# PALI DI FONDAZIONE



SONO PRINCIPALMENTE IMPIEGATI QUANDO IL TERRENO DI FONDAZIONE È SCADENTE IN SUPERFICIE E NON HA CARATTERISTICHE IDONEE PER REALIZZARE UNA FONDAZIONE DIRETTA.

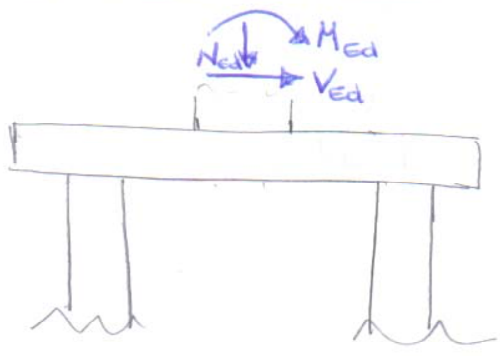
I PALI RESISTONO PER ATTRITO LATERALE E SFORZI NORMALI; LE FORZE ORIZZONTALI POSSONO ESSERE ASSORBITE O DA PALI SINGOLI VERTICALI CHE LAVORANO A FLESSIONE E TAGLIO O DA GRUPPI DI PALI.

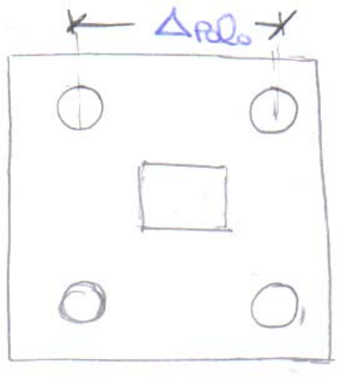
LE DIMENSIONI DEI PALI NASCONO DA CONSIDERAZIONI GEOTECNICHE. VERIFICHE DI RESISTENZA E PROGETTO DELLE ARMATURE SONO LEGATE A PROBLEMATICHE STRUTTURALI.

VERIFICHE DELLA SEZIONE: - PRESSO - FLESSIONE
- TAGLIO

PROGETTO DELLE ARMATURE: - UNIFORMI LUNGO IL PALO (Pali corti)
- VARIATE LUNGO LO SVILUPPO (pali lunghi)

IN PRESENZA DI GRUPPI DI PALI OCCORRE RIDISTRIBUIRE SU CIASCUN PALO LE AZIONI AGENTI ALLA BASE DEL PILASTRO.




SE I PALI SONO DISPOSTI SIMMETRICAMENTE RISPETTO AL PUNTO DI APPLICAZIONE DEI CARICHI: $\longrightarrow$

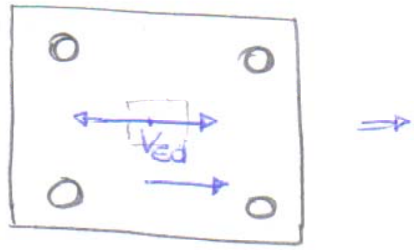
$$V_i = \frac{V_{Ed}}{N_{Pali}}$$

$$N_i = N_i' + N_i''$$

DOVE:
$$\begin{cases} N' = \dfrac{N_{Ed}}{N_{Pali}} \\ N'' = \dfrac{M_{Ed}}{2\Delta_{Palo}} \end{cases}$$
(2 perché in figura ho 2 Pali per Lato)

NEL CASO IN CUI $N_{Ed}$ NON È CENTRATO → NASCE UN'ALIQUOTA DI N PER UNA COPPIA DI TRASPORTO;

ANALOGAMENTE SE IL TAGLIO $V_{Ed}$ NON È CENTRATO → NASCE UNA COPPIA TORCENTE DI TRASPORTO CHE INCREMENTA IL TAGLIO APPLICATO IN TESTA AD ALCUNI PALI.




## VERIFICA A TENSO-PRESSO FLESSIONE

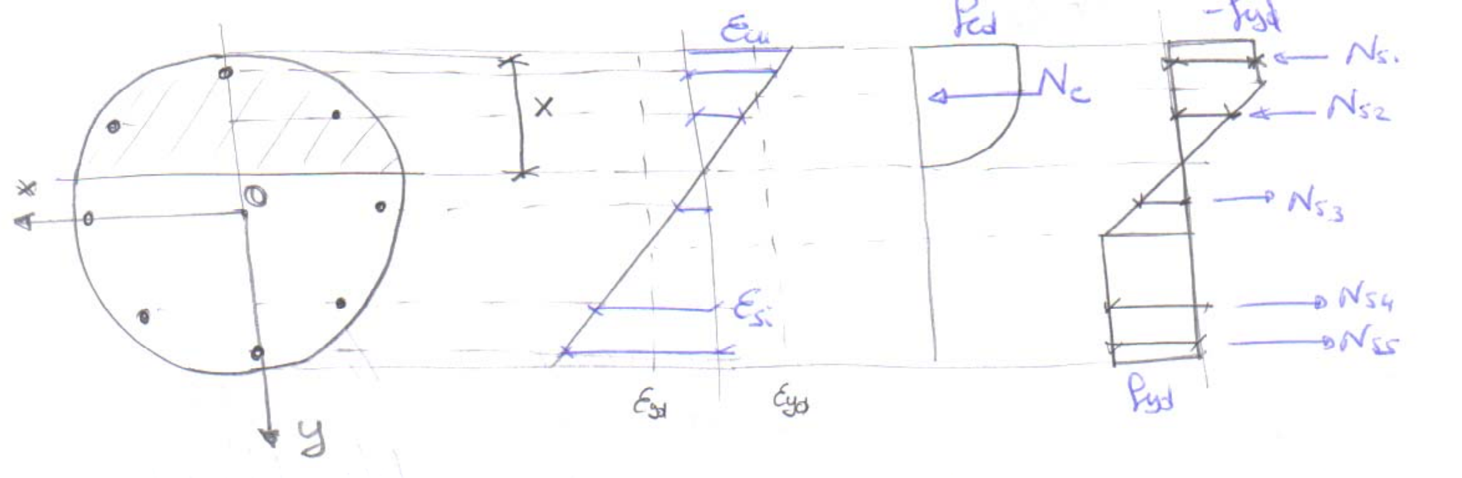
LA CONTEMPORANEA PRESENZA DI $N_{Ed}$, $M_{Ed}$ RICHIEDE UNA VERIFICA. HO DUE POSSIBILITÀ:

1 VERIFICA PER $N_{Ed}$, $M_{Ed}$ ASSEGNATI (meno comoda in fase progettuale)

2 COSTRUZIONE DEI DOMINI M-N

### CENNI SU (1)

OCCORRE DETERMINARE LA POSIZIONE DELL'ASSE NEUTRO PER CUI $N_{TOT} = N_c + \Sigma N_s^i = N_{Ed}$; VALUTARE $M_{Rd}$ PER IL DIAGRAMMA LIMITE SELEZIONATO E CONFRONTARLO CON $M_{Ed}$.

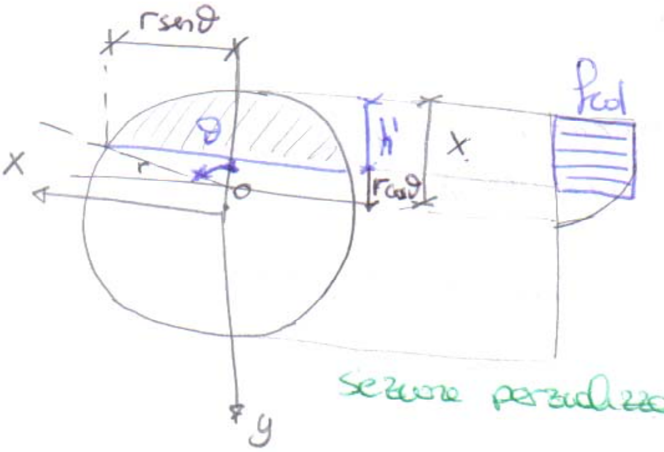



VARIO x FINO A QUANDO
- $N_c + \Sigma N_{si} = N_{Ed}$
- CALCOLO $M_{Rd}$ RISPETTO A O
- VERIFICO $M_{Rd} > M_{Ed}$

IN MODO SEMPLIFICATO PUÒ ESSERE UTILE ASSUMERE LE TENSIONI COSTANTI NEL CLS PER UN TRATTO $h'$ TALE CHE: ②

$h' = 0.8\,X$ PER SEZIONE PARZIALIZZATA

$h' = \left[1 - 0{,}2(1-\eta_{min})^2\right] h$ PER SEZIONE TUTTA REAGENTE

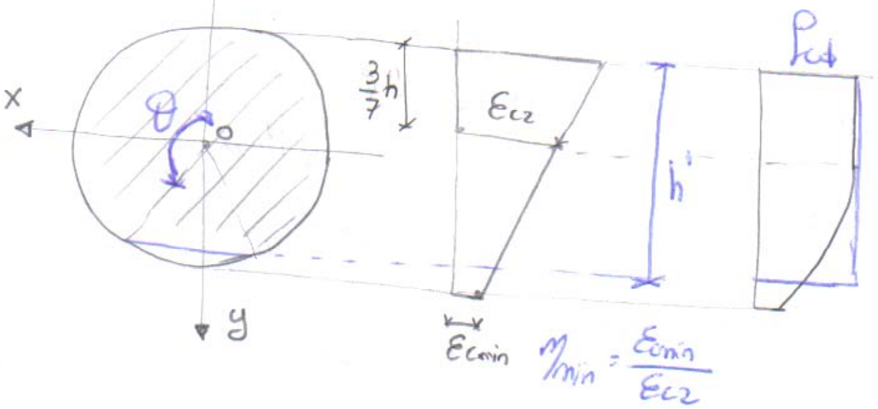



sezione parzializzata

IN QUESTO MODO: $N_c = A_c f_{cd}$

DOVE $A_c = \cancel{\pi} r^2 \cdot \frac{2\vartheta}{2\cancel{\pi}} - r^2 \sin\vartheta\cos\vartheta$

$$A_c = \frac{r^2}{2}\left(2\vartheta - 2\sin\vartheta\cos\vartheta\right) = \frac{r^2}{2}\left(2\vartheta - \sin 2\vartheta\right)$$




sezione interamente reagente

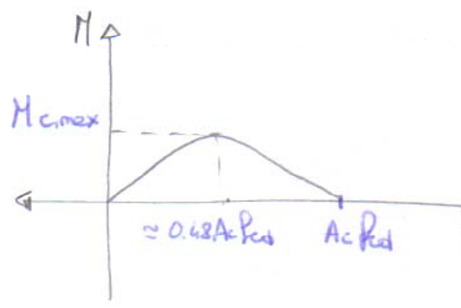
② COSTRUZIONE DEI DOMINI M-N

OCCORRE TRACCIARE DIVERSI DIAGRAMMI DI DEFORMAZIONE LIMITE E PER OGNI DIAGRAMMA CALCOLARE $N_{Rd}, M_{Rd}$ → COSTRUISCO PER PUNTI IL DOMINIO

SONO STATE PROPOSTE RELAZIONI ANALITICHE CHE DESCRIVONO IN MODO APPROSSIMATO L'INTERO DOMINIO

PER SEZIONI CIRCOLARI:

IL DOMINIO RESISTENTE DEL SOLO CLS È APPROSSIMATO DA UNA PARABOLA CON MASSIMO IN:




$N_c \simeq -0{,}4825\, A_c f_{cd}$ (asse neutro a $\simeq 0.6h$)

$M_{cmax} = 0{,}102\, A_c f_{cd}\, h$

L'ARMATURA DISPOSTA NELLA SEZIONE (DISTRIBUITA UNIFORMEMENTE E SECONDO UN ANGOLO CON COPRIFERRO c) FORNISCE IL MASSIMO CONTRIBUTO PER:

$$N \simeq -0.34 A_c f_{cd} \quad \text{(armature non totalmente snervate)}$$

$$M_{s\,max} \simeq 0.304\, A_s\,(h - 2{,}4c)\, f_{yd}$$

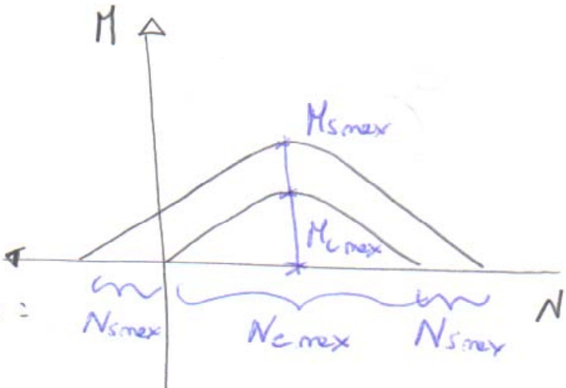
$M_{c\,max}$, $M_{s.max}$ SI VERIFICANO PER $N$ DIFFERENTI $\rightarrow$ IL MASSIMO MOMENTO COMPLESSIVO SI HA PER

$$N = -\nu A_c f_{cd} \Rightarrow \begin{cases} \omega = \dfrac{A_s f_{yd}}{A_c f_{cd}} & \text{\% meccanica di armature} \\ \nu = 0{,}4825\left(1 - \dfrac{\omega}{3}\right) \end{cases}$$

IN OGNI CASO I DUE VALORI DI $N$ SONO VICINI $\rightarrow$ POSSO ASSUMERE:

$$M_{max} = M_{c\,max} + M_{s\,max}$$

IL DOMINIO PUÒ ESSERE APPROSSIMATO MEDIANTE UN'EQUAZIONE CHE È UNA PARABOLA IN ASSENZA DI ARMATURA:




$$M_{Rd} = \left(M_{c\,max} + M_{s.max}\right)\left[1 - \left|\frac{N_{Rd} + \nu N_{c\,max}}{\nu N_{c\,max} + N_{s\,max}}\right|^{m}\right]$$

$$m = 1 + \sqrt[3]{\frac{\nu N_{c\,max}}{\nu N_{c\,max} + N_{s\,max}}}$$

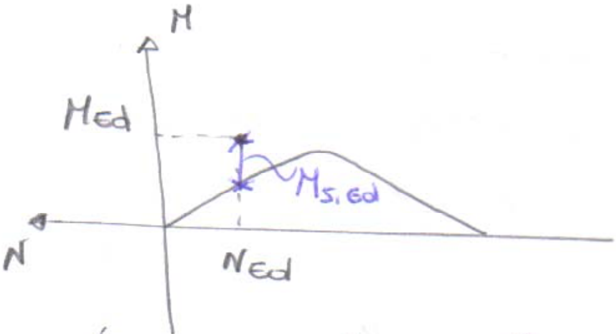
QUINDI LA SEZIONE È VERIFICATA SE:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c\,max} + M_{s\,max}} + \left|\frac{N_{Ed} + \nu N_{c\,max}}{\nu N_{c\,max} + \underbrace{N_{s\,max}}_{\omega N_{c\,max}}}\right|^{m} \leq 1$$

## PROGETTO DELL'ARMATURA A FLESSIONE

POSSO CONSIDERARE IL DOMINIO IN PRESENZA DI ARMATURE COME UNA TRASLAZIONE DEL DOMINIO IN ASSENZA DI ARMATURE

$$M_{s,Ed} = M_{Ed} - \left[ 1 - \left| \frac{N_{Ed} + 0{,}48 N_{cmax}}{0{,}48 N_{cmax}} \right|^2 \right]$$




↓

DISPONGO ARMATURA $A_{s,e} = \dfrac{2 M_{s,Ed}}{Z_{eq} f_{yd}}$ (2 perche dispongo le stesse armature sia in zone tese che compresse)

$Z_{eq}$ E' IL BRACCIO EQUIVALENTE DELLA COPPIA INTERNA IN PRESENZA DI ARMATURE TOTALMENTE SNERVATE:

$$Z_{eq} \simeq 0{,}6 \, (H - 2{,}4c)$$

NOTA BENE: QUESTA RELAZIONE E' ACCURATA SE $0{,}3 N_{cmax} < N_{Ed} < 0{,}7 N_{cmax}$, CAUTELATIVA NEGLI ALTRI CASI.

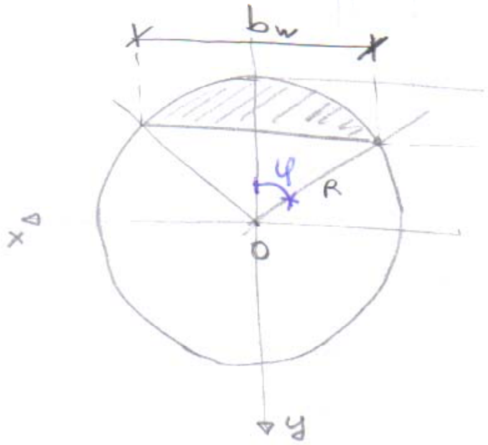
## MINIMI DI ARMATURA

PER SEZIONI CIRCOLARI SI DEVE DISPORRE:

- NUMERO BARRE $\geq 6$
- PASSO BARRE $\leq 30$ cm
- $A_{s\,tot} \geq 0{,}3\% \, A_c$

# VERIFICA A TAGLIO

IL MODELLO A PETTINE USATO NELLE VERIFICHE A TAGLIO, SI BASA SULL'IPOTESI CHE L'ASSE NEUTRO DISTA DAL BORDO COMPRESSO $\simeq 0,2d$ → VALUTO $b_w$ COME LA LARGHEZZA DELLA CORDA IN CORRISPONDENZA DI QUESTA PORZIONE.




x

R - x

$$\frac{b_w}{2} = R \operatorname{sen}\varphi$$

con $\varphi$: $R - x = R\cos\varphi \Rightarrow$

$$\varphi = \arccos\left(1 - \frac{x}{R}\right)$$

POICHÉ $x \simeq 0,2D \rightarrow \varphi = \arccos\left(1 - \frac{0,4R}{R}\right) = \arccos(0,6)$

QUINDI: $b_w = 2R \operatorname{sen} \arccos 0,6 \simeq 0,8\,D$

NON DOBBIAMO DISPORRE ARMATURA APPOSITAMENTE VALUTATA (SOLO MINIMI DI NORMATIVA) SE:

$$V_{Ed} \leq \left[0,18\,k \sqrt[3]{100\,\rho_l\, f_{ck}} \cdot \frac{1}{\gamma_c} + 0,15\,\sigma_c\right] b_w d \qquad \left[\,0.035\sqrt{k^3 f_{ck}} + 0.15\sigma\right.$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \quad d \text{ in mm}$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} \simeq \frac{1}{4}\,\frac{A_{stot}}{b_w d}$$

NEL CASO IN CUI SIA PRESENTE ARMATURA A TAGLIO HO:

SEZIONE CLS: $V_{Ed} \leq V_{Rd\,max} = \alpha_c \underbrace{\nu_1}_{0,5} f_{cd}\, b_w\, z\, \dfrac{\cot\theta + \cot\alpha}{1 + \cot^2\theta}$

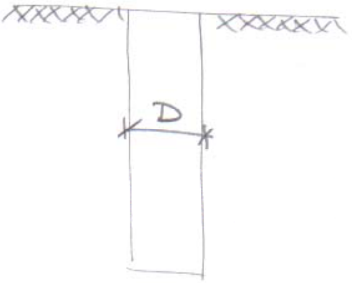
con $z \simeq 0.6d$

$$\alpha_c = \begin{cases} 1 & \text{se } N_{Ed} = 0 \\ 1 + \sigma/f_{cd} & 0.00 < \frac{\sigma}{f_{cd}} < 0.25 \\ 1.25 & 0.25 < \frac{\sigma}{f_{cd}} < 0.50 \\ 2.5\left(1 - \frac{\sigma}{f_{cd}}\right) & 0.5 < \frac{\sigma}{f_{cd}} \leq 1 \end{cases}$$

ARMATURA: $V_{Ed} \leq V_{Rd,s} = \dfrac{A_{sw}}{s}\, z\, f_{yd}\,(\cot\theta + \cot\alpha)\operatorname{sen}\alpha$

ESEMPIO



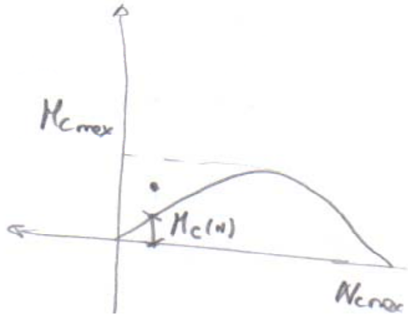



$N_{Ed} = -600 \text{ KN}$ (basso → sezione quasi inflessa!)
$M_{Ed} = 350 \text{ KNm}$
$V_{Ed} = 300 \text{ KN}$

$D = 1m$ ; $c = 0{,}05 m \Rightarrow d = 0{,}95 m$
$C25/30 \rightarrow f_{cd} = 14{,}17 \text{ MPa}$
$B450C \rightarrow f_{yd} = 391{,}3 \text{ MPa}$.

$N_{c,max} = A_c f_{cd} = \frac{\pi D^2}{4} \times 14{,}17 = 11'121 \text{ kN}$

$M_{c,max} = 0{,}102\, A_c f_{cd} D = 1134.3 \text{ kNm}$




$$M_c(N) = M_{cmax}\left[1 - \left|\frac{N_{Ed} + 0.48 N_{cmax}}{0{,}48 N_{cmax}}\right|^2\right]$$

$$= 1134.3\left[1 - \left(\frac{-600 + 0.48 \times 11'121}{0.48 \times 11121}\right)^2\right]$$

$$\cong 241 \text{ KNm}$$

$M_{s,Ed} = 350 - 241 \text{ kNm} = 109 \text{ kNm}$

$$A_{se} = \frac{2 \times M_{s,Ed}}{z_{ep} f_{yd}}$$ con $z_{ep} = 0{,}6(D - 2{,}4c) = 0{,}6(1 - 2{,}4 \times 0{,}05)$
$= 0{,}528 m$

$$\Rightarrow A_{se} = \frac{2 \times 109 \text{ kNm}}{0{,}528 m \times 391{,}3 \frac{N}{mm^2}} = 10{,}55 \text{ cm}^2$$

$A_{s,min} = 0{,}3\%\, A_c = 0{,}3\% \frac{\pi D^2}{4} = 23{,}55 \text{ cm}^2 \Rightarrow$ CONDIZIONANTE

IMPONGO PASSO $P = 25$ cm
POICHE' PERIMETRO $= 2\pi(R - c) = 2\pi(0{,}5 - 0{,}05) = 2{,}826 m$

$\Rightarrow n_b \times passo = Perim \Rightarrow n_b = \frac{2{,}826}{0{,}25} = 11{,}3 \Rightarrow 12$ barre

$$\phi : \quad \frac{\pi\phi^2}{4} = \frac{A_s}{n_b} \Rightarrow \phi \geq \sqrt{\frac{4 A_s}{\pi n_b}} = 15{,}8 \Rightarrow \boxed{12\phi 16}$$

PROGETTO ARMATURE A TAGLIO E VERIFICA:

$$= V_{Rd,c} = 0{,}5\, \alpha_c f_{cd}\, b_w\, z\, \frac{\cot\theta + \cot\alpha}{1+\cot^2\theta} \qquad \text{CLS}$$

$\cot\theta = 2$

$\cot\alpha = 0$ (staffe)

$z \simeq 0.6d = 0{,}6 \times 0{,}85 = 0{,}51\ m$

$b_w \simeq 0{,}8d = 0.8 \times 0{,}85 = 0.76\ m$

$f_{cd} = 14.17\ MPa$

$\alpha_c = 1 + \frac{\sigma}{f_{cd}} = 1 + \frac{0{,}76}{14{,}17} = 1.05 \qquad \left( \sigma = \frac{N}{A_c f_{cd}} : \frac{\sigma}{f_{cd}} < 0.25 \right)$

$\Rightarrow V_{Rd,c} = 0{,}5 \times 1.05 \times 14.17 \times 0{,}76 \times 0.57 \times \frac{2}{5} = 1288\ kN$

$$= V_{Rd,s} = \frac{A_w}{s} \cdot z\, f_{yd}\, (\cot\theta + \cot\alpha) \sin\alpha \qquad \text{STAFFE}$$

$\frac{A_{st}}{s} = \phi 10/20 = 2 \times \frac{0{,}785\ cm^2}{0{,}20\ m}$

$z \simeq 0{,}57\ m$

$\sin\alpha = 1$

$V_{Rd,s} = 2 \times \frac{0{,}785\ cm^2}{0{,}20\ m} \times 0{,}57\ m \times 391{,}3 \times 2 \times \frac{1}{10} = 350.18\ kN$

IL PASSO SCELTO VA BENE.

(POTREI OTTIMIZZARE $\cot\theta$ UGUAGLIANDO $V_{Rd,c}$, $V_{Rd,s}$ MA SOLITAMENTE $\cot\theta = 2$ È CAUTELATIVO PER I PALI)