

CALCOLO SOLAI CON D.M. 2008



ING. RICCARDO MARIOTTI

**56012 – CALCINAIA (PI), loc. FORNACETTE, via TOSCO ROMAGNOLA, 65
TEL. 0587-420108**

I solai hanno la funzione di portare i carichi verticali e tramite travi e pilastri riportarli in fondazione.

Altra funzione fondamentale dei solai è quella di ridistribuire le azioni orizzontali tra i vari elementi portanti del fabbricato. Il solaio deve quindi essere in grado di trasmettere l'azione sismica alle strutture verticali controventanti (setti o telai) ovvero deve essere sufficientemente rigido nel proprio piano. Per svolgere questa importante funzione il solaio deve essere infinitamente rigido nel proprio piano così da costituire un vincolo allo spostamento relativo orizzontale tra i nodi della struttura da esso collegati.

Con questa ipotesi nel caso di analisi statica l'azione sismica si considera applicata a livello dei solai proporzionalmente alla massa (peso sismico di piano) mentre nel caso più frequente di analisi dinamica si riduce il numero di modi da prendere in considerazione per arrivare a risultati ottimali, riducendo anche il tempo di calcolo.

La rigidezza, supposta infinita, fa sì che, quando un complesso di elementi portanti si sposta in una direzione a seguito delle azioni ad essi trasmesse, tutti gli spostamenti siano tali che gli elementi di maggiore rigidezza debbano sopportare gli sforzi maggiori.

In generale i solai hanno una altezza tale da poter essere considerati "infinitamente rigidi" nel proprio piano. E' quindi importante eseguire il solaio in maniera tale che sia in grado di trasmettere tali azioni alle strutture verticali e che sia impossibilitato a "sfilarsi" dagli appoggi.

Le tipologie dei solai che possono essere schematizzati nel calcolo del fabbricato come infinitamente rigida nel proprio piano sono:

solai a piastra armata in calcestruzzo; questi hanno sicuramente un'elevata rigidezza ma anche un'elevato peso proprio.

Solai alleggeriti con laterizio; è il classico solaio a travetti e pignatte in laterizio con sovrastante soletta in cemento armato di spessore almeno di 4,00cm.

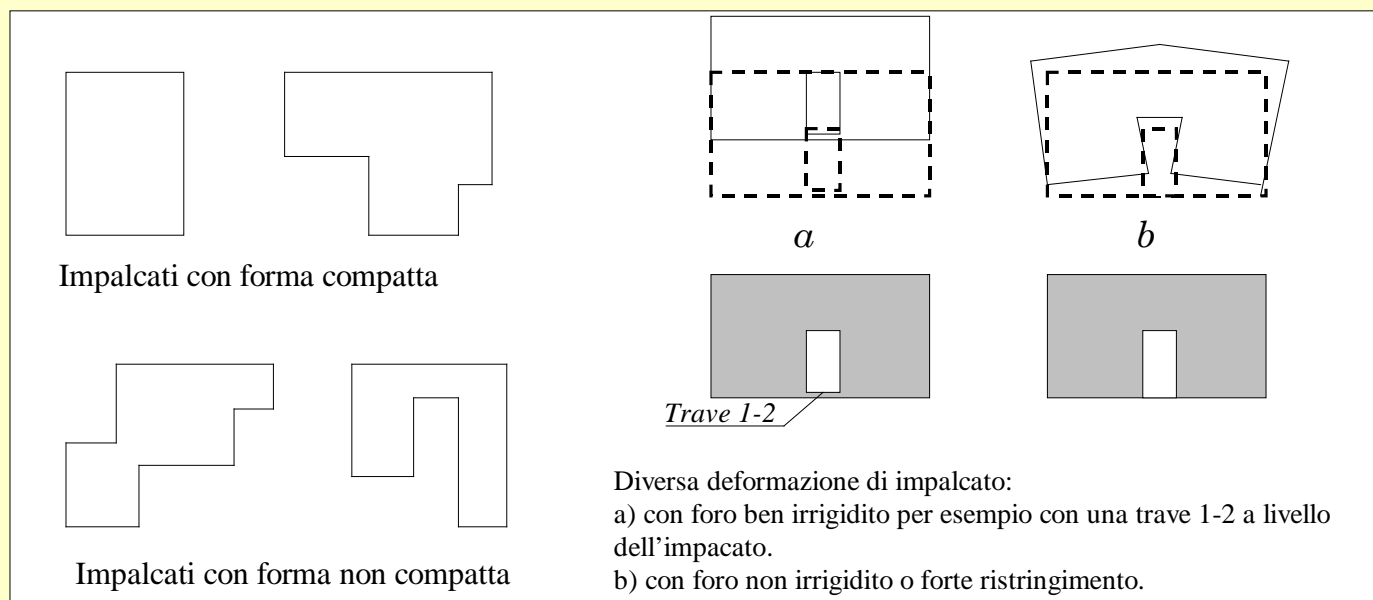
Principali regole costruttive dei solai:

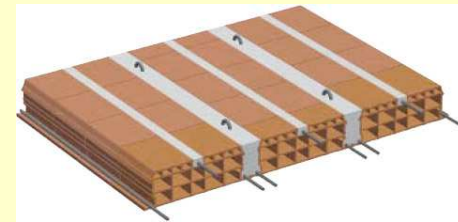
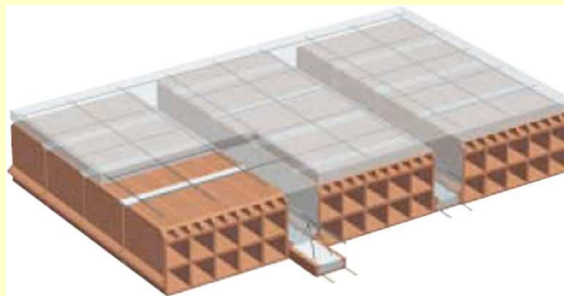
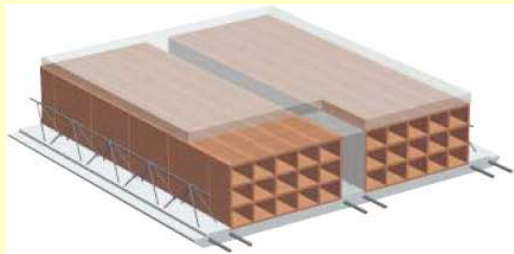
- mantenere l'interasse delle nervature (e quindi la larghezza dei blocchi di laterizio) entro valori inferiori a quelli massimi di normativa;
- completare tutti i solai con una soletta di conglomerato cementizio armato con una rete elettrosaldata almeno $\varnothing 5$ (20x20);
- **se possibile adottare un'altezza di solaio di almeno 1/25 della luce di calcolo per solai ad armatura lenta e 1/30 della luce di calcolo per solai a travetti in cemento armato precompresso, anche se oggi non più imposto dalla normativa;**
- inserire una nervatura trasversale per luci superiori a m 4.50 di dimensioni opportune ed armata con almeno 4 $\varnothing 12$ e staffe $\varnothing 6/25$ cm;
- collegare le armature in corrispondenza degli appoggi esterni (sia inferiori di ammaraggio che superiori per il momento negativo) alle travi perimetrali portanti o ai cordoli nel caso di strutture in muratura.

In fase di progettazione è bene considerare che lo schema del solaio infinitamente rigido nel proprio piano è puramente teorico e che nella realtà il solaio subirà una deformazione nel proprio piano e che quindi la ripartizione dell'azione sismica potrà essere leggermente differente da quella ipotizzata. E' buona norma cercare di avere strutture il più possibili regolari in pianta in modo da ridurre effetti torsionali e da avere comportamenti reali il più aderenti alle ipotesi di calcolo assunte.

Infatti la rigidità dell'impalcato non dipende solo dal tipo di solaio adottato ma anche dalla geometria dell'impalcato stesso.

Sono infatti spesso presenti a livello dei solai dei punti di indebolimento quali i fori per i vani scala o restringimenti dovuti alla conformazione architettonica del fabbricato oppure l'azione sismica è affidata prevalentemente a pochi elementi verticali (setti in cemento armato) molto distanti tra loro per cui il solaio sarà soggetto a sollecitazioni e deformazioni particolarmente gravose





Verifica di deformabilità

Sulle deformazioni la normativa raccomanda che le deformazioni debbano risultare compatibili con le condizioni di esercizio del solaio e degli elementi costruttivi ed impiantistici ad esso collegati.

Per quanto riguarda le limitazioni alla freccia massima la norma dice soltanto che dovrà essere commisurata a specifiche esigenze e potrà essere dedotta da documentazione tecnica di comprovata validità.

Nella valutazione pratica di questo limite di deformazione, al fine di garantire la funzionalità del solaio e degli altri elementi costruttivi (tramezzi, pavimenti, impianti) per tutte le condizioni di impiego previste a cui si richiama la norma, occorre considerare che tutti i materiali sono soggetti a deformazioni in parte reversibili e in parte irreversibili.

Nella tecnologia dei solai, le deformazioni reversibili, (deformazioni elastiche istantanee) (f_e), si manifestano all'atto dell'applicazione di carichi moderati e si annullano scaricando la struttura immediatamente.

Le deformazioni irreversibili (deformazioni plastiche differite o a lungo termine) (f_p), aumentano nel tempo e sono conseguenti a ritiro del calcestruzzo, deformazioni viscosi, rilassamento dell'acciaio nelle strutture precomprese.

La deformazione totale a lungo termine del solaio sarà allora la somma della deformazione istantanea e di quella differita.

$$f_{tot} = f_e + f_p$$

FRECCIA ISTANTANEA

Per calcolare la freccia istantanea occorre conoscere i parametri geometrici e meccanici propri del solaio quali il modulo elastico “E”, il momento d’inerzia della sezione tutta reagente “J”, l’area della sezione reagente, la posizione dell’asse neutro, l’armatura, ecc., i cui valori, solitamente, sono riportati sulle “schede tecniche” fornite dalle aziende produttrici. In un solaio con carico “q” uniformemente ripartito, la freccia elastica istantanea teorica in corrispondenza della sezione di mezzeria soggetta al momento flettente

$$M = q l^2 / \mu$$

dove μ è un coefficiente che dipende dal grado di vincolo è data da:

$$f_e = \beta l^2 M / EJ$$

nella quale:

$$\beta = (48 - \mu) / 384$$

E’ stato verificato sperimentalmente che, ponendo J uguale al momento di inerzia baricentrico della sezione netta laterizio-calcestruzzo (vale a dire al netto dei fori) ed adottando un coefficiente di omogeneizzazione pari a 1,5 per le aree di calcestruzzo precompresso nei solai, si ottiene una soddisfacente corrispondenza fra le frecce misurate e quelle calcolate attribuendo ai solai misti, precompressi e non, il valore del modulo elastico $E = 2,1 \div 2,5 \cdot 10^5$ (kg/cm²).

Ponendo

$$K = (48 / \mu - 1) / (384 \cdot E)$$

la formula della freccia istantanea può essere scritta nella forma:

$$f_e = K l^4 q / J$$

Esprimendo l in metri, il carico q in kg/m e J in cm⁴ così come lo si ritrova tabellato nelle “schede tecniche” (per la striscia di solai larga 1 m), si ottiene la freccia in mm coi valori di “K” riportati in tabella e calcolati per alcuni dei più usuali vincoli μ .

E	K			
2,1x10 ⁵	0,62	0,372	0,301	0,248
2,5x10 ⁵	0,52	0,312	0,253	0,208
μ	8	12	14	16

La freccia istantanea si può anche calcolare con:

$$f_e = (\alpha l^4 q) / (384 E J)$$

assumendo per α i seguenti valori:

vincolo	appoggio	Incastro perfetto	semincastro	Semincastro-appoggio
α	5	1	3	4

FRECCIA DIFFERITA

La freccia differita nel tempo è principalmente dovuta al ritiro del calcestruzzo ed alle deformazioni viscoso conseguenti alle tensioni generate da tutti i carichi agenti sulla struttura dopo il disarmo.

Data la molteplicità dei fattori in gioco, fra i quali rientrano anche la temperatura, la pressione e l'umidità dell'aria, nonché la stagionatura del calcestruzzo all'atto della messa in carico, il calcolo teorico della freccia differita f_p è molto complesso. Tuttavia, ammettendo che il ritiro e la deformazione viscosa seguano una legge di variazione analoga nel tempo, si potrà ritenere che f_p sia proporzionale alla freccia elastica f_e provocata da tutti i carichi costantemente agenti sulla struttura, compreso il peso proprio.

Ad un determinato tempo "t" dall'applicazione dei carichi si avrà allora:

$$f_p = \varphi f_e$$

E' stato verificato sperimentalmente che nei solai precompressi per

$t \rightarrow \infty$ si ha $\varphi_t \rightarrow 1,3 (= \varphi_\infty)$.

Per i solai misti ad armatura ordinaria può ritenersi sempre per t che tende a infinito

$$\varphi_\infty = 1,5 \div 2,0.$$

FRECCIA TOTALE A LUNGO TERMINE

Questa si valuta sommando la freccia istantanea alla freccia differita valutata per tutti i carichi costantemente agenti sul solaio.

La deformazione complessiva f risulta pertanto:

$$f = f_e + f_p = (1 + \varphi) f_e$$

Valori del momento d'inerzia J per solai in travetti tralicciati e pignatte riferiti all'interasse dei travetti

base travetto 12cm

Altezza cm	Interasse travetti cm	Spessore soletta cm	Momento d'inerzia J cm ⁴	Altezza cm	Interasse travetti cm	Spessore soletta cm	Momento d'inerzia J cm ⁴
16	50	4	7353	16	60	4	7808
20	50	4	14159	20	60	4	15083
24	50	4	23976	24	60	4	25600
28	50	4	37255	28	60	4	39802

ESEMPIO VERIFICA DEFORMAZIONE (SLE)

Modulo elastico

Per modulo elastico istantaneo del calcestruzzo va assunto quello secante tra la tensione nulla e $0,40 f_{cm}$, determinato sulla base di apposite prove, da eseguirsi secondo la norma UNI 6556:1976.

In sede di progettazione si può assumere il valore:

$$E_{cm} = 22.000 \cdot [f_{cm}/10]^{0,3} \quad [N/mm^2]$$

Nel caso di calcestruzzo C25/30si ha un valore del modulo elastico istantaneo pari a:

$$f_{cm} = (f_{ck} + 8) = (25+8) = 33 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{cm} = 22.000 \cdot [33/10]^{0,3} = 31460 \text{ N/mm}^2 = 314.600 \text{ Kg/cm}^2$$

Altezza solaio uguale a 20cm maggiore di $1/25$ della luce di calcolo pari a 473cm

$H=20 > 473/25= 18,92$ cm (si ricordi che secondo il precedente Decreto del 01/1996 con questa limitazione geometrica era già soddisfatta la verifica di deformabilità).

$$f = f_e + f_p = (1 + 1,5) f_e$$

Sulla striscia di solaio larga un metro il carico uniformemente distribuito vale: $q = 620$ kg/m

Il carico distribuito su ogni travetto vale: $q = 620 \times 0,60 = 372$ Kg/m

Combinazione quasi permanente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine:	$G1 + G2 + P + \Psi_{21} \cdot Q_{k1} + \Psi_{22} \cdot Q_{k2} + \Psi_{23} \cdot Q_{k3}$	$1,0 \times 400 + 1,0 \times 160 +$ $0,3 \times 200$	620 Kg/m ²
--	--	---	-----------------------

Il momento d'inerzia per un solaio di questo tipo, riferito all'interasse del solaio, vale $J = 15083$ cm⁴

Il valore della freccia istantanea vale assumendo $\mu=12$ e quindi $K = 0,312$

Assumendo come valore del modulo elastico $E = 2,5 \times 10^5$ Kg/cm²

$$f_e = K l^4 q / J = (0,312 \times 4,50^4 \times 372) / 15083 = 3,155 \text{ mm}$$

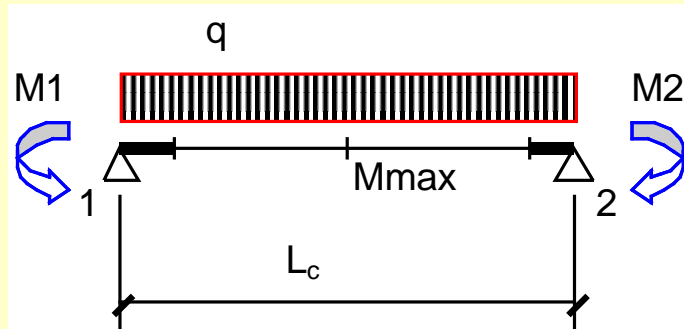
oppure (semincastro)

$$f_e = 3 l^4 q / (384 E J) = (3 \times 4,50^4 \times 372) / (384 \times 2,5 \times 10^5 \times 15083) = 0,316 \text{ cm} = 3,16 \text{ mm}$$

avendo espresso l in metri, il carico q in kg/m e J in cm⁴

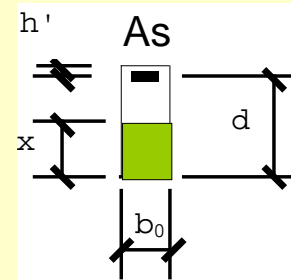
$$f = (1 + 1,5) f_e = (1+1,5) \times 3,155 = 7,888 \text{ mm} = 0,79 \text{ cm}$$

valore accettabile essendo $1/500$ della luce del solaio pari a 0,90 cm.

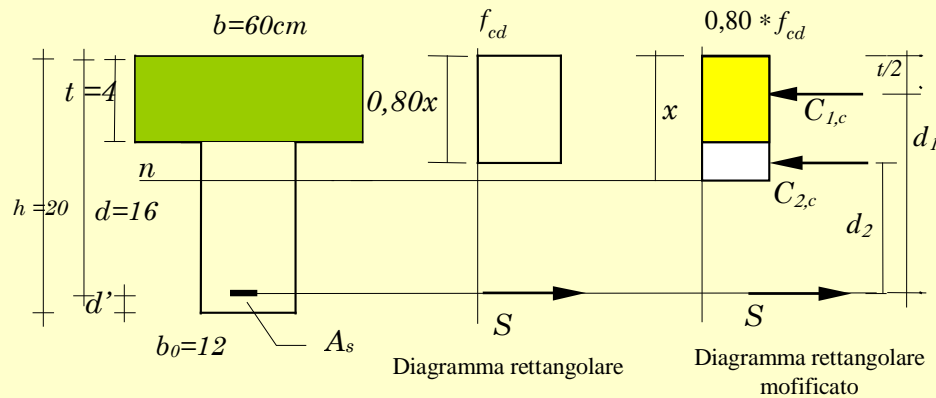


SCHEMA STATICO

VERIFICHE SLU



“APPOGGIO”



MEZZERIA

VERIFICA A TAGLIO (SLU)

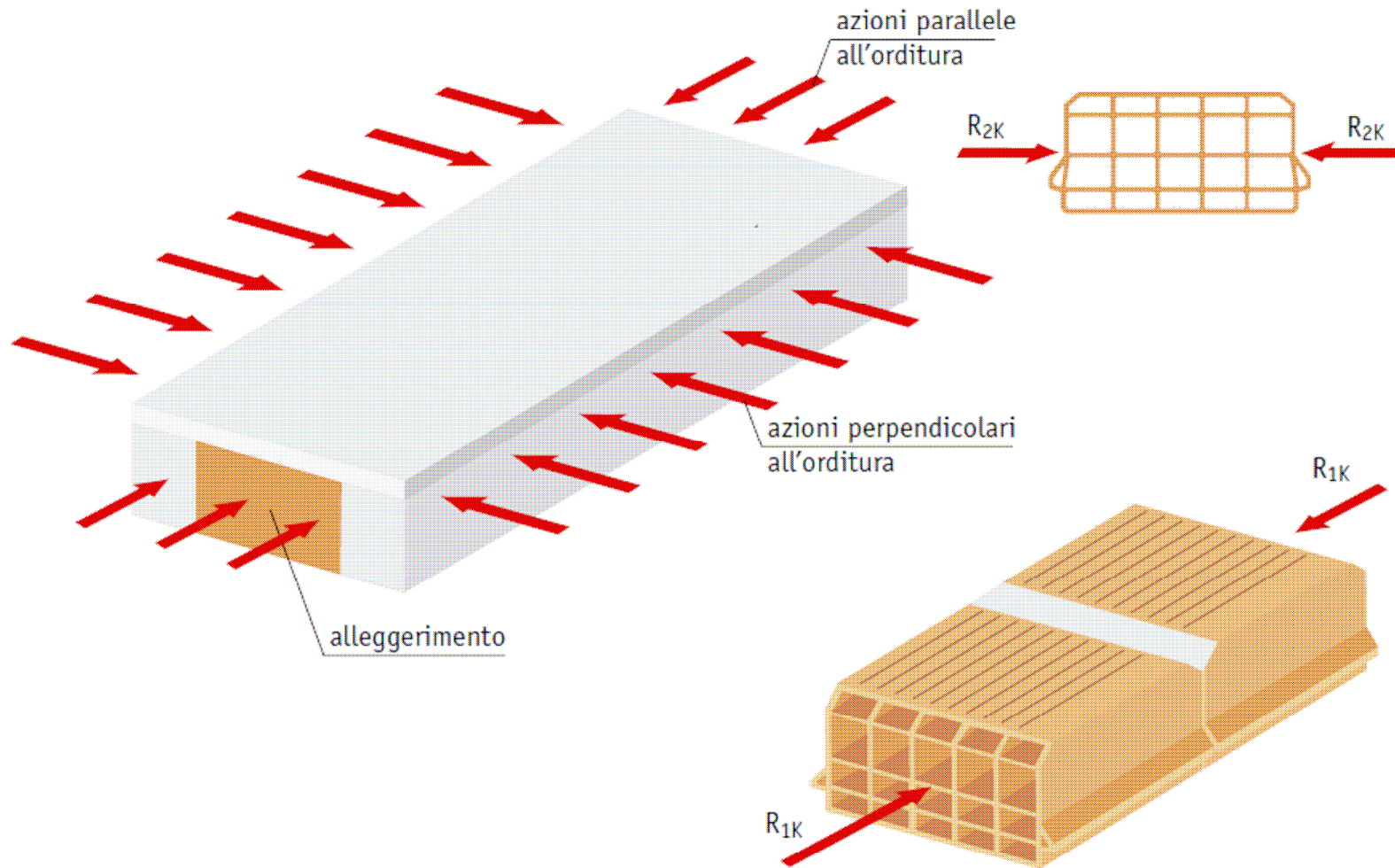
Si calcola il valore di V_{Rd} con la formula

$$V_{Rd} = \{0,18 \cdot K \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} / \gamma_c + 0,15 \cdot \sigma_{cp}\} \cdot b_w \cdot d = (v_{\min} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

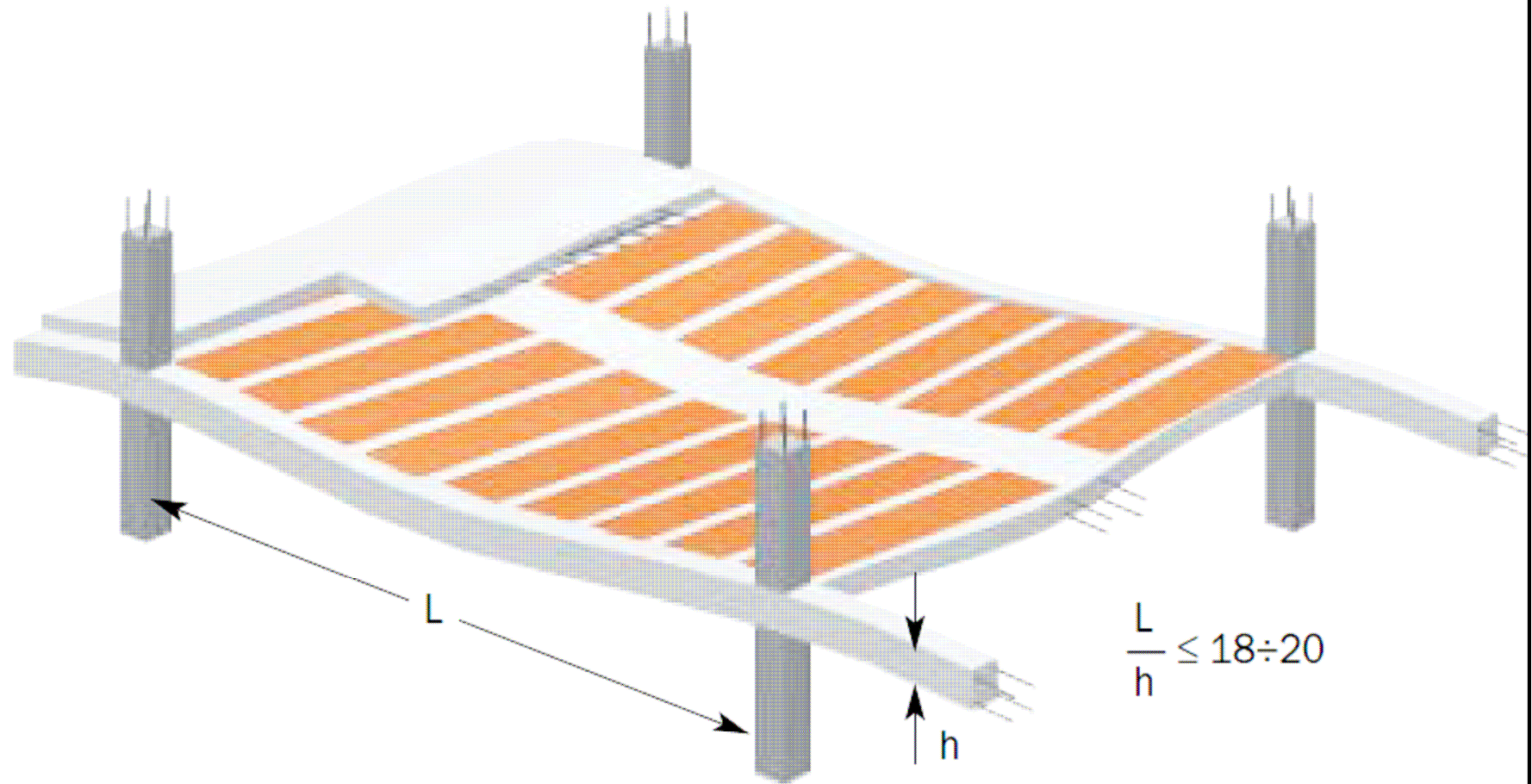
Si deve verificare che: $V_{Rd} > V_{Ed}$

Per esempio con $d=18\text{cm}$ e $b=12\text{cm}$ si ha:

$$K = 1 + (200/d)^{1/2} = 2 = 1 + (200/180)^{1/2} = 2,05 \text{ si prende allora } K=2$$



I componenti del diaframma orizzontale e la struttura derivante dal loro assemblaggio devono garantire adeguata resistenza alle azioni nelle due direzioni nel piano.



Possibile andamento deformativo di un solaio

E' sempre la figura del progettista dell'opera, in definitiva, quella che deve fornire informazioni o "accettare" quelle che vengono proposte dall'azienda fornitrice, come coerenti con le scelte progettuali che solo egli conosce in pieno.

In definitiva, nel caso specifico, se non vi sono indicazioni, si potrebbe, come giustificativo dell'azienda:

- dimensionare il solaio a $1/30$ della luce di calcolo;
- considerare, come vincoli di estremità, dei momenti pari a $1/18 ql^2$ per il calcolo dell'armatura in campata e per il calcolo delle deformazioni;
- considerare, come vincoli di estremità, dei momenti pari a $1/14 ql^2$ per il calcolo delle armature agli appoggi.

Se il progettista accetta tali condizioni, diviene automaticamente responsabile, secondo la legge, al di là di ogni documento fornito dal produttore; in caso contrario, egli deve fornire le indicazioni necessarie (momenti flettenti in campata e agli appoggi, deformazioni massime, ecc.).

ING. RICCARDO MARIOTTI

56012 – CALCINAIA (PI), loc. FORNACETTE, via TOSCO ROMAGNOLA, 65
TEL. 0587-420108