

Oggetto

**DIMENSIONAMENTO DI UNA
PILA DA PONTE SOGGETTA
AD AZIONE SISMICA**

Corso

**ELEMENTI DI INGEGNERIA
SISMICA**

Docente

Prof.ssa Silvia Santini



Studenti

**Antonelli Marco
Campolese Mattia**

Anno

2006 / 2007

Sommario

Input di progetto.....pag. 2

Modello di analisi

Analisi longitudinale.....pag. 7

Analisi trasversale.....pag. 11

Modello della sezione.....pag. 15

Azione sismica

Calcolo delle masse.....pag. 16

Calcolo dei periodi della struttura....pag. 16

Spettro di progetto.....pag. 17

Forzante sismica.....pag. 19

Analisi sollecitazioni.....pag. 19

Dimensionamento pila

Pressoflessione

Cerniera plastica.....pag. 21

Fuori cerniera plastica.....pag. 24

Dettagli costruttivi.....pag. 29

Taglio

Cerniera plastica.....pag. 31

Fuori cerniera plastica.....pag. 34

Dettagli costruttivi staffe.....pag. 40

Riepilogo armature.....pag. 41

Disegni esecutivi

Input di progetto

Normative di riferimento

- Ordinanza 3274 come modificato dall'OPCM 3431 del 3/5/05
- Testo unico D.M. 14/09/2005 (per prescrizioni non sismiche)
- D.M. 09/01/1996 Stato Limite Ultimo (per i calcoli in EC2)
- Eurocodice 8 - Ponti (per indicazioni)

Dati geometrici e fisici

Per semplicità nelle conversioni in N si pone $g = 10 \text{ m/s}_2$.

Impalcato	Peso proprio: 20 t/m Luce: 50 m
Pila	Altezza ai baggioli: 8 m h pila: 2 m b pila: 2,5 m
Calcestruzzo	R _{ck} : 35 MPa $E = 11000 \cdot \left(\frac{R_{ck}}{0,7}\right)^{\frac{1}{3}} \rightarrow E = 40524 \text{ MPa}$ $f_{ck} = 0,83 R_{ck} \rightarrow f_{ck} = 29,05 \text{ MPa}$ $f_{cd} = \frac{R_{ck}}{\gamma_{m,c}} \rightarrow f_{cd} = 18,42 \text{ MPa}$ $f_{ctm} = 0,48 \cdot \sqrt{R_{ck}} \rightarrow f_{ctm} = 2,84 \text{ MPa}$ $f_{ctk} = 0,7 \cdot f_{ctm} \rightarrow f_{ctk} = 1,99 \text{ MPa}$ $f_{ctd} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_{m,c}} \rightarrow f_{ctd} = 1,24 \text{ MPa}$ Densità: 25 KN/m ³ = 2,5 t/m ³
Acciaio	Barre ad aderenza migliorata Feb44k (B450C) f _{yd} = 373,9 MPa [D.M. 09/01/1996] f _{yd} = 391,3 MPa [Testo unico D.M. 14/09/2005]

Si trascura lo spessore degli appoggi in neoprene.

Le dimensioni della pila, del pulvino e dei baggioli sono descritti in dettaglio in Fig. 1, Fig. 2 e Fig. 3 mentre quelle dell'impalcato in Fig. 4.

Classificazione sismica [Punti 5.2.1 e 5.2.3 Ordinanza]

Zona: 3	a _g = 0,15 g
Suolo: E	S = 1,25 m/s ₂ ; T _b = 0,15 s ; T _c = 0,5 s ; T _d = 2 s

Fig. 1: VISTA LONGITUDINALE PILA
SCALA 1:50

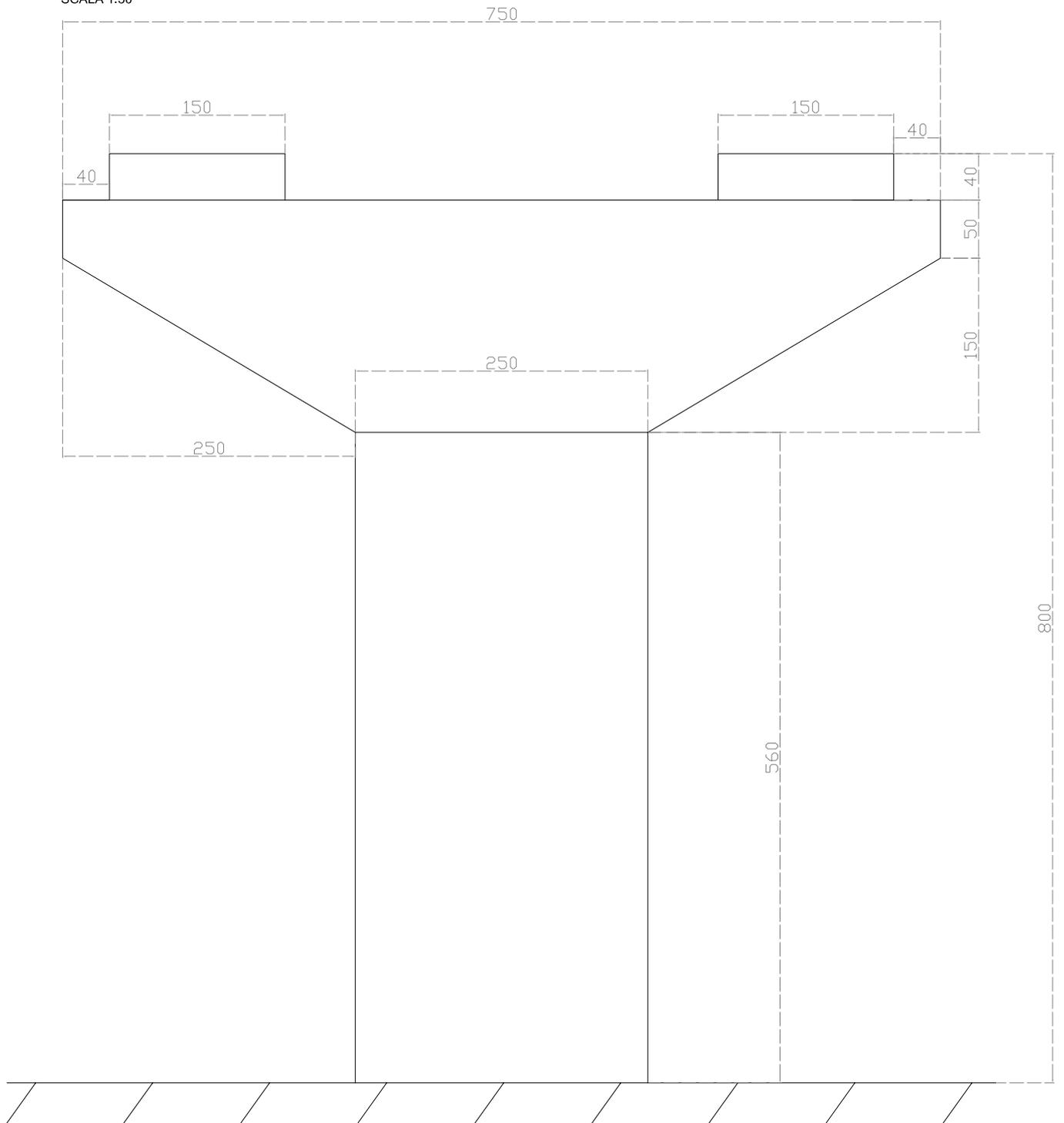


Fig. 2: VISTA TRASVERSALE PILA
SCALA 1:50

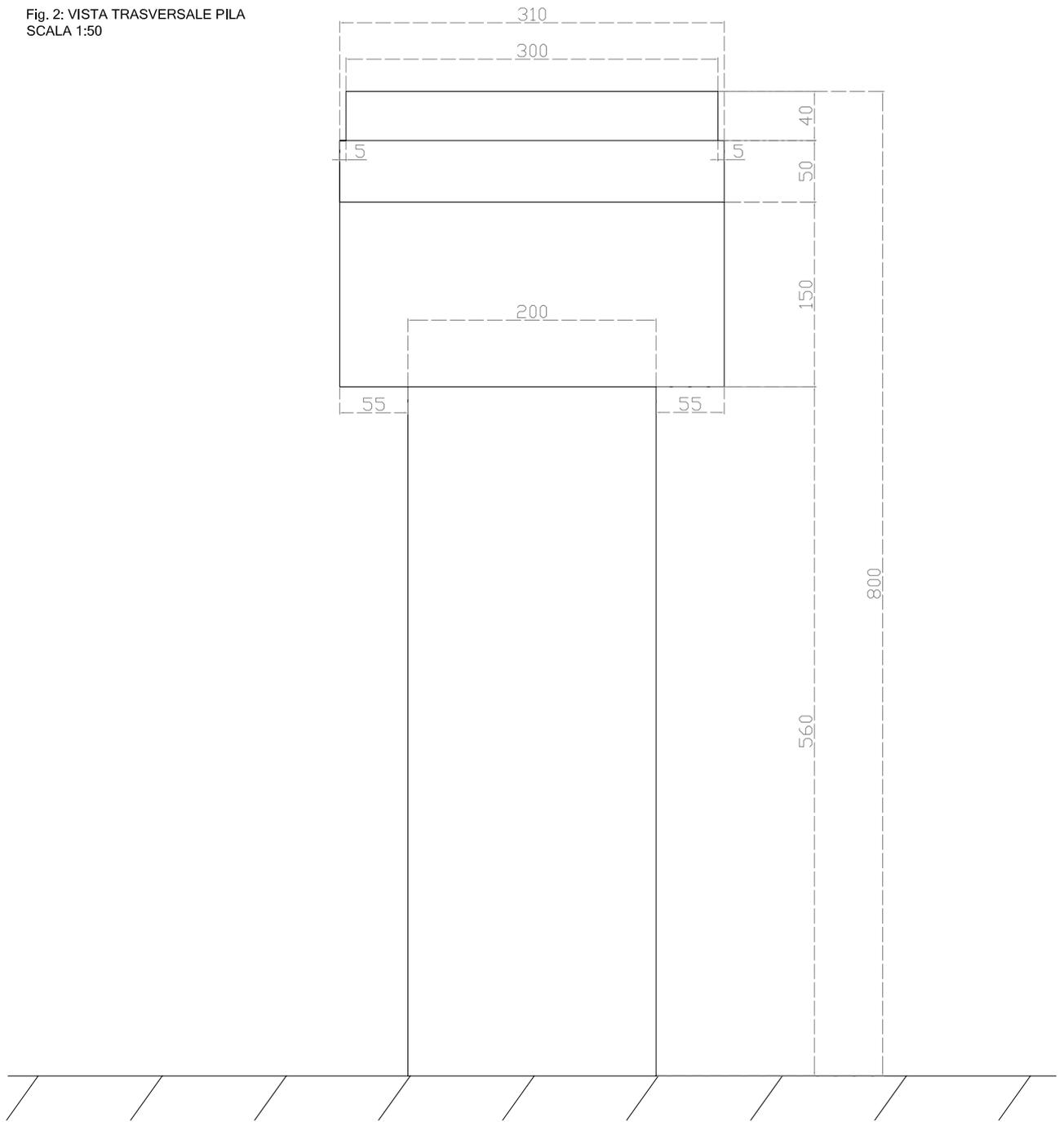
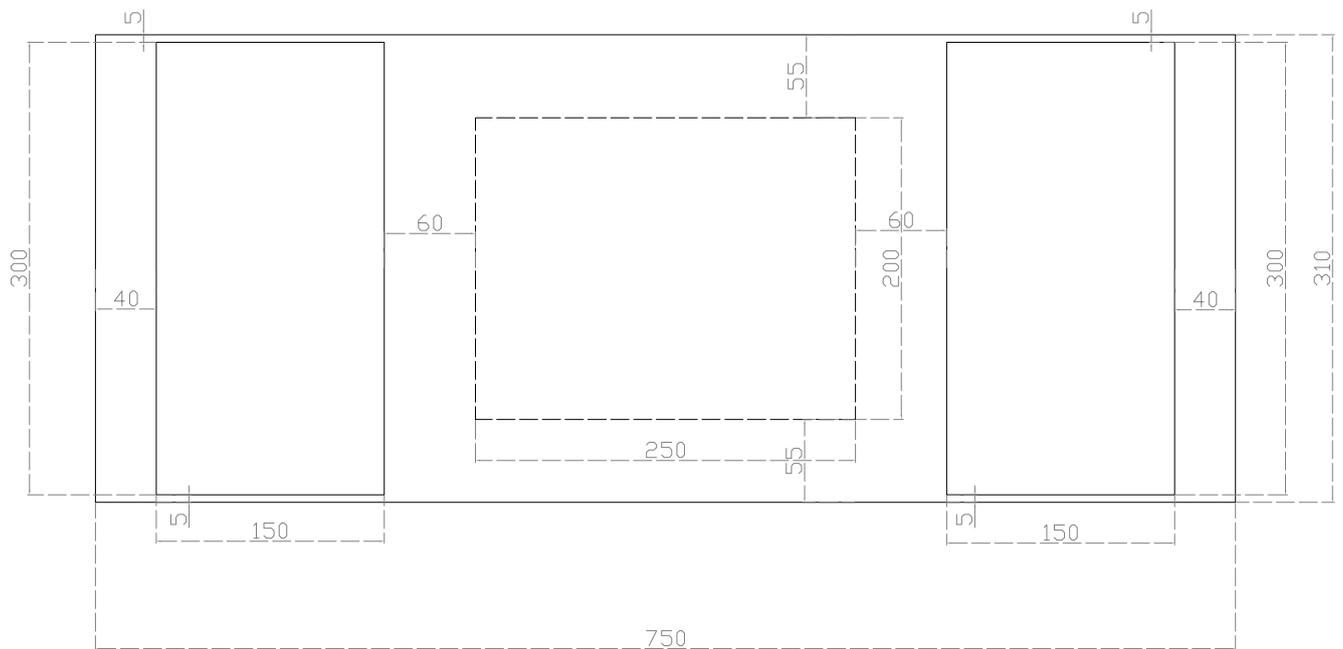


Fig. 3: PIANTE PULVINO
SCALA 1:50



Modello di analisi

La progettazione di una pila è una operazione complessa richiedente un'analisi per azioni di esercizio permanenti e variabili e azioni sismiche.

Le azioni sismiche per definizione sono azioni omnidirezionali che sviluppano sulla pila delle accelerazioni orizzontali. L'analisi delle forze date dal sisma è secondo le direzioni degli assi principali di inerzia della sezione della pila.

La progettazione per una pila può essere realizzata mediante un'analisi semplificata consistente nell'applicazione di forze statiche equivalenti alle forze di inerzia indotte dall'azione sismica.

L'entità delle forze si ottiene dallo spettro di progetto corrispondente al periodo della pila nella direzione considerata.

L'analisi semplificata può essere applicata nei casi in cui la deformata dinamica della struttura è governata da un solo modo e la risposta è quindi fornita in buona approssimazione dall'analisi di un oscillatore ad 1 grado di libertà.

Si può ricorrere all'analisi semplificata nei seguenti casi [Punto 7.2 Ordinanza].

- a) nella direzione longitudinale per ponti rettilinei a travata continua, purché la massa efficace complessiva delle pile non sia superiore ad $1/5$ della massa dell'impalcato;
- b) nella direzione trasversale per ponti che soddisfano la condizione a) e sono simmetrici rispetto alla mezzzeria longitudinale, con un'eccentricità ammessa non superiore al 5% della lunghezza del ponte. L'eccentricità è la distanza tra baricentro delle masse e centro delle rigidezze delle pile nella direzione trasversale;
- c) in ponti a travate semplicemente appoggiate, per entrambe le direzioni longitudinale e trasversale, purché la massa efficace di ciascuna pila non sia superiore ad $1/5$ della massa di impalcato da essa portata.

La verifica a tali condizioni è rimandata a pag. 16

L'analisi che si andrà ad effettuare sarà allo stato limite ultimo (SLU). Per il calcolo della rigidezza della struttura si considera un valore dimezzato poiché il calcestruzzo non è del tutto reagente durante le oscillazioni in quanto fessurato.

Lo schema di calcolo della pila è dipendente dalla direzione che si intende analizzare, in quanto le altezze dell'oscillatore sono differenti nelle due direzioni.

Lo schema di calcolo nella direzione longitudinale prevede un oscillatore alto quanto la somma dell'altezza della pila, pulvino, baggioli. Quello nella direzione trasversale prevede un oscillatore di altezza pari a quella utilizzata nello schema longitudinale, con l'aggiunta della distanza tra la base inferiore dell'impalcato e il suo baricentro.

La differenza deriva da motivi di puro equilibrio tra le azioni esplicitate nelle due direzioni:

Analisi secondo direzione longitudinale

Dal prospetto longitudinale è possibile individuare per ogni elemento del ponte il suo baricentro e quindi il punto in cui si può applicare la forza data come prodotto dell'accelerazione e dalla massa dell'elemento stesso. Per semplicità si considerano solamente le forze orizzontali date dal sisma.

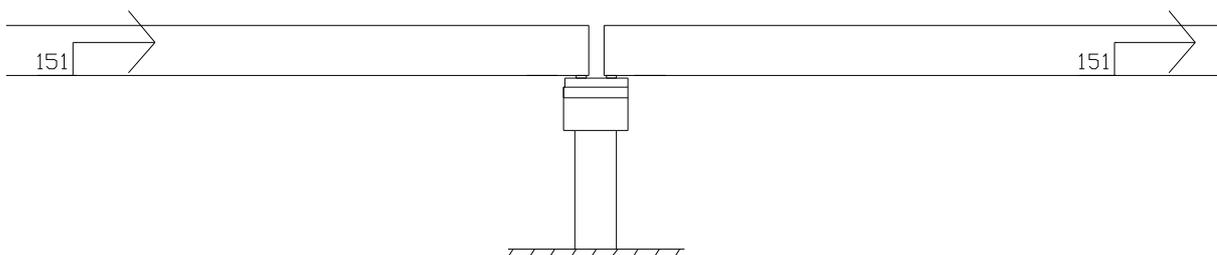


Fig. 5: Prospetto longitudinale con applicazione forze orizzontali

E' possibile determinare le sollecitazioni date al baggioio considerando uno schema statico di trave di lunghezza l (50 metri di luce) appoggiata su di un asta verticale di altezza d' pari a 1,517 m fissata nella mezzeria della trave (la distanza è stata calcolata con SAP2000).

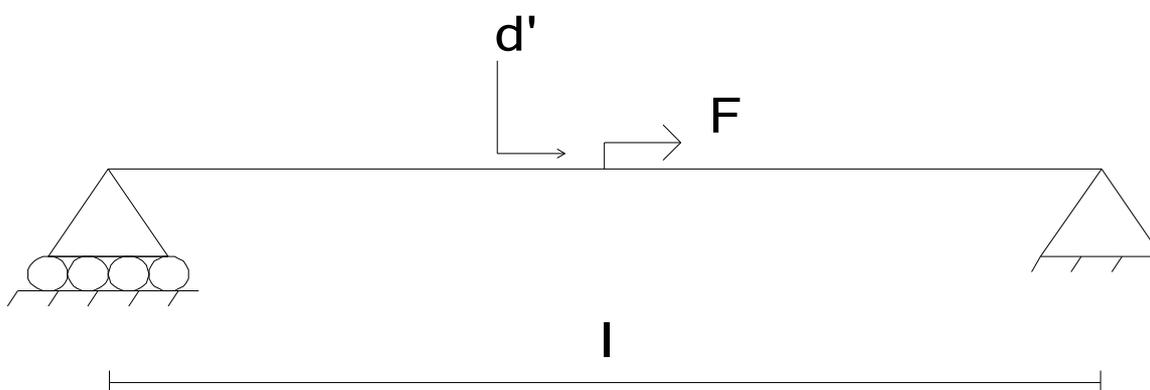


Fig. 6: Schema statico rappresentativo di una campata del ponte

Esprimendo le reazioni vincolari si ha:

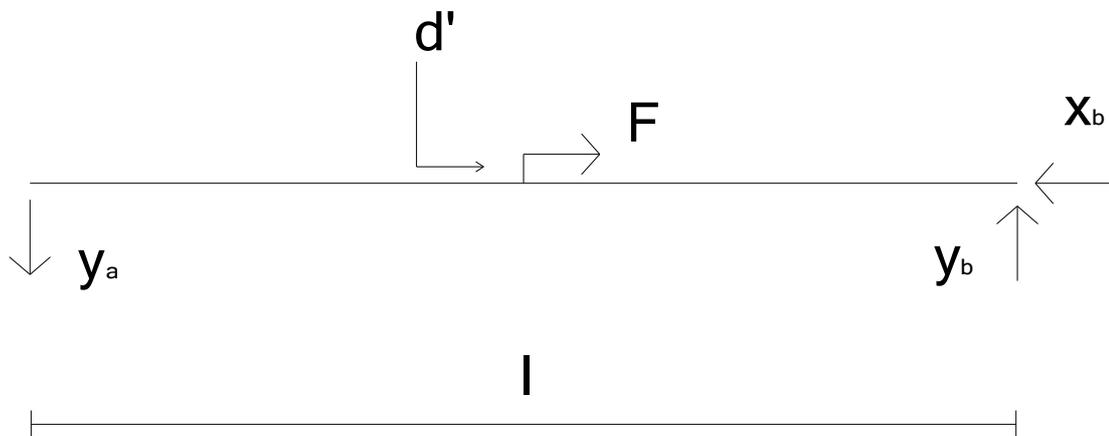


Fig. 7: Reazioni vincolari

Soluzione statica:

Equilibrio orizzontale:

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F - x_b = 0 \Rightarrow F = x_b$$

Equilibrio verticale:

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow -y_a + y_b = 0 \Rightarrow y_a = y_b$$

Equilibrio dei momenti:

$$\sum M_b = 0 \Rightarrow -F \cdot d' + y_a \cdot l = 0 \Rightarrow y_a = \frac{(F \cdot d')}{l}$$

Le reazioni vincolari risultano pari:

$$y_a = \frac{(F \cdot d')}{l} \quad y_b = \frac{(F \cdot d')}{l} \quad F = x_b$$

Schema di corpo libero equilibrato:

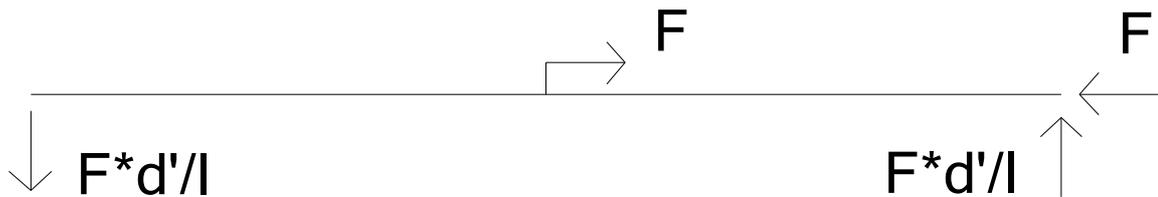


Fig. 8: Schema di corpo libero equilibrato

Le sollecitazioni sui baggioli della pila sono uguali in modulo a quelle del corpo libero, ma cambiate in verso, perciò le forze sono dirette come in figura 9:

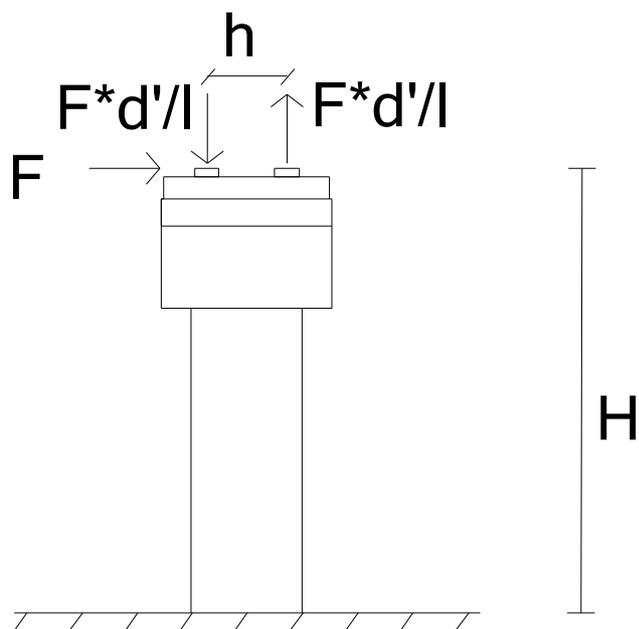


Fig. 9: Applicazione forze sui baggioli

Per il teorema del trasporto si può spostare una forza di una distanza pari ad h (distanza tra i baricentri dei baggioli); in questo modo si ha l'annullamento tra le forzanti verticali mentre rimane la forza orizzontale ed il momento di trasporto (M_t).

La pila quindi può schematizzarsi come un oscillatore con una forzante orizzontale ed un momento agente in senso opposto al momento prodotto dalla forzante orizzontale (M_F).

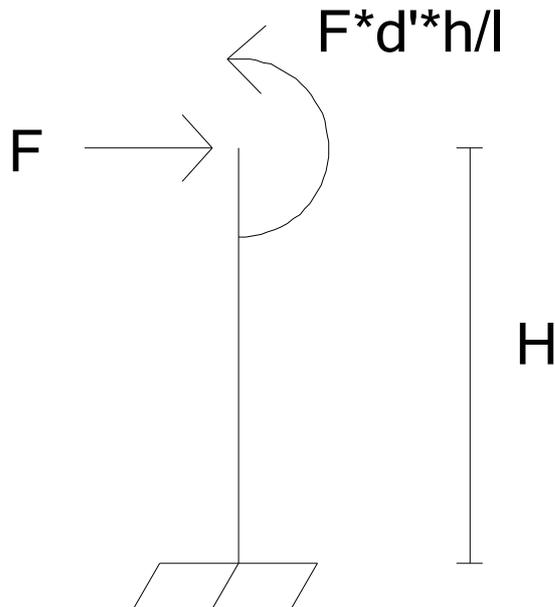


Fig. 10: Oscillatore semplice con momento di trasporto

Momenti agenti alla base dell'oscillatore:

$$M_F = F \cdot H = F \cdot 8$$

$$M_t = y_a \cdot h = \frac{(F \cdot d') \cdot h}{l} = F \cdot 0,045$$

$$\frac{M_t}{M_F} = 0,006$$

Rapportando queste due grandezze si osserva che il momento dato dal trasporto è il 0,6% del momento dato dalla forzante quindi una quantità trascurabile e che inoltre si oppone al momento dato dalla forzante. Trascurare il momento di trasporto è a vantaggio di sicurezza, quindi si considera per l'altezza dell'oscillatore direttamente l'altezza ai baggioli.

Analisi secondo direzione trasversale

Nella sezione trasversale del ponte, invece, si prende un'altezza maggiore per l'oscillatore rispetto all'altezza dell'oscillatore longitudinale.

La dimostrazione è un problema di equilibrio tra gli elementi strutturali del ponte quando sono sottoposti all'azione sismica.

Analizzando staticamente la struttura nella sezione trasversale, in particolare l'impalcato appoggiato sui baggioli, si ottiene che la forza data dall'accelerazione orizzontale e dalla massa dell'impalcato è rappresentata nel baricentro dell'impalcato stesso.

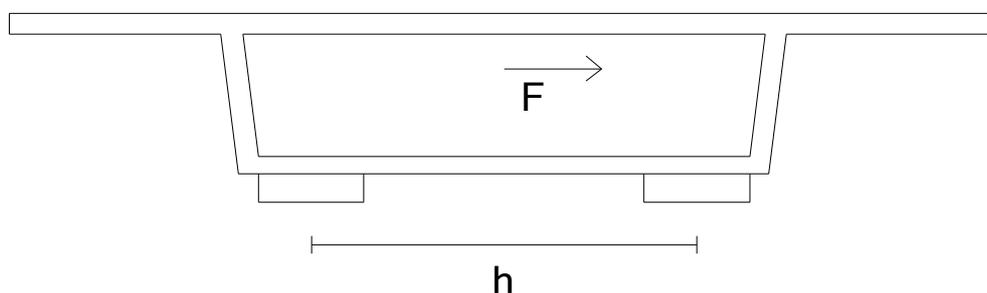


Fig. 11: Impalcato su baggioli con forza nel baricentro

Questa sezione può essere rappresentata con uno schema statico di tipo trave appoggiata di luce pari a k (distanza tra i baricentri dei due baggioli) con un carico orizzontale gravante su di un'asta verticale di lunghezza $d = d' = 1,517$ m, posizionata in mezzzeria della trave appoggiata.

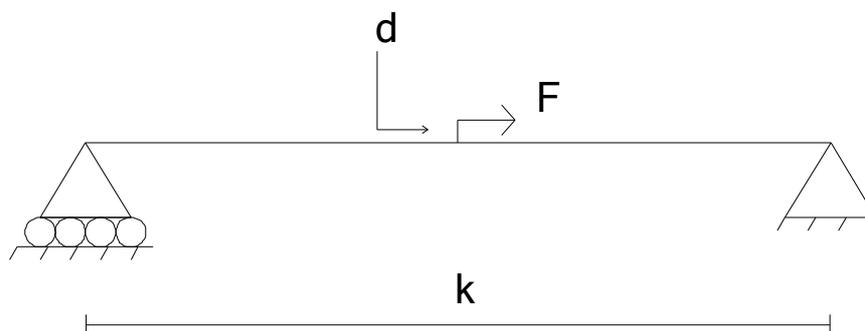


Fig. 12: Schema statico dell'impalcato sui baggioli

Esprimendo le reazioni vincolari si ha:

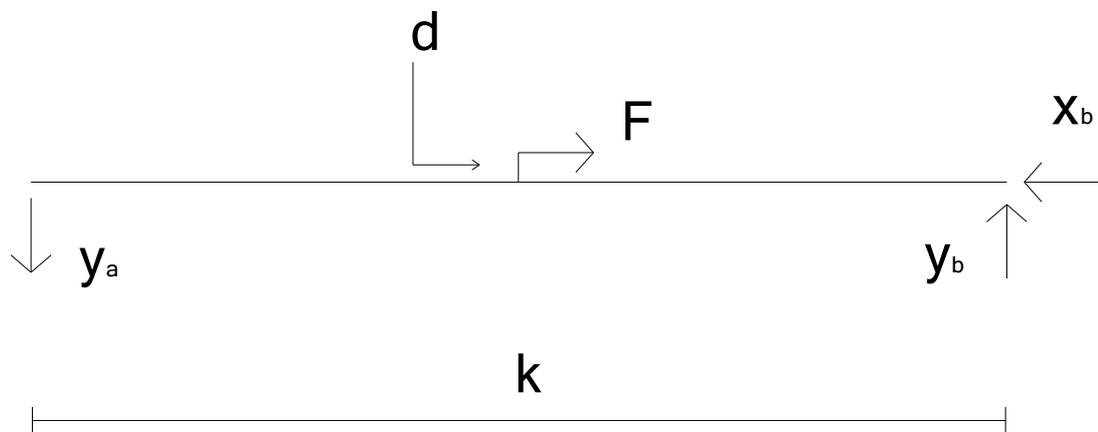


Fig. 13: Reazioni vincolari

Soluzione statica:

Equilibrio orizzontale

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F - x_b = 0 \Rightarrow F = x_b$$

Equilibrio verticale

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow -y_a + y_b = 0 \Rightarrow y_a = y_b$$

Equilibrio dei momenti

$$\sum M_b = 0 \Rightarrow -F \cdot d + y_a \cdot k = 0 \Rightarrow y_a = \frac{(F \cdot d)}{k}$$

Le reazioni vincolari risultano pari:

$$y_a = \frac{(F \cdot d)}{k} \quad y_b = \frac{(F \cdot d)}{k} \quad F = x_b$$

Schema corpo libero equilibrato:

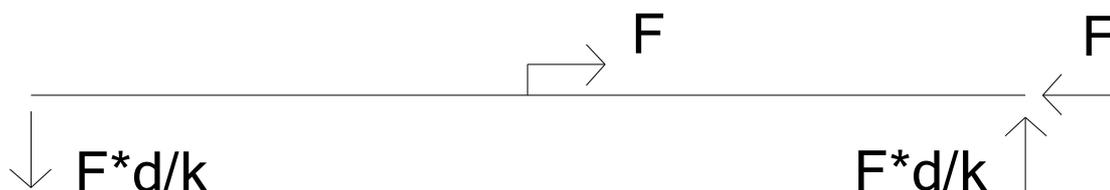


Fig. 14: Schema di corpo libero equilibrato

Le sollecitazioni sui baggioli della pila sono uguali in modulo a quelle del corpo libero, ma cambiate in verso, perciò le sollecitazioni sono dirette come in fig. 15:

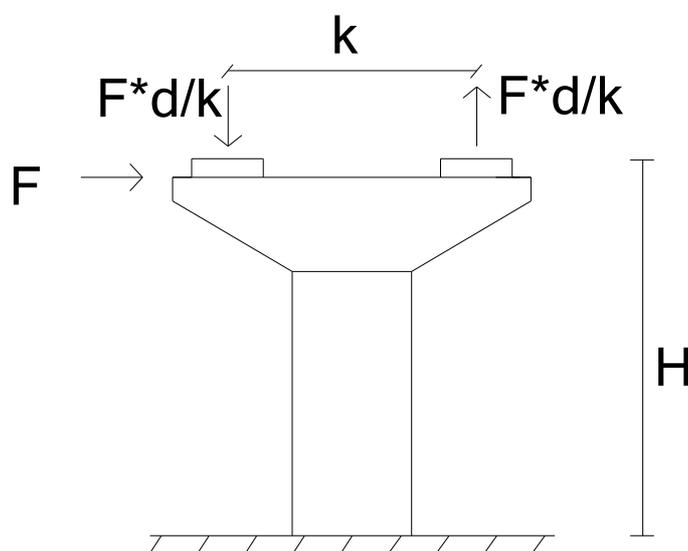


Fig. 15: Schema forze sul pulvino

Le sollecitazioni date dall'azione sismica presenti sul pulvino sono tali che trasportando una forza verticale per una distanza k , si ottiene l'annullamento delle

forze verticali (uguali in modulo con verso opposto) date dal sisma mentre rimane un momento dato dal trasporto della forza stessa.

Lo schema rappresentativo di questo insieme di sollecitazioni è dato da un oscillatore semplice in cui è presente in sommità la forza data dal sisma ed il momento di trasporto precedentemente ricavato.

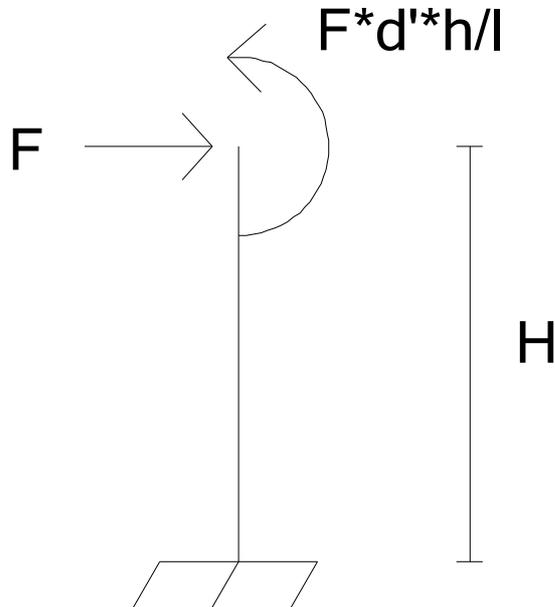


Fig. 16: Oscillatore semplice con momento di trasporto

Applicando nuovamente il teorema del trasporto per la forza orizzontale e spostandola verso l'alto di una distanza pari a d , questa genera un momento pari a $M_F = F \cdot d$ quindi questo momento positivo è in verso opposto al momento M_t ma sono uguali in modulo, tale che la loro somma è nulla e la forza risulta posizionata ad una quota dalla base dell'oscillatore pari ad $H+d$.

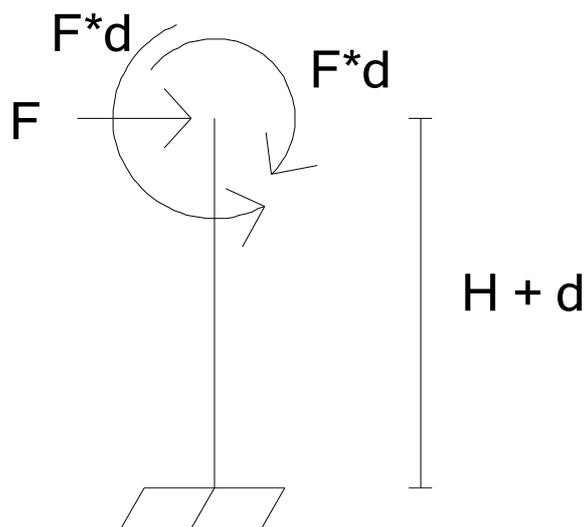


Fig. 17: Oscillatore con i due momenti agenti di segno opposto

Si considererà quindi il seguente oscillatore per l'analisi:

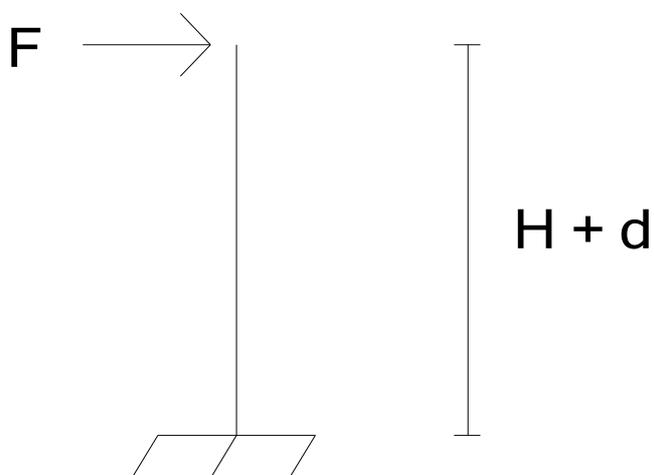


Fig. 18: Oscillatore di progetto per l'analisi trasversale

Modello della sezione

D'ora in poi verrà indicato con “*Longitudinale*” ogni tipo di analisi svolta considerando una sezione rettangolare larga 2,5m e alta 2m, mentre con “*Trasversale*” una sezione rettangolare larga 2m e alta 2,5m .

Le profondità delle sezioni si considerano fissando lo 0 alla base della pila.

Azione sismica

Calcolo delle masse

	<i>Volume</i>	<i>Massa</i>
<i>Pila</i>	H netta pila = 5,6 m Area sezione = (2 x 2,5) = 5 m ² Volume pila = 5 x 5,6 = 28 m ³	M _{pila} = 28 x 2,5 = 70 t. M _{pila/h} = 5 x 2,5 = 12,5 t/m
<i>Pulvino</i>	Calcolato considerando come area la differenza tra il rettangolo e i due triangoli inferiori: Area sezione = (7,5 x 2) - (1,5 x 2,5) = 11,25 m ² Volume pulvino = 11,25 * 3,1 = 34,8 m ³	M _{pulvino} = 24,8 x 2,5 = 87,19 t
<i>Baggioli</i>	Area sezione = 1,5 x 0,4 = 0,6 m ² Volume 1 baggiolo = 0,6 x 3 = 1,8 m ³ Volume totale = 1,8 x 2 = 3,6 m ³	M _{baggioli} = 3,6 x 2,5 = 9 t
<i>Impalcato</i>	Luce d'interesse = 50 m (si trascura il carico accidentale)	M _{impalcato} = 50 x 20 = 1000 t

Per le pile a sezione costante si considera come massa efficace la metà superiore di quella effettiva [Punto 7.2 Ordinanza], ovvero in questo caso la massa dell'impalcato + massa baggioli + massa pulvino + massa pila per un'altezza di 1,6 m.

Massa efficace = (12,5 x 1,6) + 87,19 + 9 + 1000 = **1116,19 t**

Massa totale = 70 + 87,19 + 9 + 1000 = 1166,19 t

Sforzo assiale di calcolo: N_{ed} = 1166,19 x 10 = 11662 KN

(M_{eff,pila} = 116,19 t)/(M_{impalcato} = 1000 t) = 0,12 < 0,2 ⇒ Verificata condizione necessaria per l'analisi semplificata

Calcolo dei periodi della struttura

	<i>Longitudinale</i>		<i>Trasversale</i>	
<i>Momento d'inerzia</i>	$I = b \frac{h^3}{12}$	$I_{long} = 2,5 \times (2^3 / 12) = 1,67 \text{ m}^4$	$I = h \frac{b^3}{12}$	$I_{tra} = 2 \times (2,5^3 / 12) = 2,6 \text{ m}^4$
<i>Rigidezza</i>	$K = \frac{3EI}{H^3}$	$K_{long} = (3 \times 40524 \times 1,67 \times 1000) / 8^3 = 395745,6 \text{ N/mm}$	$K = \frac{3EI}{(H+d)^3}$	$K_{tra} = (3 \times 40524 \times 2,6 \times 1000) / 9,517^3 = 367287 \text{ N/mm}$
<i>Rigidezza efficace</i>	$K_{eff} = K / 2$	$K_{eff} = 395745,6 / 2 = 197872,8 \text{ N/mm}$	$K_{eff} = K / 2$	$K_{eff} = 367287 / 2 = 183643,6 \text{ N/mm}$
<i>Frequenza</i>	$\omega = \sqrt{\frac{k}{M}}$	$\omega_{long} = (197872,8 / 1116,19)^{(1/2)} = 13,314 \text{ s}^{-1}$	$\omega = \sqrt{\frac{k}{M}}$	$\omega_{tra} = (183643,6 / 1116,19)^{(1/2)} = 12,827 \text{ s}^{-1}$
<i>Periodo</i>	$T = \frac{2\pi}{\omega}$	$T = (2 * \pi) / 13,3 = 0,472 \text{ s}$	$T = \frac{2\pi}{\omega}$	$T = (2 * \pi) / 12,83 = 0,490 \text{ s}$

Spettro di progetto

Calcolato il periodo si determina ora l'accelerazione sismica utilizzando gli spettri di normativa.

Per evitare analisi non lineari si può ricorrere ad uno spettro elastico che considera il fattore riduttivo delle forze elastiche detto fattore di struttura q [Punto 5.2.6 Ordinanza] detto "spettro di progetto per lo stato limite ultimo".

Valori del coefficiente di struttura q [Punto 5.5 Ordinanza]

Schema	H/L	q
Longitudinale	$8 / 2,5 = 3,2$	3,2
Trasversale	$8 / 2 = 4$	3,5

Sforzo assiale ridotto: $\eta_k = N_{ed} / A_c f_{ck}$

$$\eta_k = 11662 / (2 \times 2,5 \times 29,05 \times 1000) = 0,08 < 0,3 \Rightarrow \text{Verificato}$$

Verifica di regolarità della geometria del ponte [Punto 5.5 Ordinanza].

I valori di q utilizzati sono validi se è verificata la condizione di regolarità della geometria del ponte. Calcolato il rapporto $r_i = \frac{M_d}{M_{rd}}$ (con M_d = momento di calcolo derivante dall'analisi e M_{rd} = momento resistente, entrambi alla base della pila) per ogni pila del ponte il rapporto tra il massimo ed il minimo dei r_i deve essere minore di 2.

In questo schema di studio si considera un ponte con lunghezza d'influenza dell'impalcato costante appoggiato su pile identiche su terreni identici, quindi la prescrizione è automaticamente verificata.

Espressioni dello spettro di progetto per componenti orizzontali [Punto 5.2.6 Ordinanza]:

Intervallo	Relazioni
$0 \leq T < T_B$	$S_d(T) = a_g \cdot S \cdot [1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\frac{2,5}{q} - 1)]$
$T_B \leq T < T_c$	$S_d(T) = \frac{a_g \cdot S \cdot 2,5}{q}$
$T_c \leq T \leq T_D$	$S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot (\frac{T_c}{T})$
$T_D < T$	$S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot (T_c \frac{T_D}{T^2})$

Si trascura qui per semplicità la componente verticale dell'azione sismica.

Spettro di progetto – suolo E, zona III

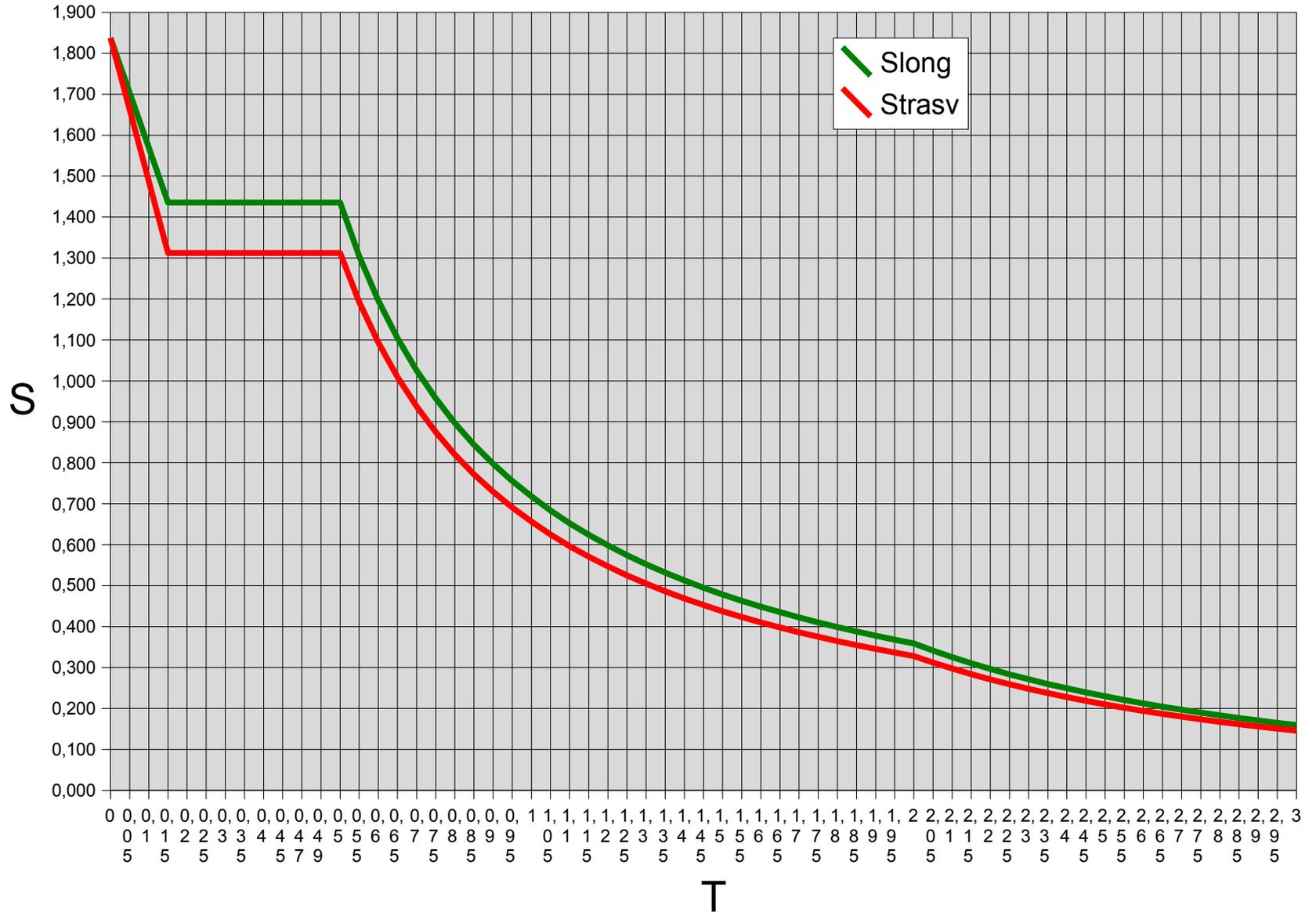
[punto 5.2.6 dell'Ordinanza 3274 come modificato dall'OPCM 3431 del 3/5/05]

$A_g = 1,47 \text{ m/s}_2$
 $S = 1,25 \text{ m/s}_2$

$q_{long} = 3,2$
 $q_{trasv} = 3,5$

$T_b = 0,15 \text{ s}$
 $T_c = 0,5 \text{ s}$
 $T_d = 2 \text{ s}$

$T_{long} = 0,472 \text{ s}$
 $T_{trasv} = 0,490 \text{ s}$



Forzante sismica

Dall'analisi dello spettro di progetto sono state individuate le accelerazioni sismiche:

Longitudinale	Trasversale
$S_d(T) = 1,436 \text{ m/s}^2$	$S_d(T) = 1,313 \text{ m/s}^2$

Poichè la pila viene schematizzata come un oscillatore ad un grado di libertà, utilizzando l'analisi semplificata [Punto 7.2 Ordinanza] è possibile determinare la forzante sismica tramite l'espressione $F = M \cdot S_d(T_1)$:

Longitudinale	Trasversale
$F_x = 1116,19 \times 1,436 = 1635,4 \text{ KN}$	$F_y = 1116,19 \times 1,313 = 1494,9 \text{ KN}$

Analisi sollecitazioni

Combinazione componenti dell'azione sismica [Punto 5.3 Ordinanza]

L'azione sismica è composta da 3 componenti traslazionali, 2 orizzontali ed una verticale tra loro indipendenti. Essendo in zona 3 si può trascurare l'azione verticale. Poiché si sta eseguendo un'analisi in campo lineare dopo aver determinato la forzante si deve determinare la combinazione degli effetti secondo l'espressione:

$$E_x = A_{Ex}' + 0,30 A_{Ey}; E_y = 0,30 A_{Ex}' + A_{Ey}$$

Si considera la combinazione più gravosa.

Si avrebbe uno studio di una condizione di pressoflessione deviata nella quale andrebbe verificata la combinazione più gravosa tra E_x ed E_y . Per semplicità si considera direttamente l'azione massima nelle sezioni considerate, operando quindi con due analisi distinte in pressoflessione retta (semplificazione a favore di sicurezza):

Schema statico	Provenienza forzante	
	Longitudinale [x]	Trasversale [y]
Longitudinale [h = 8 m]	100% $F_x = 1635,4 \text{ KN}$ $F_x \times h = M_{x,l} = 13080 \text{ KN m}$	30% $F_y = 448,47 \text{ KN}$ $0,3F_y \times h = M_{y,l} = 3588 \text{ KN m}$
Trasversale [h = 9,517 m]	30% $F_x = 490,51 \text{ KN}$ $0,3F_x \times h = M_{x,t} = 4668 \text{ KN m}$	100% $F_y = 1494,89 \text{ KN}$ $F_y \times h = M_{y,t} = 14227 \text{ KN m}$

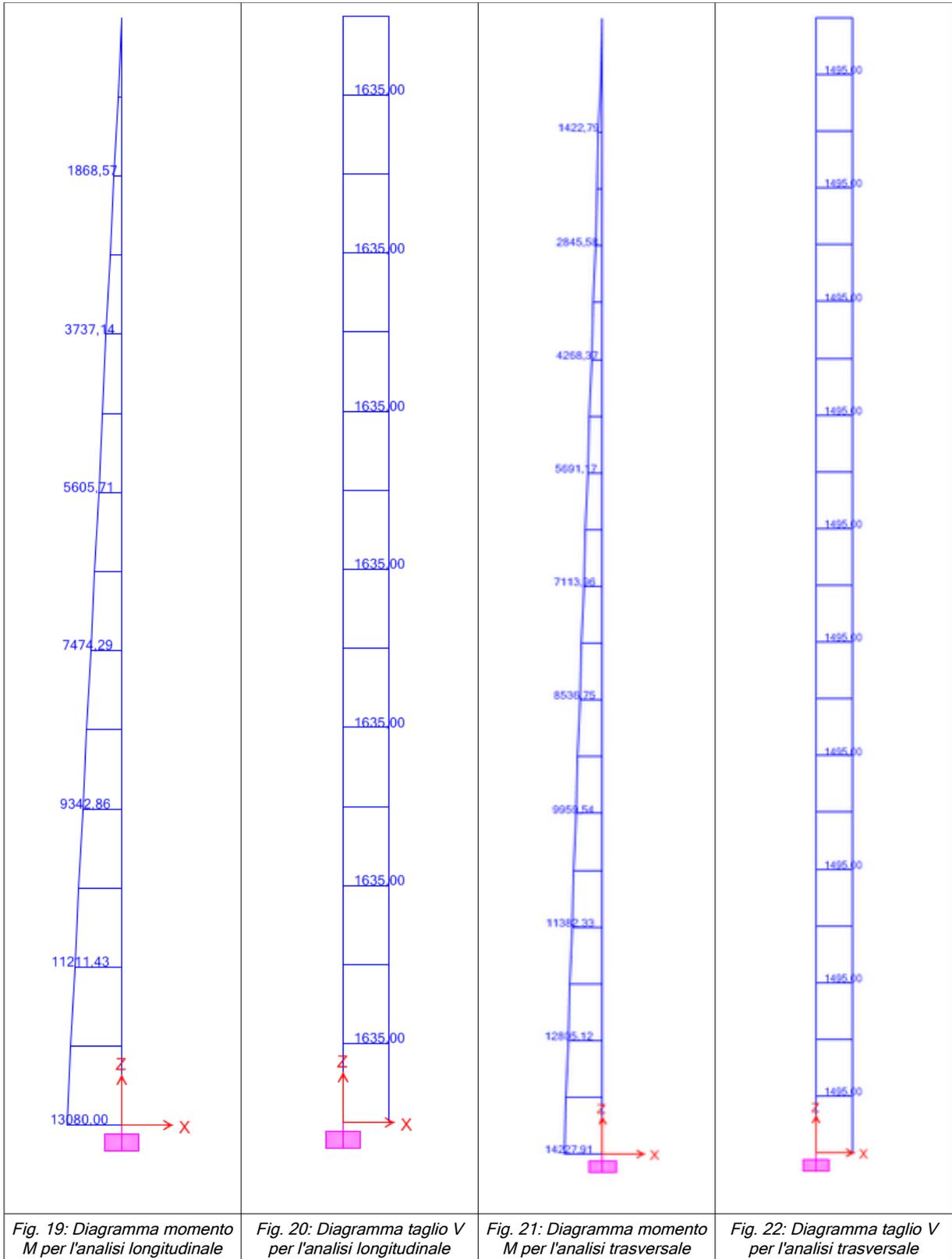
Combinazione azione sismica con altre azioni [Punto 5.3 Ordinanza]

La combinazione dei carichi agenti sulla pila è data dalla relazione $\gamma_1 E + G_k + P_k$.

Si considera il ponte di categoria II, ovvero di importanza normale, quindi il fattore di importanza γ_1 è pari a 1.0 (Tabella 1 Ordinanza). L'azione sismica si combina solo con i carichi permanenti (G_k) rappresentati dal peso proprio degli elementi strutturali. P_k , valore caratteristico della precompressione, è qui pari a 0.

Analisi statica

Si ha lo schema statico di una mensola incastrata alla base, con lunghezze differenti a seconda del tipo di analisi. La forza sismica agisce in testa dove si considera per semplicità applicato anche il carico dovuto ai pesi propri degli elementi (si trascura la variabilità di N_{ed} lungo la pila essendo l'impalcato di peso notevolmente più rilevante).



Dimensionamento pila

Il dimensionamento della pila segue il criterio della gerarchia delle resistenze (capacity design) [Punto 8.1 Ordinanza] assumendo che nelle zone dove è prevista la formazione di cerniere plastiche (in questo caso alla base della pila) agiscano momenti flettenti da considerare come frattili superiori di quelli resistenti $M_{cd} = \gamma_0 \cdot M_{rd}$ con il fattore di sovraresistenza γ_0 pari a $\gamma_0 = 0,7 + 0,2q \geq 1$.

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
$\gamma_0 = 0,7 + 0,2 \times 3,2 = 1,34$	$\gamma_0 = 0,7 + 0,2 \times 3,5 = 1,40$

Dall'analisi statica si ricavano i valori dei momenti e dei tagli di calcolo:

$N_{Ed} = 11662$ KN

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
$M_d = 13080$ KN m; $V_e = 1635$ KN	$M_d = 14228$ KN m; $V_e = 1495$ KN

Nota: per ogni sezione le armature longitudinali superiori e inferiori saranno identiche poiché la forza sismica può provenire da entrambi i versi. Ciò automaticamente verifica la prescrizione 5.1.6.1.1 del Testo Unico sul rapporto tra le armature longitudinali nei due lembi ($A_s / A_s' = 1 > 0,5$).

Pressoflessione

1) CERNIERA PLASTICA

Lunghezza di cerniera plastica

Per calcolare la lunghezza del tratto nel quale si considera la formazione della cerniera plastica si utilizzano le prescrizioni del punto 8.4.2.2 dell'ordinanza, ovvero si prende la maggiore tra le seguenti lunghezze:

- *profondità della sezione in direzione ortogonale all'asse di rotazione delle cerniere:*

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
2 m	2,5 m

- *distanza tra la sezione di momento massimo e la sezione in cui il momento si riduce del 20%:*

	<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
80% momento agente	10464 KN m	11382 KN m
Distanza dalla base	$8 - (10464/1635) = 1,6$ m	$9,517 - (11382/1495) = 1,9$ m

Si è scelta la distanza **$d = 2,5$ m** per entrambe le analisi.

Dimensionamento armature longitudinali

Per la quantità di armatura minima si fa riferimento al testo unico e alle indicazioni del software EC2 considerando come momento e taglio di calcolo i valori ottenuti dall'analisi statica.

- $0,3\% \leq \frac{A_s}{A_c} \leq 6\%$; *quantità minima armatura di acciaio a causa della presenza dello sforzo assiale [Testo unico]:*

A_c = area del calcestruzzo = area della sezione = $(2 \times 2,5 \times 1000^2) = 5 \times 10^6 \text{ mm}^2$
 Si è scelto di ripartire l'armatura necessaria per il 60% nella sezione longitudinale e per il 40% nella sezione trasversale per uniformare la distribuzione dei ferri:

% di A_c		A_s totale [mm^2]	Longitudinale [mm^2]		Trasversale [mm^2]	
			Totale	Tesa	Totale	Tesa
Massima	6	300000	180000	90000	120000	60000
Minima	0,3	15000	9000	4500	6000	3000
Adottata	0,55	27500	16500	<u>8250</u>	11000	<u>5500</u>

- $A_s \geq \frac{V_d}{f_{yd}}$; *meccanismo ad arco negli appoggi [Testo unico]:*

Schema	V_d [KN]	A_s min. [mm^2]	A_s min. totale [mm^2]
Longitudinale	1635	4178,44	8356,87
Trasversale	1495	3820,28	7640,57

- *Armatura minima di progetto indicata da EC2:*

Longitudinale [mm^2]	Trasversale [mm^2]
4540	2180

Scelte progettuali:

	Longitudinale	Trasversale
Armatura scelta	<u>$A_s = 8250 \text{ mm}^2$</u>	<u>$A_s = 5500 \text{ mm}^2$</u>
Diametro barra scelto	$\Phi 26$ ($A_b = 530,93 \text{ mm}^2$)	$\Phi 26$ ($A_b = 530,93 \text{ mm}^2$)
N. minimo barre (A_s / A_b)	15,53	10,36
N. di barre adottato	17	11
Interferro	12,24 cm	16,14 cm

Le barre andranno disposte su un'unica fila considerando un copriferro $d' = 5 \text{ cm}$ per entrambe le sezioni.

Verifica appartenenza al dominio di interazione

Con EC2 si determina l'appartenenza o meno della sezione al dominio d'interazione ed il relativo momento resistente (si considerano i contributi di tutte le armature presenti):

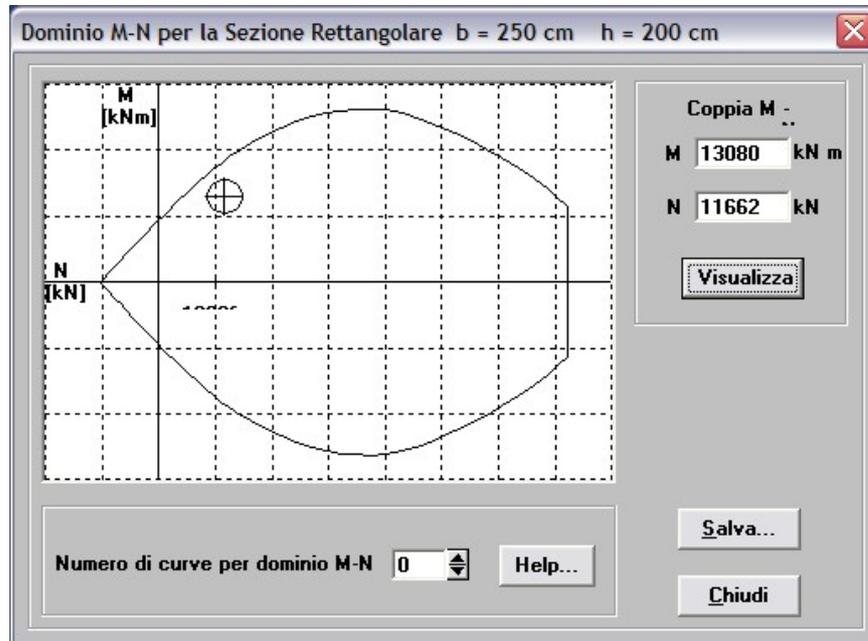


Fig. 23: Dominio d'interazione della sezione in cerniera plastica: analisi longitudinale

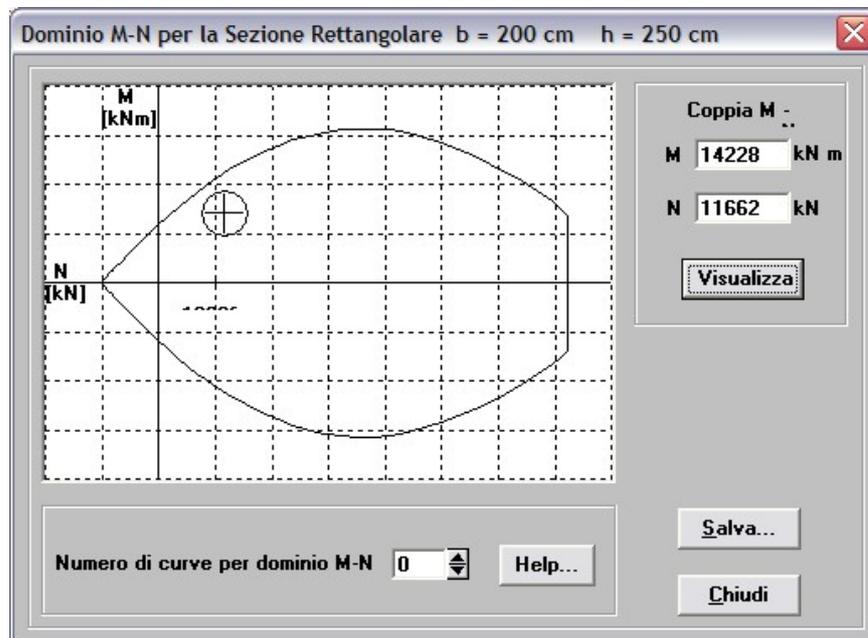


Fig. 24: Dominio d'interazione della sezione in cerniera plastica: analisi trasversale

Longitudinale	Trasversale
$M_{rd} = 23004 \text{ KNm}$	$M_{rd} = 28970 \text{ KNm}$

Per entrambe le analisi la sezione risulta verificata.

2) FUORI CERNIERA PLASTICA

Momento di capacity design

Per il dimensionamento delle sezioni fuori dalla cerniera plastica si fa riferimento ad un momento che considera la sovreresistenza delle sezioni ottenuto per costruzione geometrica in base all'amplificazione del momento resistente della sezione in cerniera plastica.

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
$M_{cd} = 23004 \times 1,34 = 30825 \text{ KNm}$	$M_{cd} = 28970 \times 1,40 = 40558 \text{ KNm}$

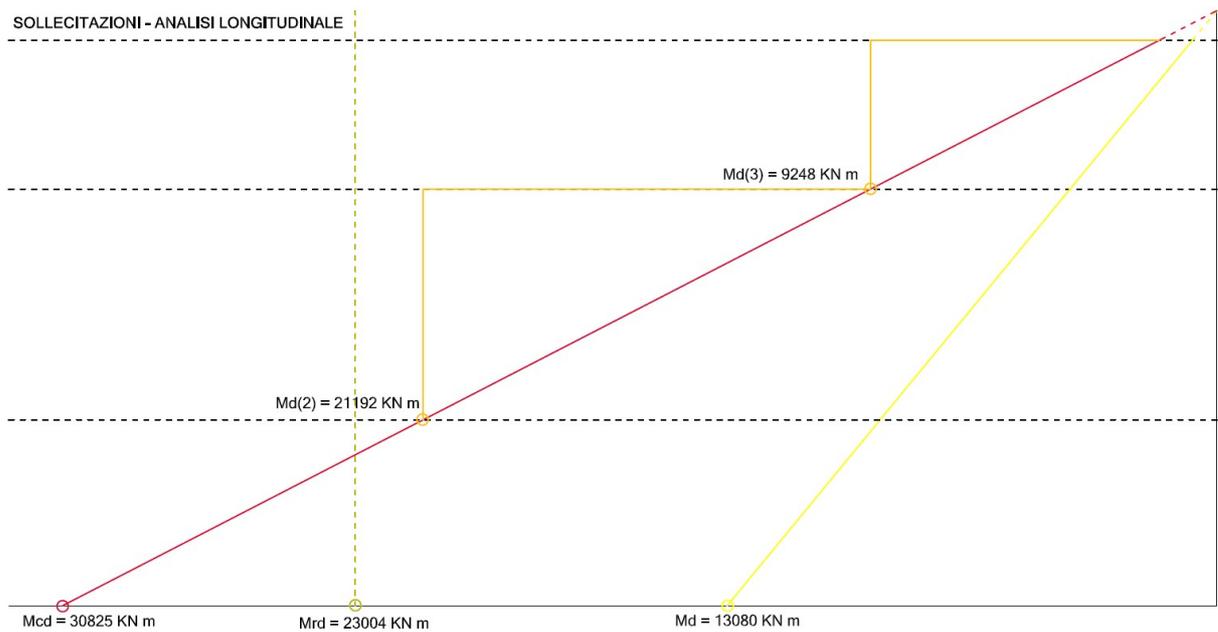


Fig. 25: Sollecitazioni di calcolo - analisi longitudinale

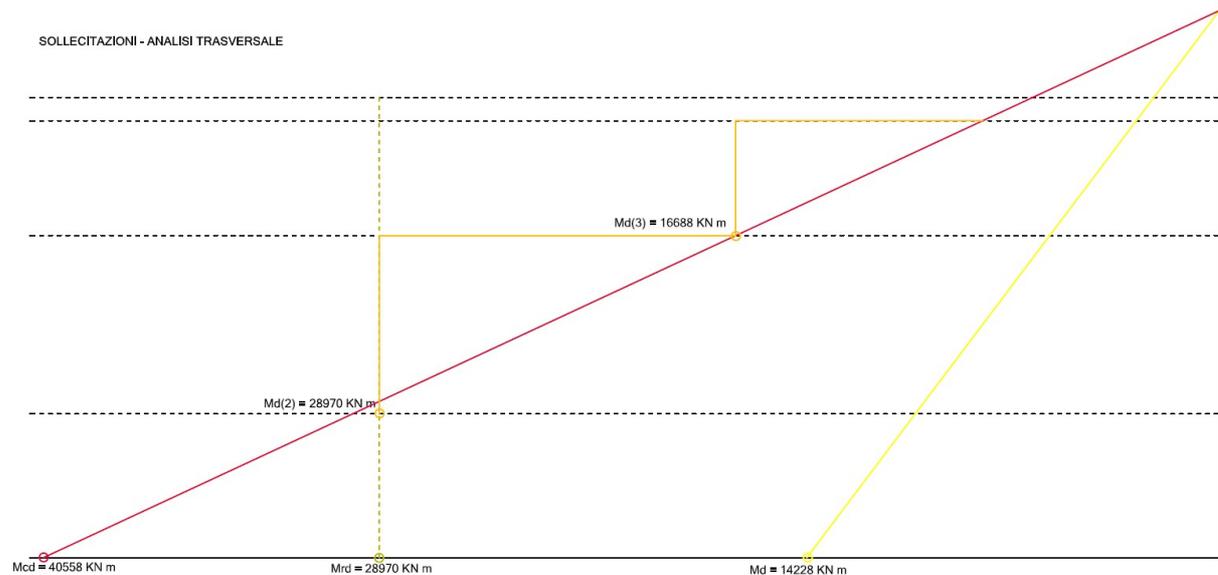


Fig. 26: Sollecitazioni di calcolo - analisi trasversale

Dall'analisi delle sollecitazioni si sono ricavati i momenti di calcolo per le sezioni esterne alla cerniera plastica. Per evitare eccessivi sovradimensionamenti si è suddivisa la sezione esterna in due individuando quindi due momenti di calcolo e si è considerato il contributo di tutta l'armatura presente.

Nell'analisi longitudinale il momento di capacity design è sempre inferiore al momento resistente della sezione in cerniera plastica, mentre nell'analisi trasversale per un tratto esso è superiore; in quest'ultimo caso si è scelto come valore di capacity direttamente il momento resistente. [Punto 8.2.1 Ordinanza].

Riassumendo, per le sezioni fuori cerniera plastica sono stati adottati i seguenti valori:

$N_{Ed} = 11662 \text{ KN}$

	<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
<i>Da +2,5m a +5,6m</i>	$M_{c(2)} = 21192 \text{ KN m}$ $M_d = 8993 \text{ KN m}$	$M_{c(2)} = 28970 \text{ KN m}$ $M_d = 10849 \text{ KN m}$
<i>Da + 5,6m a +7,6m</i>	$M_{c(3)} = 9248 \text{ KN m}$ $M_d = 3924 \text{ KN m}$	$M_{c(3)} = 16688 \text{ KN m}$ $M_d = 5854 \text{ KN m}$

1] Sezione da +2,5m a +5,6 m

Dimensionamento armature longitudinali:

Si è scelto di mantenere la stessa tipologia di ferro, il $\Phi 26$ ($A_b = 530,93 \text{ mm}^2$).

Prescrizioni di normativa:

- $0,3\% \leq \frac{A_s}{A_c} \leq 6\%$; *quantità minima armatura di acciaio a causa della presenza dello sforzo assiale [Testo unico]:*

$A_c = \text{area del calcestruzzo} = \text{area della sezione} = (2 \times 2,5 \times 1000^2) = 5 \times 10^6 \text{ mm}^2$

Si è scelto di ripartire l'armatura necessaria per il 60% nella sezione longitudinale e per il 40% nella sezione trasversale per uniformare la distribuzione dei ferri:

% di A_c		$A_s \text{ totale [mm}^2\text{]}$	<i>Longitudinale [mm}^2\text{]}</i>		<i>Trasversale [mm}^2\text{]}</i>	
			<i>Totale</i>	<i>Tesa</i>	<i>Totale</i>	<i>Tesa</i>
<i>Massima</i>	6	300000	180000	90000	120000	60000
<i>Minima</i>	0,3	15000	9000	<u>4500</u>	6000	<u>3000</u>

Si è dimensionato considerando come momento resistente minimo della sezione quello di capacity design. Quindi, partendo dalla sezione della cerniera plastica, è stata ridotta l'armatura longitudinale di una quantità tale sia da verificare il quantitativo minimo, sia da verificare il criterio delle GR.

Per l'analisi longitudinale si è optato per **13 $\Phi 26$** , mentre per quella trasversale si sono scelti **8 $\Phi 26$** .

Verifiche:

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
$M_{rd}=23951 \text{ KNm} > M_c = 21192 \text{ KNm}$	$M_{rd}=29450 \text{ KNm} > M_c = 28970 \text{ KNm}$
$A_s = 530,93 \times 13 = 6902 \text{ mm}^2 > 4500 \text{ mm}^2$	$A_s = 530,93 \times 8 = 4247 \text{ mm}^2 > 3000 \text{ mm}^2$

Verifica appartenenza al dominio di interazione:

Con EC2 si determina l'appartenenza della sezione al dominio d'interazione:

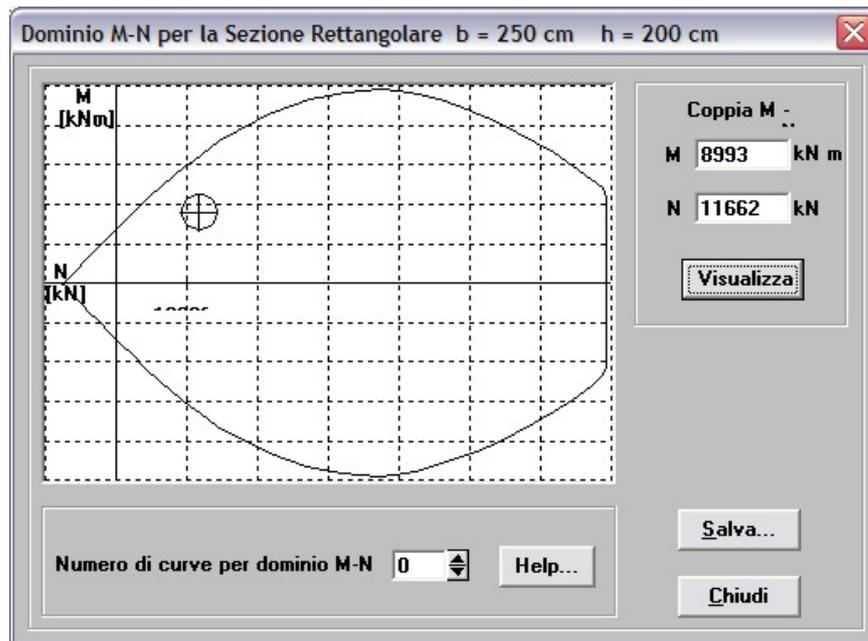


Fig. 27: Dominio d'interazione della sezione da +2,5 m a + 5,6 m: analisi longitudinale

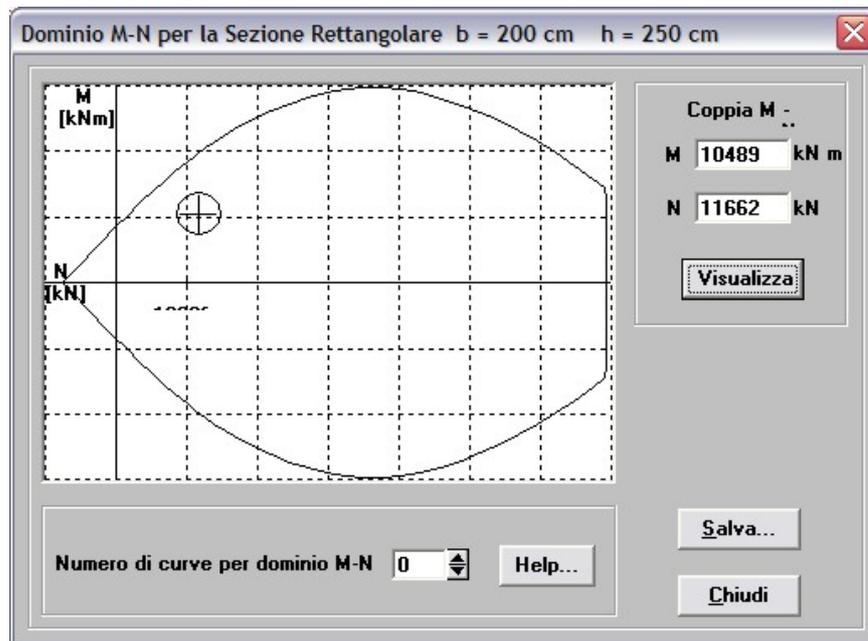


Fig. 28: Dominio d'interazione della sezione da +2,5 m a + 5,6 m: analisi trasversale

Le sezioni sono entrambe verificate.

Scelte progettuali:

	<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
Diametro barra scelto	Φ26 ($A_b = 530,93 \text{ mm}^2$)	Φ26 ($A_b = 530,93 \text{ mm}^2$)
N. di barre adottato	13	8
Interferro	12,24 cm (escluse le zone dove son state ridotte)	16,14 cm (escluse le zone dove son state ridotte)

2] Sezione da +5,6m a +7,6 m**Dimensionamento armature longitudinali:**

- $0,3\% \leq \frac{A_s}{A_c} \leq 6\%$; *quantità minima armatura di acciaio a causa della presenza dello sforzo assiale [Testo unico]:*

$A_c = \text{area del calcestruzzo} = \text{area della sezione} = (2 \times 2,5 \times 1000^2) = 5 \times 10^6 \text{ mm}^2$

Si è scelto di ripartire l'armatura necessaria per il 60% nella sezione longitudinale e per il 40% nella sezione trasversale per uniformare la distribuzione dei ferri:

% di A_c		$A_s \text{ totale [mm}^2\text{]}$	<i>Longitudinale [mm²]</i>		<i>Trasversale [mm²]</i>	
			<i>Totale</i>	<i>Tesa</i>	<i>Totale</i>	<i>Tesa</i>
<i>Massima</i>	6	300000	180000	90000	120000	60000
<i>Minima</i>	0,3	<u>15000</u>	<u>9000</u>	<u>4500</u>	6000	3000

- *Armatura minima di progetto indicata da EC2:*

<i>Longitudinale [mm²]</i>	<i>Trasversale [mm²]</i>
Non è necessaria	Non è necessaria

Scelte progettuali:

	<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
Armatura scelta	$A_s = \underline{4500 \text{ mm}^2}$	$A_s = \underline{3000 \text{ mm}^2}$
Diametro barra scelto	Φ26 ($A_b = 530,93 \text{ mm}^2$)	Φ26 ($A_b = 530,93 \text{ mm}^2$)
N. minimo barre (A_s / A_b)	8,48	5,6
N. di barre adottato	9	6
Interferro	27,1 cm	34,88 cm

Le barre andranno disposte su un'unica fila considerando un copriferro $d' = 5 \text{ cm}$ per entrambe le sezioni.

Verifica appartenenza al dominio di interazione:

Con EC2 si determina l'appartenenza o meno della sezione al dominio d'interazione ed il relativo momento resistente (si considerano i contributi di tutte le armature presenti):

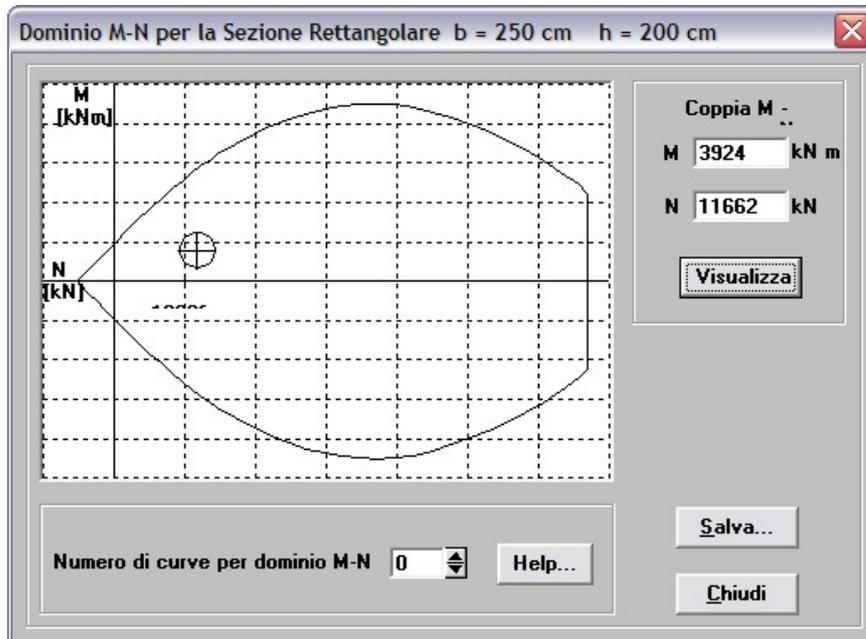


Fig. 29: Dominio d'interazione della sezione da +5,6 m a + 7,6 m: analisi longitudinale

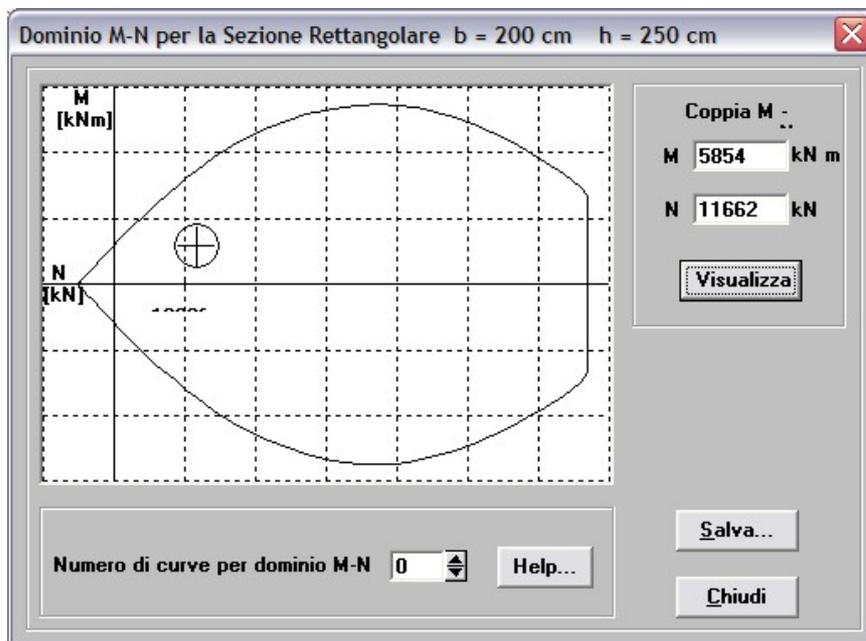


Fig. 30: Dominio d'interazione della sezione da +5,6 m a + 7,6 m: analisi trasversale

Longitudinale	Trasversale
$M_{rd(3)} = 18940 \text{ KNm} > M_c = 9248 \text{ KNm}$	$M_{rd(3)} = 24788 \text{ KNm} > M_c = 16688 \text{ KNm}$

Per entrambe le analisi la sezione risulta verificata.

DETTAGLI COSTRUTTIVI

Determinazione della lunghezza d'ancoraggio

Per il calcolo della lunghezza d'ancoraggio delle barre ci si riferisce al modello fisico delle bielle di calcestruzzo compresse a 45° secondo la relazione generale:

$T = \int_0^{L_b} \tau_a \pi \phi dx$ con $T = A_s f_{yd}$, ϕ = diametro barra longitudinale e τ_a = tensione massima data dall'aderenza tra la barra e il calcestruzzo che secondo l'attuale normativa si pone pari a $\tau_a = 2,25 f_{ctd}$. Tuttavia essendo in condizioni di aderenza mediocri (la struttura non è perfetta e gli ancoraggi sono inclinati di 0°) secondo l'Eurocodice 2 si può considerare il 50% della suddetta τ_a .

Si ottiene quindi la lunghezza d'ancoraggio della barra:
$$L_b = \frac{\phi}{4} \frac{f_{yd}}{\frac{1}{2} 2,25 f_{ctd}}$$

Le barre in cerniera plastica sono collegate inferiormente ai ferri uscenti dal palo di fondazione, mentre superiormente quelle che non costituiscono l'armatura delle sezioni superiori devono essere ancorate per una lunghezza pari a:

$$L_b = (26 / 4) \times (2 \times 391,3 / (2,25 \times 1,24)) = 70,13 \quad \phi = 1823 \text{ mm.}$$

Per sicurezza si è scelto di adottare una $L_b = 80 \phi = 2080 \text{ mm}$.

L'intraferro è di 12,24 cm, quindi sufficiente per la biella di cls compressa.

Anche le barre della sezione da +2,5m a +5,6m necessitano di ancoraggio pari sempre a 2,08m. La sezione da +5,6m a +7,6 m però è alta solo 2m. Si è quindi scelto di adottare anche per questa sezione la stessa armatura di quella inferiore e di far terminare superiormente le barre con ripiegature verso l'interno per una lunghezza pari a $L = 10 \phi = 26 \text{ cm}$ mantenendo un copriferro superiore di 5cm.

Riduzione dei ferri

La riduzione dei ferri nella sezione superiore è stata effettuata mantenendo simmetrica la disposizione delle barre, cercando di omogeneizzare l'interferro in previsione della verifica della distanza tra i bracci delle armature di confinamento e infine considerando comunque la deviazione dell'asse neutro preferendo la riduzione nella parte centrale della sezione piuttosto che agli spigoli.

Lunghezza massima

Nessuna barra è lunga più di 12 m.

Taglio

Secondo il criterio della gerarchia delle resistenze anche per il dimensionamento a taglio si considera l'amplificazione dello sforzo, utilizzando la relazione $V_c = V_e \frac{M_{cd}}{M_e}$

[Punto 8.4.1 Ordinanza] con V_e = taglio di calcolo e M_{cd} e M_e calcolati in cerniera plastica.

Ne consegue che le sezioni verranno dimensionate secondo questi valori:

	<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
V_e	1635 KN	1495 KN
M_{rd}	23004 KNm	28970 KN m
M_{cd}	30825 KNm	40558 KN m
V_c	3853 KN	4261 KN

Verifica presenza armature per duttilità [Punto 8.4.2 Ordinanza]

Le armature di confinamento per conferire duttilità alle zone di cerniera plastica sono necessarie se lo sforzo assiale ridotto risulta $\eta_k \leq 0,08$.

$\eta_k = 0,08 \leq 0,08 \Rightarrow$ Armature necessarie.

Percentuale meccanica minima di armatura per cerniera plastica [Punto 8.4.2.1 Ordinanza]

Per le sezioni rettangolari la percentuale minima di armatura di confinamento nelle zone di cerniera plastica necessaria è data dalla seguente espressione:

$$\omega_{wd,r min} = 0,33 \frac{A_c}{A_{cc}} \eta_k - 0,07 \geq 0,12$$

con A_{cc} = area del nucleo confinato di cls = $(b - 2xd') \times (h - 2xd')$.

$$A_{cc} = (2400 \times 1900) = 4,56 \times 10^6 \text{ mm}^2$$

$$\omega_{min} = 0,33 \times (5 \times 10^6 / 4,56 \times 10^6) \times 0,08 - 0,07 = -0,04 \Rightarrow \text{si sceglie } \underline{\omega_{min} = 0,12}$$

Per le staffe si è optato per ferri $\Phi 14$ a **6 braccia** ($A_{sw} = 153,94 \times 6 = 923,63 \text{ mm}^2$), di conseguenza in base alla definizione della percentuale meccanica di armatura è possibile definire il minimo del rapporto A_{sw} / s con il quale è possibile effettuare i dimensionamenti e le verifiche:

$\omega_{wd,r min} = \frac{A_{sw}}{s} \frac{f_{yd}}{b f_{cd}} \rightarrow \frac{A_{sw}}{s} = \omega_{wd,r min} \frac{b f_{cd}}{f_{yd}}$ con b = dimensione della sezione in direzione normale a quella dei bracci delle staffe:

	<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
b	$2400 + 2 \times 14 = 2428 \text{ mm}$	$1900 + 2 \times 14 = 1928 \text{ mm}$
$\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{min}$	$0,12 \times (2428 \times 18,42 \times 1000 / 391,3) = 13716,07 \text{ mm}^2/\text{m}$	$0,12 \times (1928 \times 18,42 \times 1000 / 391,3) = 10891,51 \text{ mm}^2/\text{m}$

1) CERNIERA PLASTICA

Quantità minima armatura

Nelle zone di cerniera plastica, oltre alle prescrizioni del testo unico, va considerata l' A_{sw} / s minima precedentemente calcolata:

- $\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{min}$; quantità minima precedentemente calcolata:

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
<u>13716,07 mm²/m</u>	<u>10891,51 mm²/m</u>

- $\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{min} \geq 1,5 \cdot b$; prescrizione testo unico:

b = larghezza del nucleo confinato

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
3600 mm ² /m	2850 mm ² /m

La A_{sw} / s minima scelta è quindi:

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
<u>13716,07 mm²/m</u>	<u>10891,51 mm²/m</u>

Interasse staffe massimo

- $s \leq \min[33 \text{ cm} ; 0,8 d]$; prescrizione testo unico:

d = altezza del nucleo confinato

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
33 cm	33 cm

- $s \leq 12 \cdot \phi_{l,min}$; prescrizione testo unico in prossimità degli appoggi:

$\phi_{l,min}$ = diametro della barra longitudinale più piccola (qui è 26 mm)

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
31,2 cm	31,2 cm

- $s \leq \frac{A_{sw}}{(A_{sw}/s)_{min}}$; prescrizione testo unico:

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
<u>6,73 cm</u>	<u>8,48 cm</u>

- *Il passo non deve essere superiore a 6 volte il diametro delle barre longitudinali*
[Punto 8.4.2 .2 Ordinanza]

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
15,6 cm	15,6 cm

- *Il passo non deve essere superiore a 1/5 del diametro del nucleo della sezione interna alle barre longitudinali* [Punto 8.4.2 .2 Ordinanza]

Si considera il cerchio inscritto nella sezione interna alle barre longitudinali che ha come dimensione minima la h pila - 2xd' - 2x26 = 200 - 10 - 5,2 = 184,4 cm:

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
36,96 cm	36,96 cm

Il passo scelto è quindi:

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
<u>6 cm</u>	<u>6 cm</u>

Si è scelto lo stesso valore per semplificare la fase costruttiva in cantiere.

Dimensionamento tiranti contro lo svergolamento delle barre longitudinali

[Punto 8.4.2 .2 Ordinanza]

Nelle zone di cerniera plastica tutte le barre longitudinali devono essere trattenute da un braccio di staffa o da un tirante per evitare il loro svergolamento.

L'area dei bracci necessaria è data da:

$$\frac{A_t}{s} = \sum A_s f_{ys} \frac{1}{1,6 f_{yt}} \quad \text{con } f_{ys} = f_{yt} \text{ (stesso acciaio per barre longitudinali e staffe) e}$$

ΣA_s = somma delle aree delle barre longitudinali trattenute da un braccio, quindi è dato da n volte l'area della singola barra dove n è il numero dei bracci trattenuti, ovvero $nA_s = 530,93 \text{ mm}^2$.

In questo caso si predefinisce l'interasse dei tiranti, facendolo coincidere con quello delle staffe già presenti per semplificare la fase costruttiva in cantiere.

Quindi $s = 6 \text{ cm} = 0,06 \text{ m}$.

Ogni barra longitudinale è trattenuta almeno da due braccia di staffa poiché a seguito del dimensionamento a taglio si è optato per entrambe le analisi l'uso dello stesso passo. Quindi $A_{sw} = 2 \times 153,94 = 307,88 \text{ mm}^2$.

Nel dimensionamento delle spille si è seguito il criterio consigliato dall' Eurocodice 8 considerando nell'analisi longitudinale tiranti (braccia di staffe o spille) alternati; nell'analisi trasversale si è dovuto invece rispettare il vincolo della distanza minima per le sezioni rettangolari tra i bracci delle staffe o dei tiranti, pari a 20 cm.

Per i tiranti si son scelti ferri $\Phi 14$ (**spilla ad un braccio**) per semplicità costruttiva in cantiere. Ogni spilla trattiene 2 barre longitudinali, quindi:

$$At / s = A_s / 1,6 = (2 \times 530,93) / 1,6 = 1061,86 / 1,6 = 663,66 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$At_{\min} = 663,66 \times 0,06 = \underline{39,82 \text{ mm}^2}.$$

$$A_{sw} = 153,94 \text{ mm}^2 > At_{\min} = 39,82 \text{ mm}^2 \Rightarrow \underline{\text{Tiranti verificati.}}$$

Per la verifica delle staffe si è scelta la condizione più gravosa, ovvero si è determinata la staffa che abbraccia più ferri in tutta la sezione escludendo ovviamente dal conteggio le barre trattenute dalle spille.

$$N. \text{ max} = 13.$$

$$At / s = A_s / 1,6 = (13 \times 530,93) / 1,6 = 6902 / 1,6 = 4314 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$At_{\min} = 4314 \times 0,06 = \underline{258,82 \text{ mm}^2}.$$

$$A_{sw} = 307,88 \text{ mm}^2 > 258,82 \text{ mm}^2 \Rightarrow \underline{\text{Staffe verificate.}}$$

VERIFICHE A TAGLIO [Punto 8.2.3.1 Ordinanza]

- Compressione diagonale dell'anima

$$V_c \leq V_{Rde} \text{ con:}$$

- V_c = sforzo di taglio di calcolo

- V_{rde} = resistenza a taglio corrispondente allo schiacciamento del conglomerato compresso a degradazione avvenuta, data da:

$$V_{Rde} = 0,257 \cdot v \cdot f_{ck} \cdot b_w \cdot d_c$$

$$- v = 0,7 - \frac{f_{ck}}{200} \geq 0,5$$

- b_w e d_c = larghezza e altezza dell'anima

$$v = 0,55$$

$$V_{rde} = 20208 \text{ KN}$$

$$V_{rde} = 20208 > \text{MAX} [3853 \text{ KN}; 4261 \text{ KN}] \Rightarrow \text{VERIFICATO}$$

- Verifica dell'armatura

$$V_c \leq V_{cde} + V_{wd} \text{ con:}$$

- V_c = sforzo di taglio di calcolo

- V_{cde} = contributo del cls a degradazione avvenuta

- V_{wd} = contributo dell'armatura: $V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{yd}$

- A_{sw} e s = area e interasse delle staffe

Essendo $\eta_k < 0,1$ si ha che $V_{cde} = 0$

$$A_{sw} / s \text{ adottato} = 15394 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$V_{wd} = 10572 \text{ KN} > \text{MAX} [3853 \text{ KN}; 4261 \text{ KN}] \Rightarrow \text{VERIFICATO}$$

Riassunto scelte progettuali per la cerniera plastica

Staffe		
Tipo	Φ14 a 4 braccia	
Passo	6 cm	
$\frac{A_{sw}}{s}$	15394 mm ² /m	
Spille		
Tipo	Φ14 ad 1 braccio	
Passo	6 cm	
Quantità	Longitudinale	Trasversale
	3	5

2) FUORI CERNIERA PLASTICA

Per una lunghezza pari a quella di cerniera plastica deve essere disposta un'armatura di confinamento gradualmente decrescente, in misura non inferiore in totale a metà di quella necessaria nel tratto precedente. [Punto 8.4.2.2 Ordinanza]

1] Sezione da +2,5m a +5m

Quantità minima armatura

– $\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{min}$; metà della quantità adottata in cerniera plastica:

$$A_{sw} / s = 15394 / 2 = \underline{7697 \text{ mm}^2 / \text{m}}$$

– $\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{min} \geq 1,5 \cdot b$; prescrizione testo unico:

b = larghezza del nucleo confinato

Longitudinale	Trasversale
3600 mm ² /m	2850 mm ² /m

La A_{sw} / s minima scelta è quindi:

Longitudinale	Trasversale
<u>7697 mm² / m</u>	<u>7697 mm² / m</u>

Interasse staffe massimo

- $s \leq \min [33 \text{ cm} ; 0,8 d]$; *prescrizione testo unico:*

d = altezza del nucleo confinato

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
33 cm	33 cm

- $s \leq \frac{A_{sw}}{(A_{sw}/s)_{min}}$; *prescrizione testo unico:*

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
<u>12,005 cm</u>	<u>12,005 cm</u>

- *Il passo non deve essere superiore a 6 volte il diametro delle barre longitudinali*
[Punto 8.4.2 .2 Ordinanza]

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
15,6 cm	15,6 cm

- *Il passo non deve essere superiore a 1/5 del diametro del nucleo della sezione interna alle barre longitudinali* [Punto 8.4.2 .2 Ordinanza]

Si considera il cerchio inscritto nella sezione interna alle barre longitudinali che ha come dimensione minima la h pila - 2xd' - 2x26 = 200 - 10 - 5,2 = 184,4 cm:

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
36,96 cm	36,96 cm

Il passo scelto è quindi:

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
<u>12 cm</u>	<u>12 cm</u>

Verifica distanza braccia staffe o tiranti aggiuntivi [Punto 8.4.2.2 Ordinanza]

Nelle sezioni rettangolari i bracci delle staffe o dei tiranti aggiuntivi devono rispettare le seguenti prescrizioni:

- *distanza minore di 1/3 della dimensione minima del nucleo confinato:*
 $d < (1900 - 26) / 3 = 624,7 \text{ mm}$
- *distanza minore di 350 mm:*
 $d < 350 \text{ mm}$
- *distanza maggiore di 200 mm:*
 $d > 200 \text{ mm}$

Nelle figure 31 e 32 si possono evidenziare le distanze tra le staffe e le spille; in rosso sono indicate le distanze che non verificavano le prescrizioni, corrette con l'introduzione delle spille:

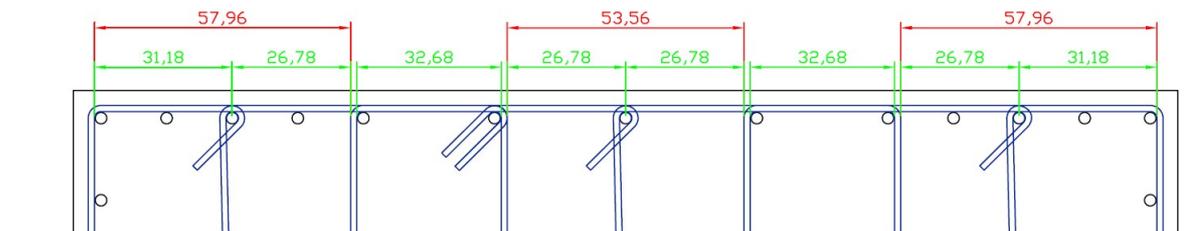


Fig. 31: Distanze tra barre e spille - sezione longitudinale (da +2,5m a +7,6 m)

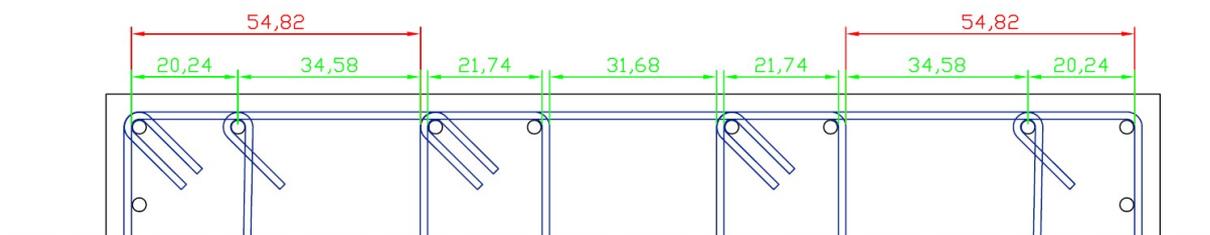


Fig. 32: Distanze tra barre e spille - sezione trasversale (da +2,5m a +7,6 m)

VERIFICHE A TAGLIO [Punto 8.2.3.2 Ordinanza]

- Compressione diagonale dell'anima

$$V_c \leq V_{Rd2} \text{ con:}$$

- V_c = sforzo di taglio di calcolo

$$- V_{Rd2} = \min[V_{wd} + V_{cu}; 2 \cdot V_{wd}]$$

$$- V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{yd}$$

- A_{sw} e s = area ed interasse delle staffe

$$- V_{cu} = 0,3 \cdot b_w \cdot d_u \cdot f_{cd}$$

- b e d = larghezza e altezza dell'anima; d_u = altezza utile della sezione

$$A_{sw} / s \text{ adottato} = 7697 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

Longitudinale	Trasversale
$V_{cu} = 25863 \text{ KN}$	$V_{cu} = 25725 \text{ KN}$
$V_{wd} = 5286 \text{ KN}$	$V_{wd} = 6641 \text{ KN}$
$V_{rd2} = 10572 \text{ KN}$	$V_{rd2} = 13282 \text{ KN}$

$$10572 \text{ KN} > 3853 \text{ KN} \Rightarrow \text{VERIFICATO}$$

$$13282 \text{ KN} > 4261 \text{ KN} \Rightarrow \text{VERIFICATO}$$

- **Verifica dell'armatura**

$V_c \leq V_{cd} + V_{wd}$ con:

- V_c = sforzo di taglio di calcolo
- $V_{cd} = 0,6 \cdot b_w \cdot d_c \cdot f_{ctd} \cdot \delta$; si pone $\delta = 1$ a favore di sicurezza (si trascura l'aiuto dello sforzo di compressione)
- $V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{yd}$
- A_{sw} e s = area e interasse delle staffe
- b_w e d = larghezza ed altezza anima; d_c = altezza utile sezione

A_{sw} / s adottato = 7697 mm²/m

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
$V_{cd} = 3489$ KN	$V_{cu} = 3467$ KN
$V_{wd} = 5286$ KN	$V_{wd} = 6641$ KN
$V_{rd2} = 8775$ KN	$V_{rd2} = 10108$ KN

8775 KN > 3853 KN ⇒ VERIFICATO

10108 KN > 4261 KN ⇒ VERIFICATO

Le verifiche sono automaticamente estese al resto della sezione nella quale c'è il passaggio graduale d'infittimento delle staffe.

Riassunto scelte progettuali per la sezione da +2,5m a +5m

<i>Staffe</i>		
<i>Tipo</i>	Φ14 a 4 braccia	
<i>Passo</i>	Graduale da 6 a 12 cm	
$\frac{A_{sw}}{s}$	7697 mm ² /m	
<i>Spille</i>		
<i>Tipo</i>	Φ14 ad 1 braccio	
<i>Passo</i>	Graduale da 6 a 12 cm	
<i>Quantità</i>	<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
	3	2

1] Sezione da +5m a +7,6m

Quantità minima armatura

- $\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{min} \geq 1,5 \cdot b$; *prescrizione testo unico:*

b = larghezza del nucleo confinato

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
3600 mm ² /m	2850 mm ² /m

La A_{sw} / s minima scelta è quindi:

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
<u>3600 mm²/m</u>	<u>2850 mm²/m</u>

Interasse staffe massimo

- $s \leq \min[33 \text{ cm}; 0,8 d]$; *prescrizione testo unico:*

d = altezza del nucleo confinato

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
33 cm	33 cm

- $s \leq \frac{A_{sw}}{(A_{sw}/s)_{min}}$; *prescrizione testo unico:*

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
25,66 cm	32,41 cm

- *Il passo non deve essere superiore a 6 volte il diametro delle barre longitudinali*
[Punto 8.4.2 .2 Ordinanza]

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
<u>15,6 cm</u>	<u>15,6 cm</u>

- *Il passo non deve essere superiore a 1/5 del diametro del nucleo della sezione interna alle barre longitudinali* [Punto 8.4.2 .2 Ordinanza]

Si considera il cerchio inscritto nella sezione interna alle barre longitudinali che ha come dimensione minima la h pila - 2xd' - 2x26 = 200 - 10 - 5,2 = 184,4 cm:

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
36,96 cm	36,96 cm

Il passo scelto è quindi:

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
<u>15 cm</u>	<u>15 cm</u>

Verifica distanza braccia staffe o tiranti aggiuntivi [Punto 8.4.2.2 Ordinanza]

In seguito all'analisi dei dettagli costruttivi dell'armatura longitudinale della sezione da +2,5m a +5,6m si è stabilito di prolungare le barre fino alla sommità della pila, quindi l'armatura sarà la stessa e di conseguenza anche le prescrizioni sulla distanza dei bracci delle staffe e dei tiranti, riassunti in fig. 30 e 31.

VERIFICHE A TAGLIO [Punto 8.2.3.2 Ordinanza]

– **Compressione diagonale dell'anima**

$$V_c \leq V_{Rd2} \quad \text{con:}$$

– V_c = sforzo di taglio di calcolo

$$V_{Rd2} = \min[V_{wd} + V_{cu}; 2 \cdot V_{wd}]$$

$$V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{yd}$$

– A_{sw} e s = area ed interasse delle staffe

$$V_{cu} = 0,3 \cdot b_w \cdot d_u \cdot f_{cd}$$

– b e d = larghezza e altezza dell'anima; d_u = altezza utile della sezione

$$A_{sw} / s \text{ adottato} = 6157 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
$V_{cu} = 25863 \text{ KN}$	$V_{cu} = 25725 \text{ KN}$
$V_{wd} = 4229 \text{ KN}$	$V_{wd} = 5313 \text{ KN}$
$V_{rd2} = 8458 \text{ KN}$	$V_{rd2} = 10626 \text{ KN}$

$$8458 \text{ KN} > 3853 \text{ KN} \Rightarrow \text{VERIFICATO}$$

$$10626 \text{ KN} > 4261 \text{ KN} \Rightarrow \text{VERIFICATO}$$

– **Verifica dell'armatura**

$$V_c \leq V_{cd} + V_{wd} \quad \text{con:}$$

– V_c = sforzo di taglio di calcolo

– $V_{cd} = 0,6 \cdot b_w \cdot d_c \cdot f_{cd} \cdot \delta$; si pone $\delta = 1$ a favore di sicurezza (si trascura l'aiuto dello sforzo di compressione)

$$V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{yd}$$

– A_{sw} e s = area e interasse delle staffe

- b_w e d = larghezza ed altezza anima; d_c = altezza utile sezione
 A_{sw} / s adottato = $6157 \text{ mm}^2 / \text{m}$

<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
$V_{cd} = 3489 \text{ KN}$	$V_{cu} = 3467 \text{ KN}$
$V_{wd} = 4229 \text{ KN}$	$V_{wd} = 5313 \text{ KN}$
$V_{rd2} = 7718 \text{ KN}$	$V_{rd2} = 8780 \text{ KN}$

$7718 \text{ KN} > 3853 \text{ KN} \Rightarrow \text{VERIFICATO}$

$8780 \text{ KN} > 4261 \text{ KN} \Rightarrow \text{VERIFICATO}$

Riassunto scelte progettuali per la sezione da +5m a +7,6m

<i>Staffe</i>		
<i>Tipo</i>	$\Phi 14$ a 4 braccia	
<i>Passo</i>	15 cm	
$\frac{A_{sw}}{s}$	$6157 \text{ mm}^2 / \text{m}$	
<i>Spille</i>		
<i>Tipo</i>	$\Phi 14$ ad 1 braccio	
<i>Passo</i>	15 cm	
<i>Quantità</i>	<i>Longitudinale</i>	<i>Trasversale</i>
	3	2

DETTAGLI COSTRUTTIVI STAFFE [Punto 8.4.2.2. Ordinanza]

Tutte le armature di confinamento, staffe, tiranti o spirali, devono terminare con piegature a 135° che si ancorano verso l'interno per una lunghezza minima di 10 diametri; in questo caso la lunghezza minima è data da $\underline{L} = 14 \times 10 = \underline{140 \text{ mm}}$.

Nella zona di cerniera plastica non sono consentite giunzioni di qualsiasi tipo delle barre longitudinali.

Nella zona da +2,5m a +5m di passaggio graduale del passo delle staffe si è scelto per velocizzare i lavori di costruzione di utilizzare solo 3 passi diversi (6 cm, 9 cm e 12 cm).

Riepilogo armature

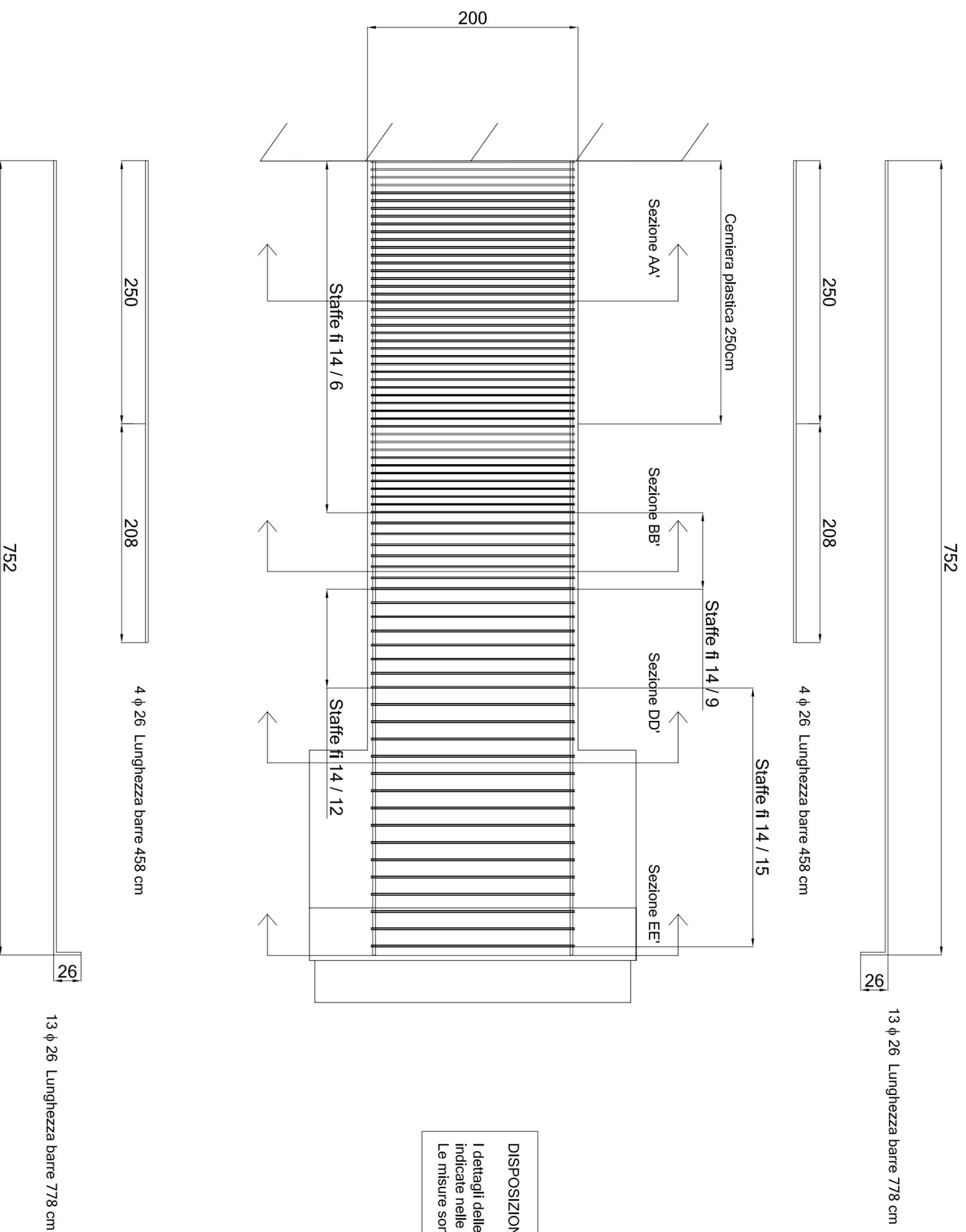
Riepilogo generale delle armature adottate per la pila:

Da 0 a 2,5 m (sezione A-A')	17 \varnothing 26 Interferro: 12,24 cm Unica fila Copriferro: 5 cm	11 \varnothing 26 Interferro: 16,14 cm Unica fila Copriferro: 5 cm	35 staffe a 6 braccia \varnothing 14 / 6 cm Spille a 1 braccio \varnothing 14 / 6 cm disposte: 3 nella sezione longitudinale 5 nella sezione trasversale
Da 2,5 m a 4,6 m (sezione B-B')	13 \varnothing 26 + 4 \varnothing 26 (ancoraggio barre) Interferro: 12,24 cm Unica fila Copriferro: 5 cm	8 \varnothing 26 + 3 \varnothing 26 (ancoraggio barre) Interferro: 16,14 cm Unica fila Copriferro: 5 cm	11 staffe a 6 braccia \varnothing 14 / 6 cm da + 2cm 7 staffe a 6 braccia \varnothing 14 / 9 cm 7 staffe a 6 braccia \varnothing 14 / 12 cm Spille a 1 braccio \varnothing 14 cm disposte: 3 nella sezione longitudinale 2 nella sezione trasversale (il passo segue quello delle staffe)
Da 4,6 m a 5 m (sezione C-C')	13 \varnothing 26 (interferro: vedi dis.) Unica fila Copriferro: 5 cm	8 \varnothing 26 (interferro: vedi dis.) Unica fila Copriferro: 5 cm	
Da 5 m a 7,52 m (sezione D-D')			15 staffe a 6 braccia \varnothing 14 / 15 cm da + 4cm Spille a 1 braccio \varnothing 14 / 15 cm disposte: 3 nella sezione longitudinale 2 nella sezione trasversale
Da 7,52 m a 7,6 m (sezione E-E')	Ancoraggio terminale superiore: Ripiegamento verso l'interno delle barre		

	Cerniera plastica
	Fuori cerniera plastica

Le sezioni si riferiscono ai disegni esecutivi.

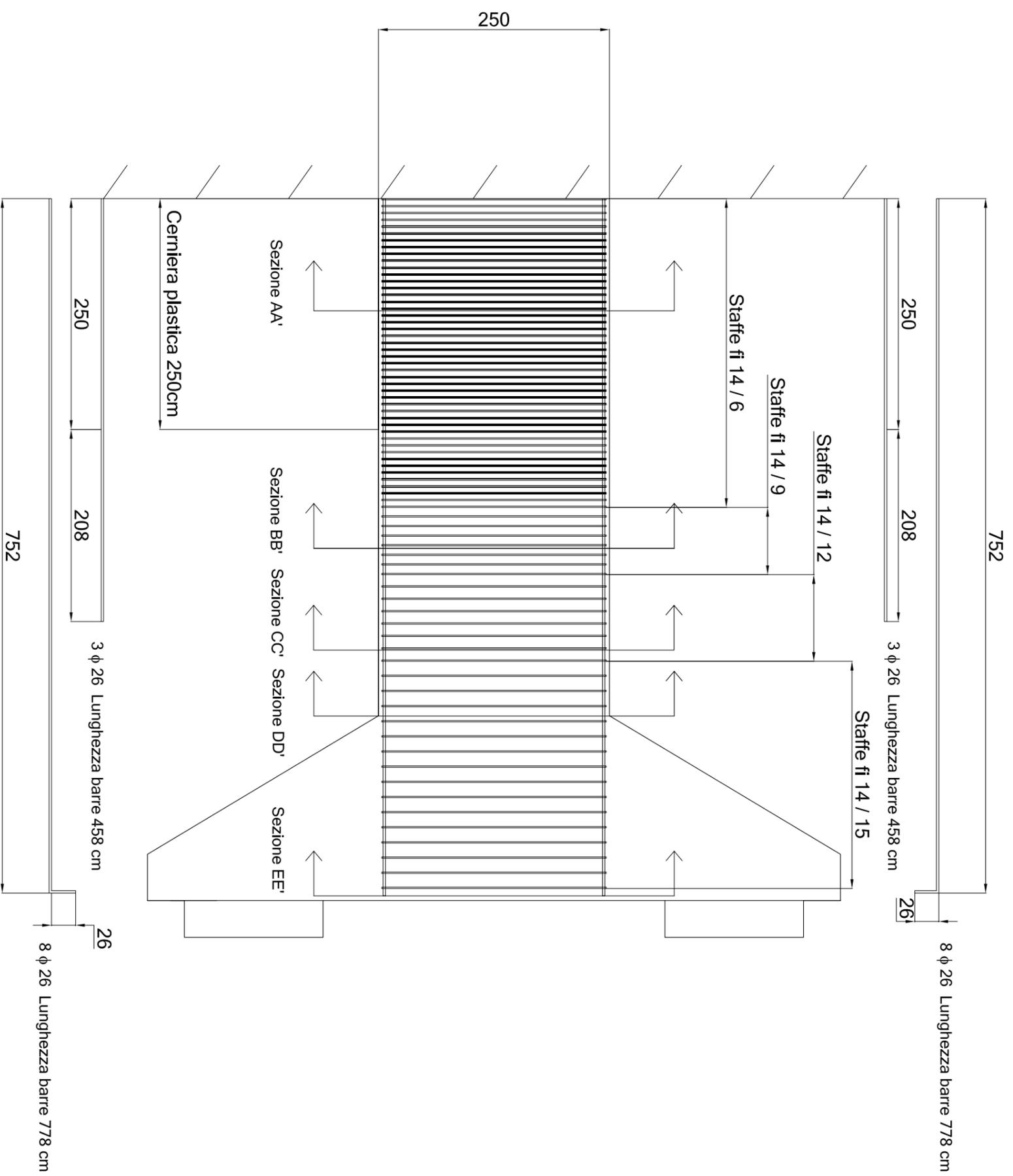
TAVOLA 1: DISPOSIZIONE ARMATURA SEZIONE LONGITUDINALE - SCALA 1:40



DISPOSIZIONE FERRI

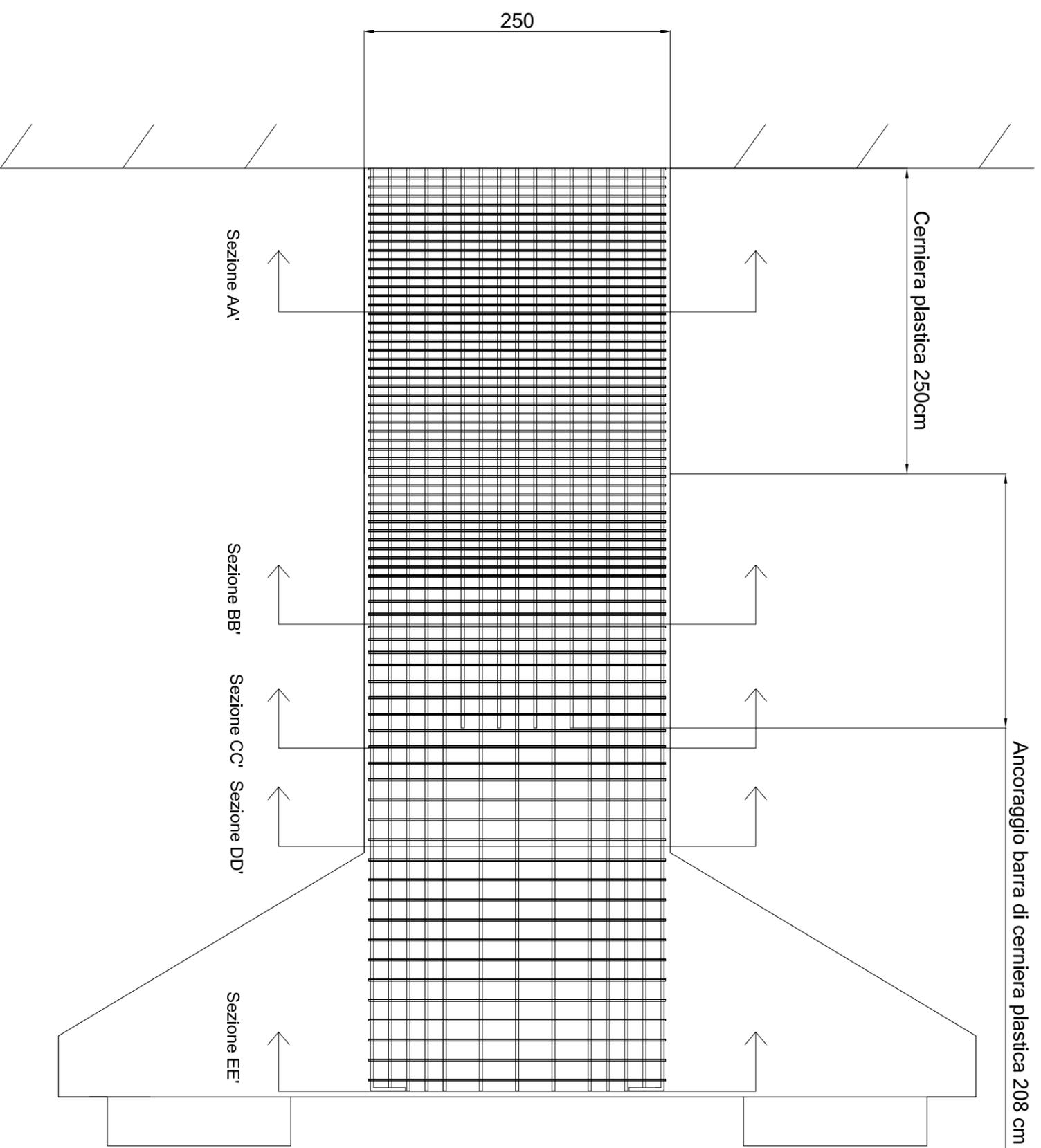
I dettagli delle armature sono indicate nelle relative sezioni. Le misure sono riportate in cm.

TAVOLA 2: DISPOSIZIONE ARMATURA SEZIONE TRASVERSALE - SCALA 1:50



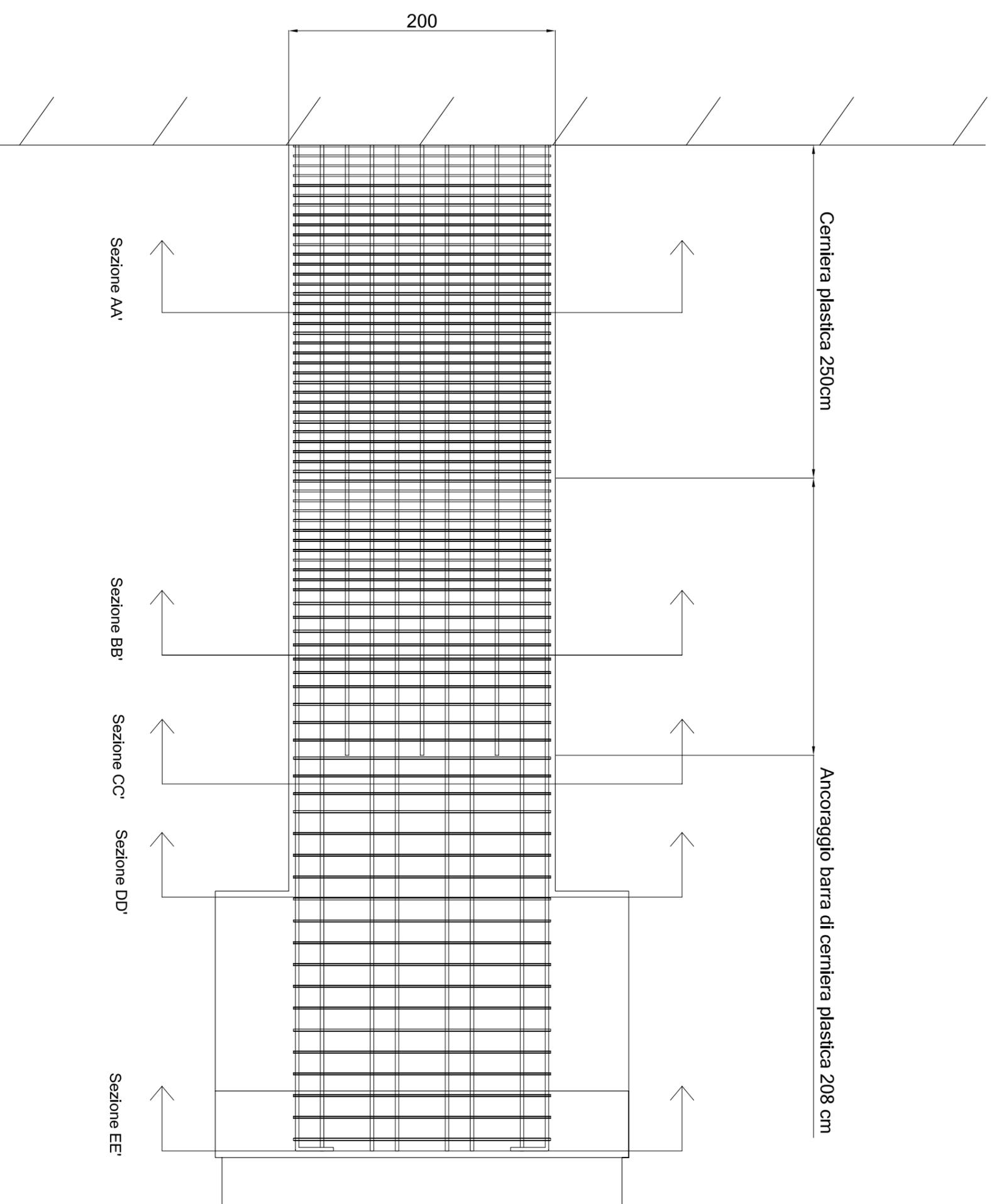
DISPOSIZIONE FERRI
 I dettagli delle armature sono indicate nelle relative sezioni. Le misure sono riportate in cm.

TAVOLA 3: DISPOSIZIONE REALE ARMATURE SEZ. LONGITUDINALE - SCALA 1:40



DISPOSIZIONE REALE FERRI
I dettagli delle armature sono
indicate nelle relative sezioni.
Le misure sono riportate in cm.

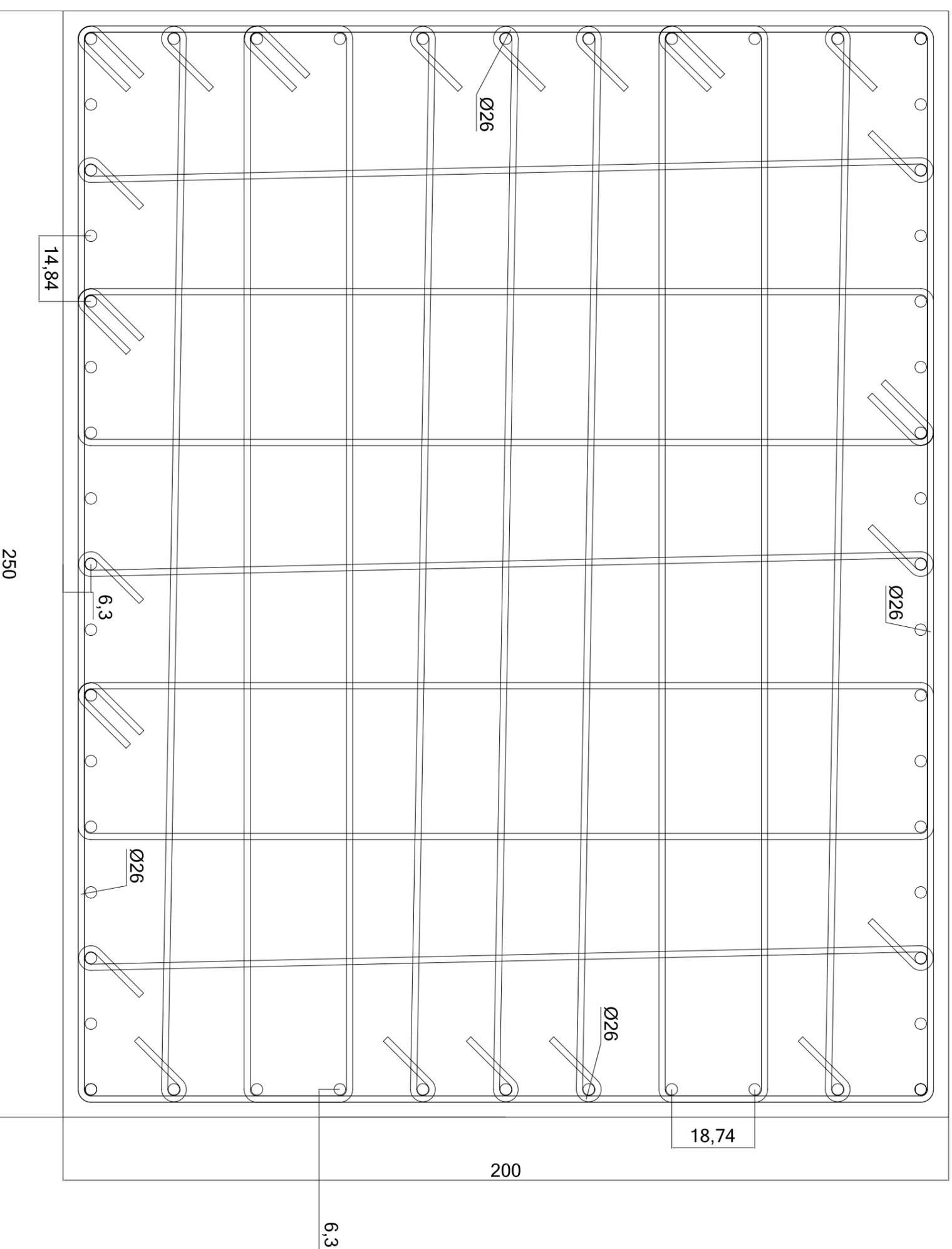
TAVOLA 4: DISPOSIZIONE REALE ARMATURE SEZ. TRASVERSALE - SCALA 1:30



DISPOSIZIONE REALE FERRI
I dettagli delle armature sono indicate nelle relative sezioni. Le misure sono riportate in cm.

TAVOLA 5: SEZIONE AA' VISTA COMPLETA - SCALA 1:10

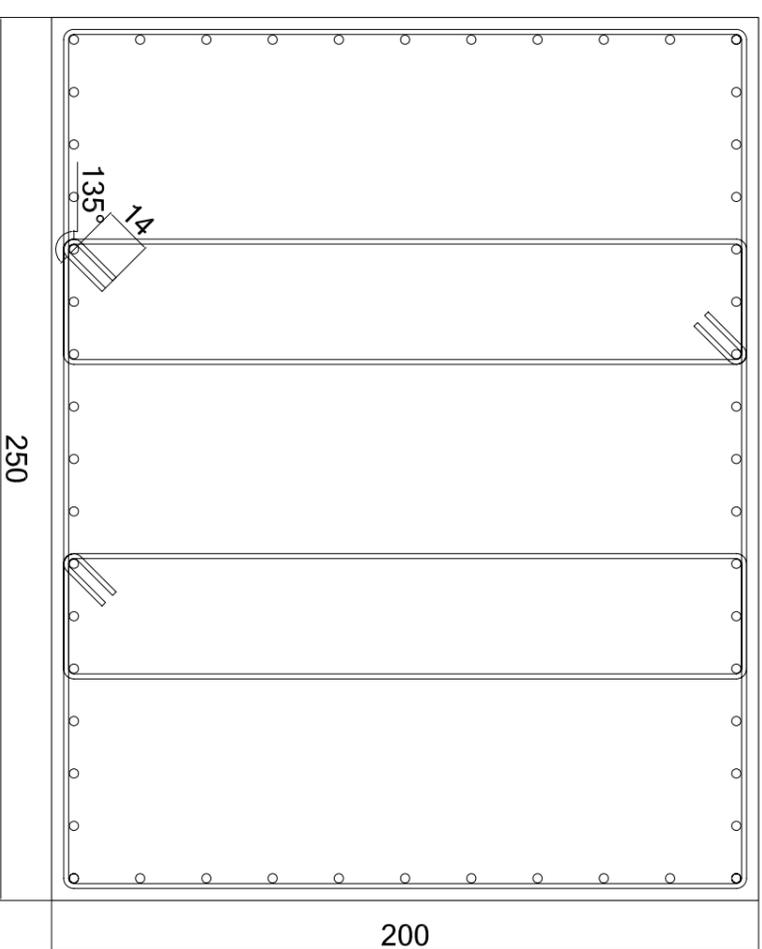
COMPLETA



SEZIONE DA 0 m A +2,5 m
I dettagli della disposizione delle
staffe e delle spille sono riportati
in tavola n e in tavola n+1
Le misure sono riportate in cm.

TAVOLA 6: SEZIONE AA' DISPOSIZIONE STAFFE - SCALA 1:20

STAFFE LONGITUDINALI



SEZIONE DA 0 m A +2,5 m
Si usano 3 staffe ϕ 14 a 2 braccia
disposte come in figura.
Le misure sono riportate in cm.

STAFFE TRASVERSALI

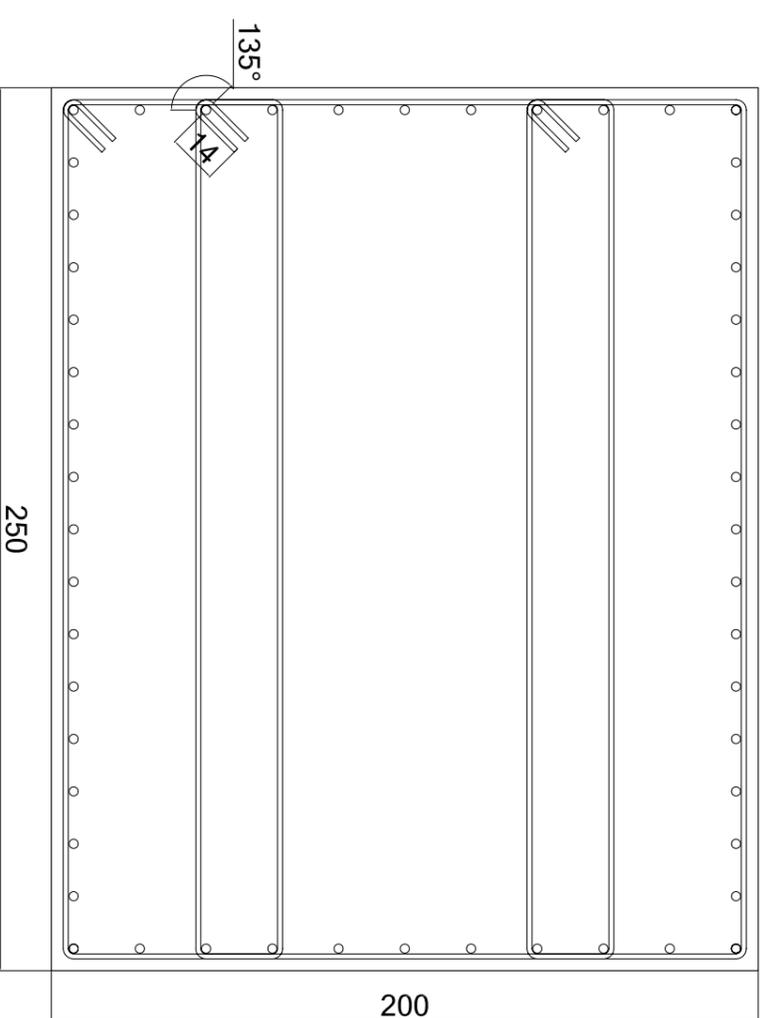
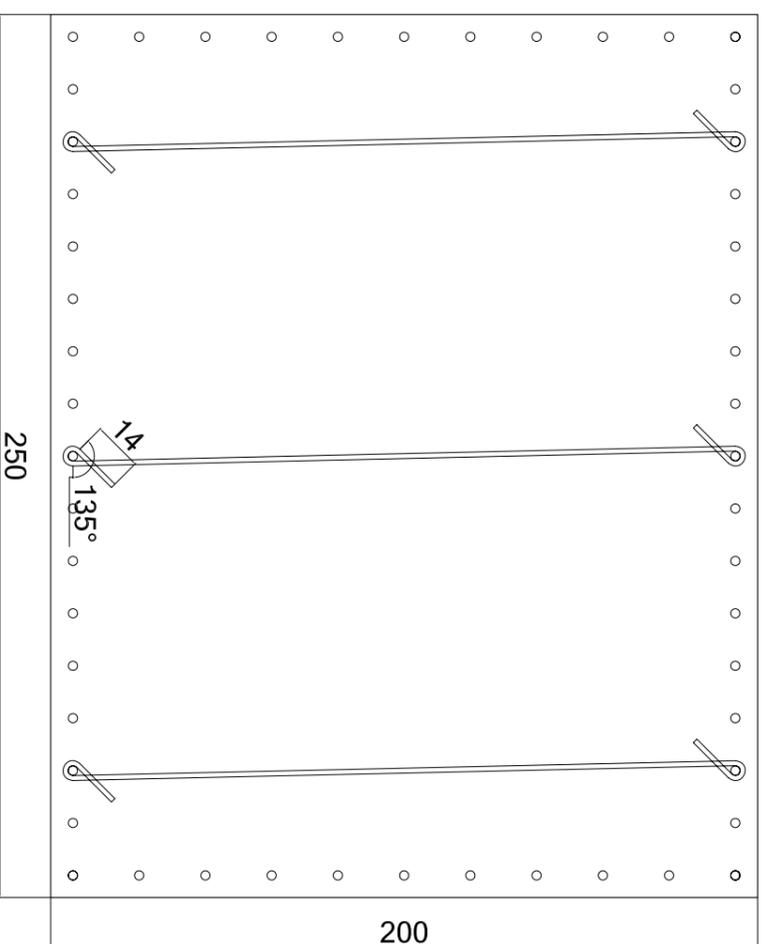


TAVOLA 7: SEZIONE AA' DISPOSIZIONE SPILLE - SCALA 1:20

SPILLE LONGITUDINALI



SEZIONE DA 0 m A +2,5 m
Si usano spille ϕ 14 a 1 braccio
disposte come in figura.
Le misure sono riportate in cm.

SPILLE TRASVERSALI

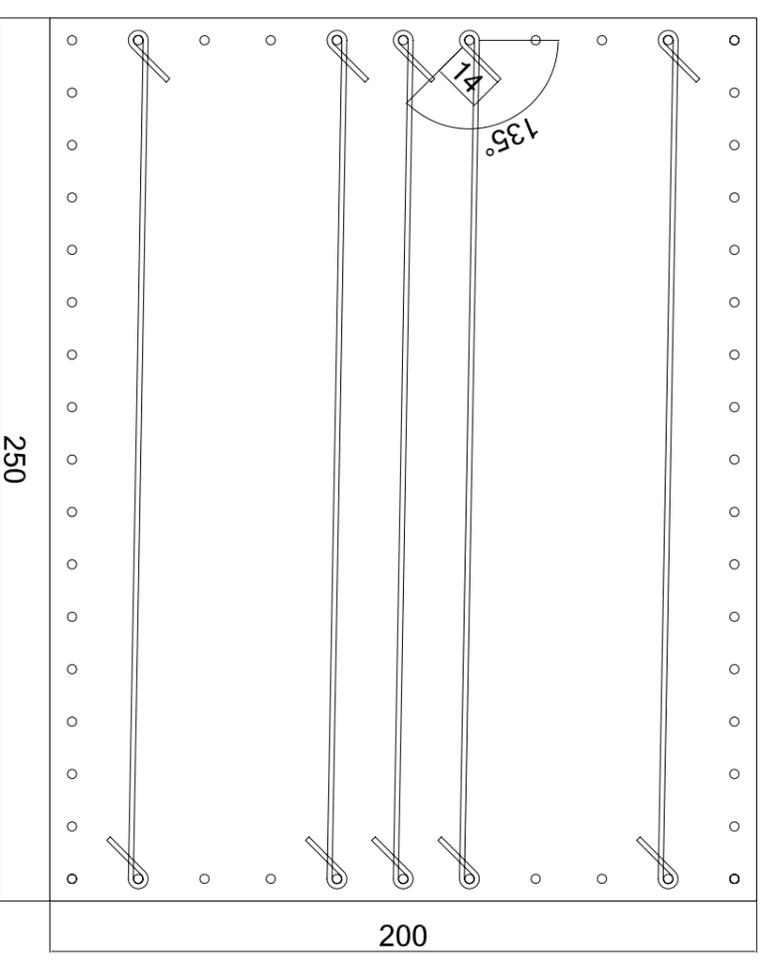
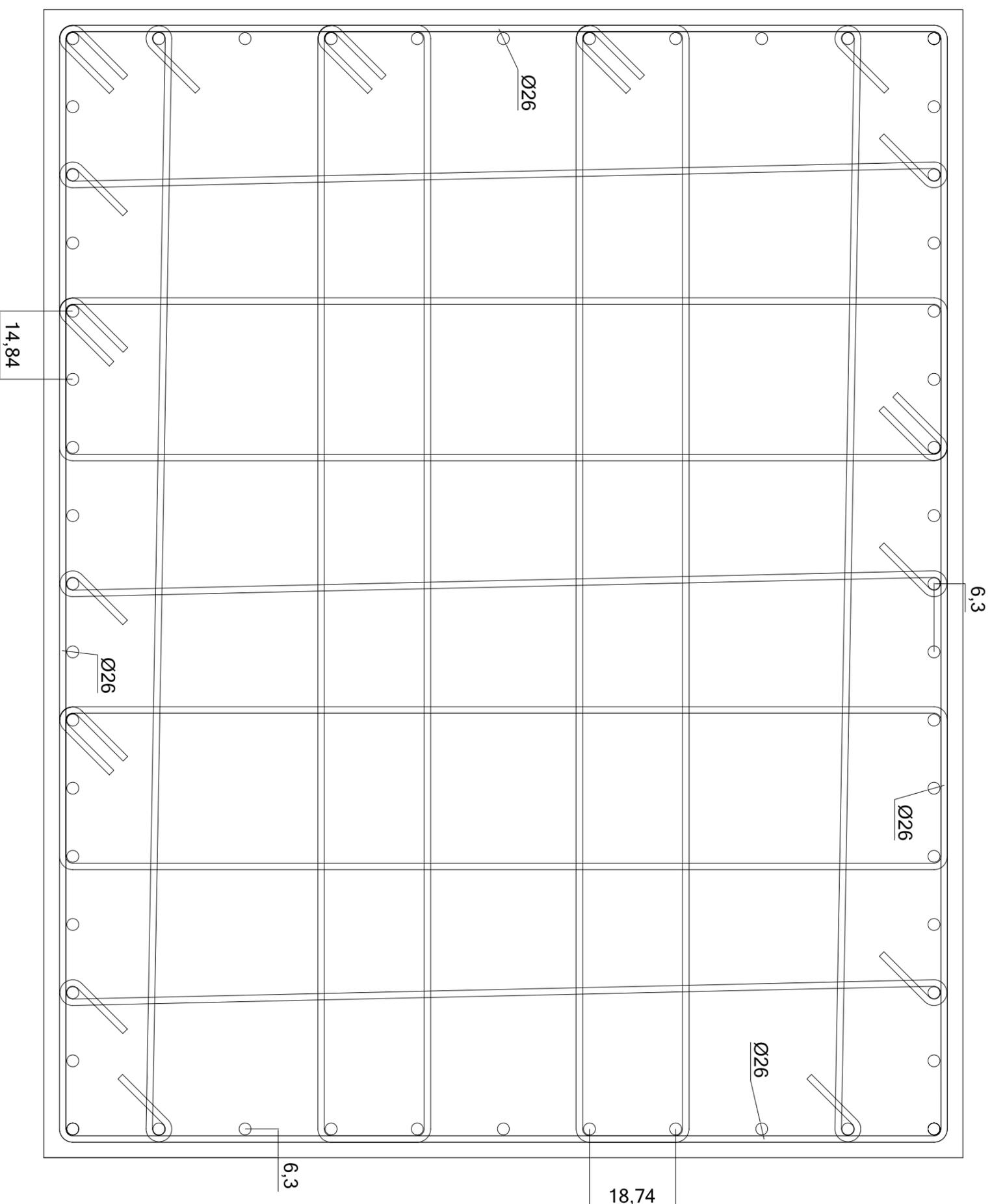


TAVOLA 8: SEZIONE BB' VISTA COMPLETA - SCALA 1:10

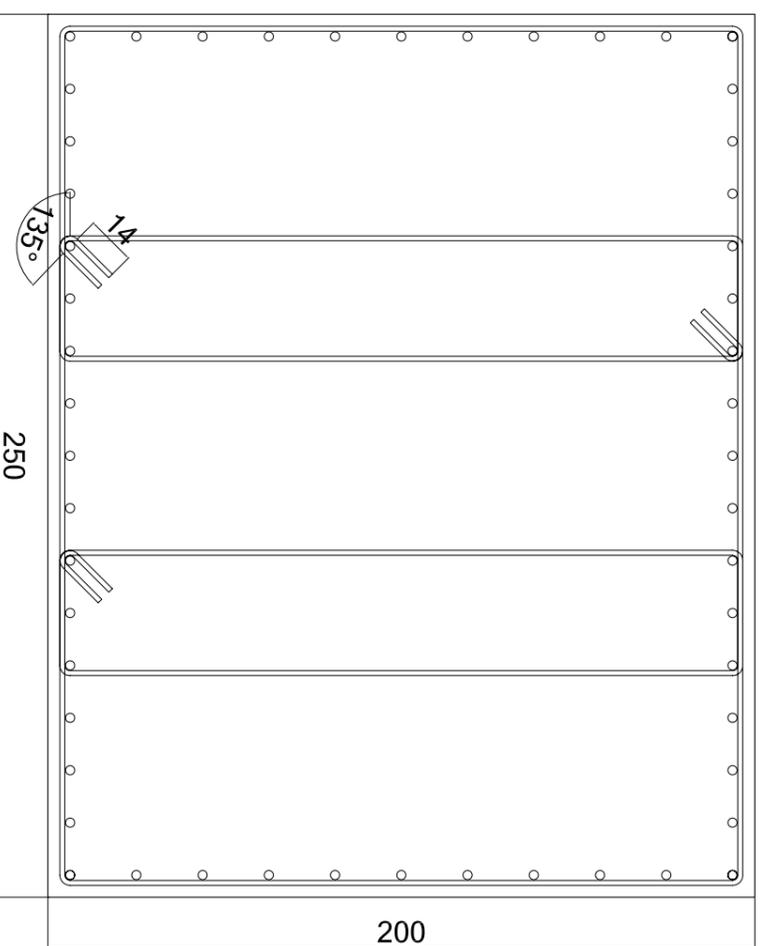
COMPLETA



SEZIONE DA + 2,5 m A +4,6 m
I dettagli della disposizione delle staffe e delle spille sono riportati in tavola n e in tavola n+1
Le misure sono riportate in cm.

TAVOLA 9: SEZIONE BB' DISPOSIZIONE STAFFE - SCALA 1:20

STAFFE LONGITUDINALI



SEZIONE DA + 2,5 m A +4,6 m
Si usano 3 staffe ϕ 14 a 2 braccia
disposte come in figura.
Le misure sono riportate in cm.

STAFFE TRASVERSALI

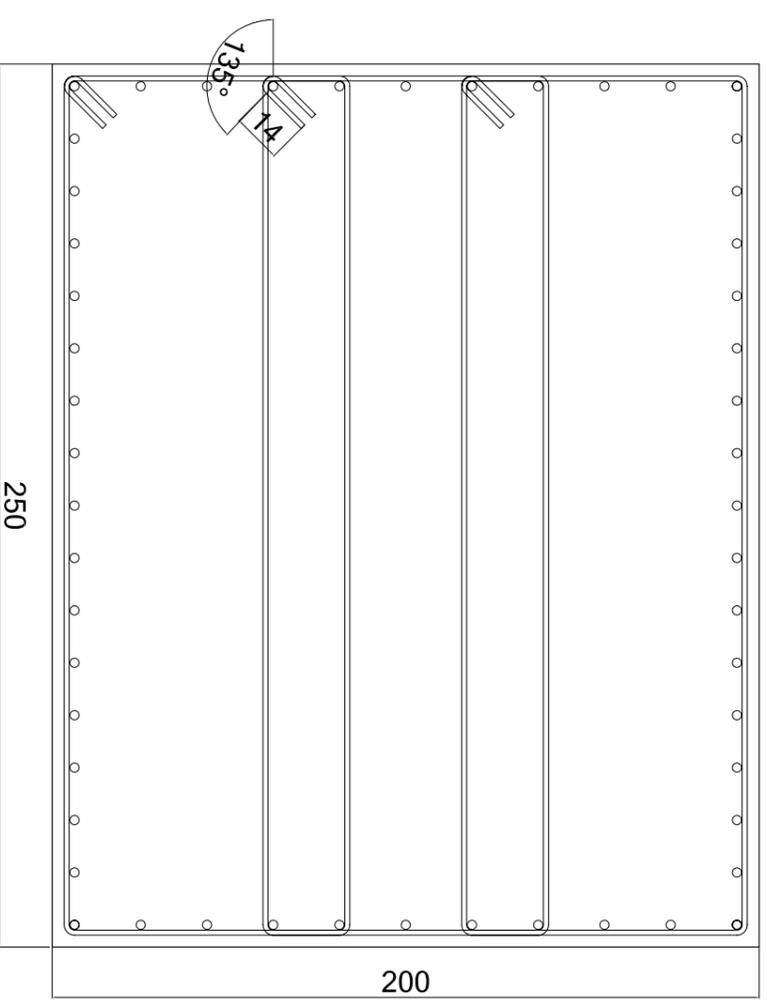
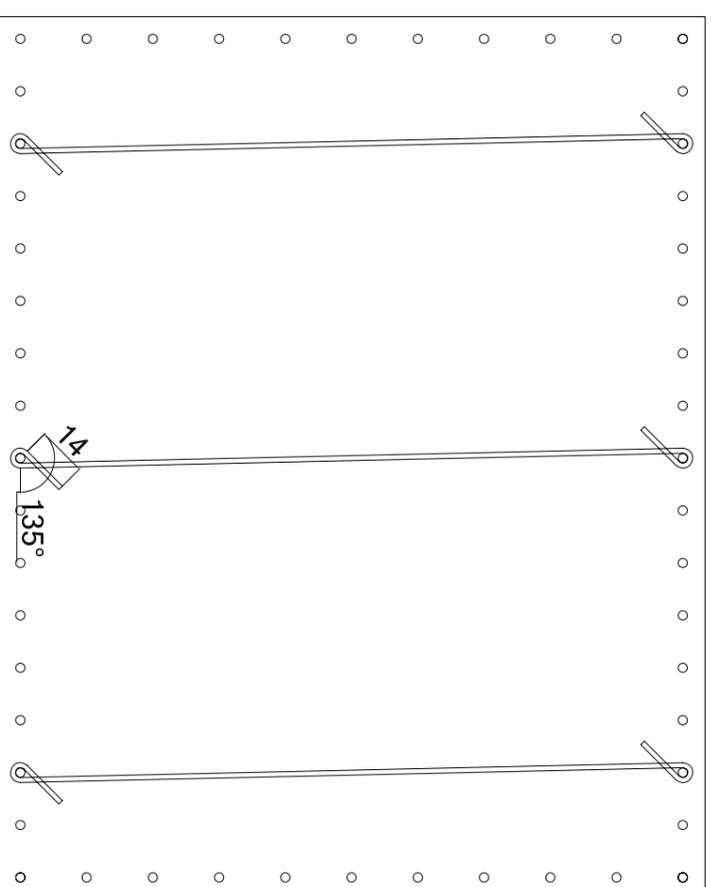


TAVOLA 10: SEZIONE BB' DISPOSIZIONE SPILLE - SCALA 1:20

SPILLE LONGITUDINALI



SEZIONE DA +2,5 m A +4,6 m
Si usano spille ϕ 14 a 1 braccio
disposte come in figura.
Le misure sono riportate in cm.

SPILLE TRASVERSALI

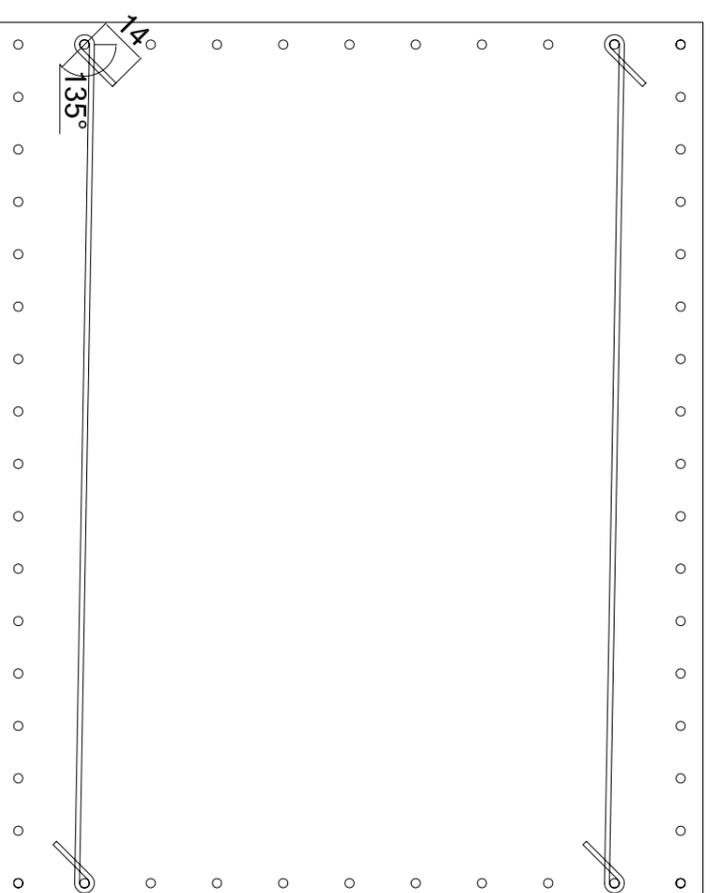
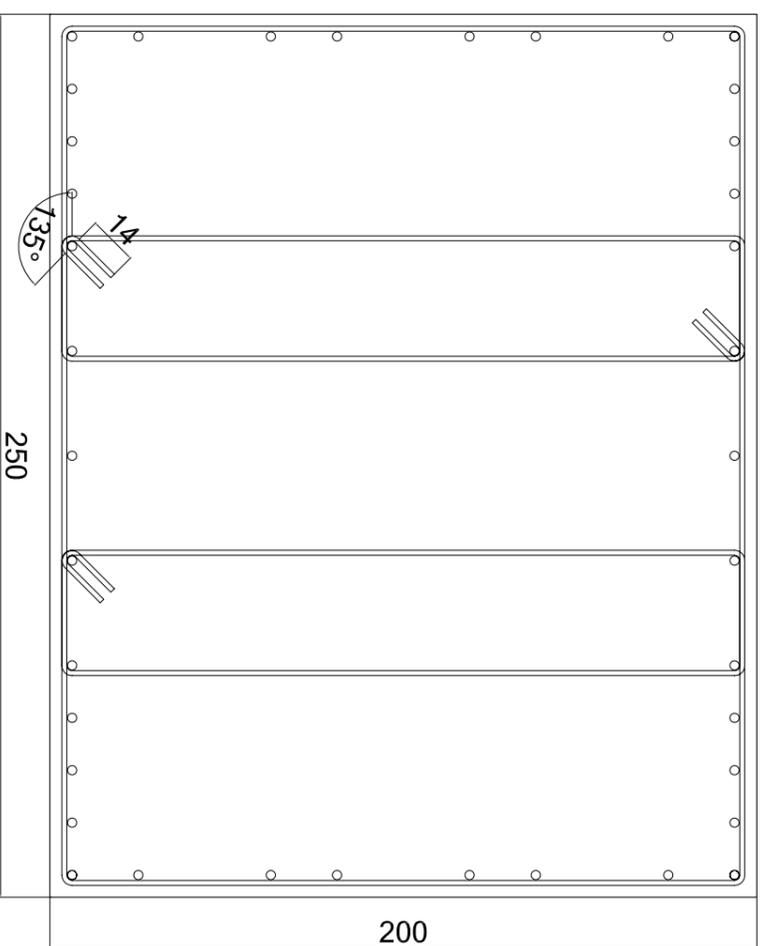


TAVOLA 12: SEZIONE CC' e SEZIONE DD' DISPOSIZIONE STAFFE - SCALA 1:20

STAFFE LONGITUDINALI



SEZIONE DA + 4,6 m A + 7,52 m
Si usano 3 staffe ϕ 14 a 2 braccia
disposte come in figura.
Le misure sono riportate in cm.

STAFFE TRASVERSALI

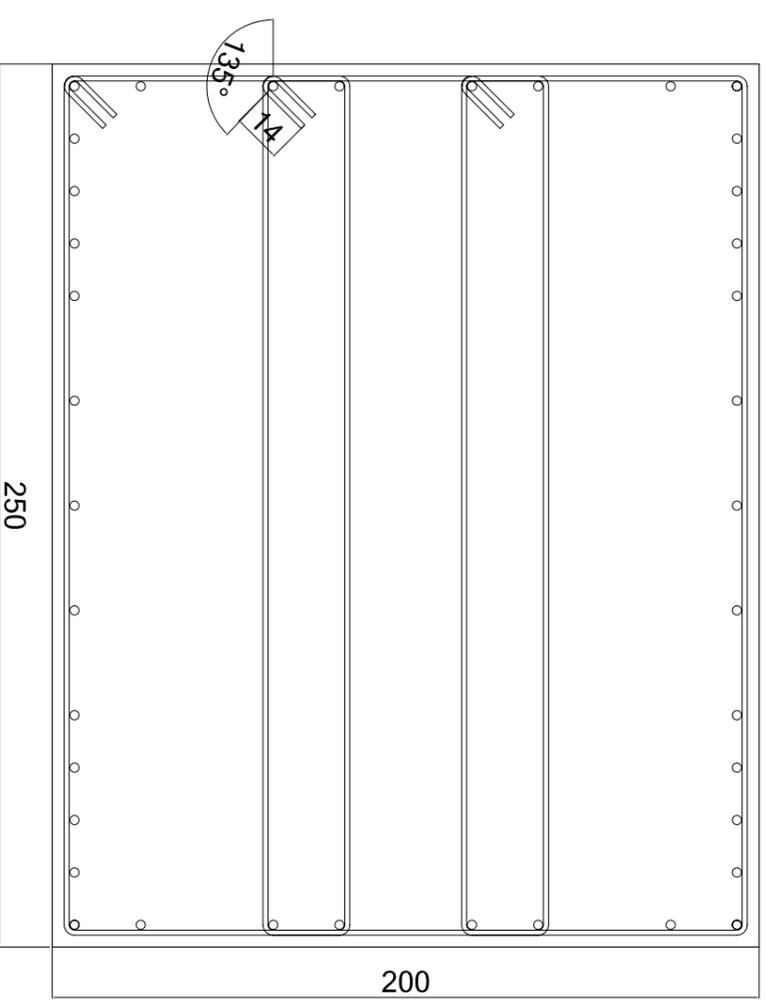
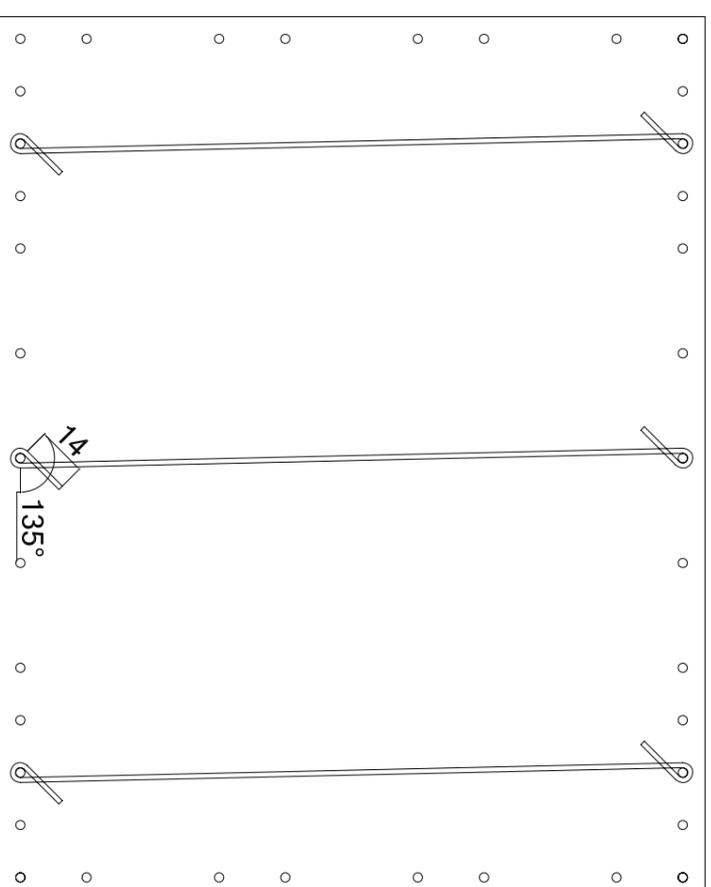


TAVOLA 13: SEZIONE CC' e SEZIONE DD' DISPOSIZIONE SPILLE - SCALA 1:20

SPILLE LONGITUDINALI



SEZIONE DA +4,6 m A +7,52 m
Si usano spille ϕ 14 a 1 braccio
disposte come in figura.
Le misure sono riportate in cm.

SPILLE TRASVERSALI

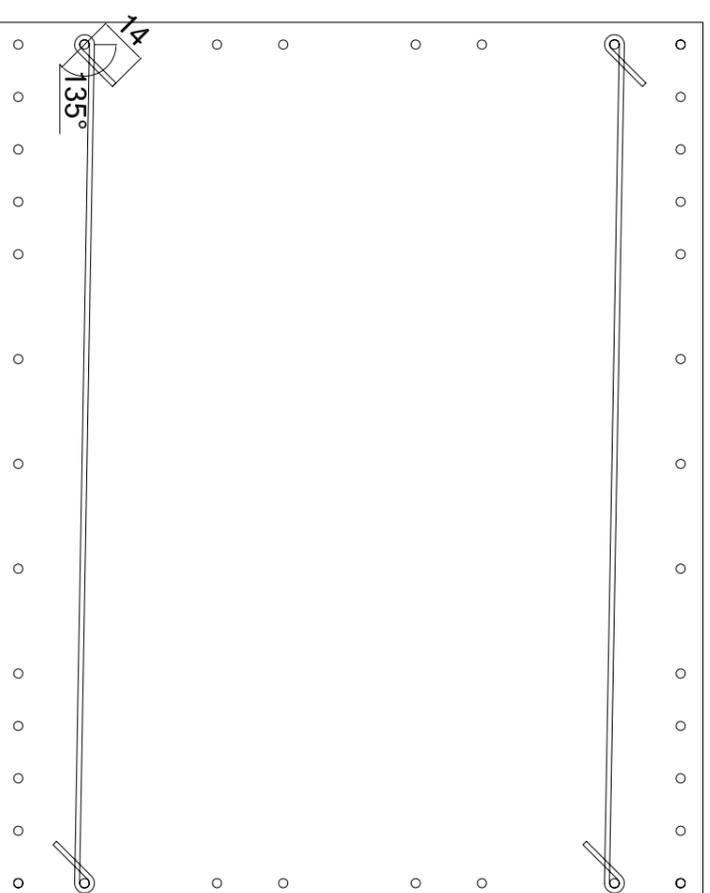
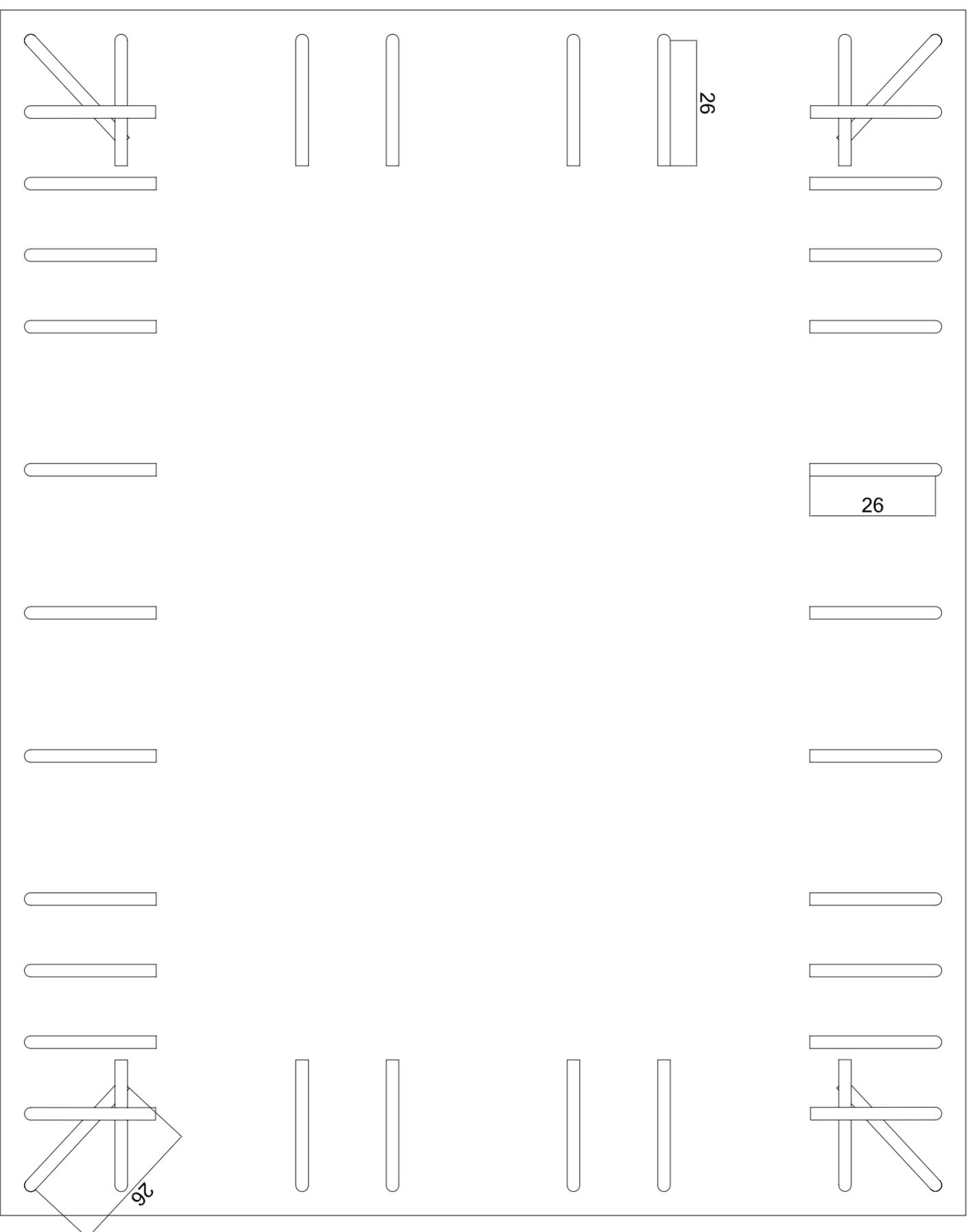


TAVOLA 14: SEZIONE EE' ANCORAGGIO ARMATURA LONGITUDINALE - SCALA 1:10



SEZIONE DA + 7,52 m A +7,6 m
Ancoraggio barre longitudinali
nella sezione di sommità della
pila, 5 cm di copriferro superiore.
Le misure sono riportate in cm.