

Lezione

Tecnica delle Costruzioni

Punzonamento

PUNZONAMENTO

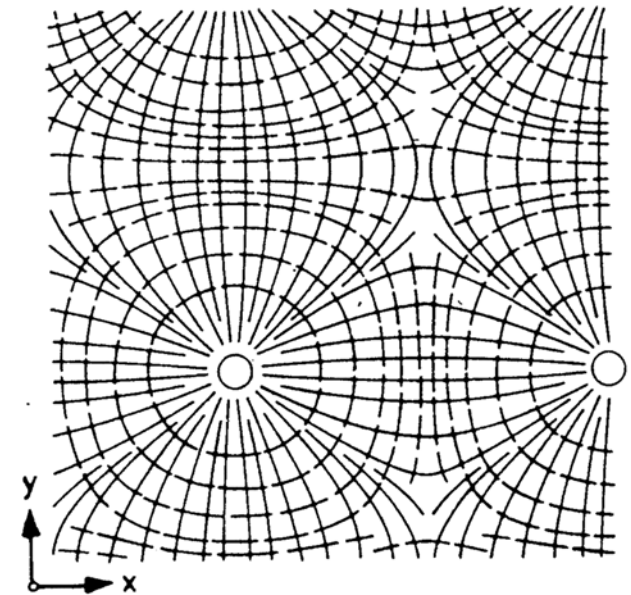
Considerazioni

Il pericolo del punzonamento sussiste nelle piastre con appoggio o carico puntiforme. Ovvero, esso può risultare da un carico concentrato o da una reazione agente su un'area relativamente piccola di una piastra o di una fondazione, genericamente definita “area caricata”.

PUNZONAMENTO

Considerazioni

Con le piastre con appoggio a punti oppure nelle piastre di fondazione per pilastri singoli, nella zona dei pilastri si producono momenti principali che ambedue negativi si sviluppano in cerchi concentrici e radialmente, originando fessurazioni circolari da flessione che a causa della contemporanea presenza di taglio proseguono nella piastra con una leggera inclinazione.

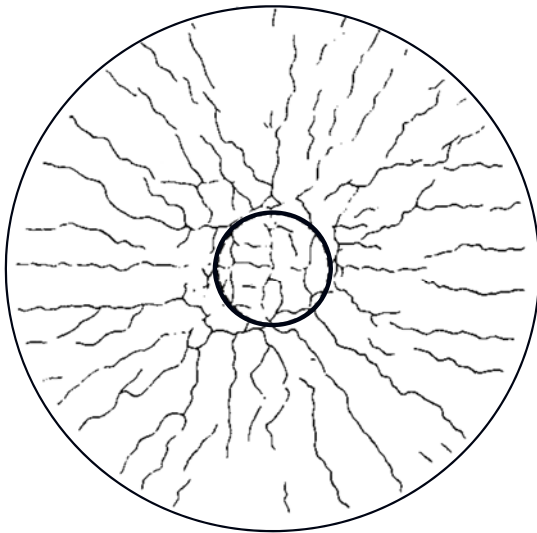


Linee dei momenti principali di un solaio a fungo sottoposto ad un carico uniformemente ripartito

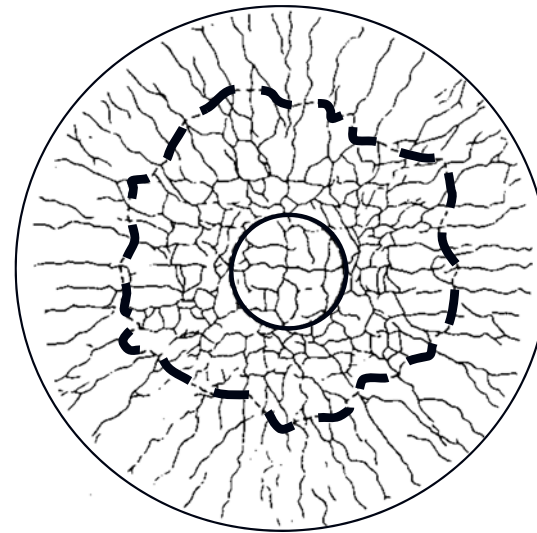
PUNZONAMENTO

Modalità di fessurazione e collasso

Per bassi valori del carico le dilatazioni tangenziali sono maggiori di quelle radiali. Per tal motivo si producono dapprima delle fessurazioni radiali e solo agli stadi superiori di carico alcune poche fessurazioni circolari



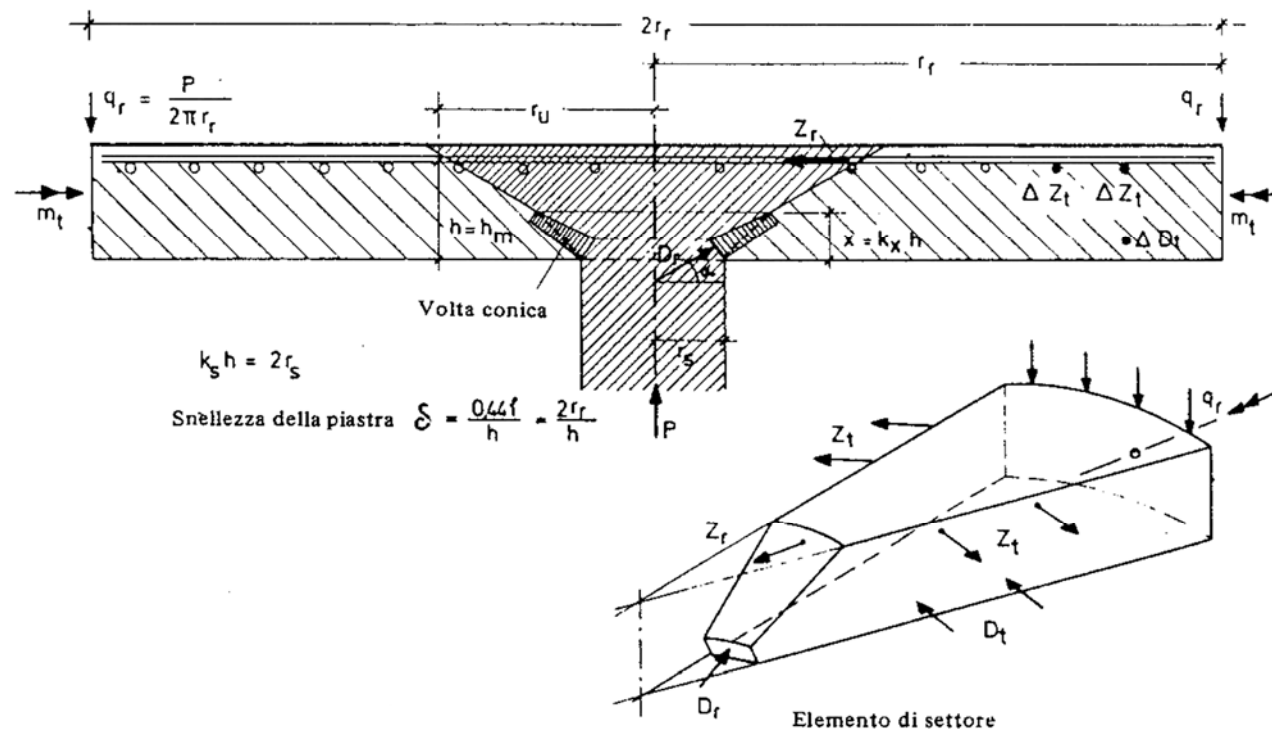
Carico di servizio



Carico di collasso

PUNZONAMENTO

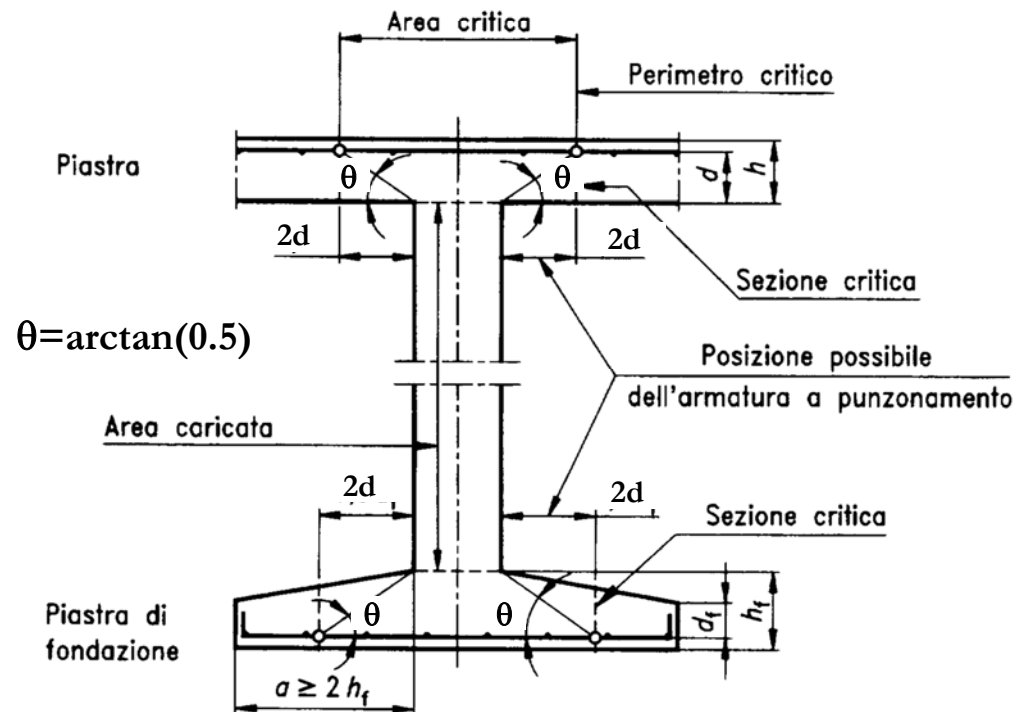
Considerazioni



PUNZONAMENTO

Generalità

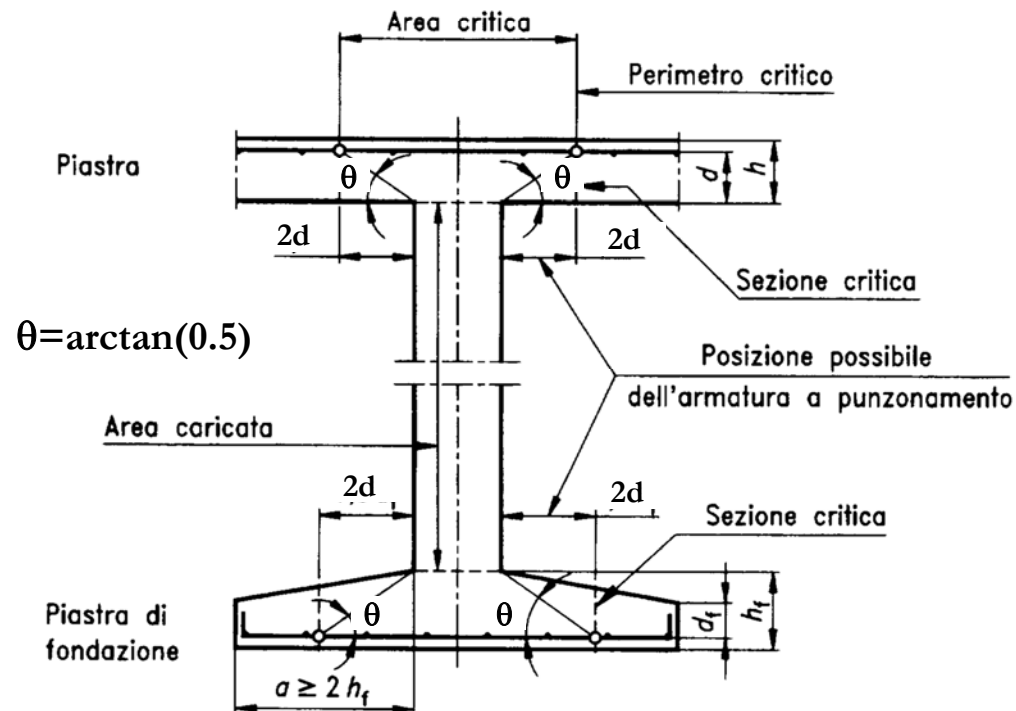
La resistenza a taglio deve essere verificata lungo un perimetro critico definito.



PUNZONAMENTO

Generalità

Nelle piastre di fondazione il taglio agente può essere ridotto per tenere conto della reazione del terreno all'interno del perimetro critico.



PUNZONAMENTO

Metodo di calcolo per la verifica a punzonamento

Il procedimento di calcolo per il taglio-punzonamento si fonda sulle verifiche

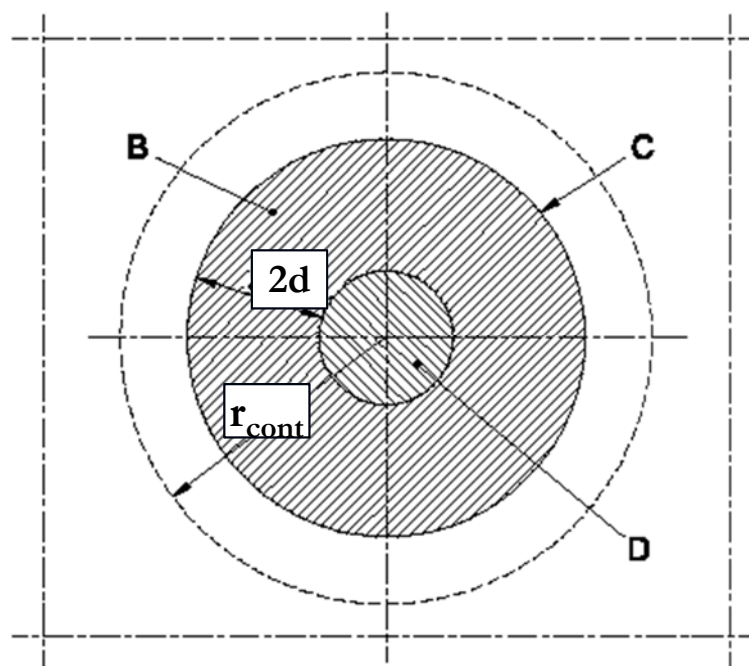
- alla faccia del pilastro
- al perimetro di verifica di base u_1 .

Attenzione:

Se è richiesta l'armatura a taglio, si raccomanda che un ulteriore perimetro di verifica $u_{out,ef}$ sia trovato laddove l'armatura a taglio non è più richiesta.

PUNZONAMENTO

Metodo di calcolo per la verifica a punzonamento

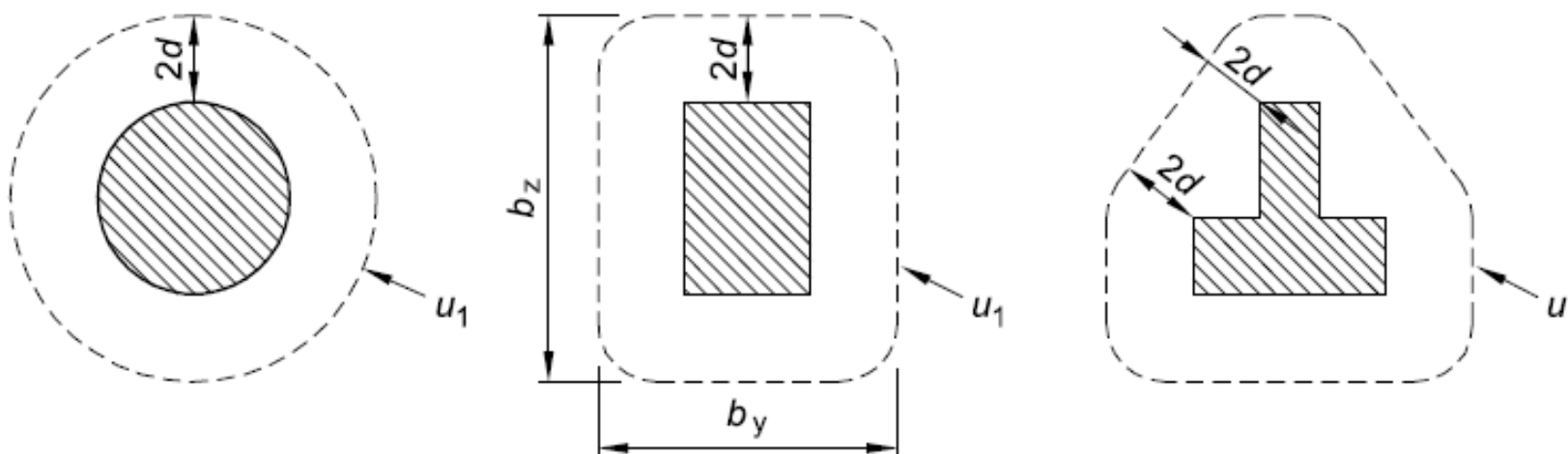


- A Sezione di base per la verifica
- B Area di verifica di base A_{cont}
- C Perimetro di verifica di base, u_1
 $\theta = \arctan (1/2) = 26,6^\circ$
- D Area caricata A_{load}
- r_{cont} Ulteriore perimetro di verifica

PUNZONAMENTO

Distribuzione del carico e perimetro di verifica di base

Il perimetro di verifica di base u_1 può generalmente essere collocato a una distanza $2.0 d$ dall'area caricata e si raccomanda che sia definito come quello di minima lunghezza.



PUNZONAMENTO

Distribuzione del carico e perimetro di verifica di base

L'altezza utile della soletta è supposta costante e può generalmente essere assunta pari a:

$$d_{\text{eff}} = \frac{d_y + d_z}{2}$$

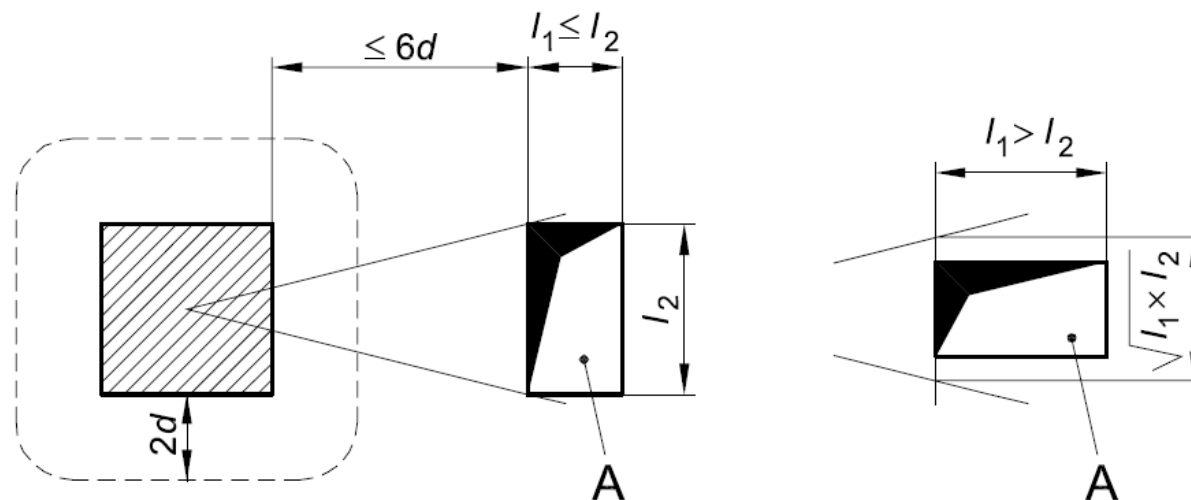
dove

d_y e d_z sono le altezze utili relative alle armature poste nelle due direzioni ortogonali.

PUNZONAMENTO

Distribuzione del carico e perimetro di verifica di base

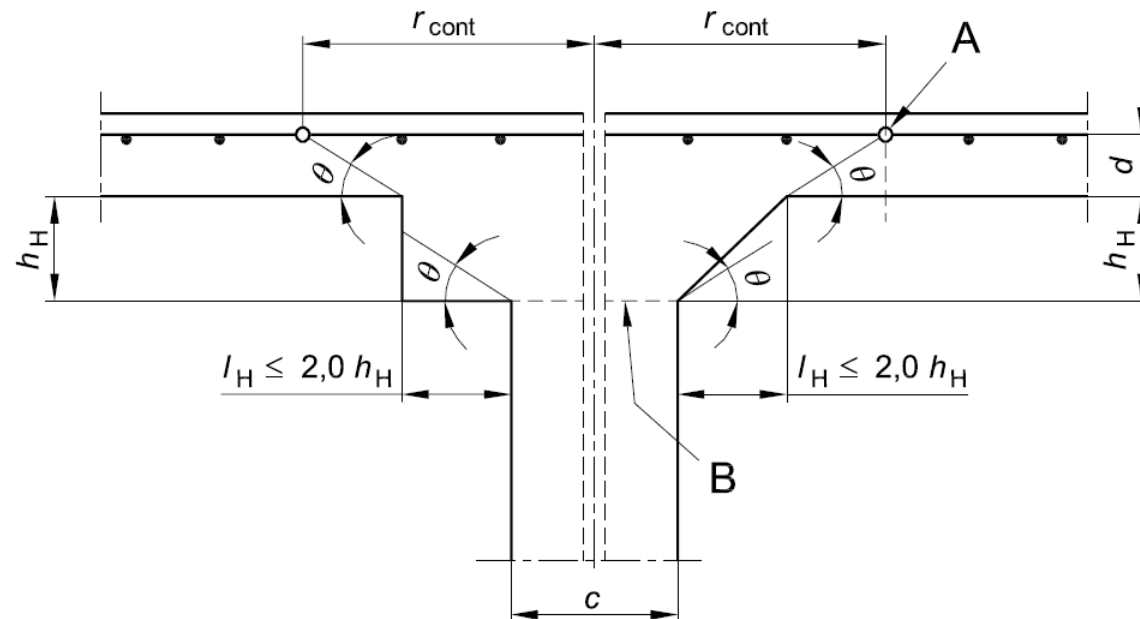
Per aree caricate in prossimità di aperture, se la minor distanza fra il perimetro dell'area caricata e il bordo dell'apertura non supera $6d$, si ritiene inefficace la parte del perimetro di verifica contenuta entro le due tangenti tracciate dal centro dell'area caricata fino al contorno del foro



PUNZONAMENTO

Distribuzione del carico e perimetro di verifica di base

Per piastre con pilastri muniti di capitello circolare
per le quali $l_H < 2.0 h_H$, una verifica delle tensioni di taglio-punzonamento è
richiesta solo sulla sezione di verifica al di là del capitello.



PUNZONAMENTO

Distribuzione del carico e perimetro di verifica di base

La distanza di questa sezione dal centro del pilastro r_{cont} può essere assunta come:

$$r_{\text{cont}} = 2d + l_H + 0.5c$$

dove:

l_H è la distanza della faccia del pilastro dal bordo del capitello;

c è il diametro del pilastro circolare.

PUNZONAMENTO

Distribuzione del carico e perimetro di verifica di base

Nel caso di un pilastro rettangolare con un capitello rettangolare con $l_H < 2.0d$ e le dimensioni complessive l_1 e l_2 ($l_1 = c_1 + 2l_{H1}$, $l_2 = c_2 + 2l_{H2}$, $l_1 \leq l_2$), per il valore r_{cont} può essere assunto il minore fra:

$$r_{\text{cont}} = 2d + 0,56 (l_1 l_2)^{0.5}$$

e

$$r_{\text{cont}} = 2d + 0,69 l_1$$

PUNZONAMENTO

Distribuzione del carico e perimetro di verifica di base

Nel caso di piastre con capitello allargato dove $l_H > 2 h_H$ si raccomanda che siano verificate entrambe le sezioni, quella nel capitello e quella nella piastra.

PUNZONAMENTO

Distribuzione del carico e perimetro di verifica di base

Nel caso di pilastri circolari le distanze dal centro del pilastro alle sezioni di verifica possono essere assunte uguali a:

$$r_{\text{cont,ext}} = l_H + 2d + 0.5c$$

$$r_{\text{cont,int}} = 2(d + h_H) + 0.5c$$

PUNZONAMENTO

Metodo di calcolo per la verifica a punzonamento

Si definiscono le seguenti tensioni di taglio di progetto [MPa] lungo le sezioni di verifica:

$V_{Rd,c}$ è il valore di progetto del taglio-punzonamento resistente di una piastra, priva di armature per il taglio-punzonamento, lungo la sezione di verifica considerata.

$V_{Rd,cs}$ è il valore di progetto del taglio-punzonamento resistente di una piastra dotata di armature per il taglio-punzonamento, lungo la sezione di verifica considerata.

$V_{Rd,max}$ è il valore di progetto del massimo taglio-punzonamento resistente lungo la sezione di verifica considerata.

PUNZONAMENTO

Metodo di calcolo per la verifica a punzonamento

- (a) l'armatura per il taglio-punzonamento non è necessaria se:

$$V_{Ed} < V_{Rd,c}$$

- (b) se v_{Ed} supera il valore $v_{Rd,c}$ per la sezione di verifica considerata, si raccomanda che sia disposta l'armatura per il taglio - punzonamento

- (c) lungo il perimetro del pilastro, o il perimetro dell'area caricata, si raccomanda che la massima tensione di taglio-punzonamento non sia superata:

$$V_{Ed} < V_{Rd,max}$$

PUNZONAMENTO

Metodo di calcolo per la verifica a punzonamento

Se la reazione d'appoggio è eccentrica rispetto al perimetro di verifica, si raccomanda di assumere come tensione massima di taglio il valore:

$$v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_i d}$$

dove:

d altezza utile media della piastra, che può assumersi come $(d_y + d_z)/2$, essendo d_y , d_z le altezze utili nelle direzioni y e z della sezione di verifica;

u_i lunghezza del perimetro di verifica considerato;

PUNZONAMENTO

Metodo di calcolo per la verifica a punzonamento

β è dato da:

$$\beta = 1 + k \frac{M_{Ed}}{V_{Ed}} \frac{u_1}{W_1}$$

dove:

u_1 è la lunghezza del perimetro di verifica di base;

k è un coefficiente che dipende dal rapporto fra le dimensioni del pilastro c_1 e c_2 : il suo valore è funzione delle proporzioni del momento sbilanciato trasmesso da taglio non uniforme e da flessione e torsione

c_1/c_2	≤ 0.5	1.0	2.0	≥ 3.0
k	0.45	0.60	0.70	0.80

PUNZONAMENTO

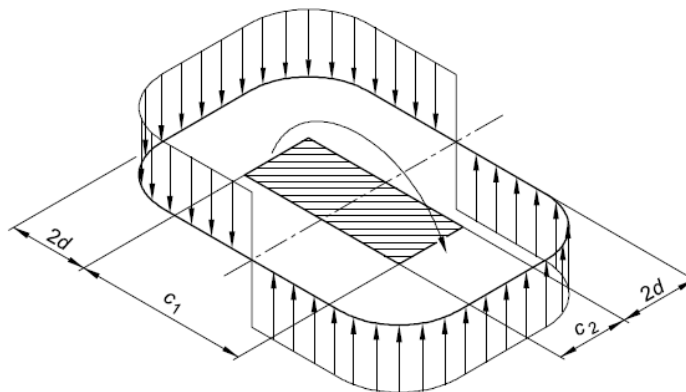
Metodo di calcolo per la verifica a punzonamento

W_1 corrisponde a una distribuzione di taglio ed è funzione del perimetro di verifica di base u_1 :

$$W_1 = \int_0^{u_1} |e| dl$$

dl è la lunghezza infinitesima del perimetro;

e è la distanza di dl dall'asse intorno al quale agisce M_{Ed} .



PUNZONAMENTO

Metodo di calcolo per la verifica a punzonamento

Per un pilastro rettangolare:

$$W_1 = \frac{c_1^2}{2} + c_1 c_2 + 4c_2 d + 16d^2 + 2\pi d c_1$$

dove:

c_1 è la dimensione del pilastro parallela all'eccentricità del carico;

c_2 è la dimensione del pilastro perpendicolare all'eccentricità del carico.

Per un pilastro circolare interno:

$$\beta = 1 + 0.6\pi \frac{e}{D + 4d}$$

dove

D è il diametro del pilastro circolare.

PUNZONAMENTO

Metodo di calcolo per la verifica a punzonamento

Per un pilastro rettangolare interno,

se il carico è eccentrico in entrambe le direzioni :

$$\beta = 1 + 1.8 \sqrt{\left(\frac{e_y}{b_z}\right)^2 + \left(\frac{e_z}{b_y}\right)^2}$$

dove:

e_y, e_z eccentricità M_{Ed}/V_{Ed} secondo gli assi y e z ;

b_y, b_z dimensioni del perimetro di verifica.

PUNZONAMENTO

Metodo di calcolo per la verifica a punzonamento

Nel caso dei pilastri di bordo, se vi sono eccentricità in entrambe le direzioni ortogonali, β può essere determinato con la seguente espressione:

$$\beta = \frac{u_1}{u_*} + k \frac{u_1}{W_1} e_{par}$$

dove:

u_1 è il perimetro di verifica di base;

u_{1*} è il perimetro di verifica di base ridotto;

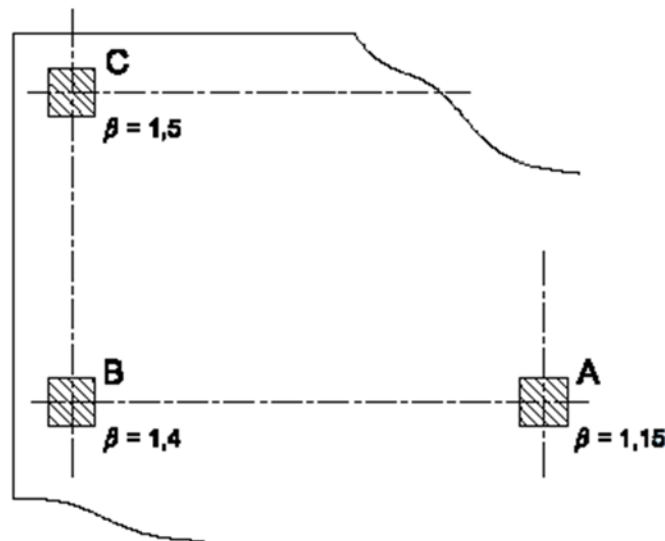
e_{par} è l'eccentricità parallela al bordo della piastra prodotta da un momento rispetto a un asse perpendicolare al bordo della piastra;

PUNZONAMENTO

Metodo di calcolo per la verifica a punzonamento

Per strutture la cui stabilità trasversale non dipende dal funzionamento a telaio del complesso piastra-pilastri, e se le luci adiacenti non differiscono in lunghezza più del 25%, per β si possono adottare valori approssimati.

Nota: Valori di β da adottare in uno Stato possono essere reperiti nella sua appendice nazionale. I valori raccomandati sono dati nella figura.



PUNZONAMENTO

Piastre o fondazioni senza armatura a taglio-punzon.

La resistenza a taglio per unità di lunghezza $v_{Rd,c}$ di piastre non precomprese è data da:

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \geq (v_{min} + k_1 \sigma_{cp})$$

dove:

f_{ck} è in MPa

$k = 1 + (200/d)^{1/2} \leq 2$ (d in mm);

$\rho_l = \sqrt{\rho_{1y} \rho_{1z}} \leq 0.02$; ρ_{1y} e ρ_{1z} si riferiscono all'armatura tesa disposta nelle direzioni y e z .

$\sigma_{cp} = (\sigma_{cy} + \sigma_{cz})/2$ con σ_{cy} e σ_{cz} tensioni normali del cls nella sezione critica nelle direzioni y e z .

PUNZONAMENTO

Piastre o fondazioni senza armatura a taglio-punzon.

La resistenza a taglio per unità di lunghezza v_{Rd1} di piastre non precomprese è data da:

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \geq (v_{min} + k_1 \sigma_{cp})$$

dove:

$C_{Rd,c}$, v_{min} e k_1 sono specificati negli annessi nazionali.

I valori raccomandati sono :

$$C_{Rd,c} = 0.18/\gamma_c$$

$$v_{min} = 0.035 k^{2/3} f_{ck}^{1/2}$$

$$k_1 = 0.1$$

PUNZONAMENTO

Piastre o fondazioni senza armatura a taglio-punzon.

Nel caso di carico coassiale la forza netta applicata è

$$V_{\text{Ed,red}} = V_{\text{Ed}} - \Delta V_{\text{Ed}}$$

dove:

V_{Ed} è la forza tagliante applicata;

ΔV_{Ed} è la forza netta rivolta verso l'alto all'interno del perimetro di verifica considerato, cioè la pressione verso l'alto trasmessa dal suolo meno il peso proprio della fondazione.

$$v_{\text{Ed}} = V_{\text{Ed,red}}/ud$$

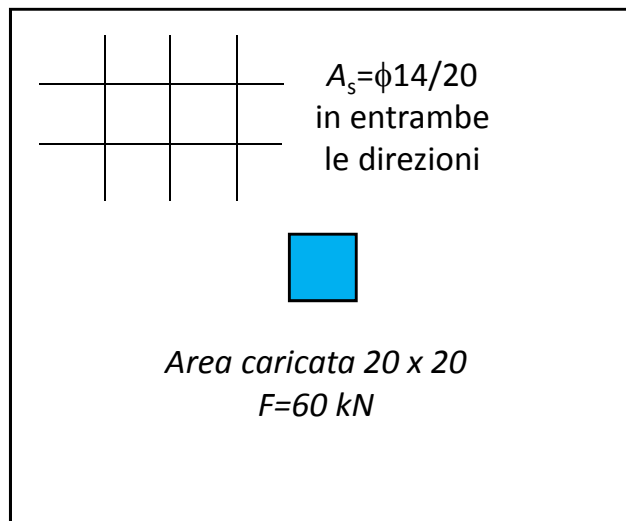
Per carico eccentrico

$$v_{\text{Ed}} = \frac{V_{\text{Ed,red}}}{ud} \left[1 + k \frac{M_{\text{Ed}} u}{V_{\text{Ed,red}} W} \right]$$

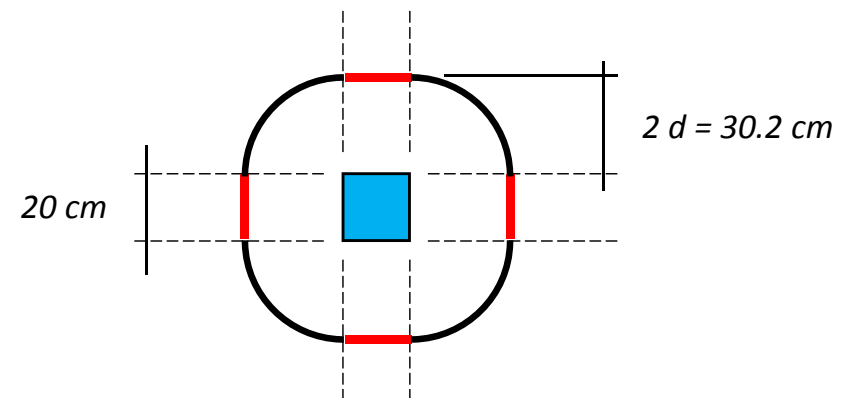
Esempio n. 3

3° stadio di comportamento

Pianta del solaio

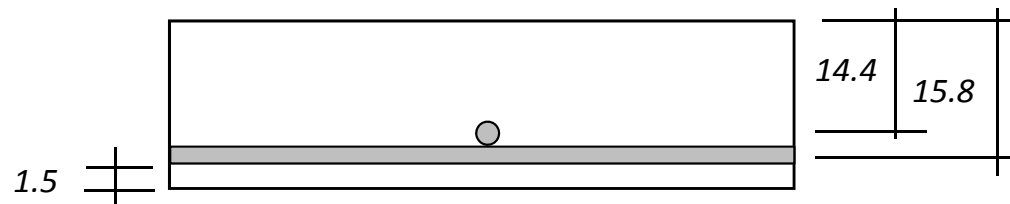


Perimetro della sezione di verifica di base



$$u_1 = 4 \cdot 20 + 4 \cdot 3.14 \cdot 15.1 = 269.8 \text{ cm}$$

Sezione trasversale del solaio

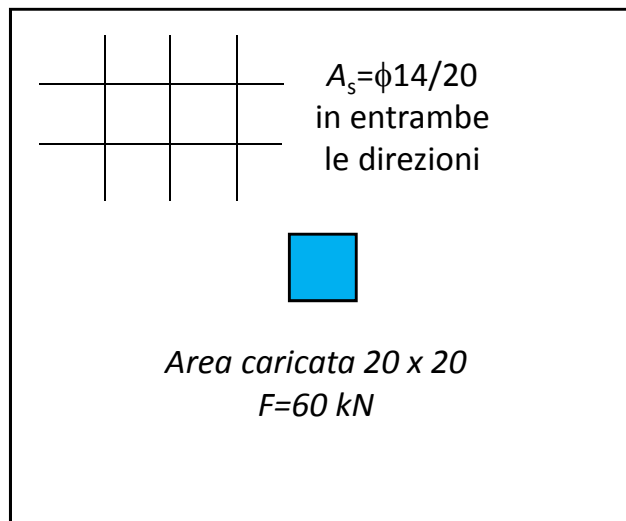


$$\begin{aligned} v_{\text{Ed}} &= V_{\text{Ed}} / (u_1 d) \\ &= \frac{60 \cdot 10^3}{269.8 \cdot 15.1 \cdot 10^2} \cong 0.147 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Esempio n. 3

3° stadio di comportamento

Pianta del solaio



$$\left. \begin{aligned} \rho_x &= \frac{1.54}{20 \cdot 15.1} = 0.0051 \\ \rho_y &= \frac{1.54}{20 \cdot 15.1} = 0.0051 \end{aligned} \right\} \rho_{\text{eff}} = \sqrt{\rho_x \rho_y} = 0.0051$$

$$k = \min \left(1 + \sqrt{\frac{200}{151}}; 2.0 \right) = 2.0$$

$$v_{\text{Rd,c}} = C_{\text{Rd,c}} k (100 \rho_l f_{\text{ck}})^{1/3} \geq v_{\text{min}}$$

$$v_{\text{Rd,c}} = \frac{0.18}{1.5} 2 (100 \cdot 0.0051 \cdot 25)^{1/3} = 0.561 \text{ MPa}$$

$$v_{\text{min}} = \geq 0.035 \sqrt{2.0^3 \cdot 25} = 0.495 \text{ MPa}$$

Poiché $v_{\text{Rd,c}}$ è maggiore di v_{Ed} ,
la sezione è verificata

PUNZONAMENTO

Piastre o fondazioni con armatura a taglio-punzonamento (6.4.5)

Dove è richiesta l'armatura a taglio, si raccomanda che questa sia calcolata in conformità all'espressione:

$$v_{Rd,cs} = 0.75v_{Rd,c} + 1.5(d/s_r)A_{sw}f_{ywd,ef} \left[1/(u_1d) \right] \sin\alpha$$

dove:

A_{sw} è l'area di armatura a taglio a punzonamento situata su di un perimetro intorno al pilastro [millimetri quadrati];

s_r è il passo radiale dei perimetri dell'armatura a taglio di punzonamento (mm);

$f_{ywd,ef}$ è la resistenza di progetto efficace dell'armatura a taglio-punzonamento, secondo la relazione $f_{ywd,ef} = 250 + 0,25 d \leq f_{ywd}$

d è la media delle altezze utili nelle due direzioni ortogonali (mm);

α è l'angolo compreso fra l'armatura a taglio e il piano della piastra.

Se è disposta una sola fila di barre piegate verso il basso, allora al rapporto d/s_r può essere assegnato il valore 0,67.

PUNZONAMENTO

Piastre o fondazioni con armatura a taglio-punzonamento

L'armatura trasversale, disposta in posizione tale da attraversare la potenziale superficie di rottura, ha lo scopo di bilanciare le forze di trazione nel calcestruzzo.

Se l'armatura è correttamente dimensionata e stesa fino a opportuna distanza dalla zona caricata, la superficie di rottura diviene pressoché cilindrica con raggio ridotto ed in generale coincidente con quello dell'impronta del supporto.

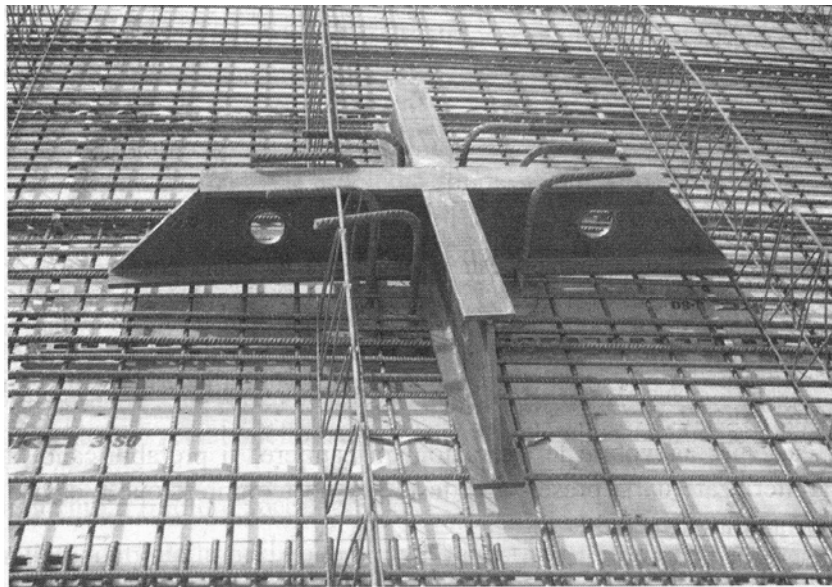
L'armatura trasversale può essere costituita :

- da staffe,
- da ferri piegati,
- da elementi in carpenteria metallica composti con un piatto a cui saldati chiodi Nelson.

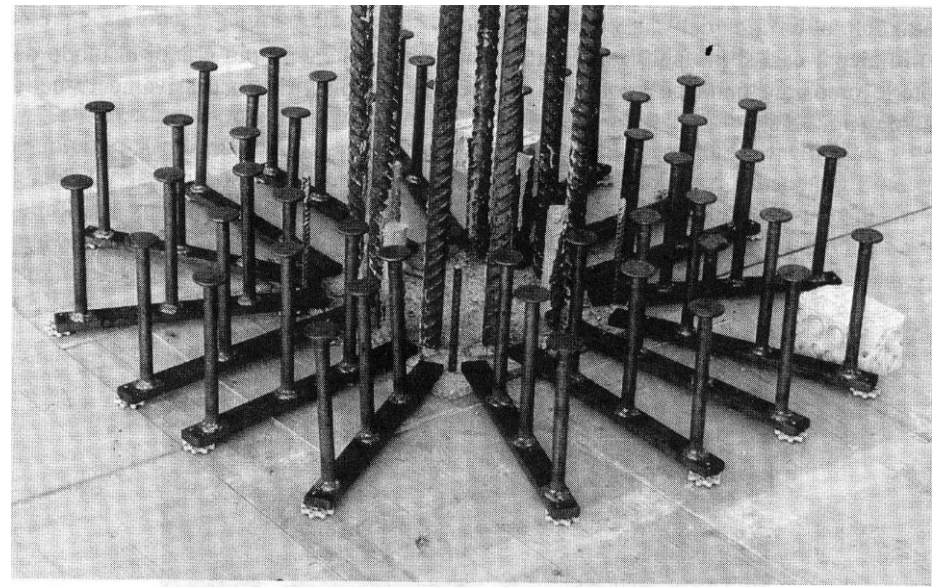
PUNZONAMENTO

Piastre o fondazioni con armatura a taglio-punzonamento

profilati in acciaio



elementi in carpenteria metallica
composti da un piatto a cui sono
saldati chiodi Nelson.



PUNZONAMENTO

Piastre o fondazioni con armatura a taglio-punzonamento (6.4.5)

Verifica in corrispondenza del pilastro

In adiacenza ai pilastri la resistenza a taglio-punzonamento è limitata a un valore massimo di:

$$v_{Ed} = \frac{\beta v_{Ed}}{u_0 d} \leq v_{Rd,max}$$

dove:

u_0	per un pilastro interno	$u_0 = \text{perimetro del pilastro [mm]},$
	per un pilastro di bordo	$u_0 = c_2 + 3d \leq c_2 + 2c_1 \text{ [mm]},$
	per un pilastro d'angolo	$u_0 = 3d \leq c_1 + c_2 \text{ [millimetri]};$

Il valore di $v_{Rd,max}$ da adottare in uno Stato può essere reperito nella sua appendice nazionale. Il valore raccomandato è $0.5 v_{f_{cd}}$

PUNZONAMENTO

Piastre o fondazioni con armatura a taglio-punzonamento (6.4.5)

Verifica nella sezione oltre l'armatura a taglio

Si raccomanda che il perimetro di verifica lungo il quale l'armatura a taglio non è richiesta, u_{out} (o $u_{\text{out,ef}}$) sia calcolato con l'espressione:

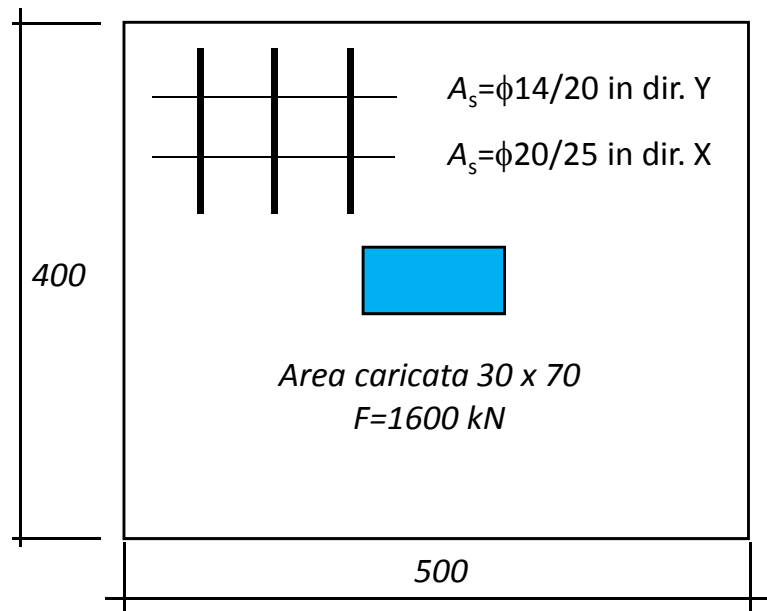
$$u_{\text{out,ef}} = \beta V_{\text{Ed}} / (v_{\text{Rd,c}} d)$$

Nota: Si raccomanda che il perimetro più lontano delle armature a taglio si collochi a una distanza non maggiore di kd all'interno di u_{out} (o $u_{\text{out,ef}}$). Valore raccomandato per $k=1.5$.

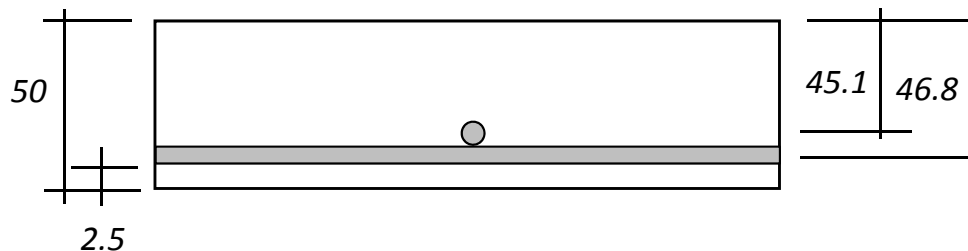
Esempio n. 4

3° stadio di comportamento

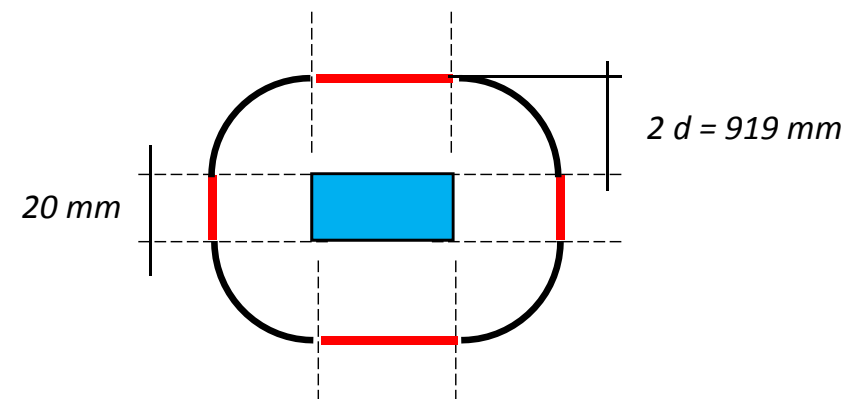
Pianta della platea



Sezione trasversale della platea



Perimetro della sezione di verifica di base



$$u_1 = 2 \cdot 30 + 2 \cdot 70 + 2 \cdot 3.14 \cdot 91.9 = 776.8 \text{ cm}$$

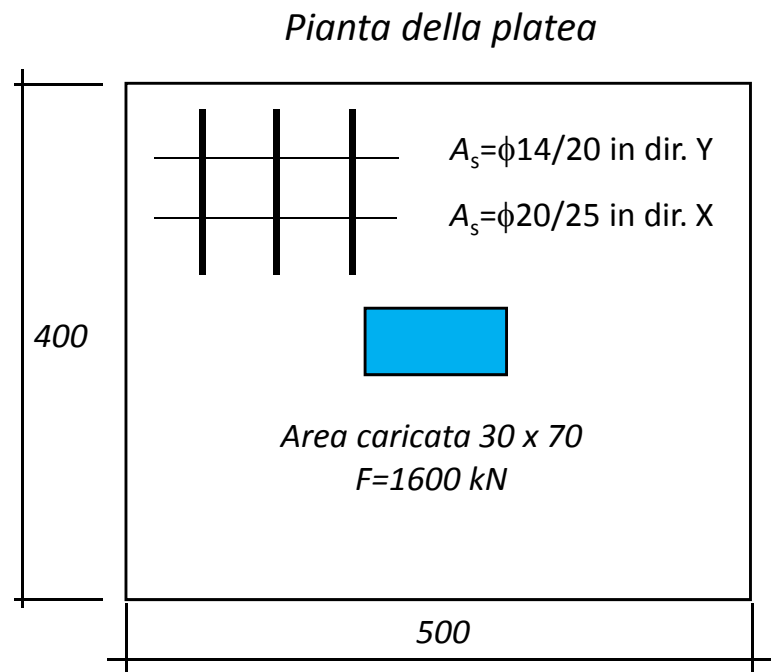
$$A_1 = 30 \cdot 70 + 2 \cdot 30 \cdot 91.9 + 2 \cdot 70 \cdot 91.9 + 3.14 \cdot 91.9^2 = 42345 \text{ cm}^2$$

$$v_{Ed} = \beta (V_{Ed} - \sigma A_1) / (u_1 d)$$

$$= \frac{1.15 (1600 - 0.080 \cdot 10^{-3} \cdot 42345 \cdot 10^2) \cdot 10^3}{776.8 \cdot 45.9 \cdot 10^2} = 0.407 \text{ MPa}$$

Esempio n. 4

3° stadio di comportamento



$$\left. \begin{aligned} \rho_x &= \frac{3.14}{25 \cdot 45.9} = 0.00274 \\ \rho_y &= \frac{1.54}{20 \cdot 45.9} = 0.00168 \end{aligned} \right\} \rho_{\text{eff}} = \sqrt{\rho_x \rho_y} = 0.00214$$

$$k = \min \left(1 + \sqrt{\frac{200}{459}}; 2.0 \right) = 1.66$$

$$v_{\text{Rd,c}} = C_{\text{Rd,c}} k (100 \rho_l f_{\text{ck}})^{1/3} \geq v_{\text{min}}$$

$$v_{\text{Rd,c}} = \frac{0.18}{1.5} 1.66 (100 \cdot 0.00214 \cdot 25)^{1/3} = 0.349 \text{ MPa}$$

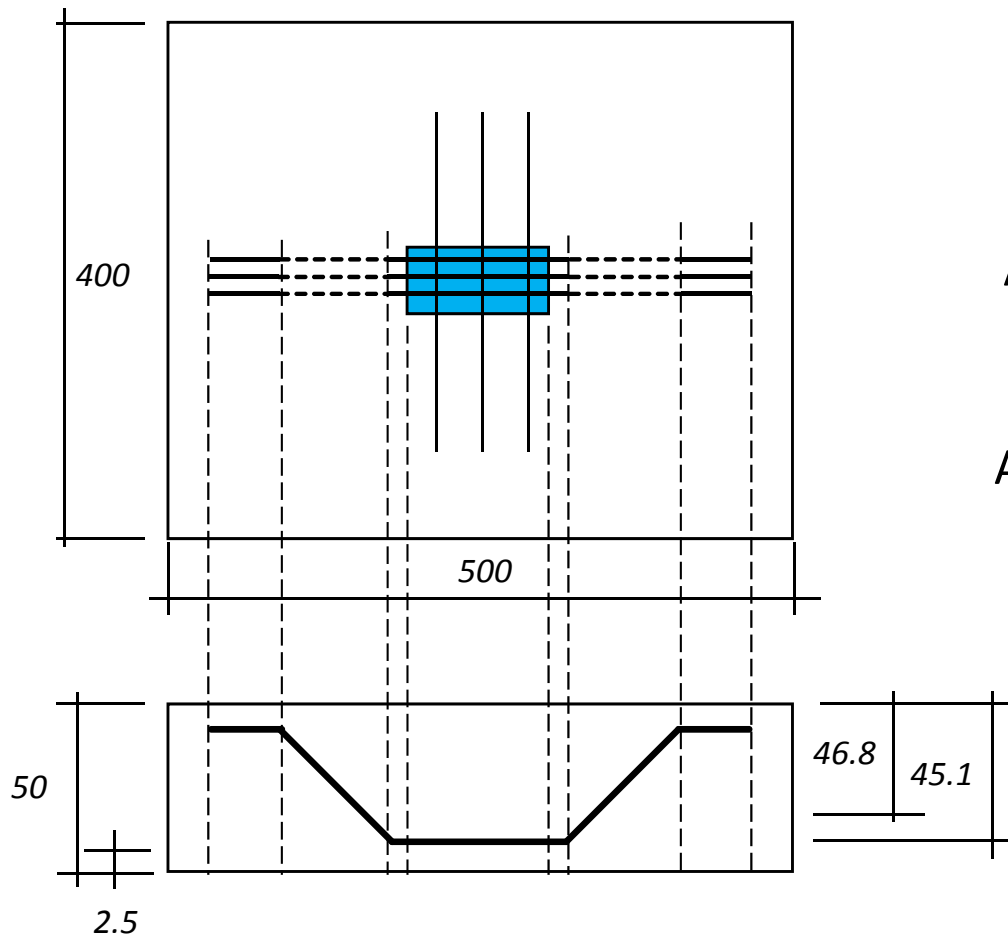
$$v_{\text{min}} = \geq 0.035 \sqrt{1.66^3 \cdot 25} = 0.374 \text{ MPa}$$

Poiché $v_{\text{Rd,c}}$ è minore di v_{Ed} ,
 occorre disporre armatura a
 punzonamento

Esempio n. 4

3° stadio di comportamento

Pianta della platea



$$0.75 v_{Rd,c} + \frac{A_s f_{yd} \sin \alpha}{u_1 d} \geq v_{Ed}$$

$$A_s \geq \frac{(v_{Ed} - 0.75 v_{Rd,c}) u_1 d}{f_{yd} \sin \alpha}$$

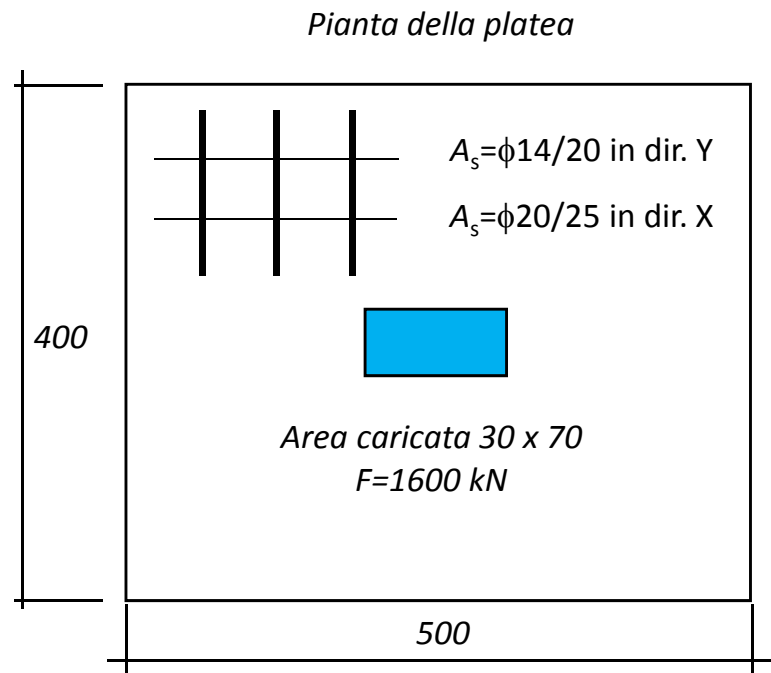
$$A_s \geq \frac{(0.407 - 0.75 \cdot 0.374) 776.8 \cdot 45.9}{391.3 / \sqrt{2}} = 16.2 \text{ cm}^2$$

Bastano 3 barre $\phi 14$ in una direzione
e 3 nell'altra,
sagomate a 45 gradi

$$A_s [6\phi 14] = 2 \cdot (3 \cdot 1.54 + 3 \cdot 1.54) = 18.48 \text{ cm}^2$$

Esempio n. 4

3° stadio di comportamento



Nota: occorrerebbe verificare anche che, laddove si interrompono le armature a punzonamento, $v_{Rd,c}$ sia maggiore di v_{Ed} .

Per far questo si deve considerare il perimetro $u_{out,ef}$.

Occorre verificare che la sezione di calcestruzzo sia adeguata. Per far questo si deve prendere in esame il perimetro di verifica u_0

$$u_0 = 2 \cdot 30 + 2 \cdot 70 = 200 \text{ cm}$$

$$A_0 = 30 \cdot 70 = 2100 \text{ cm}^2$$

$$\begin{aligned} v_{Ed} &= \beta (V_{Ed} - \sigma A_0) / (u_0 d) \\ &= \frac{1.15 (1600 - 0.080 \cdot 2100 \cdot 10^2) \cdot 10^3}{200 \cdot 45.9 \cdot 10^2} = 1.794 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{Rd,max} &= 0.5 v_{f_{cd}} \\ &= 0.5 \cdot 0.5 \cdot 14.12 = 3.54 \text{ MPa} \end{aligned}$$

FINE