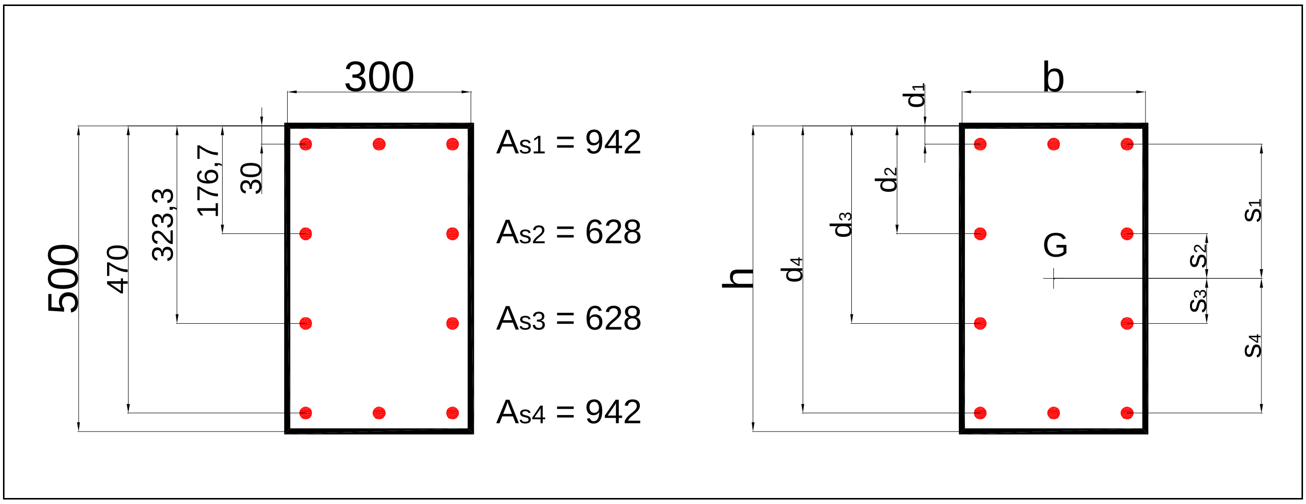


Caratteristiche geometriche:

Altezza della sezione:	$h = 500$	[mm]
Larghezza della sezione:	$b = 300$	[mm]
Copriferri:	$c = 30$	[mm]

Distanze delle armature dal lembo superiore:

Armatura 1 (3∅20):	$d_1 = 30$	[mm]
Armatura 2 (2∅20):	$d_2 = 176.7$	[mm]
Armatura 3 (2∅20):	$d_3 = 323.3$	[mm]
Armatura 4 (3∅20):	$d_4 = 470$	[mm] = altezza utile della sezione

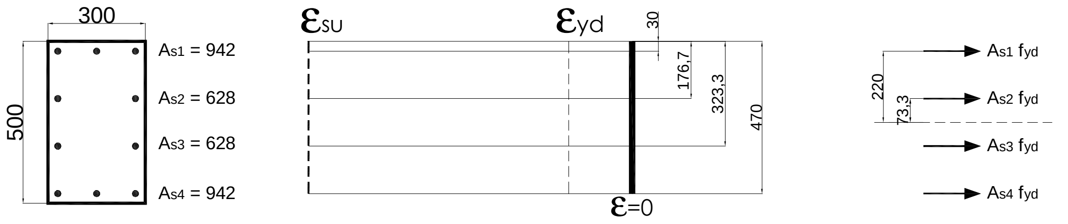
Bracci di leva delle armature calcolati dal baricentro "geometrico" della sezione:

Armatura 1:	$s_1 = 220$	[mm]
Armatura 2:	$s_2 = 73.3$	[mm]
Armatura 3:	$s_3 = 73.3$	[mm]
Armatura 4:	$s_4 = 220$	[mm]

Caratteristiche dei materiali:

Classe del Calcestruzzo:	**Classe 25/30**	
Resistenze caratteristiche:	$R_{ck} = 30$	[MPa]
	$f_{ck} = 25$	[MPa]
Resistenza di calcolo	$f_{cd} = \frac{0.85 \cdot f_{ck}}{1.50} = 14.17$	[MPa]
Tipo di acciaio:	**B450C**	
Resistenza a rottura:	$f_{tk} = 540$	[MPa]
Resistenza a snervamento:	$f_{yk} = 450$	[MPa]
Resistenza di calcolo:	$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1.15} = 391.3$	[MPa]
Modulo di elasticità:	$E = 200000$	[MPa]

PUNTO 1



Dal diagramma delle deformazioni si evince che:

$$\begin{array}{|l|}\hline \varepsilon_{s1} > \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_1 = f_{yd} \\ \varepsilon_{s2} > \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_2 = f_{yd} \\ \varepsilon_{s3} > \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_3 = f_{yd} \\ \varepsilon_{s4} > \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_4 = f_{yd} \\ \hline \end{array}$$

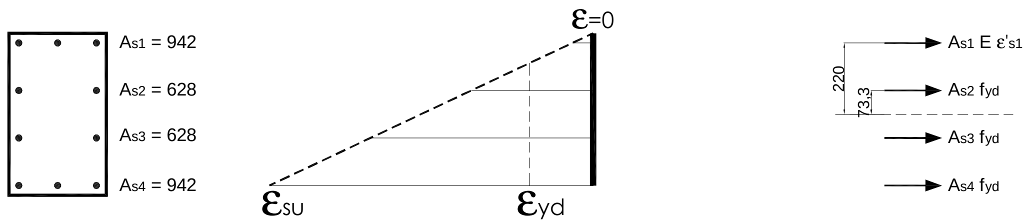
$$N_{Rd.1} = -[A_{s1} + A_{s2} + A_{s3} + A_{s4}] \cdot f_{yd}$$

$$N_{Rd.1} = -\frac{[942+628+628+942] \cdot 391.3}{1000} = -1228.70 \qquad \text{[kN]}$$

$$M_{Rd.1} = -A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot s_1 - A_{s2} \cdot f_{yd} \cdot s_2 - A_{s3} \cdot f_{yd} \cdot [-s_3] - A_{s4} \cdot f_{yd} \cdot [-s_4]$$

$$M_{Rd.1} = \left[\frac{-942 \cdot 220 - 628 \cdot 73.3 - 628 \cdot [-73.3] - 942 \cdot [-220]}{1000000}\right] \cdot f_{yd} = 0 \qquad \text{[kNm]}$$

PUNTO 2



Dal diagramma delle deformazioni si evince che:

$$\begin{array}{|l|}\hline \varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_1 = E \cdot \varepsilon'_{s1} \\ \varepsilon_{s2} > \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_2 = f_{yd} \\ \varepsilon_{s3} > \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_3 = f_{yd} \\ \varepsilon_{s4} > \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_4 = f_{yd} \\ \hline \end{array}$$

$$\varepsilon_{su} : d_4 = \varepsilon'_{s1} : d_1 \qquad \rightarrow \qquad \varepsilon'_{S1} = \frac{d_1}{d_4} \cdot \varepsilon_{su} = \frac{30}{470} \cdot 0.01 = 0.00064 < \varepsilon_{yd}$$

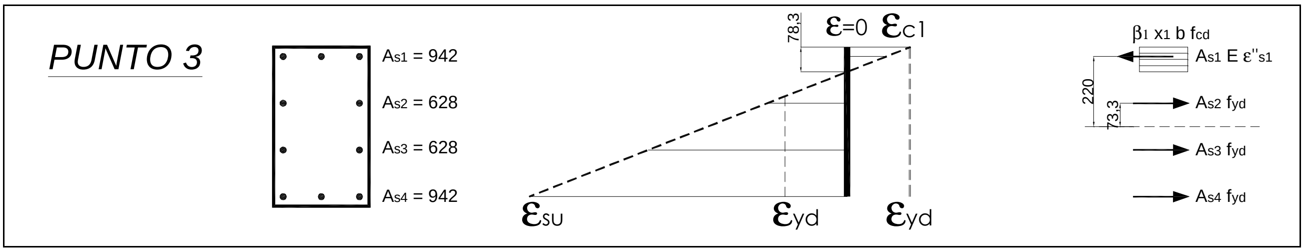
$$N_{Rd.2} = -A_{s1} \cdot E \cdot \varepsilon'_{s1} - [A_{s2} + A_{s3} + A_{s4}] \cdot f_{yd}$$

$$N_{Rd.2} = \frac{-942 \cdot 200000 \cdot 0.00064 - [628+628+942] \cdot 391.3}{1000} = -981 \qquad \text{[kN]}$$

$$M_{Rd.2} = -A_{s1} \cdot E \cdot \varepsilon'_{s1} \cdot s_1 - A_{s2} \cdot f_{yd} \cdot s_2 - A_{s3} \cdot f_{yd} \cdot [-s_3] - A_{s4} \cdot f_{yd} \cdot [-s_4]$$

$$M_{Rd.2} = \frac{-942 \cdot 200000 \cdot 0.00064 \cdot 220 - 628 \cdot 391.3 \cdot 73.3 - 628 \cdot 391.3 \cdot [-73.3] - 942 \cdot 391.3 \cdot [-220]}{1000000}$$

$$M_{Rd.2} = 54.60 \qquad \text{[kNm]}$$



Dal diagramma delle deformazioni si evince che:

$$\boxed{\begin{array}{l} \varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_1 = E \cdot \varepsilon''_{s1} \\ \varepsilon_{s2} > \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_2 = f_{yd} \\ \varepsilon_{s3} > \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_3 = f_{yd} \\ \varepsilon_{s4} > \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_4 = f_{yd} \end{array}}$$

La posizione dell'asse neutro x_1 si determina congiungendo ε_{su} con ε_{c1}:

$$\varepsilon_{su} : (d_4 - x_1) = \varepsilon_{c1} : x_1$$

$$x_1 = \frac{\varepsilon_{c1}}{\varepsilon_{c1} + \varepsilon_{su}} \cdot d_4 = \frac{0.002}{0.002 + 0.01} \cdot d_4 = 0.1667 \cdot d_4 = 0.1667 \cdot 470 = 78.3 \qquad \text{[mm]}$$

La deformazione dell'armatura ε''_{s1} si determina dalla linearità del diagramma delle deformazioni:

$$\varepsilon_{su} : (d_4 - x_1) = \varepsilon''_{s1} : (x_1 - d_1)$$

$$\varepsilon''_{s1} = \frac{x_1 - d_1}{d_4 - x_1} \cdot \varepsilon_{su} = \frac{78.3 - 30}{470 - 78.3} \cdot 0.01 = 0.00123 < \varepsilon_{yd}$$

Per questa configurazione deformata i valori β_1 e κ_1 sono univocamente determinati e valgono rispettivamente:

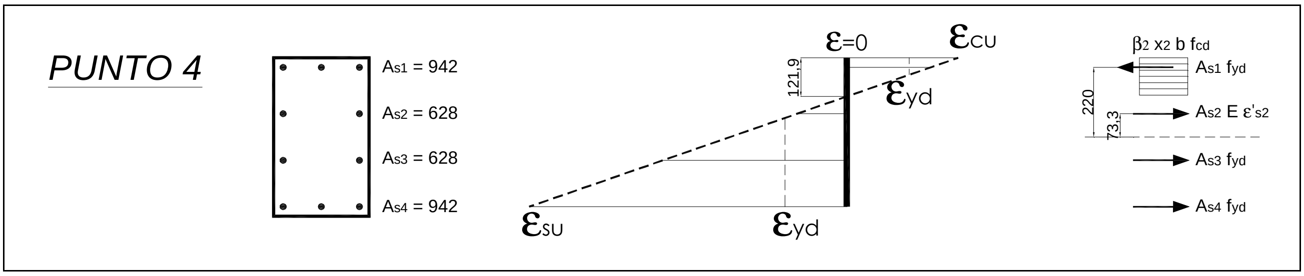
$$\begin{cases} \beta_1 = 0.6667 \\ \kappa_1 = 0.375 \end{cases}$$

$$N_{Rd.3} = \beta_1 \cdot x_1 \cdot b \cdot f_{cd} + A_{s1} \cdot E \cdot \varepsilon''_{s1} - [A_{s2} + A_{s3} + A_{s4}] \cdot f_{yd}$$

$$N_{Rd.3} = \frac{0.6667 \cdot 78.3 \cdot 300 \cdot 14.17 + 942 \cdot 200000 \cdot 0.00123 - [628 + 628 + 942] \cdot 391.3}{1000} = -406 \qquad \text{[kN]}$$

$$M_{Rd.3} = \beta_1 \cdot x_1 \cdot b \cdot f_{cd} \cdot \left(\frac{h}{2} - \kappa_1 \cdot x_1\right) + A_{s1} \cdot E \cdot \varepsilon''_{s1} \cdot s_1 - A_{s2} \cdot f_{yd} \cdot s_2 - A_{s3} \cdot f_{yd} \cdot [-s_3] - A_{s4} \cdot f_{yd} \cdot [-s_4]$$

$$M_{Rd.3} = \frac{48962395 + 50981040 - 18012478 + 18012478 + 81093012}{1000000} = 181 \qquad \text{[kNm]}$$



Dal diagramma delle deformazioni si evince che:

$$\begin{array}{|l|}\hline \varepsilon_{s1} > \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_1 = f_{yd} \\ \varepsilon_{s2} < \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_2 = E \cdot \varepsilon'_{s2} \\ \varepsilon_{s3} > \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_3 = f_{yd} \\ \varepsilon_{s4} > \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_4 = f_{yd} \\ \hline \end{array}$$

La posizione dell'asse neutro x_2 si determina congiungendo ε_{su} con ε_{cu}:

$$\varepsilon_{su} : (d_4 - x_2) = \varepsilon_{cu} : x_2$$

$$x_2 = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{su}} \cdot d_4 = \frac{0.0035}{0.0035 + 0.01} \cdot d_4 = 0.2593 \cdot d_4 = 0.2593 \cdot 470 = 121.9 \qquad \text{[mm]}$$

La deformazione dell'armatura ε'_{s2} si determina dalla linearità del diagramma delle deformazioni:

$$\varepsilon_{su} : (d_4 - x_2) = \varepsilon'_{s2} : (d_2 - x_2)$$

$$\varepsilon'_{s2} = \frac{d_2 - x_2}{d_4 - x_2} \cdot \varepsilon_{su} = \frac{176.7 - 121.9}{470 - 121.9} \cdot 0.01 = 0.00157 < \varepsilon_{yd}$$

Per questa configurazione deformata i valori β_2 e κ_2 sono univocamente determinati e valgono rispettivamente:

$$\begin{cases} \beta_2 = 0.8095 \\ \kappa_2 = 0.4160 \end{cases}$$

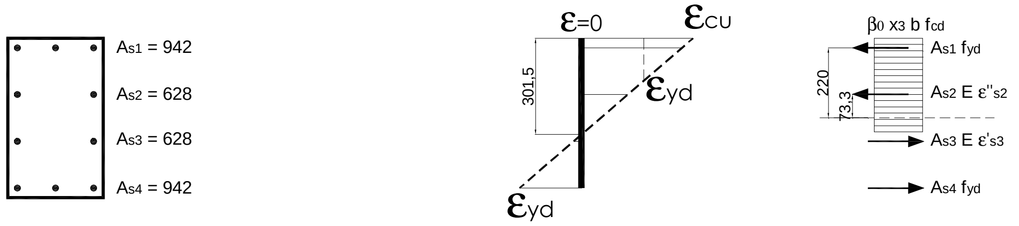
$$N_{Rd.4} = \beta_2 \cdot x_2 \cdot b \cdot f_{cd} + A_{s1} \cdot f_{yd} - A_{s2} \cdot E \cdot \varepsilon'_{s2} - A_{s3} \cdot f_{yd} - A_{s4} \cdot f_{yd}$$

$$N_{Rd.4} = \frac{419480.4 + 368604.6 - 197192 - 245736.4 - 368604.6}{1000} = -23.45 \qquad \text{[kN]}$$

$$M_{Rd.4} = \beta_2 \cdot x_2 \cdot b \cdot f_{cd} \cdot \left(\frac{h}{2} - \kappa_2 \cdot x_2 \right) + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot s_1 - A_{s2} \cdot E \cdot \varepsilon'_{s2} \cdot s_2 - A_{s3} \cdot f_{yd} \cdot [-s_3] - A_{s4} \cdot f_{yd} \cdot [-s_4]$$

$$M_{Rd.4} = \frac{83598079 + 81093012 - 14454174 + 18012478 + 81093012}{1000000} = 249 \qquad \text{[kNm]}$$

PUNTO 5



Dal diagramma delle deformazioni si evince che:

$$\boxed{\begin{aligned}&\varepsilon_{s1} > \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_1 = f_{yd}\\&\varepsilon_{s2} < \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_2 = E \cdot \varepsilon''_{s2}\\&\varepsilon_{s3} < \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_3 = E \cdot \varepsilon'_{s3}\\&\varepsilon_{s4} = \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_4 = f_{yd}\end{aligned}}$$

La posizione dell'asse neutro x_3 si determina congiungendo ε_{yd} con ε_{cu}:

$$\varepsilon_{yd} : (d_4 - x_3) = \varepsilon_{cu} : x_3$$

$$x_3 = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yd}} \cdot d_4 = \frac{0.0035}{0.0035 + 0.001956} \cdot d_4 = 0.6415 \cdot d_4 = 0.6415 \cdot 470 = 301.5 \qquad \text{[mm]}$$

La deformazione dell'armatura ε''_{s2} si determina dalla linearità del diagramma delle deformazioni:

$$\varepsilon_{cu} : x_3 = \varepsilon''_{s2} : (x_3 - d_2)$$

$$\varepsilon''_{s2} = \frac{x_3 - d_2}{x_3} \cdot \varepsilon_{cu} = \frac{301.5 - 176.7}{301.5} \cdot 0.0035 = 0.00145 < \varepsilon_{yd}$$

La deformazione dell'armatura ε'_{s3} si determina dalla linearità del diagramma delle deformazioni:

$$\varepsilon_{cu} : x_3 = \varepsilon'_{s3} : (d_3 - x_3)$$

$$\varepsilon'_{s3} = \frac{d_3 - x_3}{x_3} \cdot \varepsilon_{cu} = \frac{323.3 - 301.5}{301.5} \cdot 0.0035 = 0.00025 < \varepsilon_{yd}$$

Per questa configurazione deformata i valori β_0 e κ_0 sono univocamente determinati e valgono rispettivamente:

$$\begin{cases}\beta_0 = 0.80\\ \kappa_0 = 0.40\end{cases}$$

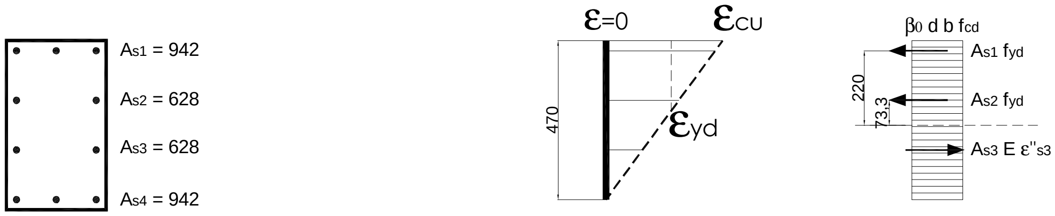
$$N_{Rd.5} = \beta_0 \cdot x_3 \cdot b \cdot f_{cd} + A_{s1} \cdot f_{yd} + A_{s2} \cdot E \cdot \varepsilon''_{s2} - A_{s3} \cdot E \cdot \varepsilon'_{s3} - A_{s4} \cdot f_{yd}$$

$$N_{Rd.5} = \frac{1025341 + 368604.6 + 182120 - 31400 - 368604.6}{1000} = 1176 \qquad \text{[kN]}$$

$$M_{Rd.5} = \beta_0 \cdot x_3 \cdot b \cdot f_{cd} \cdot \left(\frac{h}{2} - \kappa_0 \cdot x_3\right) + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot s_1 + A_{s2} \cdot E \cdot \varepsilon''_{s2} \cdot s_2 - A_{s3} \cdot E \cdot \varepsilon'_{s3} \cdot [-s_3] - A_{s4} \cdot f_{yd} \cdot [-s_4]$$

$$M_{Rd.5} = \frac{132679151 + 81093012 + 13349396 + 2301620 + 81093012}{1000000} = 310 \qquad \text{[kNm]}$$

PUNTO 6



Dal diagramma delle deformazioni si evince che:

$$\begin{array}{|l|}\hline \varepsilon_{s1} > \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_1 = f_{yd} \\ \varepsilon_{s2} > \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_2 = f_{yd} \\ \varepsilon_{s3} < \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_3 = E \cdot \varepsilon''_{s3} \\ \varepsilon_{s4} = 0 \rightarrow \sigma_4 = 0 \\ \hline \end{array}$$

La posizione dell'asse neutro x_4 è pari all'altezza utile della sezione: $x_4 = d_4 = 470$ mm.

La deformazione dell'armatura ε''_{s3} si determina dalla linearità del diagramma delle deformazioni:

$$\varepsilon_{cu} : d_4 = \varepsilon''_{s3} : (d_4 - d_3)$$

$$\varepsilon''_{s3} = \frac{d_4 - d_3}{d_4} \cdot \varepsilon_{cu} = \frac{470 - 323.3}{470} \cdot 0.0035 = 0.00109 < \varepsilon_{yd}$$

Per questa configurazione deformata i valori β_0 e κ_0 sono univocamente determinati e valgono rispettivamente:

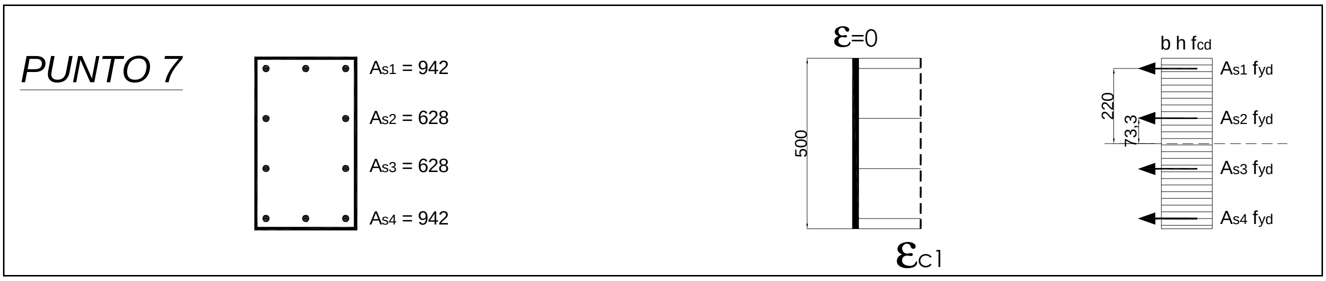
$$\begin{cases} \beta_0 = 0.80 \\ \kappa_0 = 0.40 \end{cases}$$

$$N_{Rd.6} = \beta_0 \cdot d_4 \cdot b \cdot f_{cd} + A_{s1} \cdot f_{yd} + A_{s2} \cdot f_{yd} - A_{s3} \cdot E \cdot \varepsilon''_{s3}$$

$$N_{Rd.6} = \frac{1598376 + 368604.6 + 245736.4 - 136904}{1000} = 2076 \qquad \text{[kN]}$$

$$M_{Rd.6} = \beta_0 \cdot d \cdot b \cdot f_{cd} \cdot \left(\frac{h}{2} - \kappa_0 \cdot d\right) + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot s_1 + A_{s2} \cdot f_{yd} \cdot s_2 - A_{s3} \cdot E \cdot \varepsilon''_{s3} \cdot [-s_3]$$

$$M_{Rd.6} = \frac{99099312 + 81093012 + 18012478 + 10035063}{1000000} = 209 \qquad \text{[kNm]}$$



Dal diagramma delle deformazioni si evince che:

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{c1} > \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_1 = f_{yd}$$
$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{c1} > \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_2 = f_{yd}$$
$$\varepsilon_{s3} = \varepsilon_{c1} > \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_3 = f_{yd}$$
$$\varepsilon_{s4} = \varepsilon_{c1} > \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_4 = f_{yd}$$

$$N_{Rd.7} = h \cdot b \cdot f_{cd} + [A_{s1} + A_{s2} + A_{s3} + A_{s4}] \cdot f_{yd}$$

$$N_{Rd.7} = \frac{500 \cdot 300 \cdot 14.17 + [942 + 628 + 628 + 942] \cdot 391.3}{1000} = 3354 \quad \text{[kN]}$$

$$M_{Rd.7} = A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot s_1 + A_{s2} \cdot f_{yd} \cdot s_2 + A_{s3} \cdot f_{yd} \cdot [-s_3] + A_{s4} \cdot f_{yd} \cdot [-s_4]$$

$$M_{Rd.7} = 0 \quad \text{[kNm]}$$

<u>**DOMINIO DI RESISTENZA**</u>