

## ESERCIZIO 1

Verificare allo stato limite ultimo la sezione a T (larghezza soletta superiore 50 cm, larghezza anima 25 cm, spessore soletta 20 cm, altezza totale 90 cm,  $A_s = 6 \varnothing 28 = 36,95 \text{ cm}^2$ ,  $A'_s = 3 \varnothing 28 = 18,47 \text{ cm}^2$ ) sollecitata da  $M_{Sd} = 1000 \text{ kNm}$ .

Realizzata con calcestruzzo  $R_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$  e acciaio B450C.

### CARATTERISTICHE RESISTIVE DI CALCOLO DEI MATERIALI IMPIEGATI

Calcestruzzo:  $f_{ck} = 0,83 R_{ck} = 0,83 \cdot 30 = 24,9 \text{ N/mm}^2$   
 $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c = 0,85 \cdot 24,9 / 1,5 = 14,11 \text{ N/mm}^2$   
 Acciaio:  $f_{yd} = 450 / 1,15 = 391 \text{ N/mm}^2$   
 $\epsilon_{yd} = 391 / 200.000 = 0,0019$

### CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE

$b_w = 250 \text{ mm}$      $b = 500 \text{ mm}$      $h = 900 \text{ mm}$      $s = 200 \text{ mm}$   
 $A_s = 6 \varnothing 28 = 3695 \text{ mm}^2$      $A'_s = 3 \varnothing 28 = 1847 \text{ mm}^2$

Occorre disporre l'armatura tesa su due file per rispettare l'interfero.

Prevedendo un ricoprimento  $c = 25 \text{ mm}$ , staffa  $\varnothing 8 \text{ mm}$ , lo spazio per disporre su una unica fila  $6 \varnothing 28$  non è sufficiente, e comunque le prescrizioni di legge che prevedono un interfero pari ad almeno una volta il diametro delle barre longitudinali  $28 \text{ mm}$ , diametro massimo dell'aggregato  $+ 5 \text{ mm e } 16 + 5 = 21 \text{ mm}$  comunque superiore a  $20 \text{ mm}$ .

Pertanto si disporranno  $3 + 3 \varnothing 28$ .

La distanza fra le due file, riferita all'interfero, è pari a  $28 \text{ mm}$ , pertanto l'altezza utile risulta  $d = 900 - 25 - 8 - 28 - 14 = 825 \text{ mm}$ . La distanza del baricentro dell'armatura compressa ( $A'_s = 1847 \text{ mm}^2$ ) dal lembo superiore è pari a  $(25 + 8 + 14) = 47 \text{ mm}$ .

$d = 825 \text{ mm}$      $d' = 47 \text{ mm}$

Posizione del baricentro della sezione di solo calcestruzzo

$Y_G = (500 \cdot 200^2/2 + 250 \cdot 700 (350 + 200)) / (500 \cdot 200 + 250 \cdot 700) = 363 \text{ mm}$

### CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE							
bw	250	mm					
b	500	mm					
h	900	mm					
s	200	mm					
c	25	mm					
∅	28	AREA	616	mm <sup>2</sup>	staffe	∅	8 mm
As	6∅28	3,695	mm <sup>2</sup>				
A's	3∅28	1,847	mm <sup>2</sup>				
d	825	mm					
d'	47	mm					

### DETERMINAZIONE POSIZIONE ASSE NEUTRO

Si ipotizza la posizione dell'asse neutro:

$x = 200 \text{ mm}$ , pari allo spessore della soletta superiore.

Il collasso avviene per opera del calcestruzzo compresso  $\epsilon_c = 0,0035$ .

Dalla conservazione delle sezioni piane si ottiene lo stato di deformazione dell'armatura tesa e compressa e di conseguenza lo stato di sollecitazione:

$$\epsilon_s = (d - x) / x \cdot \epsilon_c = 0,0109$$

$$\sigma_s = 391 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon_s' = (x - d') / x \cdot \epsilon_c = 0,002678$$

$$\sigma_s' = 391 \text{ N/mm}^2$$

$$C = f_{cd} \cdot 0,8 \cdot x \cdot b = 14,11 \cdot 0,8 \cdot 200 \cdot 500 = 1129 \text{ kN},$$

$$T' = 1847 \cdot 391 = 722 \text{ kN}$$

$$T = 3695 \cdot 391 = 1446 \text{ kN}.$$

In regime di flessione pura deve essere rispettato l'equilibrio alla traslazione, ossia  $N_{Rd} = 0$ .

Effettuiamo il controllo per verificare se con la posizione dell'asse neutro ipotizzata l'equilibrio è soddisfatto:

$$N_{Rd} = -C - T' + T = 0 = -1129 - 722 + 1446 = -406 \text{ kN}.$$

L'equilibrio non è soddisfatto ed il segno negativo evidenzia un eccesso di parte compressa nel meccanismo di collasso ipotizzato, pertanto occorre sollevare l'asse neutro. Procedendo con un processo iterativo, o con la funzione Excel "RICERCA OBIETTIVO" si ottengono i seguenti risultati, riepilogati nel foglio di calcolo Excel:

DETERMINAZIONE ASSE NEUTRO											
x	128	mm	$\epsilon_{cu}$	0.0035							
$\epsilon_s$	0.019058594		$\sigma_s$	391.3043478	N/mm <sup>2</sup>						
$\epsilon_{s'}$	0.002214844		$\sigma_{s'}$	391.3043478	N/mm <sup>2</sup>						
C	722,432	N									
T'	722,839	N									
T	1,445,679	N									
NRd	407	N	MRd	1,121,387,007	Nmm						
x	$\epsilon_c$	$\epsilon_{s'}$	$\epsilon_s$	$\sigma_c$	$\sigma_{s'}$	$\sigma_s$	C	T'	T	NRd	
200	0.0035	0.002678	0.010938	14.11	391.3043	391.3043	1,128,800	722,839	1,445,679	-405,961	
100	0.0035	0.001855	0.025375	14.11	371	391.3043	564,400	685,332	1,445,679	195,947	
128	0.0035	0.002215	0.019059	14.11	391.3043	391.3043	722,432	722,839	1,445,679	407	
MRd	1,121,565,748										

Si considera soddisfatto l'equilibrio e si ricava il  $M_{Rd}$ :

Scrivendo l'equilibrio rispetto al baricentro dell'armatura tesa si ottiene:

$$M_{Rd} = C (d - k x) + T' (d - d') = 722 (825 - 0,4 \cdot 128) + 723 (825 - 47) = 1126 \text{ kNm}$$

Si osserva che la sezione è verificata poiché  $M_{Rd} > M_{Sd} = 1000 \text{ kNm}$ .

La sezione è dotata di adeguata duttilità in quanto la deformazione dell'acciaio teso è adeguatamente grande ( $\epsilon_s \geq 0,01$ ), ovvero  $x = 0,15 d$ .

#### VERIFICA DISPOSIZIONI COSTRUTTIVE

$$A_{smin} = 0.26 f_{ctm} / f_{yk} \cdot b t \cdot d = 0.26 \cdot 2.56 / 450 \cdot 250 \cdot 825 = 305 \text{ mm}^2 \text{ dove } f_{ctm} = 0.30 \cdot f_{ck}^{2/3} = 2.56 \text{ N/mm}^2$$

$$A_{smin} = 0.0013 b t d = 268 \text{ mm}^2$$

$$A_{smax} = 0.04 A_c = 11000 \text{ mm}^2 \text{ dove } A_c = 500 \cdot 200 + 250 \cdot 700 = 275000 \text{ mm}^2$$

Le disposizioni costruttive sono verificate

## ESERCIZIO 2

Valutare il  $M_{Rd}$  e la duttilità ( $x/d$ ) per le seguenti armature:

$$A_s = 5 \varnothing 14, A'_s = 2 \varnothing 14$$

$$A_s = 5 \varnothing 18, A'_s = 2 \varnothing 18$$

$$A_s = 5 \varnothing 24, A'_s = 2 \varnothing 24$$

per la sezione rettangolare  $b = 30 \text{ cm}$ ,  $h = 70 \text{ cm}$ , realizzata con calcestruzzo  $R_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$  e acciaio B450C.

### CASO 1

$$A_s = 5 \varnothing 14 = 770 \text{ mm}^2, A'_s = 2 \varnothing 14 = 308 \text{ mm}^2$$

### CARATTERISTICHE RESISTIVE DI CALCOLO DEI MATERIALI IMPIEGATI

Calcestruzzo:  $f_{cd} = 0,85 \cdot 0,83 \cdot 30 / 1,5 = 14,11 \text{ N/mm}^2$

Acciaio:  $f_{yd} = 450 / 1,15 = 391 \text{ N/mm}^2$

$$\varepsilon_{yd} = 391 / 200.000 = 0,001957$$

calcestruzzo	Rck	30	N/mm <sup>2</sup>			
	fck	24,9	N/mm <sup>2</sup>			
	fcd	14,11	N/mm <sup>2</sup>			
acciaio	B450C	450	N/mm <sup>2</sup>			
	f <sub>yd</sub>	391,3043	N/mm <sup>2</sup>			
	E <sub>s</sub>	200000	N/mm <sup>2</sup>			
	ε <sub>yd</sub>	0,001957				

### CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE

$$b = 300 \text{ mm}$$

$$h = 700 \text{ mm}$$

$A_s = 5 \varnothing 14 = 770 \text{ mm}^2$  sono disposti su una unica fila,

infatti prevedendo un ricoprimento  $c = 25 \text{ mm}$ , staffa  $\varnothing 8 \text{ mm}$ , lo spazio è sufficiente nel rispetto delle prescrizioni di legge che prevedono un interfero maggiore o uguale a

- 1 volta il diametro delle barre longitudinali, 14 mm
- diametro massimo dell'aggregato + 5 mm 16 + 5 = 21 mm
- a 20 mm. 20 mm

Interfero  $(300 - 2 \cdot 25 - 2 \cdot 8 - 5 \cdot 14) / 4 = 41 \text{ mm}$ , l'altezza utile risulta  $d = 700 - 25 - 8 - 7 = 660 \text{ mm}$ .

La distanza del baricentro dell'armatura compressa ( $A'_s = 308 \text{ mm}^2$ ) dal lembo superiore è pari a  $(25 + 8 + 7) = 40 \text{ mm}$ .

### DETERMINAZIONE POSIZIONE ASSE NEUTRO

Si ipotizza la posizione dell'asse neutro:

$$x = 200 \text{ mm}$$

il collasso avviene per opera del calcestruzzo compresso  $\varepsilon_c = 0,0035$ .

Dalla conservazione delle sezioni piane si ottiene lo stato di deformazione dell'armatura tesa e compressa e di conseguenza lo stato di sollecitazione:

$$\varepsilon_s = (d - x) / x \cdot \varepsilon_c = 0,0081$$

$$\sigma_s = 391 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon'_s = (x - d') / x \cdot \varepsilon_c = 0,0029$$

$$\sigma'_s = 391 \text{ N/mm}^2$$

la risultante di compressione nel calcestruzzo risulta

$$C = f_{cd} \cdot 0,8 \cdot x \cdot b = 14,11 \cdot 0,8 \cdot 200 \cdot 300 = 677 \text{ kN}$$

la risultante di compressione nell'armatura compressa risulta  $T' = A'_s \cdot \sigma'_s = 308 \cdot 391 = 121 \text{ kN}$

la risultante di trazione nell'armatura tesa risulta

$$T = A_s \cdot \sigma_s = 770 \cdot 391 = 301 \text{ kN}.$$

In regime di flessione pura deve essere rispettato l'equilibrio alla traslazione, ossia  $N_{Rd} = 0$ .

Effettuiamo il controllo per verificare se con la posizione dell'asse neutro ipotizzata l'equilibrio è soddisfatto:

$$N_{Rd} = -C - T' + T = 0 = -677 - 121 + 301 = -496 \text{ kN}.$$

L'equilibrio non è soddisfatto ed il segno negativo evidenzia un eccesso di parte compressa nel meccanismo di collasso ipotizzato, pertanto occorre sollevare l'asse neutro. Procedendo come prima indicato si ottengono i seguenti risultati, riepilogati in tabella:

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE										
b	300	mm								
h	700	mm								
c	25	mm								
Ø	14	AREA	154	mm <sup>2</sup>	staffe	Ø	8	mm		
A <sub>s</sub>	5Ø14		770	mm <sup>2</sup>						
A' <sub>s</sub>	2Ø14		308	mm <sup>2</sup>						
d	660	mm								
d'	40	mm								
DETERMINAZIONE ASSE NEUTRO										
x	200	mm	ε <sub>cu</sub>	0,0035						
ε <sub>s</sub>	0,00805		σ <sub>s</sub>	391,3043	N/mm <sup>2</sup>					
ε <sub>s'</sub>	0,0028		σ <sub>s'</sub>	391,3043	N/mm <sup>2</sup>					
C	677.280	N								
T'	120.473	N								
T	301.183	N								
NRd	-496.570	N								
x	ε <sub>c</sub>	ε <sub>s'</sub>	ε <sub>s</sub>	σ <sub>c</sub>	σ <sub>s'</sub>	σ <sub>s</sub>	C	T'	T	NRd
200	0,0035	0,0028	0,00805	14,11	391,3043	391,3043	677.280	120.473	301.183	-496.570
100	0,0035	0,0021	0,0196	14,11	391,3043	391,3043	338.640	120.473	301.183	-157.930
65	0,0035	0,001346	0,032038	14,11	269,2308	391,3043	220.116	82.890	301.183	-1.823
MRd	190.380.163									

Si considera soddisfatto l'equilibrio e si ricava il M<sub>Rd</sub>:

Scrivendo l'equilibrio alla rotazione rispetto al baricentro della sezione di solo calcestruzzo si ottiene:

$$M_{Rd} = C (h/2 - 0,4 x) + T' (h/2 - d') + T (d - h/2) = 220 (350 - 0,4 \cdot 65) + 83 (350 - 40) + 301 (660 - 350) = 190 \text{ kNm}$$

Controllo della duttilità  $x/d = 65/660 = 0,10$

## CASO 2

$$A_s = 5 \text{ } \varnothing 18 = 1272 \text{ mm}^2, A'_s = 2 \text{ } \varnothing 18 = 763 \text{ mm}^2$$

### CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE

$A_s = 5 \text{ } \varnothing 18 = 1272 \text{ mm}^2$  disposti su una unica fila, infatti prevedendo un ricoprimento  $c = 25 \text{ mm}$ , staffa  $\varnothing 8 \text{ mm}$ , lo spazio è sufficiente nel rispetto delle prescrizioni di legge che prevedono un interfero pari ad almeno 1 volta il diametro delle barre longitudinali e comunque superiore a 20 mm.

Interfero  $(300 - 2 \cdot 25 - 2 \cdot 8 - 5 \cdot 18)/4 = 36 \text{ mm}$ , l'altezza utile risulta  $d = 700 - 25 - 8 - 9 = 658 \text{ mm}$ .

La distanza del baricentro dell'armatura compressa ( $A'_s = 509 \text{ mm}^2$ ) dal lembo superiore è pari a  $(25 + 8 + 9) = 42 \text{ mm}$ .

DETERMINAZIONE POSIZIONE ASSE NEUTRO

d	658	mm							
d'	42	mm							
DETERMINAZIONE ASSE NEUTRO									
x	90.59265995	mm	$\epsilon_{cu}$	0.0035					
$\epsilon_s$	0.021921486		$\sigma_s$	391.3043	N/mm <sup>2</sup>				
$\epsilon_{s'}$	0.001877352		$\sigma_{s'}$	375.4704	N/mm <sup>2</sup>				
C	306,783	N							
T'	191,091	N							
T	497,874	N							
NRd	0	N							
MRd	308,458,441	Nmm							

$$M_{Rd} = C (h/2 - 0,4 x) + T' (h/2-d') + T (d - h/2) = 307 (350 - 0,4 \cdot 91) + 191 (350- 42) + 498 (658 - 350) = 308.5 \text{ kNm}$$

Controllo della duttilità  $x/d = 91/658 = 0,14$

CASO 3

$$A_s = 5 \varnothing 24 = 2262 \text{ mm}^2, A'_{s'} = 2 \varnothing 24 = 905 \text{ mm}^2$$

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE

$A_s = 5 \varnothing 24 = 2262 \text{ mm}^2$  disposti su una unica fila, infatti prevedendo un ricoprimento  $c = 25 \text{ mm}$ , staffa  $\varnothing 8 \text{ mm}$ , lo spazio è sufficiente nel rispetto delle prescrizioni di legge che prevedono un interfero pari ad almeno 1 volta il diametro delle barre longitudinali e comunque superiore a 20 mm.

$$\text{Interfero } (300 - 2 \cdot 25 - 2 \cdot 8 - 5 \cdot 24)/4 = 29 \text{ mm, l'altezza utile risulta } d = 700 - 25 - 8 - 12 = 655 \text{ mm.}$$

La distanza del baricentro dell'armatura compressa ( $A'_{s'} = 905 \text{ mm}^2$ ) dal lembo superiore è pari a  $(25 + 8 + 12) = 45 \text{ mm}$ .

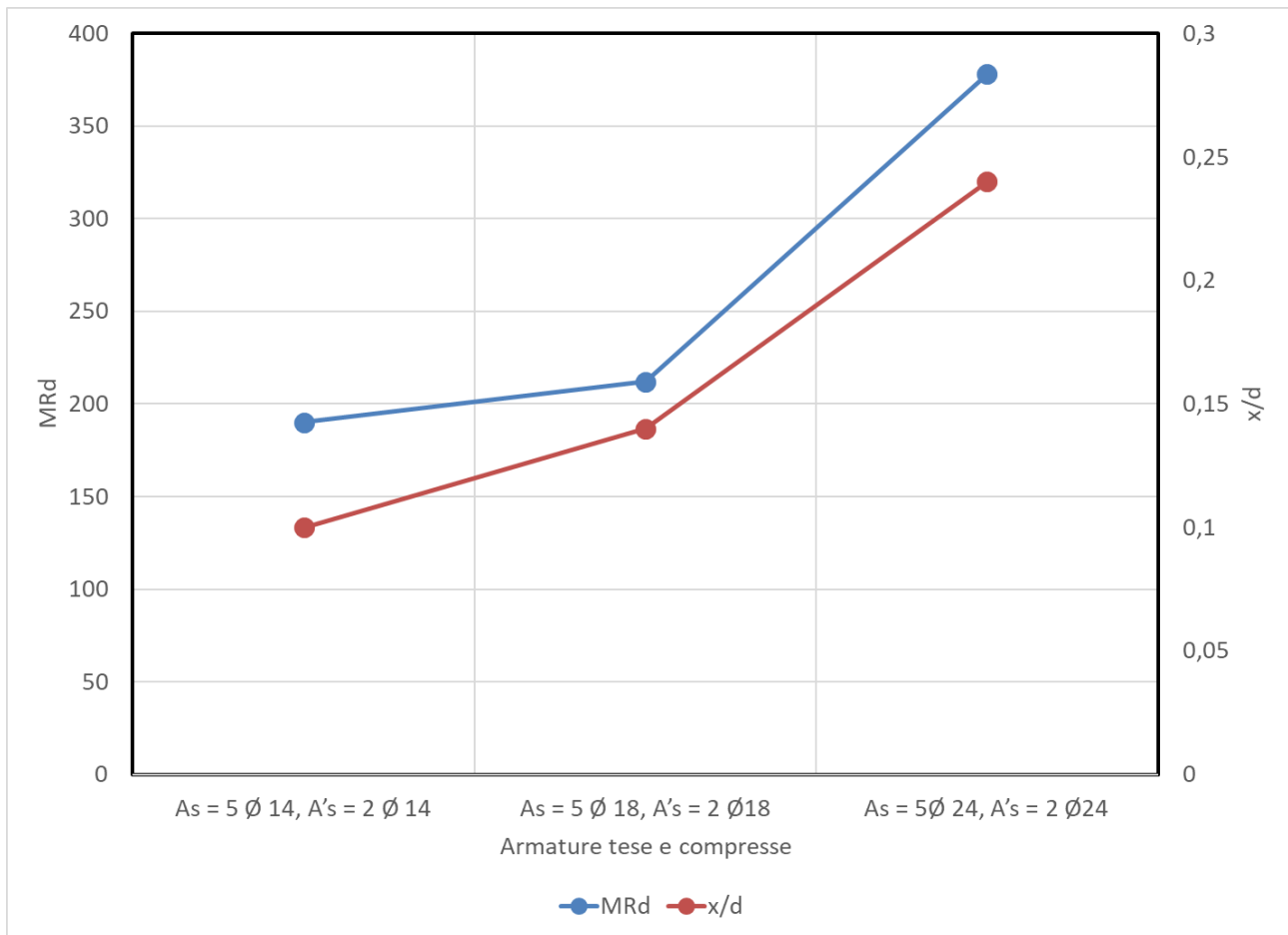
DETERMINAZIONE POSIZIONE ASSE NEUTRO

b	300	mm							
h	700	mm							
c	25	mm							
$\varnothing$	24	AREA	452	mm <sup>2</sup>	staffe	$\varnothing$	8	mm	
$A_s$	5 $\varnothing$ 24	2,262	mm <sup>2</sup>						
$A'_{s'}$	2 $\varnothing$ 24	905	mm <sup>2</sup>						
d	655	mm							
d'	45	mm							
DETERMINAZIONE ASSE NEUTRO									
x	156.8231011	mm	$\epsilon_{cu}$	0.0035					
$\epsilon_s$	0.011118382		$\sigma_s$	391.3043	N/mm <sup>2</sup>				
$\epsilon_{s'}$	0.002495684		$\sigma_{s'}$	391.3043	N/mm <sup>2</sup>				
C	531,066	N							
T'	354,044	N							
T	885,110	N							
NRd	0	N							
MRd	530,501,453	Nmm							

Scrivendo l'equilibrio rispetto al baricentro della sezione di solo calcestruzzo si ottiene:

$$M_{Rd} = C (h/2 - 0,4 x) + T' (h/2 - d') + T (d - h/2) = 531 (350 - 0,4 \cdot 68) + 354 (350 - 45) + 885 (655 - 350) = 530,5 \text{ kNm}$$

Controllo della duttilità  $x/d = 157/655 = 0,14$ .



### ESERCIZIO 3

Progettare allo stato limite ultimo l'altezza e l'armatura tesa per la sezione rettangolare ( $b = 40$  cm) che deve sopportare un momento flettente  $M_{Sd} = 420$  kNm, realizzata con calcestruzzo  $R_{ck} = 35$  N/mm<sup>2</sup> e acciaio B450C.

#### CARATTERISTICHE RESISTIVE DI CALCOLO DEI MATERIALI IMPIEGATI

Calcestruzzo:  $f_{cd} = 0,85 \cdot 0,83 \cdot 35 / 1,5 = 16,46$  N/mm<sup>2</sup>

Acciaio:  $f_{yd} = 450 / 1,15 = 391$  N/mm<sup>2</sup>

$\varepsilon_{yd} = 391 / 200.000 = 0,001957$

#### MECCANISMO DI ROTTURA

Si pone come 1° tentativo che il collasso avvenga per una deformazione raggiunta  $\varepsilon_c = 0,0035$  ed una posizione di asse neutro  $x = 0,2$  d. In tale condizione le armature tese sono snervate  $\sigma_s = 391$  N/mm<sup>2</sup>. Si considera  $d = h$ . Inoltre, si omette il contributo dell'armatura compressa, che in ogni caso va disposta poiché ha funzione di reggi staffe.

Per l'equilibrio alla traslazione  $N_{Rd} = 0 - f_{cd} \cdot 0,8 \cdot 0,2 h \cdot b + f_{yd} \cdot A_s = 0$

Per l'equilibrio alla rotazione rispetto alle armature tese  $M_{Rd} = M_{Sd}$

$f_{cd} \cdot 0,8 \cdot 0,2 h \cdot b (h - 0,4 \cdot 0,2 h) = M_{Sd}$

da cui  $h = \sqrt{\frac{M_{Sd}}{f_{cd} \cdot 0,8 \cdot 0,2 \cdot b (1 - 0,4 \cdot 0,2)}} = 658$  mm

$A_s = \frac{f_{cd} \cdot 0,8 \cdot 0,2 \cdot h \cdot b}{f_{yd}} = 1773$  mm<sup>2</sup>

da cui si ricava che occorrono  $7 \varnothing 18 = 1781$  mm<sup>2</sup>

Si procede quindi con la verifica con la sezione avente le seguenti caratteristiche

#### CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE

$b = 400$  mm

$h = 700$  mm

$A_s = 7 \varnothing 18$  disposti su una unica fila, infatti prevedendo un

ricoprimento  $c = 25$  mm, staffa  $\varnothing 8$  mm, lo spazio è sufficiente nel rispetto delle prescrizioni di legge che prevedono un interfero pari ad almeno 1 volta il diametro delle barre longitudinali e comunque superiore a 20 mm. Interfero  $(400 - 2 \cdot 25 - 2 \cdot 8 - 7 \cdot 18) / 6 = 35$  mm, l'altezza utile risulta  $d = 700 - 25 - 8 - 9 = 658$  mm. La distanza del baricentro dell'armatura compressa dal lembo superiore è pari a  $(25 + 8 + 9) = 42$  mm.

$A_s = 7 \varnothing 18 = 1781$  mm<sup>2</sup>

#### DETERMINAZIONE POSIZIONE ASSE NEUTRO

Si ipotizza la posizione dell'asse neutro:  $x = 0,2 \cdot 658 = 132$  mm

$\varepsilon_s = (d - x) / x \cdot \varepsilon_c = 0,0139$

$\sigma_s = 391$  N/mm<sup>2</sup>

$\varepsilon_s' = (x - d') / x \cdot \varepsilon_c = 0,00239$

$\sigma_s' = 391$  N/mm<sup>2</sup>

$C = f_{cd} \cdot 0,8 \cdot x \cdot b = -16,46 \cdot 0,8 \cdot 132 \cdot 400 = 695$  kN,  $T' = 0$  e  $T = 1781 \cdot 391 = 697$  kN.

In regime di flessione pura deve essere rispettato l'equilibrio alla traslazione da cui:

$N_{Rd} = -C + T = 0 = -695 + 697 = 2$  kN.

La posizione dell'asse neutro che soddisfa l'equilibrio alla traslazione risulta

$x = 132,3$  mm

$\varepsilon_s = (d - x) / x \cdot \varepsilon_c = 0,0139$

$\sigma_s = 391$  N/mm<sup>2</sup>

$\varepsilon_s' = (x - d') / x \cdot \varepsilon_c = 0,00239$

$\sigma_s' = 391$  N/mm<sup>2</sup>

$C = f_{cd} \cdot 0,8 \cdot x \cdot b = 16,46 \cdot 0,8 \cdot 132,3 \cdot 400 = 697$  kN,  $T' = 0$  e  $T = 1781 \cdot 391 = 697$  kN.

In regime di flessione pura deve essere rispettato l'equilibrio alla traslazione da cui:

$N_{Rd} = -C + T = 0 = -697 + 697 = 0$ .

Si considera soddisfatto l'equilibrio e si ricava il  $M_{Rd}$ :

Scrivendo l'equilibrio rispetto alle armature tese:

$M_{Rd} = C (d - 0,4 x) = 422$  kNm

CLS	Rck	35	N/mm <sup>2</sup>						
	fck	29.05	N/mm <sup>2</sup>						
	fcd	16.46167	N/mm <sup>2</sup>						
acciaio	B450C	450	N/mm <sup>2</sup>						
	fyd	391.3043	N/mm <sup>2</sup>						
	Es	200000	N/mm <sup>2</sup>						
	ε <sub>yd</sub>	0.001957							
CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE									
b	400	mm							
h	700	mm							
c	25	mm							
∅	18	AREA	254	mm <sup>2</sup>	staffe	∅	8	mm	
As	7∅18	1,781	mm <sup>2</sup>						
A's	0	0	mm <sup>2</sup>						
d	658	mm							
d'	42	mm							
DETERMINAZIONE ASSE NEUTRO									
x	132.3	mm	ε <sub>cu</sub>	0.0035					
ε <sub>s</sub>	0.013907407		σ <sub>s</sub>	391.3043	N/mm <sup>2</sup>				
ε <sub>s'</sub>	0.002388889		σ <sub>s'</sub>	391.3043	N/mm <sup>2</sup>				
C	696,921	N							
T'	0	N							
T	697,024	N							
NRd	103	N							
MRd	421,693,031	Nmm							

#### VERIFICA DISPOSIZIONI COSTRUTTIVE

$$A_{smin} = 0.26 \cdot f_{ctm} / f_{yk} \cdot b \cdot d = 0.26 \cdot 2.83 / 450 \cdot 400 \cdot 658 = 430 \text{ mm}^2 \text{ dove } f_{ctm} = 0.30 \cdot f_{ck}^{2/3} = 2.83 \text{ N/mm}^2$$

$$A_{smin} = 0.0013 \cdot b \cdot d = 342 \text{ mm}^2$$

$$A_{smax} = 0.04 \cdot A_c = 11200 \text{ mm}^2 \text{ dove } A_c = 400 \cdot 700 = 280000 \text{ mm}^2$$

Le disposizioni costruttive sono verificate

## ESERCIZIO 4

Progettare le armature della sezione rettangolare ( $b = 40$ ;  $h = 100$  cm) per  $M_{Sd} = 450$  kNm. Realizzata con calcestruzzo  $R_{ck} = 35$  N/mm<sup>2</sup> e acciaio B450C.

### CARATTERISTICHE RESISTIVE DI CALCOLO DEI MATERIALI IMPIEGATI

Calcestruzzo:  $f_{cd} = 0,85 \cdot 0,83 \cdot 35 / 1,5 = 16,46$  N/mm<sup>2</sup>

Acciaio:  $f_{yd} = 450 / 1,15 = 391$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{yd} = 391 / 200.000 = 0,001957$

### CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE

$b = 400$  mm

$h = 1000$  mm

supponendo di disporre le armature tese su una unica fila, ponendo  $c = 25$  mm e staffe diametro 8 mm, si ottiene  $d = h - c - \varnothing$  staffe  $- \varnothing$ long/2  $\cong 960$  mm.

### DETERMINAZIONE ARMATURA TESA - METODO 1

Si pone $M_{Rd} = M_{Sd}$	$d$	960						
$A_s = M_{Sd} / (0,9 d f_{yd})$								
$A_s$	1331.018519							

### DETERMINAZIONE ARMATURA TESA - METODO 2

Occorre risolvere il sistema formato dalle equazioni di equilibrio alla traslazione e alla rotazione rispetto all'armatura tesa. Si ipotizza il valore di  $x = 0,2 d$  per assicurare il comportamento duttile della sezione.

L'altezza utile  $d$  è forfettariamente posta uguale a 960 mm e  $d' = 40$  mm, pertanto  $x = 192$  mm.

$$\begin{cases} -f_{cd} \cdot b \cdot 0,8 \cdot x - \sigma'_s \cdot A'_s + \sigma_s \cdot A_s = 0 \\ f_{cd} \cdot b \cdot 0,8 \cdot x \cdot (d - 0,4 \cdot x) + \sigma'_s \cdot A'_s (d - d') = M_{Sd} \end{cases}$$

$$\epsilon_s = \frac{0,0035}{192} \cdot (960 - 192) = 0,014$$

$$\sigma_s = 391 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon'_s = \frac{0,0035}{192} \cdot (192 - 40) = 0,00277$$

$$\sigma'_s = 391 \text{ N/mm}^2$$

$$-412896 - 391 A'_s + 391 A_s = 0$$

$$383435105 + 359720 A'_s = 450000000$$

$$\text{si ottiene } A'_s = 185 \text{ mm}^2$$

$$A_s = 1241 \text{ mm}^2$$

### VERIFICA A FLESSIONE

CLS	Rck	35	N/mm <sup>2</sup>					
	fck	29.05	N/mm <sup>2</sup>					
	fcd	16.46167	N/mm <sup>2</sup>					
acciaio	B450C	450	N/mm <sup>2</sup>					
	f <sub>yd</sub>	391.3043	N/mm <sup>2</sup>					
	E <sub>s</sub>	200000	N/mm <sup>2</sup>					
	ε <sub>yd</sub>	0.001957						
CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE								
b	400	mm						
h	1000	mm						
c	25	mm						
∅	16	AREA	201	mm <sup>2</sup>	staffe	∅	8	mm
A <sub>s</sub>	7∅16	1,407	mm <sup>2</sup>		interferro	37		
A' <sub>s</sub>	2∅16	402	mm <sup>2</sup>					
d	959	mm						
d'	41	mm						
DETERMINAZIONE ASSE NEUTRO								
x	78.88556308	mm	ε <sub>cu</sub>	0.0035				
ε <sub>s</sub>	0.039048977		σ <sub>s</sub>	391.3043	N/mm <sup>2</sup>			
ε' <sub>s</sub>	0.001680909		σ' <sub>s</sub>	336.1818	N/mm <sup>2</sup>			
C	415,548	N						
T'	135,187	N						
T	550,735	N						
NRd	0	N						
MRd	509,499,767	Nmm	x/d	0.082258				

### VERIFICA DISPOSIZIONI COSTRUTTIVE

$$A_{smin} = 0,26 f_{ctm} / f_{yk} \cdot b_t \cdot d = 0,26 \cdot 2,83 / 450 \cdot 400 \cdot 959 = 627 \text{ mm}^2 \text{ dove } f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} = 2,83 \text{ N/mm}^2$$

$$A_{smin} = 0,0013 b_t d = 499 \text{ mm}^2$$

$$A_{smax} = 0,04 A_c = 16000 \text{ mm}^2 \text{ dove } A_c = 400 \cdot 1000 = 400000 \text{ mm}^2$$

Le disposizioni costruttive sono verificate