

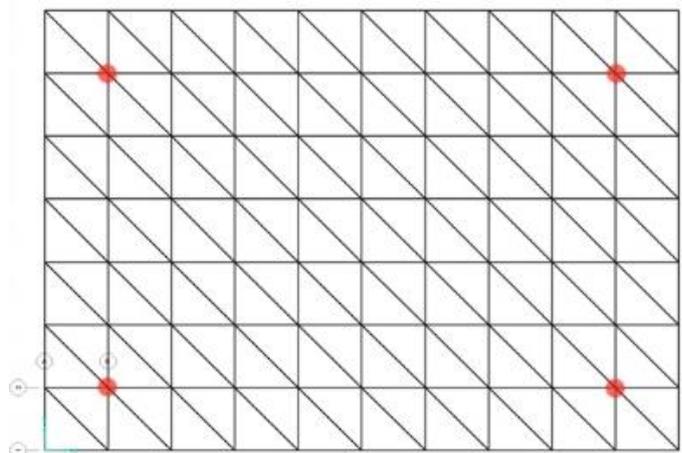
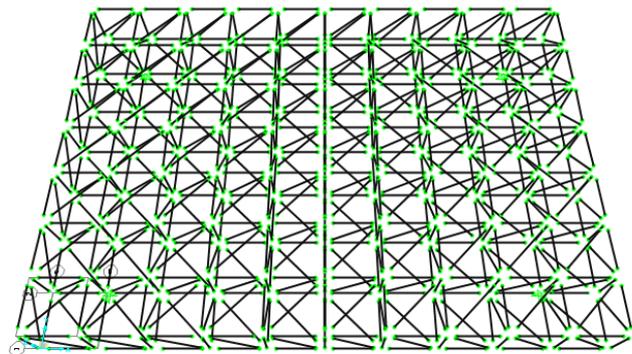
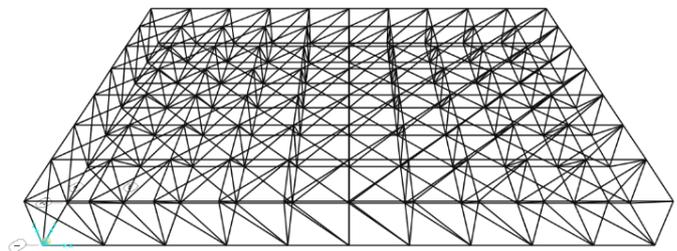
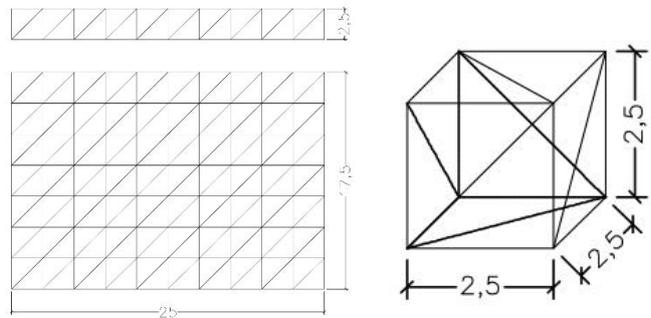
### Esercitazione 1\_Travatura reticolare 3D

Ho iniziato lo svolgimento dell'esercitazione ipotizzando uno scenario nel quale era richiesta la progettazione di un elemento strutturale, collocato al primo piano, che potesse sostenere il peso di un edificio di 5 piani con il minor numero possibile di appoggi. Si progetta quindi una trave reticolare spaziale di  $25m \times 17,5m$  con lo scopo di rifondare l'edificio e rispondere in maniera performante a queste grandi sollecitazioni. Si è scelto per questa esercitazione un modulo cubico di  $2,5m \times 2,5m \times 2,5m$ , ripetuto 10 volte in larghezza e 7 in altezza.

Ho iniziato disegnando il modulo di base su AutoCAD, importandolo poi su SAP e ripetendolo per il numero di moduli necessari a coprire la superficie totale dell'edificio. In questo modo abbiamo realizzato l'elemento che sarà sottoposto ad analisi dei carichi e conseguente dimensionamento.

A questo punto inserisco sia le cerniere interne (**Assign/frame/releases/moment2-2, moment 3-3 e torsion**), che caratterizzano i nodi strutturali di una travatura reticolare, sia i vincoli esterni (**assign/joint/restraints/ scelgo la cerniera**). Ho immaginato che, essendo queste strutture utilizzate per superare luci importanti con un numero di appoggi molto basso, il numero di cerniere esterne da inserire potesse essere pari a *quattro*, con una luce di 20m orizzontalmente e 12,5m verticalmente, collocate in modo da sfruttare un piccolo oggetto perimetrale.

Per prendere in considerazione il peso proprio della struttura durante il calcolo delle sollecitazioni, opero un primo pre dimensionamento, basandomi sul fatto che le aste compresse di acciaio hanno spesso il problema della snellezza e che la normativa prevede per le aste scariche una  $\lambda < 200$ . Sapendo che la snellezza è:  $\lambda = \frac{l_0}{\rho_{min}}$ , e che la grandezza che definirà la mia sezione è  $\rho_{min}$  (raggio d'inerzia), conoscendo sia  $\lambda$  che  $l_0$  mi trovo la sezione.



$$200 = \frac{l_0}{\rho_{min}} \rightarrow \text{avendo } l_0 = 2,5\text{m}, \rightarrow 200 = \frac{2,5}{\rho_{min}} \rightarrow \rho_{min} = \frac{2,5}{200} \rightarrow \rho_{min} = 0,0125\text{m} = 1,25\text{cm}$$

Dovrò quindi avere una sezione con un raggio di inerzia maggiore o uguale a 1,25cm. Dal sagomario di riferimento della *Fondazione Promozione Acciaio*<sup>1</sup>, riferita alla normativa europea EN10210 per profili formati a caldo, avrò una sezione di 42,4mm di diametro e 2,6mm di spessore:

42,4	2,6	2,55	3,25	6,46	1,41	3,05	4,12	12,9	6,10	0,133	391,9
------	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	-------

Scelto un acciaio S275, vado così a definire la sezione in SAP inserendo tutte le caratteristiche trovate fino adesso (**assign /frame/frame sections / add new property/...**). A questo punto il programma ha tutte le caratteristiche necessarie per poter risolvere lo schema statico e restituirmi i valori delle reazioni vincolari, grazie alle quali potrò trovarmi il peso in kN della struttura.

Dobbiamo creare quindi un “modello di carico” che tenga in considerazione del solo il carico distribuito dovuto dal peso proprio della struttura e far partire l’analisi (**Run/ DEAD 1 → Run Now**)

In output il programma ci darà vari livelli d’informazione partendo dalla deformazione dell’elemento sotto il suo peso, alla tabella con i valori delle reazioni vincolari che esporteremo in Excel.

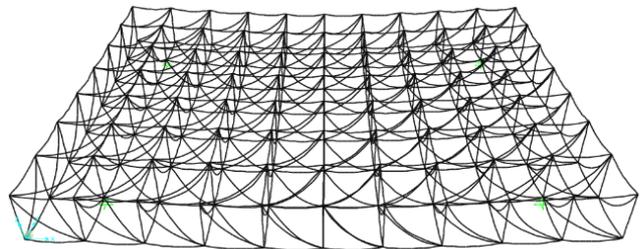
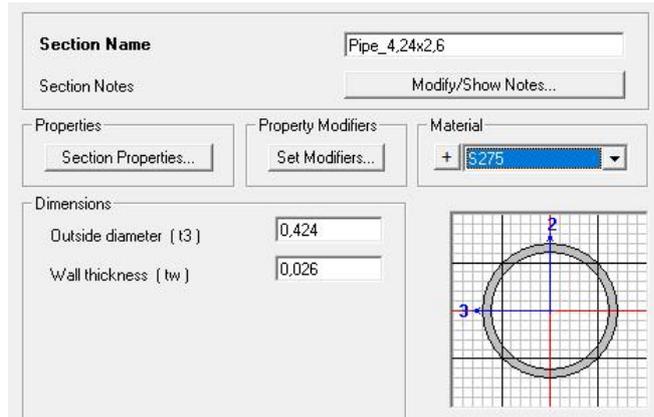


TABLE: Joint Reactions

Joint	Rx (kN)	Ry (kN)	Rz (kN)
6	4,658	0,328	<b>11,949</b>
64	-9,299	2,736	<b>13,763</b>
162	9,878	-3,228	<b>13,763</b>
180	-5,236	0,165	<b>11,949</b>
<b>TOT.</b>			<b>51,424 kN</b>

Dalla tabella possiamo vedere le reazioni vincolari lungo l’asse delle x, y e z. Quello che a noi interessa è la forza relativa alla reazione vincolare verticale, che nella tabella viene visualizzata come Rz. La somma dei valori nelle quattro cerniere, e quindi il peso, è pari a 51,424 kN.

Prevedendo un carico di 10kN/m<sup>2</sup>, dobbiamo calcolarci il carico complessivo a cui sarà soggetta la struttura:

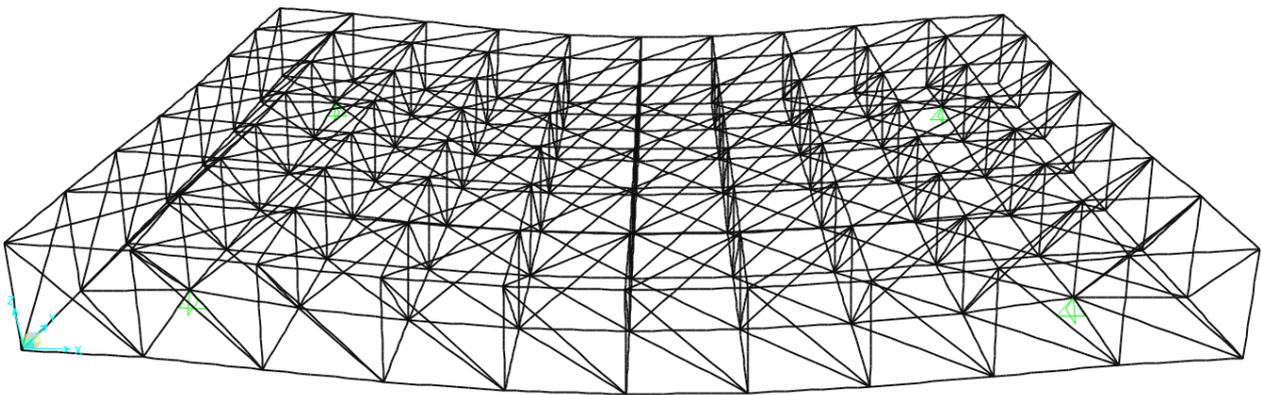
$$25\text{m} * 17,5\text{m} * 10\text{kN/m}^2 = 4.375 \text{ kN} \rightarrow 4.375 * 5 = 21.875 \text{ kN} \rightarrow 21.875 + 51,42 = \mathbf{21.926,42 \text{ kN}}$$

<sup>1</sup> [http://www.promozioneacciaio.org/sagomari/sagomario\\_tubi\\_10210\\_circolari.pdf](http://www.promozioneacciaio.org/sagomari/sagomario_tubi_10210_circolari.pdf)

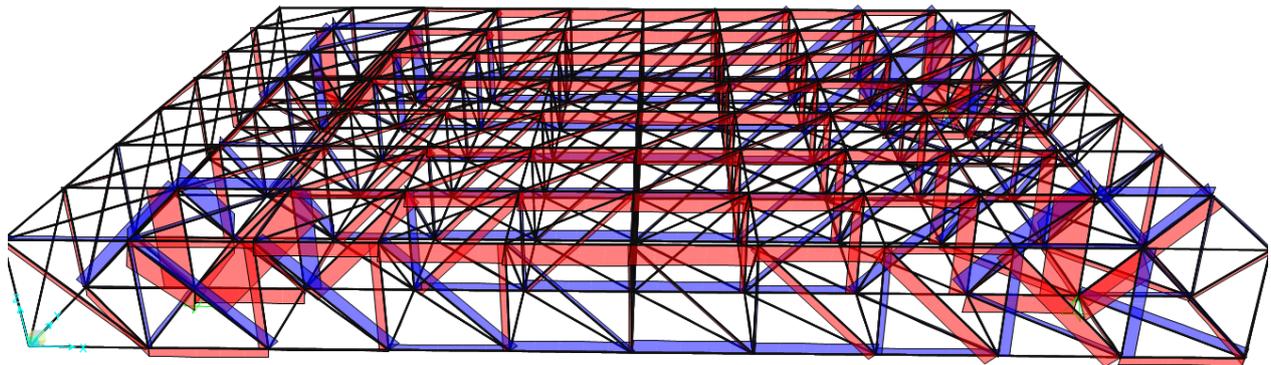
Creo così un nuovo “modello di carico” chiamato “F”, dove caricherò le forze nei nodi e annullerò il peso proprio della struttura. Sapendo che i nodi superiori dove agisce il carico sono 88, avremo un carico per nodo di 249,16kN (**Assign/Join Loads /Forces/“F”/ Global Z= -249,16**).

Faccio partire l’analisi e ancora una volta SAP mostrerà a video la struttura deformata che, come possiamo vedere, risulta consistentemente diversa dalla precedente. A questo punto esporto nuovamente in Excel i risultati dell’analisi ottenuta e mi trovo tabellati tutti gli sforzi normali che agiscono su ogni asta, con valore negativo per quelli sottoposti a compressione.

Divido poi tutti i risultati in 8 classi attraverso un’operazione algebrica: in questo modo definirò le 4 classi di sezione per le aste tese e le 4 classi di sezione per le aste compresse. Per ogni classe sarà dimensionata l’asta con valore di sforzo normale maggiore, in modo che, verificata quella, siano verificate anche tutte le altre con sforzo minore. Nelle tabelle successive sono mostrati i valori di sforzo normale estremi per ogni classe.



Visualizzazione della deformata sotto “F”.



Visualizzazione degli sforzi normali: in blu a trazione, in rosso a compressione.

### Suddivisione in Classi:

Comprese:	
<b>I CLASSE</b>	3681,84kN – 701,573kN
<b>II CLASSE</b>	684,79kN – 312,49kN
<b>III CLASSE</b>	312,48kN – 132,90kN
<b>IV CLASSE</b>	131,33kN– 0,2kN

Tese:	
<b>I CLASSE</b>	2592,13kN – 529,00kN
<b>II CLASSE</b>	526,92kN – 203,27kN
<b>III CLASSE</b>	200,94kN – 79,98kN
<b>IV CLASSE</b>	79,76kN - 0

Preso il valore più alto per ogni classe, si è proceduto attraverso il foglio Excel alla definizione della sezione di progetto ingegnerizzata, anche attraverso l’uso dei sagomari.

**I Classe tese:**

<b>N</b> (Kn)	<b>Fyk</b> (Mpa)	<b><math>\gamma_m</math></b>	<b><math>f_d</math></b> (Mpa)	<b>A_min</b> (cm <sup>2</sup> )	<b>A_design</b> (cm <sup>2</sup> )
2592,13	275,00	1,05	261,90	98,97	<b>99,3</b>

457,0	50,0	502	639	134375	14,5	5881	8324	268750	11761	1,44	1,99
508,0	6,0	74,3	94,6	29812	17,7	1174	1512	59623	2347	1,60	13,5
508,0	6,3	77,9	99,3	31246	17,7	1230	1586	62493	2460	1,60	12,8
508,0	8,0	98,6	126	39280	17,7	1546	2000	78560	3093	1,60	10,1
508,0	10,0	123	156	48520	17,6	1910	2480	97040	3820	1,60	8,14

E così per le restanti classi (vedi foglio Excel allegato *Dimensionamento\_Prova1*).

**I Classe compresse:**

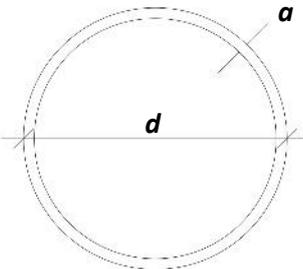
<b>N</b> (Kn)	<b>Fyk</b> (Mpa)	<b><math>\gamma_m</math></b>	<b><math>f_d</math></b> (Mpa)	<b>A_min</b> (cm <sup>2</sup> )	<b>E</b> (Mpa)	<b><math>\beta</math></b>	<b>L</b> (m)	<b><math>\lambda</math></b>	<b><math>\rho_{min}</math></b> (cm)	<b>I_min</b> (cm <sup>4</sup> )
3681,84	275,00	1,05	261,90	<b>140,58</b>	210000,00	1	2,5	88,96	<b>2,81</b>	<b>1110</b>

<b>A_design</b> (cm <sup>2</sup> )	<b>I_design</b> (cm <sup>4</sup> )	<b><math>\rho_{min}</math></b> (cm)	<b><math>\lambda</math></b>
141,00	8957	7,97	31,37

244,5	12,5	71,5	91,1	6147	8,21	503	673	12295	1006	0,768	14,0
244,5	16,0	90,2	115	7533	8,10	616	837	15066	1232	0,768	11,1
244,5	20,0	111	141	8957	7,97	733	1011	17914	1465	0,768	9,03
244,5	25,0	135	172	10517	7,81	860	1210	21034	1721	0,768	7,39
273,0	5,0	33,0	42,1	3781	9,48	277	359	7562	554	0,858	30,3
273,0	6,0	39,5	50,3	4487	9,44	329	428	8974	657	0,858	25,3

E così per le restanti classi (vedi foglio Excel allegato *Dimensionamento\_Prova1*).

Alla fine di questa analisi avremo delle sezioni così composte:

	<b>Comprese</b>	<b>Tese</b>
	<b>I Classe:</b> 244,5mm x 20,0mm	<b>I Classe:</b> 508,0mm x 6,3mm
	<b>II Classe:</b> 139,7mm x 6,3mm	<b>II Classe:</b> 114,3mm x 6mm
	<b>III Classe:</b> 88,9mm x 5mm	<b>III Classe:</b> 88,9mm x 3,2mm
	<b>IV Classe:</b> 88,9mm x 4mm	<b>IV Classe:</b> 42,4mm x 2,6mm

**Osservazioni:**

Come prima cosa mi sono resa conto che tra la III e la IV classe delle sezioni compresse la differenza è minima, si può pensare quindi di unificare queste due classi e dividere nuovamente la I in modo da avere un'ottimizzazione delle sezioni. In secondo luogo mi sono resa conto che le sezioni della prima classe, sia per le tese che per le compresse, vengono particolarmente grandi; se prendiamo per esempio quelle tese risulta impensabile utilizzare su una reticolare di 2,5m una sezione di 50cm. Come prima cosa verifico se effettivamente i risultati ottenuti da excel sono corretti, in modo da assicurarmi che la sezione così grande non sia frutto di un errore di calcolo.

Ripetere

• Verifica area\_min aste tese:

$$A_{min} = \frac{N}{f_{yd}} = \frac{2592,13 \cdot 1000}{261,90 \cdot 100} = \underline{98,97 \text{ cm}^2} \quad \text{OK}$$

• Verifica a\_min aste compresse:

$$A_{min} = \frac{N}{f_{yd}} = \frac{3681,84 \cdot 1000}{261,9 \cdot 100} = \underline{140,58 \text{ cm}^2} \quad \text{OK}$$

~~Verifica~~ per lo snellezza:

$$I_{min} = \frac{N d \cdot l_0^2}{\pi^2 \cdot E} = \frac{3681,84 \cdot (2,5)^2 \cdot 10^5}{(3,14)^2 \cdot 210000} = \frac{3681,84 \cdot 6,25 \cdot 10^5}{9,87 \cdot 210000} = \underline{1110,26 \text{ cm}^4} \quad \text{OK}$$

$$p_{min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}} = \sqrt{\frac{1110,26}{140,58}} = \underline{2,81 \text{ cm}} \quad \text{OK}$$

$$N = \frac{l_0}{p_{min}} = \frac{2,5 \cdot 10^2}{2,81} = \underline{88,96} \quad \text{OK}$$

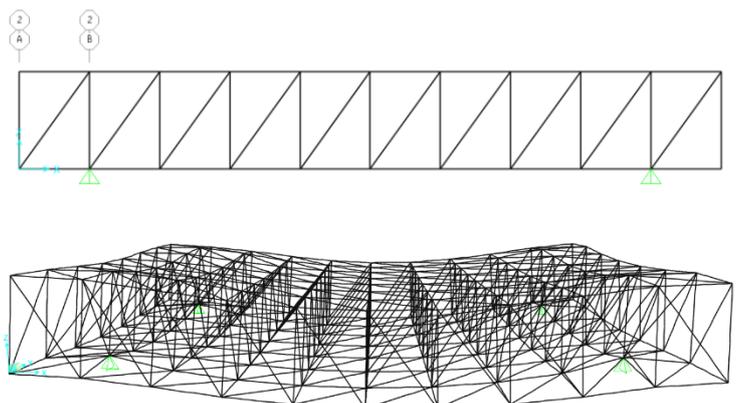
I calcoli risultano giusti, devo quindi trovare la causa di sezioni tanto importanti nel modello strutturale. Basandomi su quanto detto durante il seminario "ad astra per aspera" di mercoledì sulle grandi luci, mi sono resa conto di due possibili modalità d'intervento: o provo ad aumentare l'altezza della reticolare, o provo a diminuire la luce tra i vincoli andando ad aggiungerne altri due in mezzzeria.

#### Aumento dell'altezza della reticolare:

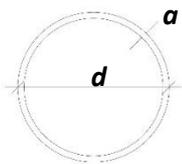
Tornando su SAP provo a disegnare un modulo di 2,5m x 2,5m x 3,5m e svolgo tutti i passaggi precedenti per verificare che lo sforzo normale sulle aste più sollecitate sia diminuito in maniera consistente.

Dalla nuova analisi, la sollecitazione a sforzo normale nelle aste più tese/comprresse risulta ora essere:

<b>Compressione</b>	3290,91kN
<b>Trazione</b>	2001,076kN



Con questa modifica della sezione possiamo raggiungere delle sezioni che sono effettivamente più piccole e adattabili a questo genere di reticolare:

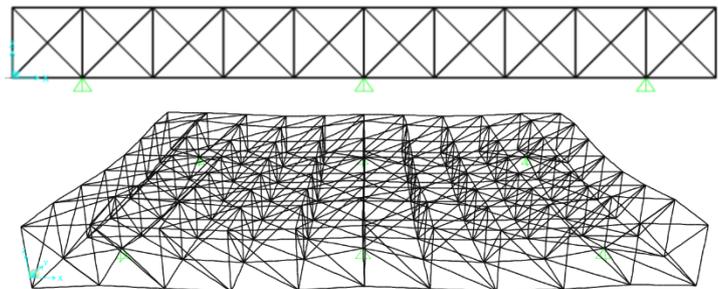


**Comprese**  
**I Classe:**  
 219,1mm x 20,0mm

**Tese**  
**I Classe:**  
 219,1mm x 12mm

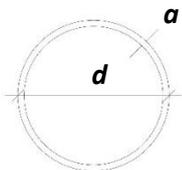
**Aumento dei vincoli:**

Tornando alla reticolare precedente, con il modulo 2,5m x 2,5m x 2,5m provo ad inserire un altro vincolo centrale in mezzeria in modo da diminuire sensibilmente le sollecitazioni a sforzo normale e vedere in che modo mi varieranno le sezioni rispetto a questa nuova sollecitazione. Ripeto i passaggi su SAP e mi importo su Excel i nuovi valori massimi di N che risulteranno:



<b>Compressione</b>	1964,703kN
<b>Trazione</b>	1331,206kN

Con queste modifiche mi sono trovata nel sagomario delle sezioni così definite:



**Comprese**  
**I Classe:**  
 219,1mm x 12,5mm

**Tese**  
**I Classe:**  
 177,8mm x 10mm

Per concludere vorrei quindi porre in evidenza delle riflessioni che mi sono trovata a fare durante il dimensionamento di questi diversi “casi” di studio. Per prima cosa mi sembra interessante sottolineare come, con l’aumento dell’altezza della trave lo sforzo assiale diminuisce solo del 10%, mentre con l’inserimento di un vincolo diminuisce di ben 46%. Nonostante questo le sezioni tra il secondo e il terzo caso non si differiscono eccessivamente per quanto riguarda il diametro esterno se non per lo spessore interno che assume il tubo. Il problema iniziale con il quale mi sono scontrata, ovvero il diametro di 50cm, è stato dato dal fatto che per scelta non mi sono voluta allontanare troppo dall’area minima prevista dai calcoli di progetto, perché in un’ottica prettamente economica avrebbe voluto dire una struttura più costosa, nel sagomario però l’area più vicina ai 99 cm<sup>2</sup> era quella con un diametro molto grande e uno spessore molto piccolo; probabilmente in un altro sagomario sarei riuscita a risolvere con una sezione molto più piccola ma decisamente più spessa. Proprio questo discorso di rapporto tra area e spessore si è rivelato particolare negli ultimi due casi: pur avendo le due sezioni quasi dello stesso diametro lo spessore interno è sensibilmente diverso: questo determina una prima struttura sicuramente più sollecitata ma comunque in grado di rispondere ai carichi con sezioni comunque contenute ma sicuramente pesanti. Quello che in fase di progetto potrei fare è: in primo luogo, se strettamente necessario ai fini del progetto, lasciare altezza e vincoli così come sono, cercando un sagomario che abbia sezioni più spesse e vicine a quelle da me calcolate per ottimizzare i costi della realizzazione; se ciò non fosse possibile potrei aumentare l’altezza o aggiungere un vincolo. In questo momento, non avendo una reale necessità progettuale, non ho elementi per stabilire quale delle due soluzioni possa essere migliore perché entrambi rispondono a due necessità diverse, sarà poi la contestualizzazione del progetto a evidenziare quale delle due adottare.