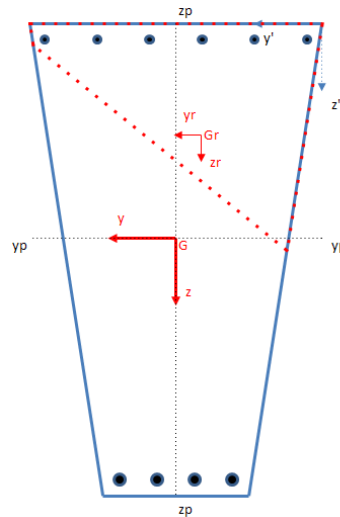


CaricoLim.Az

***Software per il calcolo delle sezioni in cemento armato normale e
precompresso***

(versione 9.0)



Validazione del software

Autore

Ing. **Ciro Azzara**

Via E. Majorana, 8 – 90035 Marone (PA)

Cell. 348 1514947

Email ing.azzara@libero.it azzara.ciro@gmail.com

SezioniCA.Az 9.0 <i>(Ing. Ciro Azzara)</i>	Validazione del software	Pag. 2 di 17
------------------------------------------------------	---------------------------------	--------------

INDICE

1. PREMESSA	3
2. ESEMPI DI VALIDAZIONE DEL CODICE	3
N. 1 – Verifica sezione rettangolare a flessione retta metodo tens. ammissibili.....	3
N° 2 – Verifica sezione a T a flessione retta metodo tens. ammissibili.....	4
N° 3 – Verifica sezione a C a flessione deviata metodo tens. ammissibili	5
N° 4 – Verifica sezione trapezia soggetta a presso flessione deviata	7
N° 5 – Verifica allo S.L.E. di fessurazione.....	8
N° 6 – Verifica sezione in C.A.P. alle tensioni ammissibili	9
N° 7 – Progetto sezione in C.A.P. alle tensioni ammissibili	11
N° 8 – Verifica sezione in C.A.P. agli S.L.U.	14
3. BIBLIOGRAFIA	17

1. PREMESSA

Di seguito vengono riportati alcuni esempi al fine di dare ulteriori chiarimenti sull'uso del software e per validare il codice di calcolo confrontando i risultati con quelli ottenuti manualmente e/o riscontrabili in letteratura tecnica e/o utilizzando altri software di comprovata affidabilità.

La taratura dei vari algoritmi di calcolo implementati, al fine di dimostrare l'attendibilità dei risultati, è una operazione fondamentale che va a tutela e garanzia dell'utente finale ed è espressamente prevista dalle NTC di cui al D.M. 14/01/2008 e al D.M. 17/01/2018 (capitolo 10), fermo restando che il progettista resta sempre e comunque unico responsabile dell'intera progettazione, come espressamente previsto dal penultimo comma del capitolo 10.1 dei citati Decreti Ministeriali.

Il progettista deve controllare l'affidabilità dei codici di calcolo utilizzati e verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti.

2. Esempi di validazione del codice

N. 1 – VERIFICA SEZIONE RETTANGOLARE A FLESSIONE RETTA METODO TENS. AMMISSIBILI

Verificare, con il metodo delle tensioni ammissibili, la sezione rettangolare 20x80 cm, risolta in [1] a pag. 108, armata al lembo inferiore con 4 ϕ 16, al lembo superiore con 2 ϕ 8 e sollecitata da un momento flettente positivo $M_y=9400$ kgm. Il copriferro è di 2,2 cm e il coeff. omogeneizzazione $n=10$.

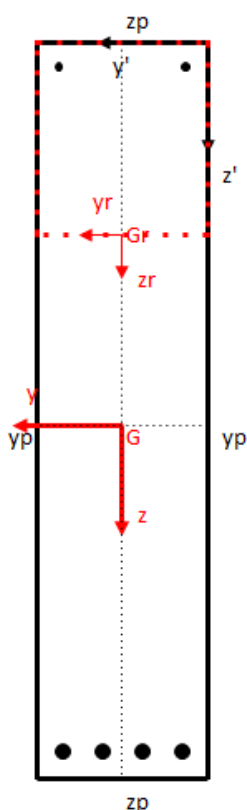
Come materiali scegliamo $R_{ck}=250$ kg/cm² e acciaio Fe B 38 k. Data la forma della sezione e la posizione delle armature, la sezione può essere risolta utilizzando la forma *Rettangolare* (DATI GENERALI).

Inseriti i dati e lanciando il calcolo si ottengono, tra gli altri, i seguenti risultati:

- altezza zona compressa = 20,82 cm
- tensione massima di compressione nel cls = -61,7 kg/cmq
- tensione massima nelle armature = 1664,1 kg/cmq

I risultati **corrispondono esattamente** con quelli ottenuti nel testo citato per via analitica.

Da notare nella figura accanto, ottenuta con il software: il baricentro G della sezione omogeneizzata, gli assi principali di inerzia y_p e z_p , il baricentro G_r della sezione reagente (cls compresso e armature), la zona compressa della sezione (poligono puntinato di colore rosso), la posizione dell'asse



SezioniCA.Az 9.0 (Ing. Ciro Azzara)	Validazione del software	Pag. 4 di 17
-----------------------------------------------	---------------------------------	--------------

neutro (che è baricentrico della sezione reagente nella sollecitazione di flessione semplice).

Si fa infine osservare che la stessa sezione poteva essere risolta con la forma geometrica **Generica** (n° poligonal=1), inserendo le coordinate dei quattro vertici rispetto ad un generico sistema di riferimento utente $y'z'$ orientato come in figura (l'origine può essere scelta in un punto qualunque; qui si è scelto il vertice della sezione in alto a destra) e inserendo i seguenti dati per i due pacchetti di armatura:

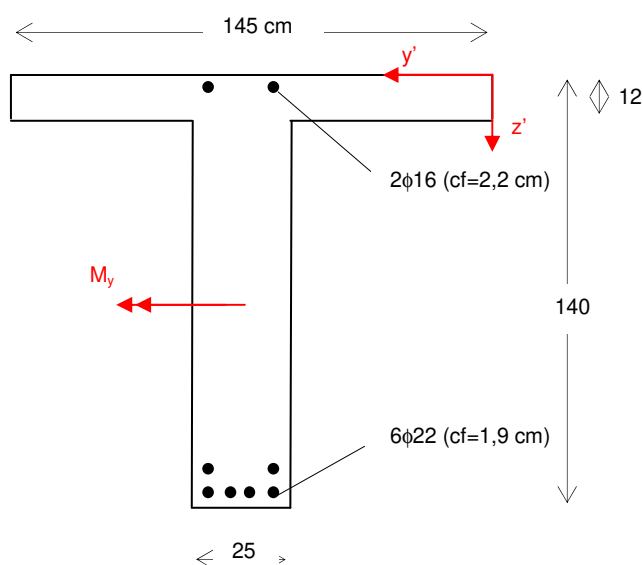
Pacchetto tondini	y'_{in} (cm)	z'_{in} (cm)	y'_{fi} (cm)	z'_{fi} (cm)	N_{tond}	d_{tond} (mm)
1	2,6	2,6	17,4	2,6	2	8
2	3	77	17	77	4	16

Da notare che del valore del copriferro se ne tiene conto quando si inseriscono le coordinate dei baricentri dei tondini di inizio e di fine del pacchetto di armatura.

N° 2 – VERIFICA SEZIONE A T A FLESSIONE RETTA METODO TENS. AMMISSIBILI

Verificare, con il metodo alle tensioni ammissibili, la sezione a T indicata sotto, risolta in [1] a pag. 110, sollecitata da un momento flettente positivo $M_y=52.000$ kgm. Il copriferro è di 2,2 cm per le barre superiori e 1,9 cm per le barre inferiori. Il coeff. omogeneizzazione è $n=10$.

Come materiali scegliamo $R_{ck}=250$ kg/cm² e acciaio Fe B 38 k. Dato che il copriferro ha valore differente ai due lembi è necessario utilizzare la forma *Generica* (DATI GENERALI).

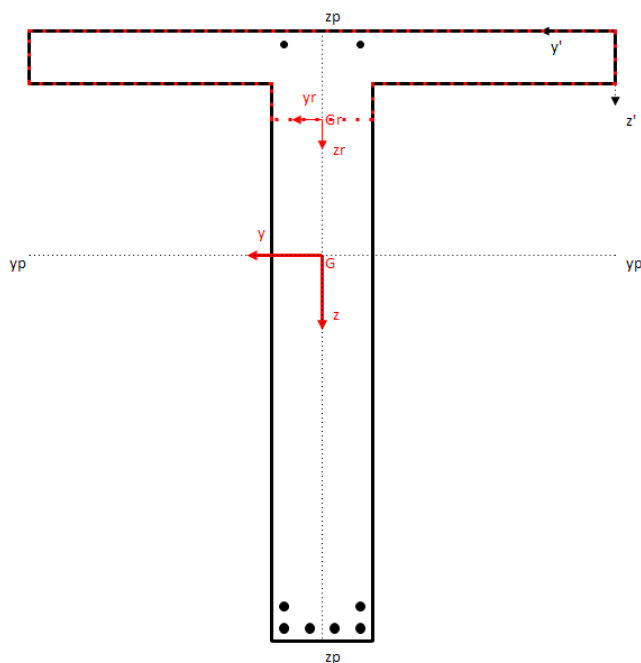


Assunto il sistema di riferimento utente $y'z'$ nel vertice all'estremo in alto a destra, si determinano le coordinate degli otto vertici che definiscono la sezione, procedendo in senso orario:

vert.	y' (cm)	z' (cm)
1	0	0
2	0	12
3	60	12
4	60	140
5	85	140
6	85	12
7	145	12
8	145	0

Ricaviamo i dati dei tre pacchetti di armatura disposti orizzontalmente:

Pacchetto tondini	y' in (cm)	z' in (cm)	y' fi (cm)	z' fi (cm)	N _{tond}	d _{tond} (mm)
1	63	3	82	3	2	16
2	63	132	82	132	2	22
3	63	137	82	137	4	22



Inseriamo tutti i dati nel software e lanciamo il calcolo. Si ottengono, tra l'altro, i seguenti risultati:

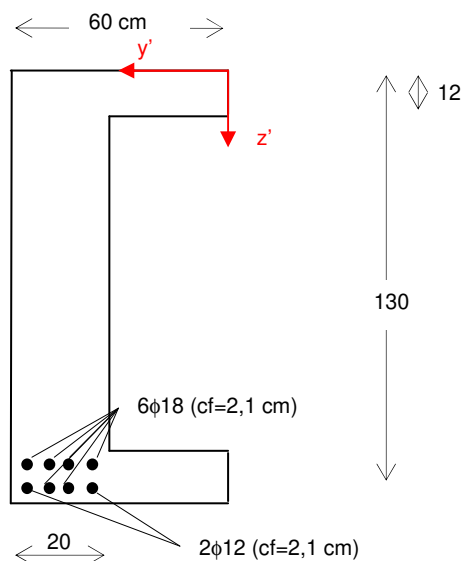
- altezza zona compressa = 20,21 cm (nel testo citato 21 cm);
- tensione massima di compressione nel cls = -30,8 kg/cm² (-32)
- tensione massima nelle armature = 1779,5 kg/cm² (1752).

I risultati sono praticamente corrispondenti a quelli ottenuti nel testo citato.

N° 3 – VERIFICA SEZIONE A C A FLESSIONE DEVIATA METODO TENS. AMMISSIBILI

Verificare la sezione a C indicata sotto, risolta in [1] a pag. 125, sollecitata da un momento flettente positivo $M_y = 30.000$ kgm. Il copriferro è di 2,1 cm. Il coeff. omogeneizzazione è $n=10$.

Come materiali scegliamo $R_{ck} = 250$ kg/cm² e acciaio Fe B 38 k. Data la forma della sezione è necessario utilizzare la forma *Generica*.



Assunto il sistema di riferimento utente $y'z'$ nel vertice all'estremo in alto a destra, si determinano le coordinate degli otto vertici che definiscono la sezione, procedendo in senso orario:

vert.	y' (cm)	z' (cm)
1	0	0
2	0	12
3	40	12
4	40	118
5	0	118
6	0	130
7	60	130
8	60	0

Ricaviamo i dati dei tre pacchetti di armatura disposti orizzontalmente (la fila più in basso è infatti costituita da tondini di diverso diametro):

Pacchetto tondini	y'_{in} (cm)	z'_{in} (cm)	y'_{fi} (cm)	z'_{fi} (cm)	N_{tond}	d_{tond} (mm)
1	43	121	57	121	4	18
2	43	127,3	57	127,3	2	12
3	47	127	53	127	2	18

Inseriamo tutti i dati nel software e lanciamo il calcolo. Si ottengono, tra l'altro, i seguenti risultati:

- tensione massima di compressione nel cls = -82,3 kg/cm² (nel testo citato -87 kg/cm²)
- tensione massima nelle armature = 1730,5 kg/cm² (1769)

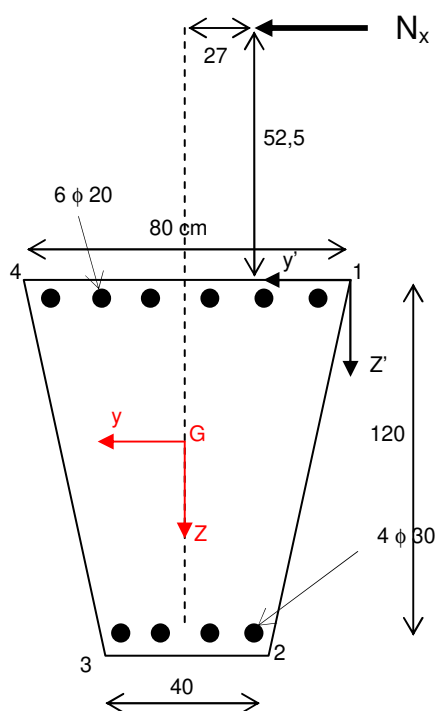
I risultati sono praticamente corrispondenti a quelli ottenuti nel testo citato, dove essendo stati ottenuti per via grafica sono affetti da errore di graficismo.

N° 4 – VERIFICA SEZIONE TRAPEZIA SOGGETTA A PRESSO FLESSIONE DEVIATA

Verificare, con il metodo alle tensioni ammissibili, la sezione trapezia indicata sotto, risolta in [1] a pag. 178 con metodo grafico.

La sezione, simmetrica rispetto all'asse verticale, è sollecitata da uno sforzo di compressione $N_x = -26.000$ kg, applicato a 52,5 cm dal bordo superiore della sezione e a 27 cm dall'asse di simmetria. Si assume:

- copriferro= 3 cm;
- coeffic. n di omogeneizzazione = 10;
- modulo elastico del cls = 200.000 kg/cm^2 .



Data la forma della sezione occorre scegliere la sezione *Generica*. Si devono inserire, come visto per gli esempi precedenti, le coordinate dei vertici della sezione e quelle dei baricentri dei tondini di inizio e di fine di ogni pacchetto di armatura presente nella sezione rispetto ad un generico sistema di riferimento $y'z'$ fissato dall'utente. Fissiamo tale sistema coincidente con il vertice in alto a destra e determiniamo le coordinate dei vertici della sezione, da identificarsi in senso orario:

vertice	y' (cm)	z' (cm)
1	0	0
2	20	120
3	60	120
4	80	0

Per i due pacchetti di armatura si ha:

SezioniCA.Az 9.0 (Ing. Ciro Azzara)	Validazione del software	Pag. 8 di 17
-----------------------------------------------	---------------------------------	--------------

Pacchetto tondini	y'_{in} (cm)	z'_{in} (cm)	y'_{fi} (cm)	z'_{fi} (cm)	N_{tond}	d_{tond} (mm)
1	4	4	76	4	6	20
2	24,5	115,5	55,5	115,5	4	30

Inseriti i dati si avvia il calcolo in modo da determinare la posizione del baricentro G della sezione omogeneizzata:

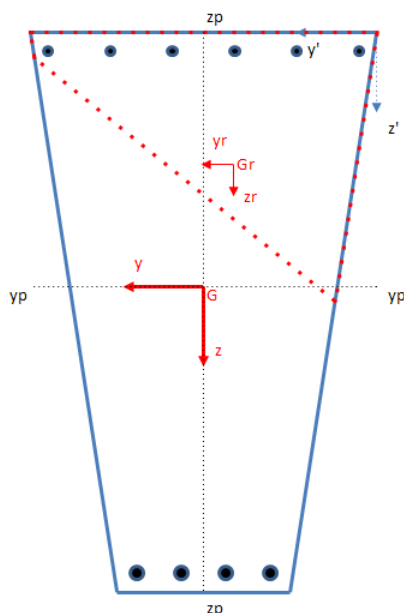
$$y'_G = 40 \text{ cm} \quad z'_G = 54,43 \text{ cm}$$

Ora occorre calcolare, per inserirle come input nel software *SezioniCA.Az*, le caratteristiche di sollecitazione rispetto al sistema di riferimento yz avente gli assi paralleli a $y'z'$ e origine nel baricentro G della sezione omogeneizzata:

$$M_y = N_x e_z = -26.000 \times (-(52,5+54,43)) = 2.780.180 \text{ kg cm}$$

$$M_z = -N_x e_y = 26.000 \times (-27) = -702.000 \text{ kg cm}$$

Risolvendo la sezione per mezzo del software si ottiene (la zona puntinata in rossa è la parte compressa della sezione, con evidenziata quindi la posizione dell'asse neutro):



- massima tensione nel cls = - 46,8 kg/cm²
- massima tensione nelle barre di armatura = - 644 kg/cm² (il segno meno indica che si tratta di tensioni di compressione).

I valori trovati sono molto prossimi a quelli riportati nel libro citato ($\sigma_c=46 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{fmax}=668 \text{ kg/cm}^2$).

Da notare che nella presso-flessione l'asse neutro non è baricentrico della sezione reagente (G_r è il baricentro della sezione reagente).

N° 5 – VERIFICA ALLO S.L.E. DI FESSURAZIONE

Verificare alla fessurazione (NTC 2008), con il metodo indicato nella circolare ministeriale del 1996, la sezione rettangolare 30x70 cm, risolta in [1] a pag. 355, armata al lembo inferiore con 4 ϕ 18 e sollecitata da un momento flettente (combinazione quasi permanente) positivo $M_y=11375 \text{ kgm}$. Il copriferro è di 2,1 cm.

Come materiali scegliamo $R_{ck}=250 \text{ kg/cm}^2$ e acciaio B450C. La resistenza media a trazione del cls f_{ctm} si assume pari a $19,3 \text{ kg/cm}^2$.

Si fissano i seguenti altri dati:

- carichi di breve durata

- condizioni ambientali ordinarie
- armature poco sensibili alla corrosione.

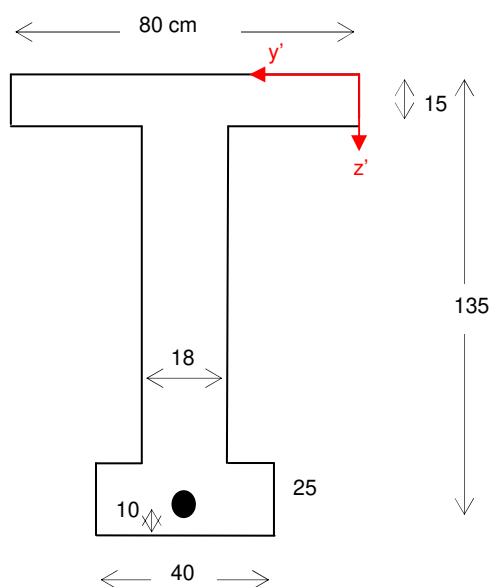
Inseriti i dati e lanciando il calcolo si ottengono, tra gli altri, i seguenti risultati:

momento di fessurazione della sezione = 5897,67 kg*m
Stato Limite da considerare: Stato Limite di apertura delle fessure
ampiezza ammissibile di apertura delle fessure = 0,3 mm
copriferro = 2,1 cm
interasse tra le armature tese = 8 cm
diametro le armature tese = 18 mm
tensione di trazione nelle armature tese = 1867,9 kg/cm²
rapporto armatura efficace = 0,045
coeff. funzione della sollecitazione in sezione $k_3 = 0,125$
tensione di trazione armature soggette a momento di fessuraz. = 968,5 kg/cm²
distanza media tra le fessure = 7,79 cm
deformaz. unitaria media delle barre di armat. = 0,0006504
valore di calcolo di apertura delle fessure **wd = 0,086 mm**
Verifica di fessurazione soddisfatta

Il valore riportato nel testo citato è di 0,078 mm, molto prossimo a quello ottenuto con *SezioniCA.Az*.

N° 6 – VERIFICA SEZIONE IN C.A.P. ALLE TENSIONI AMMISSIBILI

Verificare la sezione precompressa, risolta in [1] a pag. 414, armata al lembo inferiore con un cavo da precompressione (che si suppone $\phi 30$) e sollecitata da un momento flettente positivo dovuto al peso proprio pari a $M_{y,pp}=180$ tm e da un momento a pieno carico pari a $M_{y,pp+q}=290$ tm



Lo sforzo di precompressione N_p vale 320 t ed è applicato a 10 cm dal lembo inferiore della trave.

SezioniCA.Az 9.0 <i>(Ing. Ciro Azzara)</i>	Validazione del software	Pag. 10 di 17
------------------------------------------------------	---------------------------------	---------------

Verificare alle tensioni ammissibili la sezione al disarmo ed in esercizio, prevedendo cadute di tensione al 20% e che il cls abbia resistenza caratteristica $R_{ck}=400 \text{ kg/cm}^2$. Si assume una tensione ammissibile nel cls compresso al tiro di 192 kg/cm^2 ed in esercizio di 152 kg/cm^2 . Si vuole poi che in entrambe le situazioni non si abbiano tensioni di trazione (sezione tutta compressa). Per l'armatura (acciaio armonico) si considera una tensione ammissibile di 4.000 kg/cm^2 .

Assunto il sistema di riferimento utente $y'z'$ nel vertice all'estremo in alto a destra, si determinano le coordinate degli dodici vertici che definiscono la sezione, procedendo in senso orario:

vert.	y' (cm)	z' (cm)
1	0	0
2	0	15
3	31	15
4	31	110
5	20	110
6	20	135
7	60	135
8	60	110
9	49	110
10	49	15
11	80	15
12	80	0

I dati relativo all'unico pacchetto di armatura sono:

Pacchetto tondini	y'_{in} (cm)	z'_{in} (cm)	y'_{fi} (cm)	z'_{fi} (cm)	N_{tond}	d_{tond} (mm)
1	40	125	40	125	1	30

Inseriamo tutti i precedenti dati nel software (stato di sollecitazione piano).

Verifica al tiro

Le sollecitazioni agenti sulla sezione al momento del tiro, da inserire nel programma, sono le seguenti:

$$N_x = \beta N_p = -1,25 \times 320 = -400 \text{ t (negativo essendo di compressione)}$$

$$T_z = 0$$

$$M_y = M_{y,pp} + \beta N_p e = 180 - 400 \times 0,64 = -76 \text{ tm}$$

dove:

$e = H - 0,1 - z'_G = 1,35 - 0,1 - 0,61 = 0,64 \text{ m}$ è l'eccentricità dello sforzo di precompressione rispetto al baricentro G della sezione geometrica; z'_G è la posizione del baricentro G della sezione rispetto all'asse y' ottenuto con il programma inserendo $N_{tond}=0$. La posizione del baricentro della sezione omogeneizzata (considerando quindi l'armatura) si ottiene con il programma ripristinando $N_{tond}=1$.

SezioniCA.Az 9.0 (Ing. Ciro Azzara)	Validazione del software	Pag. 11 di 17
-----------------------------------------------	---------------------------------	---------------

Nel determinare le sollecitazioni al tiro si è tenuto conto che la caduta di tensione in esercizio è del 20% ($\beta=1,25$).

Lanciando il calcolo si ottengono, tra l'altro, i seguenti risultati:

- ✓ sezione tutta compressa, essendo ovunque le tensioni negative
- ✓ tensione massima di compressione nel cls = $160,7 \text{ kg/cm}^2$ (nel testo citato $168,9 \text{ kg/cm}^2$)
- ✓ tensione minima di compressione nel cls = $46,7 \text{ kg/cm}^2$ ($48,1 \text{ kg/cm}^2$)

La sezione è quindi verificata al tiro, essendo tutta compressa e con valori della tensione di compressione inferiore a quelli ammissibili.

Si può notare come i risultati sono praticamente corrispondenti a quelli ottenuti nel testo citato.

Verifica in esercizio

Le sollecitazioni agenti sulla sezione in esercizio, da inserire nel programma, sono le seguenti:

$$N_x = N_p = -320 \text{ t}$$

$$T_z = 0$$

$$M_y = M_{y,pp+q} + N_p e = 290 - 320 \times 0,64 = 85,2 \text{ tm}$$

Lanciando il calcolo si ottengono, tra l'altro, i seguenti risultati:

- ✓ sezione tutta compressa, essendo ovunque le tensioni negative
- ✓ tensione massima di compressione nel cls = $139,7 \text{ kg/cm}^2$ ($142,4 \text{ kg/cm}^2$)
- ✓ tensione minima di compressione nel cls = $11,2 \text{ kg/cm}^2$ ($8,3 \text{ kg/cm}^2$)

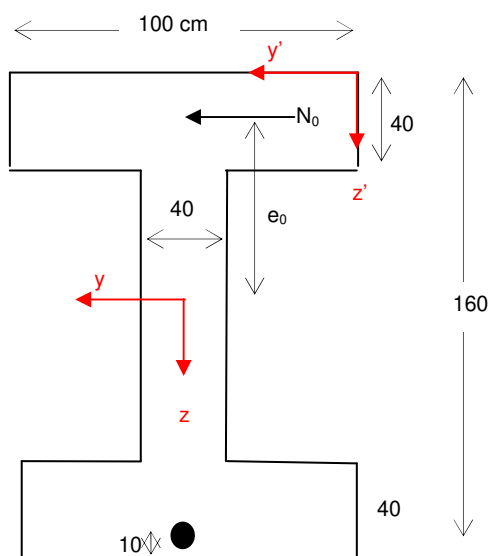
La sezione è quindi verificata anche in esercizio, essendo tutta compressa e con valori della tensione di compressione inferiore a quelli ammissibili.

N° 7 – PROGETTO SEZIONE IN C.A.P. ALLE TENSIONI AMMISSIBILI

La sezione seguente, risolta in [1] pag. 421, è sollecitata da uno sforzo normale eccentrico N_0 di compressione variabile da 300 (al tiro) a 560 t (in esercizio) con eccentricità, rispetto al baricentro geometrico, $e_0 = -60 \text{ cm}$ (il punto di applicazione cade sul semiasse negativo di z producendo quindi un momento M_y positivo).

Si vuole determinare lo sforzo di precompressione N_p tale da eliminare in fase iniziale e finale trazione ai lembi estremi, prevedendo cadute di tensione al 20% e il baricentro dei cavi di precompressione a 10 cm dal lembo inferiore della sezione.

Il cls ha resistenza caratteristica $R_{ck} = 400 \text{ kg/cm}^2$. Si assume una tensione ammissibile nel cls compresso al tiro di 192 kg/cm^2 ed in esercizio di 152 kg/cm^2 . Per l'armatura (acciaio armonico) si considera una tensione ammissibile di 4.000 kg/cm^2 .



Il problema può essere risolto a tentativi. Si ipotizza un primo valore di N_p (di compressione e quindi negativo) e si effettua la verifica come visto nell'esercizio precedente. È opportuno verificare per prima la condizione di esercizio, che in genere è quella più restrittiva, e poi quella al tiro.

Assunto il sistema di riferimento utente $y'z'$ nel vertice all'estremo in alto a destra, si determinano le coordinate degli dodici vertici che definiscono la sezione, procedendo in senso orario:

vert.	y' (cm)	z' (cm)
1	0	0
2	0	40
3	30	40
4	30	120
5	0	120
6	0	160
7	100	160
8	100	120
9	70	120
10	70	40
11	100	40
12	100	0

I dati relativo all'unico pacchetto di armatura sono:

Pacchetto tondini	y'_{in} (cm)	z'_{in} (cm)	y'_{fi} (cm)	z'_{fi} (cm)	N_{tond}	d_{tond} (mm)
1	50	150	50	150	1	20

Inseriamo i precedenti dati nel software (stato di sollecitazione piano, ...) e iniziamo i vari tentativi.

1° tentativo $N_p = -100$ t

SezioniCA.Az 9.0 (Ing. Ciro Azzara)	Validazione del software	Pag. 13 di 17
-----------------------------------------------	---------------------------------	---------------

Verifica in esercizio

Le sollecitazioni agenti sulla sezione in esercizio, da inserire nel programma, sono le seguenti:

$$N_x = N_0 + N_p = - 560 - 100 = - 660 \text{ t}$$

$$T_z = 0$$

$$M_y = M_{y,pp+q} + N_p e = 560 \times 0,6 - 100 \times 0,7 = 336 - 70 = 266 \text{ tm}$$

dove $M_{y,pp+q} = N_0 \times e_0$ è il momento prodotto dal carico esterno in esercizio ed $e = H - 0,1 - z'_G = 1,6 - 0,1 - 0,8 = 0,7 \text{ m}$ è l'eccentricità dello sforzo di precompressione rispetto al baricentro G della sezione geometrica.

Lanciando il calcolo si ottiene, tra l'altro, il risultato che la sezione è in parte compressa e in parte tesa (tensione massima di trazione 8 kg/cm^2) e quindi la verifica non è soddisfatta.

2° tentativo $N_p = -130 \text{ t}$

Verifica in esercizio

Le sollecitazioni agenti sulla sezione in esercizio, da inserire nel programma, sono le seguenti:

$$N_x = N_0 + N_p = - 560 - 130 = - 690 \text{ t}$$

$$T_z = 0$$

$$M_y = M_{y,pp+q} + N_p e = 560 \times 0,6 - 130 \times 0,7 = 245 \text{ tm}$$

Lanciando il calcolo si vede che si ha ancora tensione di trazione, ma di valore molto più basso ($0,1 \text{ kg/cm}^2$). Volendo eliminare del tutto la tensione di trazione occorre aumentare un po' lo sforzo di precompressione.

3° tentativo $N_p = -132 \text{ t}$

Verifica in esercizio

Le sollecitazioni agenti sulla sezione in esercizio, da inserire nel programma, sono le seguenti:

$$N_x = N_0 + N_p = - 560 - 132 = - 692 \text{ t}$$

$$T_z = 0$$

$$M_y = M_{y,pp+q} + N_p e = 560 \times 0,6 - 132 \times 0,7 = 243,6 \text{ tm}$$

Lanciando il calcolo si vede che la sezione è tutta compressa, con minima tensione di compressione pari a $0,5 \text{ kg/cm}^2$ e massima tensione di compressione pari a 123 kg/cm^2 . Occorre ora fare la verifica al tiro.

Verifica al tiro

Le sollecitazioni agenti sulla sezione al momento del tiro, da inserire nel programma, sono le seguenti:

$$N_x = N_0 + \beta N_p = - 300 - 1,25 \times 132 = - 465 \text{ t}$$

SezioniCA.Az 9.0 (Ing. Ciro Azzara)	Validazione del software	Pag. 14 di 17
-----------------------------------------------	---------------------------------	---------------

$$T_z = 0$$

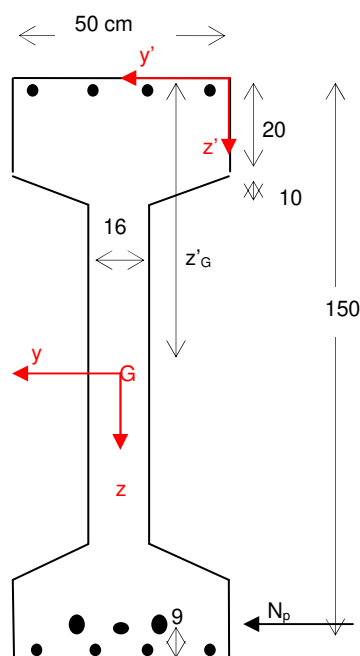
$$M_y = M_{y,pp} + \beta N_p e = 300 \times 0,6 - 1,25 \times 132 \times 0,7 = 64,5 \text{ tm}$$

Lanciando il calcolo si vede che la sezione è tutta compressa, con massima tensione di compressione pari a $57,6 \text{ kg/cm}^2$.

I risultati ottenuti corrispondono esattamente con quelli riportati in [1].

N° 8 – VERIFICA SEZIONE IN C.A.P. AGLI S.L.U.

La sezione seguente, risolta in [1] pag. 463, è sollecitata (fase di esercizio) da un momento flettente positivo $M_{ye} = 284.400 \text{ kgm}$ ed è precompressa da uno sforzo normale eccentrico N_p di compressione pari a 285.645 kg .



L'armatura da precompressione (acciaio armonico), posta a 9 cm dal lembo inferiore, ha diametro equivalente di 30,76 mm (cavo centrale) e di 37,68 mm per ciascuno dei due cavi estremi.

Nella sezione è presente anche armatura ordinaria B450C ($f_{yk} = 4400 \text{ kg/cm}^2$), disposta lungo i lembi superiore e inferiore (copriferro 2,4 cm) e costituita da $4\phi 12$.

Il cls ha resistenza caratteristica $R_{ck} = 400 \text{ kg/cm}^2$ con $f_{cd} = 176 \text{ kg/cm}^2$ e $E_c = 360.000 \text{ kg/cm}^2$ (diagramma di calcolo stress block).

Per l'armatura (acciaio armonico) si considera una tensione caratteristica convenzionale di snervamento f_{yk} di 17.500 kg/cm^2 a cui corrisponde una resistenza di calcolo di $17500/1,15 = 15217 \text{ kg/cm}^2$ (diagramma elastico-perfettamente plastico). Il modulo elastico si assume pari a $2.000.000 \text{ kg/cm}^2$.

SezioniCA.Az 9.0 (Ing. <i>Ciro Azzara</i>)	Validazione del software	Pag. 15 di 17
-------------------------------------------------------	---------------------------------	---------------

L'eccentricità dello sforzo di precompressione rispetto al baricentro geometrico¹ è di 150-76,9-9=64,1 cm, mentre rispetto al baricentro G della sezione omogeneizzata (si tiene conto delle armature), calcolabile con il software, è di H-z'_G-9=150-82,7-9=58,3 cm.

Si vuole effettuare la verifica allo stato limite ultimo calcolando il momento di rottura (o momento resistente a presso-flessione retta) della sezione così sollecitata.

Il carico di precompressione N_p è applicato all'insieme dei tre cavi. La tensione media applicata ai cavi da precompressione vale:

$$\sigma_{f0} = \frac{N_p}{A_{fp}} = \frac{285.645}{29,728} = 9.608,6 \text{ kg/cm}^2$$

a cui corrisponde una deformazione iniziale dei cavi dovuta alla pretensione pari a

$$\varepsilon_{f0} = \frac{\sigma_{f0}}{E_s} = \frac{9.608,6}{2.000.000} = 0,004804 = 0,4804\%$$

Assunto il sistema di riferimento utente y'z' nel vertice all'estremo in alto a destra, si determinano le coordinate degli dodici vertici che definiscono la sezione, procedendo in senso orario:

vert.	y' (cm)	z' (cm)
1	0	0
2	0	20
3	17	30
4	17	115
5	0	125
6	0	150
7	50	150
8	50	125
9	33	115
10	33	30
11	50	20
12	50	0

I dati relativi ai quattro pacchetti di armatura sono:

Pacchetto tondini	y' _{in} (cm)	z' _{in} (cm)	y' _{fi} (cm)	z' _{fi} (cm)	N _{tond}	d _{tond} (mm)	Armat. da precompr?
1	25	141	25	141	1	30,76	Si
2	14	141	36	141	2	37,68	Si
3	3	147	47	147	4	12	No
4	3	3	47	3	4	12	No

¹ Si può determinare con il programma impostando a zero il numero dei tondini di ogni pacchetto di armatura.

SezioniCA.Az 9.0 <i>(Ing. Ciro Azzara)</i>	Validazione del software	Pag. 16 di 17
------------------------------------------------------	---------------------------------	---------------

Nelle condizioni di esercizio le sollecitazioni agenti sulla sezione, da inserire nel programma, sono le seguenti:

$$N_x = N_p = - 285.645 \text{ kg}$$

$$M_y = M_{ye} + N_p e = 284.400 - 285.645 \times 0,58 = 101.301,6 \text{ kgm}$$

dove “e”, come già detto, è l’eccentricità dello sforzo di precompressione rispetto al baricentro G della sezione omogeneizzata.

Inseriamo tutti i dati nel software (stato di sollecitazione piano) e lanciamo il calcolo. Si ottengono, tra gli altri, i seguenti risultati:

momenti ultimi o resistenti della sezione soggetta a presso/tenso-flessione retta (corrispondenti a Ned)
(sono i momenti che si leggono nel dominio di rottura in corrispondenza dell'intersezione con la verticale passante per il punto rosso rappresentativo delle sollecitazioni agenti)

$$Myu_s = \mathbf{331276,4 \text{ kg*m}}$$

$$Myu_i = -124487,3 \text{ kg*m}$$

essendo il punto rappresentativo delle sollecitazioni di progetto non esterno al dominio di rottura $N_x\text{-}M_y$ ($Myu_i \leq Medy \leq Myu_s$) la verifica è soddisfatta

Il momento ultimo corrispondente a $N_x=0$ vale 441.000 kgm circa (lettura fatta direttamente sul dominio di rottura $N_x\text{-}M_y$).

Come è facile vedere, i risultati ottenuti corrispondono con quelli riportati in [1].

Osservazione: Nel caso di trave con cavi disposti con tracciato curvilineo la verifica della trave deve essere effettuata considerando diverse sezioni, determinando per ognuna delle quali la posizione dei cavi e l’entità dello sforzo normale, con relativa posizione, e di taglio di precompressione.

SezioniCA.Az 9.0 (Ing. Ciro Azzara)	Validazione del software	Pag. 17 di 17
-----------------------------------------------	---------------------------------	---------------

3. BIBLIOGRAFIA

- [1] Giangreco E. – *Teoria e tecnica delle costruzioni*, vol. 1 - Liguori editore, Napoli 1992

Data revisione documento: **Marzo 2022**