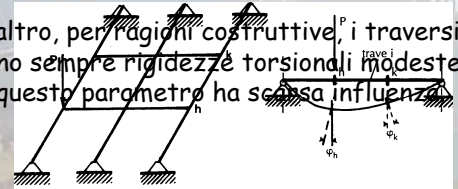
25

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Osservazioni

- Come si può vedere nello schema seguente, ove il trasverso  $k$  scarico, dovendo ruotare, influenza la ripartizione del carico operata dal trasverso  $h$  direttamente caricato.

- Peraltro, per ragioni costruttive, i trasversi hanno sempre rigidità torsionali modeste per cui questo parametro ha scarsa influenza.



26

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

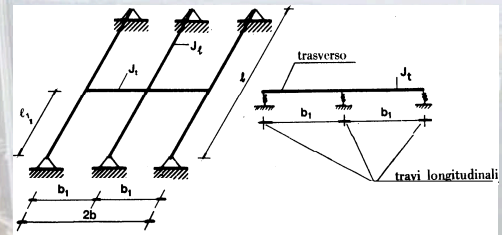
*Graticci con trasversi infinitamente rigidi flessionalmente*

- Si consideri ancora un graticcio costituito da  $n$  travi ed un unico trasverso e si supponga trascurabile la rigidità torsionale delle travi.
- Questa ipotesi può considerarsi sufficientemente valida per tutti i ponti con nervature ad anima sottile, quali le travi in c.a.p. o in acciaio.
- In questa ipotesi si può isolare il trasverso e trattarlo come trave continua su appoggi elastici. Questi ultimi rappresentano le travi longitudinali.

27

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

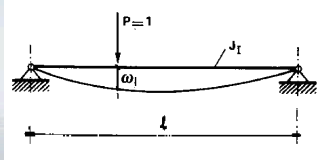
*Graticci con trasversi infinitamente rigidi flessionalmente*



28

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

*Parametro di Homberg*



La cedevolezza delle molle (abbassamento provocato da una forza unitaria) sarà del tipo:

$$\omega_\ell = c \frac{\ell^3}{EJ_\ell}$$

essendo  $c$  una costante che dipende da dove è posizionato il trasverso, cioè da  $\ell_1$ , e da come è vincolata la trave (ad esempio per la trave appoggiata e trasverso in mezzzeria della stessa si ha  $c = 1/48$ ).

29

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

*Parametro di Homberg*

La risoluzione della trave continua su appoggi elastici mostra come la distribuzione degli sforzi sia legata al parametro adimensionale (parametro di Homberg):

$$Z = 6 \frac{EJ_\ell \omega_\ell}{b_1^3} = c \left( \frac{\ell}{b_1} \right)^3 \cdot \frac{J_T}{J_\ell}$$

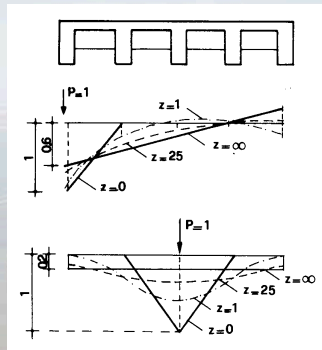
che mostra come per avvicinarsi all'ipotesi di trasverso infinitamente rigido, cioè  $Z \rightarrow \infty$ , sia più importante il rapporto  $(\ell/b_1)$ , che compare al cubo, che la effettiva rigidità flessionale del trasverso, cioè il rapporto  $J_T/J_\ell$ .

30

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

*L'influenza di Z sulla ripartizione trasversale*

- Deformata del trasverso in un ponte a cinque travi e per due diverse posizioni del carico, per diversi valori di Z.



31

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

*L'influenza di Z sulla ripartizione trasversale*

- Si rileva come già per i valori di Z superiori a 25 le differenze con il caso limite  $Z \rightarrow \infty$  siano modeste, riducendosi ulteriormente, a parità di Z, al ridursi del numero di travi, cioè della larghezza  $2b$  dell'impalcato
- Nel caso di 3 sole travi e  $Z = 20$  le differenze rispetto all'ipotesi di trasverso rigido sono inferiori al 5%.

32

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Osservazioni

- Se si osserva che per  $(J_t/J_\ell)=1$ ,  $(\ell/b_1) = 10$  (30 m di luce con travi a 3 m di interasse, trasverso in mezzzeria) risulta  $Z \approx 20$ , si capisce come l'ipotesi di trasversi rigidi sia senz'altro accettabile per molti ponti a travata
- A meno delle costanti delle molle, gli abbassamenti sono proporzionali alle reazioni che nascono nelle molle stesse. Ne deriva poi che la deformata trasversale del ponte è proporzionale alla linea di influenza del coefficiente di ripartizione della trave carica<sup>33</sup>

35

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Osservazioni

- Nel caso di molle di eguale rigidezza (travi tutte eguali) la deformata trasversale coincide anche, a meno della costante delle molle, con il diagramma dei coefficienti di ripartizione.

34

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

*Il trasverso infinitamente rigido*

- Il problema iperstatico della trave continua su appoggi elastici si semplifica notevolmente se si ammette la trave rigida. Infatti per individuare la configurazione deformata del sistema sono sufficienti due parametri che si possono determinare con semplici equazioni di equilibrio (metodo degli spostamenti)

35

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

*Il trasverso infinitamente rigido*

- Nel caso di molle diverse tra loro (travi longitudinali di diverso momento di inerzia o diversa luce), è necessario individuare preliminarmente il baricentro  $G$  delle rigidzze delle molle. Si possono assumere poi come incognite l'abbassamento  $\delta$  e la rotazione  $\phi$ .

36

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

Calcolo dei coefficienti di ripartizione

- Dalle equazioni di equilibrio si ha:

$$\sum r_i = 1 = \sum K_i \delta \Rightarrow \delta = \frac{1}{\sum K_i}$$

$$\sum r_i \cdot y_i = 1 \cdot y_p = \sum K_i \varphi y_i^2 \Rightarrow \varphi = \frac{y_p}{\sum K_i y_i^2}$$

Si ha quindi il valore dei coefficienti di ripartizione:

$$r_i = \frac{K_i}{\sum K_j} + \frac{y_p y_i K_i}{\sum K_j y_j^2}$$

37

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

Calcolo dei coefficienti di ripartizione

- Dalle equazioni di equilibrio si ha:

$$\sum r_i = 1 = \sum K_i \delta \Rightarrow \delta = \frac{1}{\sum K_i}$$

$$\sum r_i \cdot y_i = 1 \cdot y_p = \sum K_i \varphi y_i^2 \Rightarrow \varphi = \frac{y_p}{\sum K_i y_i^2}$$

Si ha quindi il valore dei coefficienti di ripartizione:

$$r_i = \frac{K_i}{\sum K_j} + \frac{y_p y_i K_i}{\sum K_j y_j^2}$$

38

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

Calcolo dei coefficienti di ripartizione

- Nel caso frequente di travi longitudinali tutte eguali fra loro ed egualmente vincolate si ha e l'espressione diviene:

$$r_i = \frac{1}{n} + \frac{y_p y_i}{\sum y_j^2}$$

In questo caso particolare vale inoltre l'eguaglianza:

$$r_{i,j} = r_{j,i}$$

39

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

Calcolo dei coefficienti di ripartizione

- Se nelle espressioni viste si tiene fisso  $y_p$  facendo variare  $y_i$  si ottiene il diagramma dei coefficienti di ripartizione per la posizione fissata del carico;
- Se invece si fissa  $y_i$ , cioè la posizione di una trave, e si fa variare  $y_p$  si ottiene la linea di influenza di  $r_i$ .

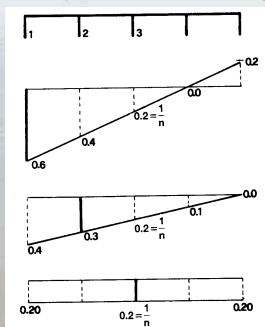
40

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

Esempio

- Valori degli  $r_i$  per un ponte a 5 travi eguali tra loro

Linee di influenza per carico sulle travi 1, 2 e 3



41

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

Influenza reciproca di più traversi

- Nell'ipotesi di traversi con rigidezza flessionale infinita e torsionale nulla, si può verificare che non si ha influenza mutua dei traversi nella ripartizione trasversale del carico;

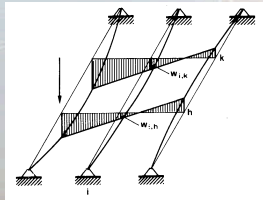
42

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Influenza reciproca di più traversi

- Consideriamo, infatti, un graticcio con due trasversi,  $h$  e  $k$ , e poniamo il carico unitario su un nodo del primo; qualunque sia la trave  $i$  risulterà:

$$w_{i,h} / w_{i,k} = \text{cost}$$



43

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Influenza reciproca di più traversi

- Ne consegue che, poiché le  $w_{i,h}$  sono allineate su una retta che rappresenta la deformata del traverso  $h$ , anche le  $w_{i,k}$  si disporranno automaticamente lungo una retta. Il traverso posto in  $k$  segue quindi la deformata del graticcio senza intervenire, cioè ogni traverso è indipendente dagli altri.

44

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Influenza reciproca di più traversi

- Questo non sarebbe vero se si rimuovesse l'ipotesi di trasversi infinitamente rigidi. La deformata di  $h$  sarebbe, infatti, curvilinea e quindi anche quella di  $k$ . Un traverso posto in  $k$ , dovendo assumere delle curvature diverse da zero, sarebbe sollecitato operando così una redistribuzione degli sforzi nel graticcio

45

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Il metodo degli infiniti trasversi infinitamente rigidi (Metodo di Courbon-Albenga)

- Consiste semplicemente nel supporre la presenza di un traverso sotto una qualunque posizione del carico. Con questa ipotesi un carico distribuito con una legge qualsiasi su una trave si ripartisce tra le altre travi mantenendo inalterata la propria forma ma con una intensità proporzionale al coefficiente di ripartizione

46

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

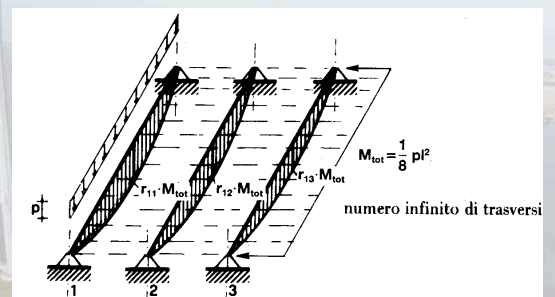
### Il metodo degli infiniti trasversi infinitamente rigidi (Metodo di Courbon-Albenga)

- Sotto ogni carico elementare  $p \, dx$  immaginiamo un traverso che lo ripartisce fra le varie travi secondo i coefficienti di ripartizione. In particolare un carico uniformemente ripartito applicato ad una trave sarà tale anche per le travi non direttamente caricate

47

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Il metodo degli infiniti trasversi infinitamente rigidi (Metodo di Courbon-Albenga)



48



## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

*Il metodo degli infiniti trasversi infinitamente rigidi (Metodo di Courbon-Albenga)*

- L'apparente grossolanità di quest'ipotesi trova giustificazione nel buon accordo con i dati sperimentali. I motivi sono:
  - presenza della soletta che agisce trasversalmente come una serie di traversi accostati, se pur di rigidità limitata
  - esiguità delle correzioni da apportare

49

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

*Il metodo di Engesser*

- In questo caso si rimuove l'ipotesi del numero infinito di trasversi, ferme restando le altre (rigidezze torsionali nulle e rigidità flessionale dei trasversi infinita);
- Il metodo si basa sul principio di sovrapposizione degli effetti, considerando due fasi.

50

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

*Il metodo di Engesser*

- Fase 1
  - Si immaginano dapprima dei sostegni provvisori in corrispondenza dei nodi. In questa fase ciascuna trave si comporta indipendentemente dalle altre come trave continua su appoggi fissi e si calcolano le reazioni degli appoggi;

51

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

*Il metodo di Engesser*

- Fase 2
  - Si tolgono i sostegni e si applicano le reazioni prima trovate cambiate di segno. Poiché ora le forze esterne agiscono in corrispondenza dei trasversi, esse verranno ripartite tra le varie travi secondo i coefficienti di ripartizione visti.

*Lo stato di sollecitazione effettivo nel graticcio sarà la somma di quelli trovati nelle fasi 1 e 2.*

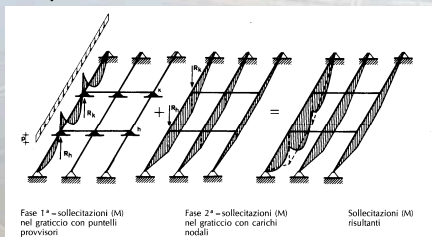
52

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

*Esempio*

- Diagrammi dei momenti flettenti nelle travi per lo stesso caso visto in precedenza qualora si abbiano due soli trasversi

Essi hanno una forma diversa a secondo che si consideri la trave direttamente caricata o le altre



53

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

*Osservazione*

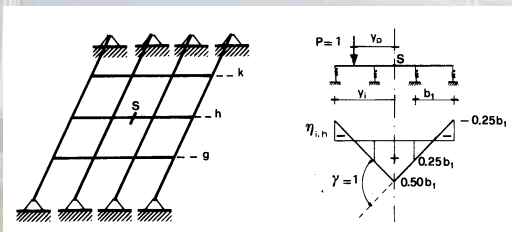
- Comunque già con 3 trasversi intermedi le sollecitazioni di flessione calcolate nella fase 1 sono trascurabili rispetto a quelle calcolate nella fase 2, cosicché è lecito tornare all'ipotesi di infiniti trasversi (Courbon - Albenga)

54

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Esempio

- Si determina la superficie di influenza di  $M_S$



55

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Esempio

- Si supponga dapprima che il carico si muova sul traverso  $h$  contenente  $S$ . Per una generica posizione del carico unitario si calcolano i coefficienti di ripartizione e quindi il momento in  $S$  del tipo:

$$M_S = \sum r_i \cdot y_i - 1 \cdot y_p$$

- I valori numerici si ricavano facilmente e nel caso di quattro travi sono quelli riportati in figura.
- Si noti la rettilinearità dei tratti costituenti il diagramma: ciò era prevedibile pensando di applicare il teorema di Colonnetti al traverso infinitamente rigido.

56

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Esempio

- Se invece il carico si muove sulla generica trave  $i$  si può procedere come visto nel metodo di Engesser, immaginando dapprima i nodi impediti di spostarsi verticalmente. Nascerà allora nel generico nodo  $h$  della trave  $i$  una reazione verticale  $R_{i,h}$  che dipende dalla posizione del carico sulla trave  $i$ . In questa fase non nascono sollecitazioni in  $S$ .
- Tolti i vincoli provvisori, cioè applicate le  $R_{i,h}$  cambiate di segno, in  $S$  nascerà un momento pari a:

$$M_S = \eta_{i,h} \cdot R_{i,h}$$

$\eta_{i,h}$  è il valore della linea di influenza del momento in  $S$  per  $P = 1$  agente sul nodo  $h$  della trave  $i$

57

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

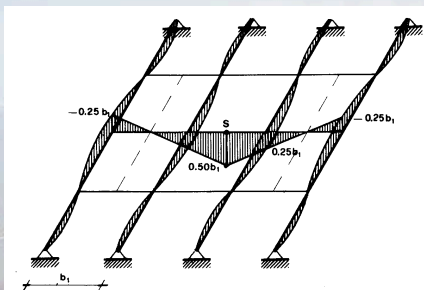
### Esempio

- Basterà quindi definire l'andamento di  $R_{i,h}$  per diverse posizioni del carico, cioè costruire la linea di influenza della reazione di una trave continua su appoggi fissi, e poi moltiplicarne tutte le ordinate per la costante  $\eta_{i,h}$  (che vale  $-0,25 b_1$  nell'esempio in figura)

58

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Esempio



Andamento qualitativo della superficie di influenza di  $M_S$ . Si noti che le ordinate sono nulle in corrispondenza degli altri traversi che non si influenzano a vicenda.

59

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

### Metodo di Guyon- Massonnet- Bares

In questo caso si segue la via opposta di quella vista al paragrafo precedente: l'impalcato viene assimilato ad una piastra equivalente, quindi ad una struttura continua anziché discreta.

60

## GLI IMPALCATI A GRATICCIO

*Metodo di Guyon- Massonnet- Bares*

- Questo metodo fu proposto da Guyon nel 1946 per un grigliato di travi prive di rigidità torsionale, ripreso da Massonnet nel 1950 per tener conto della torsione, ed infine esteso da Bares;
- **Questo metodo tabellare è oggi caduto totalmente in disuso anche nella fase di predimensionamento;**