



COME CALCOLARE LE PARETI DI UN SILO RETTANGOLARE

Domenico Leone

COME CALCOLARE LE PARETI DI UN SILO RETTANGOLARE

Domenico Leone

Il prof. Domenico Leone vanta un'esperienza più che trentennale nel campo della progettazione e realizzazione di strutture metalliche sia in campo industriale che infrastrutturale e civile ed è titolare del laboratorio di "Costruzione dell'Architettura" presso la facoltà di Architettura di Genova in qualità di professore a contratto.

E' consulente di azienda avendo occupato in precedenza il ruolo di Responsabile del settore di progettazione di opere in carpenteria metallica prima presso la Società Italimpianti S.p.A. e successivamente presso le Società SMSDemag e Paul-Wurth S.p.A.

Ha partecipato alla progettazione di grandi impianti industriali di produzione e trasformazione dell'acciaio e ne ha seguito la realizzazione con le imprese costruttrici e di montaggio acquisendo ampia esperienza in tutti i settori del ciclo di esecuzione delle opere metalliche.

Per il suo impegno in campo internazionale vanta ampia conoscenza delle norme di settore utilizzate in varie nazioni con particolare riguardo agli Eurocodici.

Ha esercitato ed esercita tuttora attività formativa in ambito Aziendale, Universitario, Pubblico, Privato e dell'Ordine Professionale.

È autore del libro "Eurocodice 3" edito da Sistemi Editoriali nonché di numerosi programmi di calcolo automatico dedicati sia alla progettazione di strutture in acciaio di impianti industriali che alla progettazione di componenti strutturali e di dettaglio proprie degli edifici civili e delle infrastrutture (pacchetto SAITU edito da STA DATA S.r.l.) in base agli Eurocodici ed alle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni.

La presente pubblicazione è tutelata dalla legge sul diritto d'autore e non può essere divulgata senza il permesso scritto dell'autore.

S.T.A. DATA srl
Corso Raffaello, 12 - 10126 Torino
tel. 011 6699345 www.stadata.com

COME CALCOLARE LE PARETI DI UN SILO RETTANGOLARE

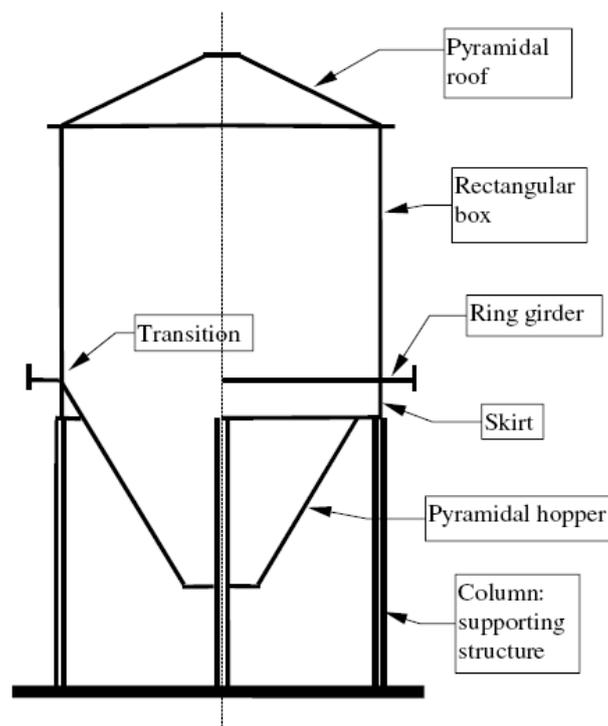
IN ACCORDO CON LE NORME EN 1993-4-1 – EN 1993-1-6 – EN 1993-1-7

GENERALITA'

In questo articolo viene presentata parte di un progetto industriale relativo al calcolo di pareti piane irrigidite di silos rettangolari in acciaio per materiali solidi frammentati o macinati dotati di tramoggia tronco-piramidale assiale o eccentrica supportati da colonne o appoggiati in modo continuo lungo il perimetro di base.

Per il calcolo viene fatto riferimento sia agli studi ECCS (volume Le silos Reimbert) che agli Eurocodici EN 1993-4-1 ("silos"); EN 1993-1-6 ("Resistenza e stabilità delle strutture a guscio"); EN 1993-1-7 ("Strutture a lastra ortotropa caricate fuori dal piano"); EN 1991-4 ("Azioni su silos e serbatoi"). Le norme NTC 2008 non trattano l'argomento.

La tipologia strutturale qui esaminata è rappresentata nella seguente figura in cui la struttura di sostegno costituita da colonne controventate o no può essere calcolata con le normali teorie della resistenza di elementi trave o colonna (anche per effetto dell'azione sismica) già trattate in altri articoli di "Faresismica". Il silo appartiene alla categoria dei silos "tozzi" con $h/d_c \leq 1,5$.



b) Rectangular planform silo

Per la verifica delle pareti irrigidite si farà riferimento nel seguito ad un programma da me appositamente costruito denominato "Silorett" disponibile presso Stadata s.r.l.

Il calcolo del silo rettangolare viene eseguito partendo dall'effetto che il materiale insilato produce sulle pareti applicando la teoria della spinta delle terre modificata come esposto sia nelle ECCS che nella norma EN 1991-4.

Di seguito sono riportate le espressioni per il calcolo della pressione che il materiale insilato esercita, dopo l'avvenuto riempimento, sulle pareti della parte a forma di parallelepipedo e su quelle della tramoggia trico-piramidale del silo.

Le formule proposte dalle ECCS sono confrontate con quelle della norma europea EN 1991-4 per far notare due filosofie di calcolo completamente diverse ma che conducono a risultati simili tenendo conto però degli stessi coefficienti di amplificazione per effetto del riempimento e dello svuotamento.

AZIONI DELLA CARICA :

La **pressione laterale** massima che il materiale insilato esercita sulle **pareti verticali** è data da :

ECCS :

la pressione laterale dipende dalle dimensioni relative delle pareti (a , b) oltre che dalla profondità **z misurata a partire dalla base del cono di carica** :

$$p_{z,a} = \gamma \cdot a / (4 \cdot \operatorname{tg} \varphi') \cdot [1 - (z/A_1 + 1)^{-2}]$$

in cui A_1 è l'ascissa caratteristica corrispondente alla parete minore "a" :

$$A_1 = a / [\pi \cdot \operatorname{tg} \varphi' \cdot \operatorname{tg}^2 (\pi/4 - \varphi/2) - h/3]$$

a è la larghezza della parete minore "a"

φ' è l'angolo di attrito materiale-parete

φ è l'angolo di attrito interno del materiale

h è l'altezza del cono di carica

γ è il peso specifico del materiale insilato

Per la parete maggiore "b" le espressioni sono le stesse ma la larghezza "a" viene sostituita dalla larghezza a' data da :

$$a' = (2 \cdot a \cdot b - a^2) / b$$

EN 1991-4 :

la pressione laterale (normale alle pareti) non dipende dalle dimensioni relative delle pareti ma solo dalla profondità z misurata dalla superficie equivalente al massimo riempimento. In questa trattazione e nel programma automatico "Silorett" **z è la profondità misurata a partire dal baricentro del cono di carica** (fig. 1.2 EN 1991-4).

$$p_{z,a} = \gamma \cdot A / (\mu \cdot U) \cdot [1 - e^{(-z/Z_0)}]$$

in cui : $Z_0 = A / (K_s \cdot \mu \cdot U)$

A è l'area della sezione trasversale del silo

U è il perimetro della sezione

μ è il coefficiente di attrito materiale-parete : $\mu = \arctan \varphi'$

K_s è il rapporto tra la pressione orizzontale e la pressione verticale data dalla seguente tabella per diversi tipi di materiali insilati

Proprietà dei materiali in particelle

Materiale in particelle	Peso dell'unità di volume ³⁾ γ [kN/m ³]	Rapporto fra le pressioni ($K_{s,m}$)	Coefficiente d'attrito di parete, μ_m		Massimo coefficiente di amplificazione del carico C_0
			acciaio ⁴⁾	calcestruzzo	
orzo ¹⁾	8,5	0,55	0,35	0,45	1,35
cemento	16,0	0,50	0,40	0,50	1,40
clinker di cemento	18,0	0,45	0,45	0,55	1,40
sabbia asciutta ²⁾	16,0	0,45	0,40	0,50	1,40
farina ¹⁾	7,0	0,40	0,30	0,40	1,45
ceneri volanti ²⁾	14,0	0,45	0,45	0,55	1,45
mais ¹⁾	8,5	0,50	0,30	0,40	1,40
zucchero ¹⁾	9,5	0,50	0,45	0,55	1,40
frumento ¹⁾	9,0	0,55	0,30	0,40	1,30
carbone ^{1), 2)}	10,0	0,50	0,45	0,55	1,45

Nota 1 - Questo materiale può essere soggetto ad esplosioni di polvere.

Nota 2 - Bisogna prestare attenzione alla possibile variabilità nelle proprietà del materiale.

Nota 3 - I pesi dell'unità di volume sono forniti per il calcolo dei carichi e non devono essere usati per determinare i volumi. I pesi dell'unità di volume forniti nella ENV 1991-2-1 possono essere usati per i calcoli di volume.

Nota 4 - Non applicabile nel caso di pareti rugose.

La pressione verticale massima alla profondità z è data da :

ECCS :

$$q_z = \gamma \cdot [z \cdot (z/A_2 + 1)^{-1} + h/3]$$

in cui :

A_2 è l'ascissa caratteristica relativa alla parete maggiore "b"

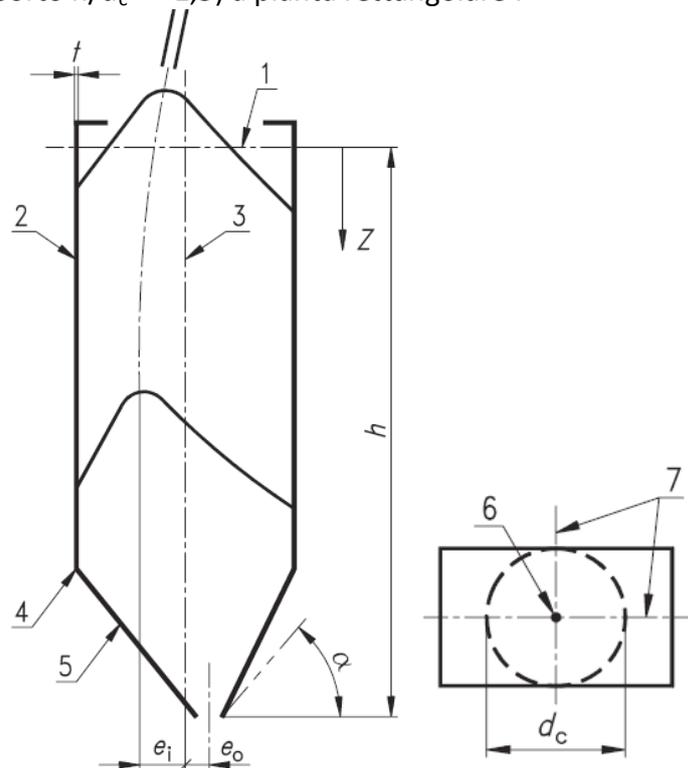
EN 1991-4 :

$$q_z = \gamma \cdot A / (K_s \cdot \mu \cdot U) \cdot [1 - e^{(-z/Z_0)}]$$

come si può notare le espressioni delle due norme non sembrano neppure lontane parenti ma come vedremo dall'esempio applicativo tendono allo stesso risultato se si tiene conto della diversa "partenza" della misura della profondità z e dello stesso coefficiente di amplificazione per carico e scarico.

Su questo punto le ECCS si limitavano a segnalare che *"bisogna prendere particolari precauzioni nella stima della sovrappressione causata dallo svuotamento"* evidenziando, come fanno anche le norme EN, che tali amplificazioni del carico devono essere spesso confortate da prove di laboratorio.

La norma EN 1991-4 definisce così il coefficiente di amplificazione delle pressioni laterali per silos **tozzi** (ovvero con rapporto $h/d_c \leq 1,5$) a pianta rettangolare :



per silos dove:

$h/d_c \leq 1,0$ (d_c è il diametro del cerchio inscritto nel rettangolo)

$$C_h = 1,0$$

per silos dove:

$1,0 < h/d_c < 1,5$

$$C_h = 1,0 + 2 (C_0 - 1,0) (h/d_c - 1,0)$$

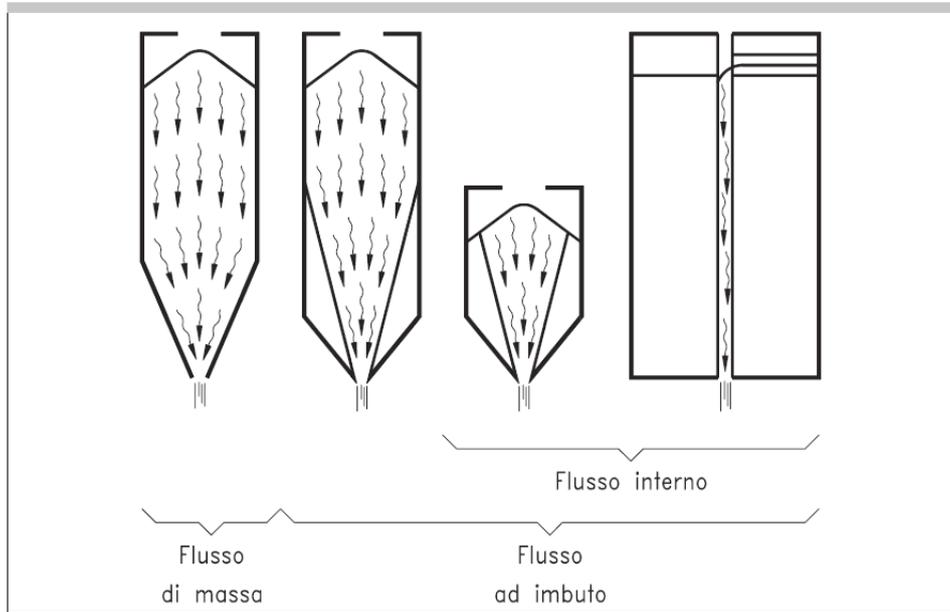
Per silos **snelli** ($h/d_c > 1,5$) il valore di C_h è posto pari a C_0 dato dalla tabella precedentemente proposta ovvero generalmente $C_h = 1,4$.

Il coefficiente di amplificazione C_h è stato qui adottato sia per il calcolo secondo ECCS che per il calcolo secondo EN 1991-4

Si segnala inoltre che lo stesso coefficiente di amplificazione usato per il carico può essere utilizzato per la fase di scarico nel caso di flussi a imbuto ovvero qualora il materiale fluisca dalla

tramoggia senza scorrere sulle pareti della stessa ma all'interno di un volume a "imbuto" che viene a crearsi all'interno della carica per ragioni geometriche, fisiche e dinamiche.

Modelli di flusso



Nel caso di silo con flusso ad imbuto, i carichi sul fondo o sulla tramoggia nella fase di scarico si possono calcolare secondo la procedura usata per i carichi in fase di riempimento (EN 1991-4)

Il calcolo qui presentato considera una situazione di "fine riempimento" (tutto il volume disponibile è riempito dal materiale) con coefficiente di amplificazione per il carico dato dalla EN 1991-4 in funzione del materiale insilato.

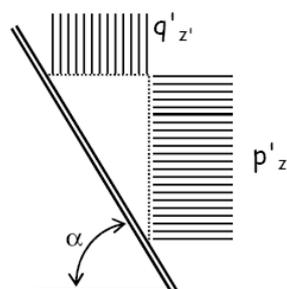
La **pressione normale** che il materiale insilato esercita sulle **pareti della tramoggia** è data da :

ECCS :

la pressione è calcolata come **valore medio** con riferimento ad una profondità z' riferita al baricentro del volume tronco-piramidale ed è ottenuta partendo dalle stesse espressioni usate per definire la pressione laterale e verticale nella parte rettangolare del silo.

Calcolate quindi le pressioni $p_{z',a}$; $p_{z',b}$; $q_{z'}$ si procede nel seguente modo :

- Si calcolano le pressioni per unità di superficie della parete inclinata della tramoggia in base al seguente schema :



$$\text{lato a : } p'_{z',a} = p_{z',a} \cdot \text{sen } \alpha_a =$$

$$q'_{z',a} = q_{z'} \cdot \text{cos } \alpha_a =$$

$$\text{lato b : } p'_{z',b} = p_{z',b} \cdot \text{sen } \alpha_b =$$

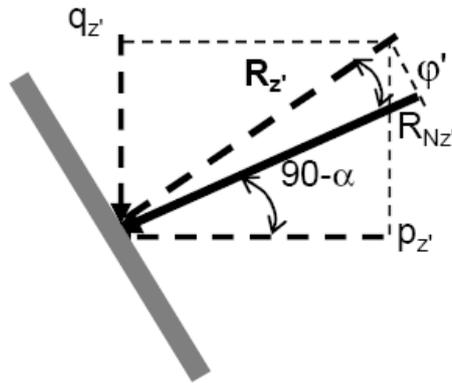
$$q'_{z',b} = q_{z'} \cdot \text{cos } \alpha_b =$$

- Si calcolano le risultanti delle pressioni :

$$\text{lato a : } R_{z',a} = \sqrt{p'_{z',a}{}^2 + q'_{z',a}{}^2}$$

$$\text{lato b : } R_{z',b} = \sqrt{p'_{z',b}{}^2 + q'_{z',b}{}^2}$$

- Si scompone la risultante delle pressioni su ciascuna parete nelle componenti normale ($R_{Nz'}$) e tangenziale ($R_{Tz'}$) secondo il seguente schema :



EN 1991-4 :

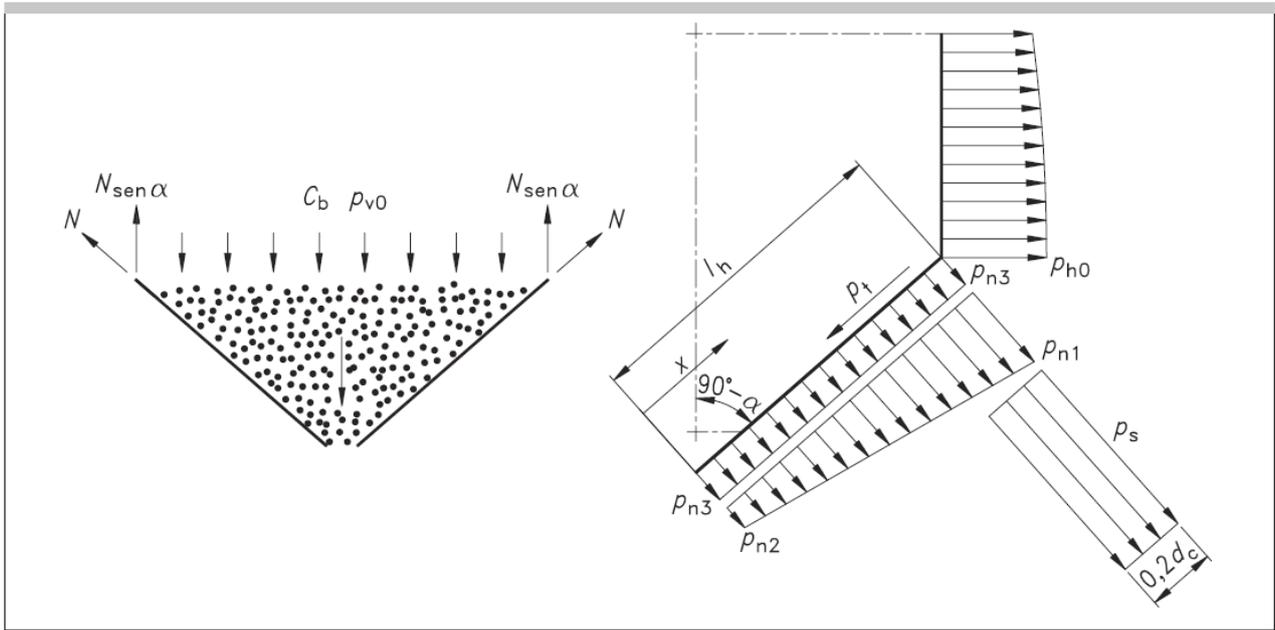
La pressione normale a ciascuna parete della tramoggia è data dalle seguenti espressioni e dalla figura che segue :

$$p_n = p_{n3} + p_{n2} + (p_{n1} - p_{n2}) \frac{x}{l_h}$$

$$p_{n1} = p_{v0} (C_b \cos^2 \alpha + \text{sen}^2 \alpha)$$

$$p_{n2} = C_b p_{v0} \cos^2 \alpha$$

$$p_{n3} = 3,0 \frac{A}{U} \frac{\gamma K_s}{\sqrt{\mu}} \text{sen}^2 \alpha$$



Dove, oltre ai termini già definiti,

p_{n1} e p_{n2} sono le pressioni dovute al riempimento della tramoggia;

p_{n3} è la pressione legata alla pressione verticale nel materiale immagazzinato subito al di sopra della transizione;

p_{v0} è la pressione verticale a livello della zona di transizione

C_b è un coefficiente di amplificazione del carico di fondo assunto pari a 1,2

La pressione tangenziale è ottenuta moltiplicando la pressione normale per il coefficiente di attrito

$$p_t = p_n \cdot \mu$$

Anche qui **non esiste alcuna somiglianza** tra le espressioni fornite dalle due norme ma vedremo nell'esempio che segue che **i risultati sono molto vicini in termini di valori medi** se si adotta lo stesso coefficiente di amplificazione C_b .

CLASSIFICAZIONE DEL SILO E CRITERI DI VERIFICA :

Un aspetto fondamentale che condiziona il metodo di analisi di queste strutture è la "classificazione del silo" definita nell'Eurocodice EN 1993-4-1 come "Consequence Class".

Un silo è definito di classe 3 nei seguenti casi :

- Silo direttamente appoggiato sulla fondazione o struttura rigida lungo il perimetro di base del volume parallelepipedo o lungo il prolungamento delle pareti laterali con una capacità di carico maggiore di 5000 ton.
- Silo supportato da colonne o in modo discontinuo con capacità di carico maggiore di 1000 ton.

- Silo con capacità di carico maggiore di 200 ton in cui sono presenti le seguenti situazioni di progetto :
 - o Eccentricità della bocca di scarico
 - o Carico localizzato (patch load)
 - o Riempimento non simmetrico

Un silo è definito di classe 1 se ha una capacità di carico compresa tra 10 e 100 ton. In tutti gli altri casi il silo è definito di classe 2.

Un silos di classe inferiore può essere calcolato come silo di classe superiore.

L'attribuzione della classe condiziona il metodo di analisi nel seguente modo :

- Per silos di classe 3 le sollecitazioni interne dovrebbero essere determinate usando "un'analisi numerica validata" (FEA = finite element analysis). E' ammessa la verifica di resistenza a collasso plastico secondo il metodo di calcolo allo stato limite plastico della EN 1993-1-6
- Per un silo di classe 2 assial-simmetrico sia dal punto di vista del carico che della geometria, sono possibili due metodi di analisi
 - o Teoria elastica flessionale con tensioni principali di membrana
 - o Analisi numerica validata (FEA) in accordo con EN 1993-1-6

Nel caso di silos non assial-simmetrici è previsto il solo calcolo a elementi finiti (FEA) **o, aggiungo io, il calcolo allo stato limite plastico della EN 1993-1-6**

(2) Where the design loading from stored solids cannot be treated as axisymmetric, a validated numerical analysis should be used.

La possibilità di eseguire un calcolo analitico (DBF = design by formula) sembra essere limitato a pochi casi anche se la norma EN 1993-1-6 offre criteri di calcolo allo stato limite plastico (SL1) (ma anche elastico) basati sulla definizione delle tensioni primarie.

4.2.2.2 Primary stresses

(1) The primary stresses should be taken as the stress system required for equilibrium with the imposed loading. They may be calculated from any realistic statically admissible determinate system. The plastic limit state (LS1) should be deemed to be reached when the primary stress reaches the yield strength throughout the full thickness of the wall at a sufficient number of points, such that only the strain hardening reserve or a change of geometry would lead to an increase in the resistance of the structure.

(2) The calculation of primary stresses should be based on any system of stress resultants, consistent with the requirements of equilibrium of the structure. It may also take into account the benefits of plasticity theory. Alternatively, since linear elastic analysis satisfies equilibrium requirements, its predictions may also be used as a safe representation of the plastic limit state (LS1). Any of the analysis methods given in 5.3 may be applied.

(3) Because limit state design for LS1 allows for full plastification of the cross-section, the primary stresses due to bending moments may be calculated on the basis of the plastic section modulus, see 6.2.1. Where there is interaction between stress resultants in the cross-section, interaction rules based on the von Mises yield criterion may be applied.

(4) The primary stresses should be limited to the design value of the yield strength, see section 6 (LS1).

Overo :

- (1) Le tensioni primarie sono quelle richieste dall'equilibrio con i carichi imposti. Lo stato limite plastico (LS1) è raggiunto quando la tensione primaria raggiunge lo snervamento in diversi punti dello spessore della parete lasciando una riserva di resistenza solo per l'effetto di incrudimento del materiale o modificazione della geometria.
- (2) Il calcolo delle tensioni primarie può tener conto dei benefici della teoria plastica. In alternativa, poichè l'analisi elastica lineare soddisfa le richieste di equilibrio, i risultati da essa ottenuti possono essere usati come una sicura rappresentazione dello stato limite plastico (LS1). **Questo criterio è seguito nel calcolo qui presentato confrontando i risultati di un'analisi elastica con quelli dell'analisi plastica.**
- (3) Le tensioni primarie dovute al momento flettente possono essere calcolate utilizzando il modulo di resistenza plastico della sezione. Dove c'è una interazione tra le tensioni risultanti in una sezione, può essere applicato il criterio di von Mises.
- (4) Le tensioni primarie devono essere limitate alla tensione di snervamento.

Il calcolo diretto (DBF) può essere usato in accordo con gli allegati A e B della norma EN 1993-1-6 :

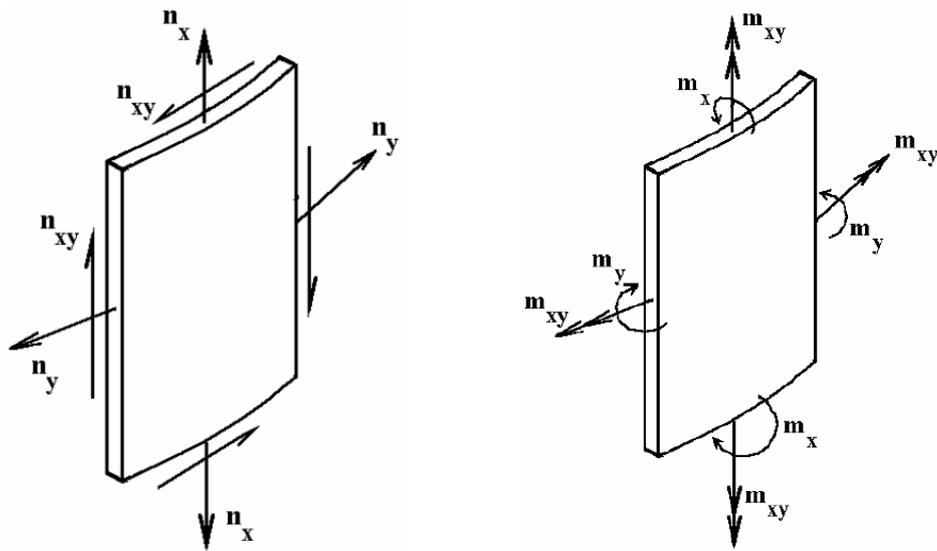
4.2.3 Direct design

(1) Where direct design is used, the limit states may be represented by standard expressions that have been derived from either membrane theory, plastic mechanism theory or linear elastic analysis.

(2) The membrane theory expressions given in Annex A may be used to determine the primary stresses needed for assessing LS1 and LS3.

(3) The expressions for plastic design given in Annex B may be used to determine the plastic limit loads needed for assessing LS1.

Le sollecitazioni primarie di membrana sono rappresentate nella seguente figura :



I tipi di analisi previsti per l'involucro dei silos son riassunti nella seguente tabella :

Table 5.2: Types of shell analysis

Type of analysis	Shell theory	Material law	Shell geometry
Membrane theory of shells	membrane equilibrium	not applicable	perfect
Linear elastic shell analysis (LA)	linear bending and stretching	linear	perfect
Linear elastic bifurcation analysis (LBA)	linear bending and stretching	linear	perfect
Geometrically non-linear elastic analysis (GNA)	non-linear	linear	perfect
Materially non-linear analysis (MNA)	linear	non-linear	perfect
Geometrically and materially non-linear analysis (GMNA)	non-linear	non-linear	perfect
Geometrically non-linear elastic analysis with imperfections (GNIA)	non-linear	linear	imperfect
Geometrically and materially non-linear analysis with imperfections (GMNIA)	non-linear	non-linear	imperfect

Il calcolo di seguito presentato con l'uso del programma "Silorett" segue l'analisi elastica lineare LA) che richiederebbe (come altre analisi anche non lineari) una geometria perfetta.

Nel caso in cui le superfici interne del silo non siano protette contro l'abrasione lo spessore di progetto della lamiera delle pareti deve essere opportunamente ridotto.

Le espressioni di verifica delle tensioni plastiche sono date dal criterio di von Mises di seguito riportato in cui si trascurano le tensioni tangenziali :

(6) Where an LA or GNA analysis is used, the resulting two dimensional field of primary stresses may be represented by the von Mises equivalent design stress:

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \cdot \sigma_{\theta,Ed} + 3(\tau_{x,\theta,Ed}^2 + \tau_{xn,Ed}^2 + \tau_{\theta n,Ed}^2)} \quad \dots (6.2)$$

in which:

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{n_{x,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x,Ed}}{(t^2/4)}, \quad \sigma_{\theta,Ed} = \frac{n_{\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{\theta,Ed}}{(t^2/4)} \quad \dots (6.3)$$

$$\tau_{x\theta,Ed} = \frac{n_{x\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x\theta,Ed}}{(t^2/4)}, \quad \tau_{xn,Ed} = \frac{q_{xn,Ed}}{t}, \quad \tau_{\theta n,Ed} = \frac{q_{\theta n,Ed}}{t} \quad \dots (6.4)$$

NOTE 1: The above expressions give a simplified conservative equivalent stress for design purposes.

NOTE2: The values of $\tau_{xn,Ed}$ and $\tau_{\theta n,Ed}$ are usually very small and do not affect the plastic resistance, so they may generally be ignored.

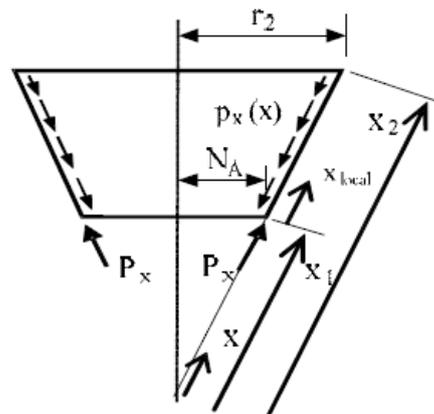
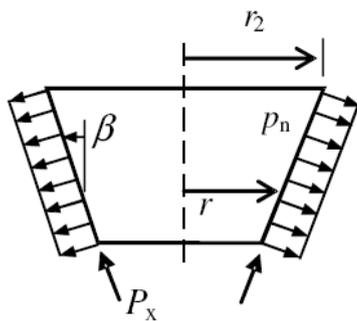
La resistenza che deve essere rispettata è data dalla seguente espressione :

$$f_{eq,Rd} = f_{yd} = f_{yk} / \gamma_{M0}$$

Con la seguente verifica :

$$\sigma_{eq,Ed} \leq f_{eq,Rd}$$

Di seguito si riportano alcune espressioni per il calcolo delle sollecitazioni ricavate dall'allegato A della norma EN 1993-1-6 valide per superfici tronco-coniche ma che possono essere adattate per superfici piane di elementi tronco-piramidali come riportato nell'esempio qui presentato.



$$\sigma_x = -p_n \frac{r}{2t \cdot \cos \beta} \left[\left(\frac{r_2}{r} \right)^2 \right]$$

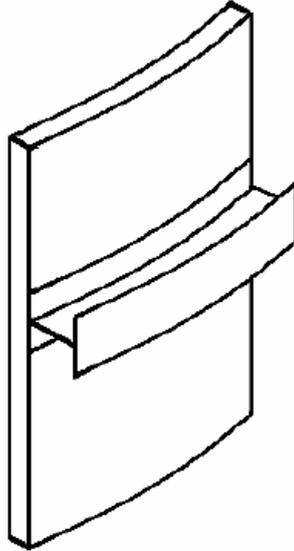
$$\sigma_\theta = p_n \frac{r}{t \cdot \cos \beta}$$

$$x_1 = \frac{r_1}{\sin \beta} \quad x_2 = \frac{r_2}{\sin \beta}$$

$$\sigma_{x1} = -\frac{1}{x_1 t} \int_{x_1}^{x_2} p_x \cdot x \cdot dx$$

L'allegato B della EN 1993-1-6 fornisce espressioni di calcolo delle sollecitazioni esclusivamente per "involucri" cilindrici.

L'irrigidimento collaborante con la parte efficace della lamiera dell'involucro è quindi trattato come trave composta lineare soggetta ad un carico uniforme dato dalla componente normale della pressione interna del materiale insilato.



Per la verifica della lamiera di parete compresa tra gli irrigidimenti e vincolata negli angoli il calcolo è eseguito in base a due criteri : il primo ricavato dalle ECCS per la verifica in campo elastico ed il secondo dalla norma EN 1993-1-7 per la verifica in campo plastico.

Quest'ultimo fa riferimento alla teoria delle piccole deformazioni (prevalenza degli effetti flessionali rispetto agli effetti membranali) come presentata nel capitolo B.3 della EN 1993-1-7.

La deformazione è data dalla seguente espressione : (valida se w è piccola rispetto allo spessore t)

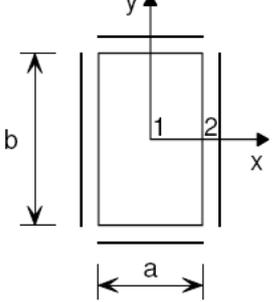
$$w = k_w \frac{q_{Ed} a^4}{E t^3}$$

Le tensioni flessionali sono date dalle seguenti espressioni :

$$\sigma_{bx,Ed} = k_{\sigma bx} \frac{q_{Ed} a^2}{t^2} \quad \sigma_{by,Ed} = k_{\sigma by} \frac{q_{Ed} a^2}{t^2}$$

I coefficienti delle formule sono ricavati dalla seguente tabella per pannello vincolato lungo tutto il contorno (angoli e irrigidimenti)

Table B.2: Coefficients k

		Loading: Uniformly distributed loading		
		Boundary conditions: All edges are rigidly supported and rotationally fixed.		
b/a	k_{w1}	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{bx2}}$
1,0	0,01375	0,1360	0,1360	-0,308
1,5	0,02393	0,2180	0,1210	-0,454
2,0	0,02763	0,2450	0,0945	-0,498
3,0	0,02870	0,2480	0,0754	-0,505

ESEMPIO APPLICATIVO :

L'esempio di seguito riportato riguarda un silo di medie dimensioni con parete e tramoggia irrigidita rispettivamente con elementi a T e con elementi a L. Il silo contiene materiale inerte granulare di peso specifico $1,7 \text{ kg/m}^3$.

Inizialmente sarà verificata la situazione del silo con bocca di scarico centrata (assial-simmetrico) e irrigidimenti di parete orizzontali. Successivamente sarà analizzata e commentata la situazione del silo con bocca di scarico eccentrica da un lato e irrigidimenti prima solo orizzontali e poi con rompitratta verticali per verificare la resistenza di pannelli di parete.

Il calcolo è eseguito con l'uso del programma "**Silorett**" costruito in ambiente excel.

SILO PARALLELEPIPEDO CON TRAMOGGIA TRONCO-PIRAMIDALE

CALCOLO DI VERIFICA SECONDO ECCS e EN 1993-4-1 ; EN 1993-1-6 ; EN 1993-1-7

calcolo sollecitazioni secondo ECCS (vol. *Le silos Reimbert*) e secondo EN 1991-4

SILO ADDITIVI

ELEMENTI DELL'INVOLUCRO

METODO DI CALCOLO :

STATO LIMITE ULTIMO ▼

SILO SUPPORTATO DA COLONNE ▼

CLASSE DEL SILO :

2

per una capacità di carico di

545,20 ton

per classe 2 è ammesso il calcolo elastico con tensioni primarie di membrana

Dalla geometria e capacità di carico il silo risulta essere di **classe 2** per cui è ammessa l'analisi lineare elastica con calcolo allo SLU.

La pagina che segue riassume la geometria e i dati di progetto :

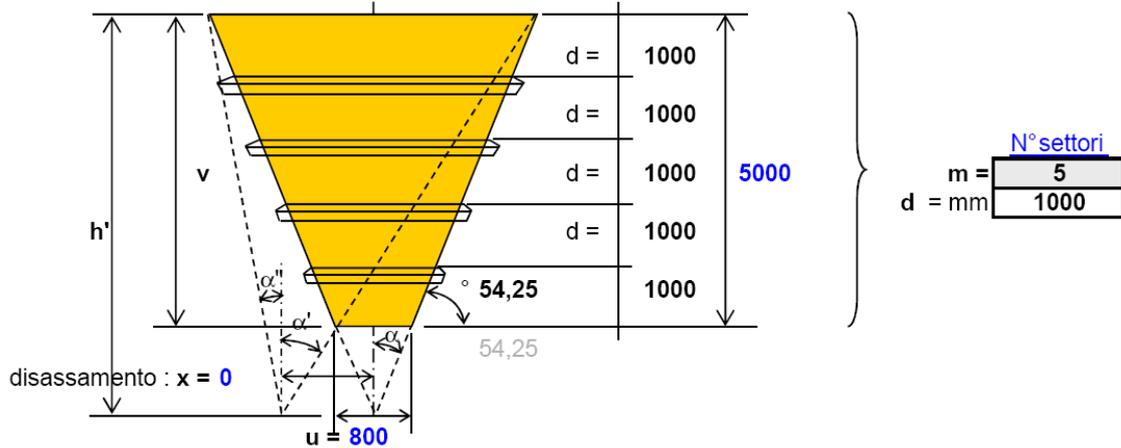
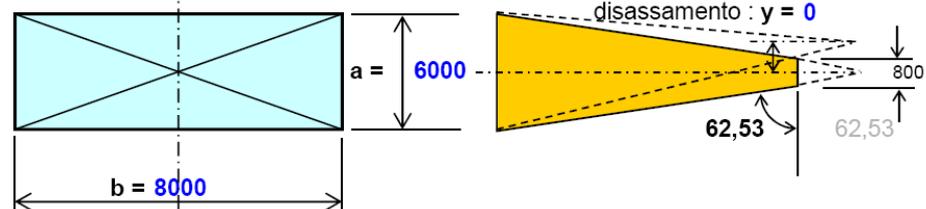
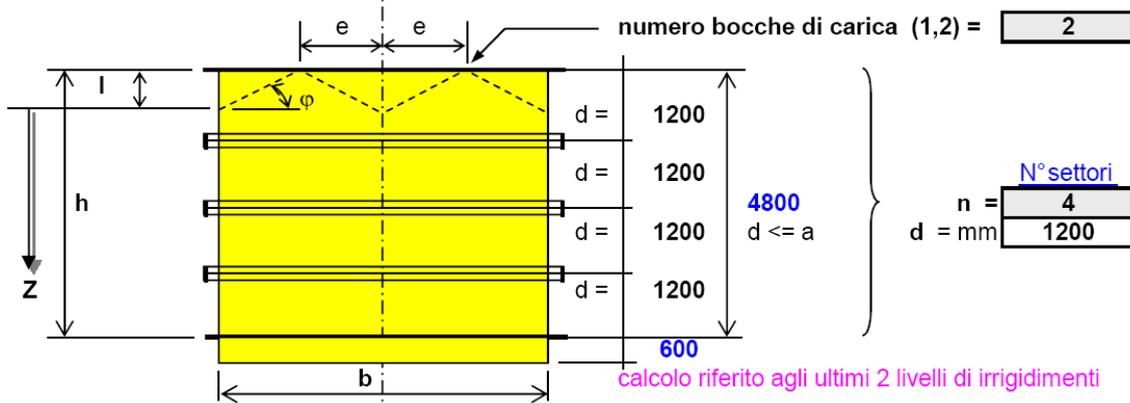
PARETI DEL SILO

materiale insilato : additivi con peso specifico 1,7 t/m³

U.M. dimensioni ; mm

$$H = h - l/3 + v$$

volume complessivo max. = m ³	320,70
silo tozzo H/a ≤ 1,5 H/a =	1,18



lato a :	$\alpha_a = \text{°}$	35,75	$\alpha'_a = \text{°}$	35,75	$\alpha''_a = \text{°}$	35,75
lato b :	$\alpha_b = \text{°}$	27,47	$\alpha'_b = \text{°}$	27,47	$\alpha''_b = \text{°}$	27,47

$h'_a = \text{mm}$	5556	$h'_b = \text{mm}$	5769
$\delta =$	1,7	$\mu =$	0,424
$\varphi' = \text{°}$	23		
$\varphi = \text{°}$	29		
$e =$	2	m	
$K_s =$	0,45		
$A/U =$	1,714	m	
$C_h =$	1,143		
		$C_0 =$	1,4

peso specifico materiale insilato
 angolo di attrito materiale-pareti
 angolo di attrito interno materiale
 larghezza cono di carico
 rapporto tra le pressioni
 rapporto area/perimetro
 coeff. di amplificazione del carico

Segue il calcolo delle pressioni di progetto sia secondo ECCS che secondo EN 1991-4 comprensive del coefficiente di amplificazione C_h per le pressioni laterali

Pressione laterale massima sulle pareti :

	ECCS modificata	EN 1991-4
lato a :	$p_{max,a} = C_h \cdot \delta \cdot a / (4 \cdot tg \varphi') = 68,668 \text{ kN/m}^2$	$p_{max,a} = C_h \cdot \delta / \mu \cdot A/U = 78,477 \text{ kN/m}^2$
lato b :	$p_{max,b} = C_h \cdot \delta \cdot a' / (4 \cdot tg \varphi') = 85,835 \text{ kN/m}^2$	$p_{max,b} = C_h \cdot \delta / \mu \cdot A/U = 78,477 \text{ kN/m}^2$
	$a' = (2 \cdot a \cdot b - a^2) / b = 7,50 \text{ m}$	$z_0 = A / (K_s \cdot \mu \cdot U) = 8,97 \text{ m}$

Ascissa caratteristica corrispondente :

lato a :	$A_1 = a / [\pi \cdot tg \varphi' \cdot tg^2(\pi/4 - \varphi/2)] - l/3 = 12,59785 \text{ m}$	$l = e \cdot tg \varphi = 1,109 \text{ m}$
lato b :	$A_2 = a' / [\pi \cdot tg \varphi' \cdot tg^2(\pi/4 - \varphi/2)] - l/3 = 15,83969 \text{ m}$	

Pressione laterale pz sulle pareti :

	ECCS	EN 1991-4
lato a :	$p_{z1,a} = p_{max,a} \cdot [1 - (z_1/A_1 + 1)^{-2}] = 20,803$	$p_{z1,a} = p_{max,a} \cdot [1 - e^{(-z_1/z_0)}] = 21,421 \text{ kN/m}^2$
	$p_{z2,a} = p_{max,a} \cdot [1 - (z_2/A_1 + 1)^{-2}] = 27,596$	$p_{z2,a} = p_{max,a} \cdot [1 - e^{(-z_2/z_0)}] = 28,562 \text{ kN/m}^2$
	$z_1 = (n-1) \cdot h/n - l = 2,491 \text{ m}$	$z_1 = 2,861 \text{ m}$
	$z_2 = h - l = 3,691 \text{ m}$	$z_2 = 4,061 \text{ m}$
lato b :	$p_{z1,b} = p_{max,b} \cdot [1 - (z_1/A_2 + 1)^{-2}] = 21,746$	$p_{z1,b} = p_{max,b} \cdot [1 - e^{(-z_1/z_0)}] = 21,421 \text{ kN/m}^2$
	$p_{z2,b} = p_{max,b} \cdot [1 - (z_2/A_2 + 1)^{-2}] = 29,379$	$p_{z2,b} = p_{max,b} \cdot [1 - e^{(-z_2/z_0)}] = 28,562 \text{ kN/m}^2$

Pressione verticale unitaria media qz a profondità z_2 :

	ECCS modificata	EN 1991-4
	$q_{z2} = C_h \cdot \delta \cdot [z_2 \cdot (z_2/A_2 + 1)^{-1} + l/3] = 65,354$	$q_{z2} = p_{z2} / K_s \cdot [1 - e^{(-z_2/z_0)}] = 63,472 \text{ kN/m}^2$

Si noti come i valori delle pressioni laterali calcolate con due criteri formalmente molto diversi siano alla fine molto simili tra loro

Di seguito è presentato il calcolo dei momenti flettenti di parete sia in mezzaria che negli angoli in base alle due norme .

Momento flettente sulle pareti : $K = J_b / J_a \cdot a/b = 0,75$ $J_b / J_a = 1$

	ECCS	EN 1991-4
Momento flettente negli angoli :		
prof. z_1 :	$M_{z1,l} = -(p_{z1,a} \cdot a^2 \cdot K + p_{z1,b} \cdot b^2) / 12 / (1+K) = -93,021 \text{ kNm/m}$	$-92,826 \text{ kNm/m}$
prof. z_2 :	$M_{z2,l} = -(p_{z2,a} \cdot a^2 \cdot K + p_{z2,b} \cdot b^2) / 12 / (1+K) = -125,018 \text{ kNm/m}$	$-123,770 \text{ kNm/m}$

	ECCS	EN 1991-4
Momento flettente lungo i lati :		
lato a :	$M_{z1,a} = p_{z1,a} \cdot a^2 / 8 + M_{z1,l} = 0,594 \text{ kNm/m}$	$3,570 \text{ kNm/m}$
	$M_{z2,a} = p_{z2,a} \cdot a^2 / 8 + M_{z2,l} = -0,836 \text{ kNm/m}$	$4,760 \text{ kNm/m}$
lato b :	$M_{z1,b} = p_{z1,b} \cdot b^2 / 8 + M_{z1,l} = 80,948 \text{ kNm/m}$	$78,545 \text{ kNm/m}$
	$M_{z2,b} = p_{z2,b} \cdot b^2 / 8 + M_{z2,l} = 110,018 \text{ kNm/m}$	$104,728 \text{ kNm/m}$

Segue il calcolo delle forze di trazione e compressione nelle zone irrigidite

Trazione longitudinale sulle pareti a profondità z_1 e z_2 :

	ECCS	EN 1991-4
lato a : $T_{z1,a} = p_{z1,b} \cdot b/2 =$	86,98 kN/m	85,69 kN/m
$T_{z2,a} = p_{z2,b} \cdot b/2 =$	117,52 kN/m	114,25 kN/m
lato b : $T_{z1,b} = p_{z1,a} \cdot a/2 =$	62,41 kN/m	64,26 kN/m
$T_{z2,b} = p_{z2,a} \cdot a/2 =$	82,79 kN/m	85,69 kN/m

Compressione longitudinale nella zona di raccordo della tramoggia a profondità z_2 :

	ECCS	EN 1991-4
lato a : $C_{z2,a} = R_{Tm} \cdot \cos[90-(\alpha'_b+\alpha''_b)/2] \cdot (A_{F1,b}+A_{F2,b})/2 =$	439,13 kN	463,70 kN
lato b : $C_{z2,b} = R_{Tm} \cdot \cos[90-(\alpha'_a+\alpha''_a)/2] \cdot (A_{F1,a}+A_{F2,a})/2 =$	469,84 kN	496,13 kN

Di seguito è riportata la verifica della parete in corrispondenza dell'irrigidimento orizzontale a T posto alla profondità $z = 2,491$ m (ECCS) e 2,861 m (EN 1991-4)

VERIFICA IRRIGIDIMENTI DI PARETE : metodo di calcolo allo stato limite ultimo

Pareti lato "a" :

larghezza = m **6,00**

materiale lamiere :

S 355

$f_y = \text{kN/cm}^2$ **35,50**

$\epsilon = 0,81$

coeff. sic. mater. $\gamma_{M0} =$

1

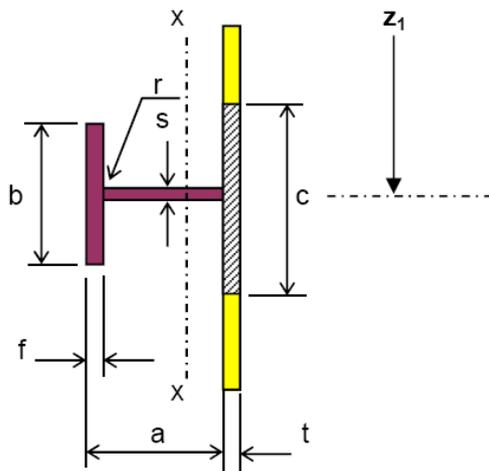
$f_{yd} = \text{kN/cm}^2$ **35,50**

$\gamma_Q = 1,5$

$z_1 = \text{m } 2,491$

IRRIGIDIMENTO A "T"

$c = 2.16.e.t + s$



t =	1,8	cm
c =	47,72	cm
a =	20	cm
b =	18	cm
f =	1,35	cm
s =	0,86	cm
r =	2,1	cm
A =	128,136	cm ²
$y_G =$	6,30	cm
$y_{pl} =$	1,34	cm
Jx =	9090	cm ⁴
$W_{x,est.} =$	587	cm ³
$W_{x,int.} =$	1442	cm ³
$W_{x,pl.} =$	722	cm ³
$M_{b,Rd} =$	20824	kNcm
$N_{t,Rd} =$	4549	kN

ECCS $M_{Ed,max} =$ **16744** kNcm < $M_{b,Rd}$

EN 1991-4 $M_{Ed,max} =$ **16709** kNcm < $M_{b,Rd}$

ECCS $N_{t,Ed} =$ **104,38** kN trazione

EN 1991-4 $N_{t,Ed} =$ **102,82** kN

resistenza elastica a tenso-flessione

$M_{Ed,max} / M_{b,Rd} + N_{t,Ed} / N_{t,Rd}$: ECCS **0,827** < 1

$M_{Ed,max} / M_{b,Rd} + N_{t,Ed} / N_{t,Rd}$: EN 1991-4 **0,825** < 1

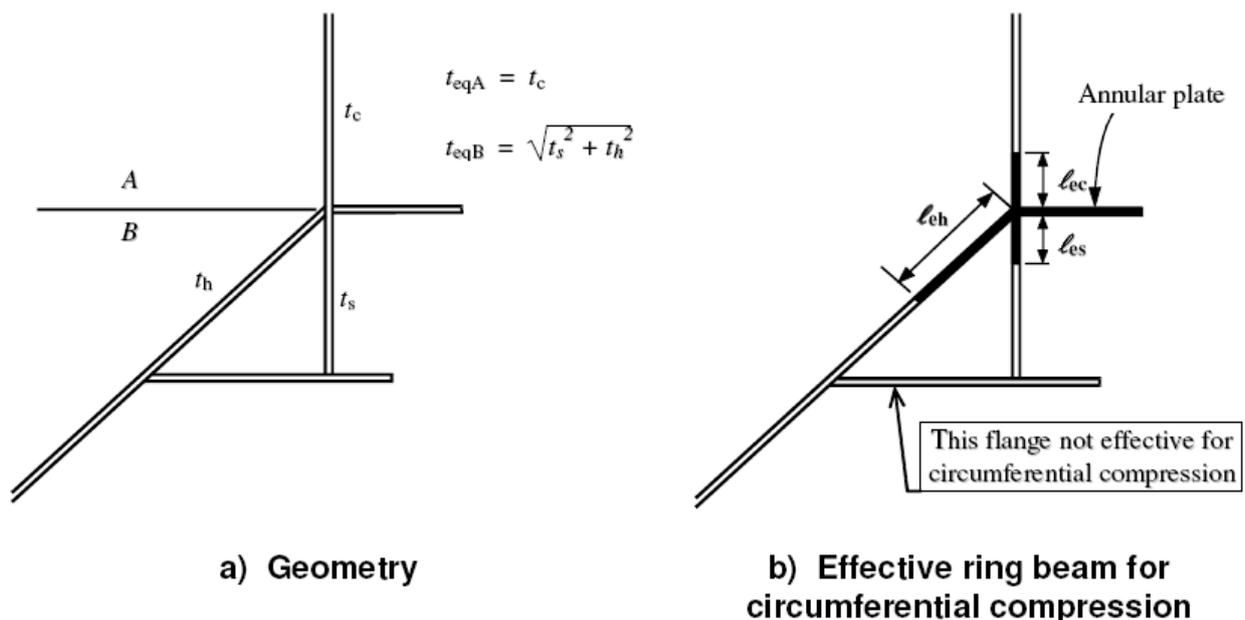
Il momento resistente $M_{b,Rd}$ è calcolato in campo elastico con riferimento al modulo di resistenza minimo della sezione efficace ($W_{x,est}$) come previsto per un silo di classe 2

L'irrigidimento è costituito da una ½ IPE 400 e la parte collaborante di lamiera della parete è presa pari a :

$$c = 2.16 \cdot \varepsilon \cdot t + s$$

Secondo le nuove indicazioni della norma europea $c = 2 \cdot 16 t + s$ senza considerare la riduzione dovuta alla qualità del materiale. Tale criterio era previsto dalle ECCS ed è stato da me mantenuto nel calcolo automatico a favore di sicurezza.

Segue la verifica nella zona di raccordo silo-tramoggia dove è sempre prevista una "cerchiatura" di rinforzo per contrastare gli effetti d'angolo. La norma EN 1993-4-1 è molto precisa per quanto riguarda il calcolo di questa zona nei silos CIRCOLARI ma non dice nulla per quanto riguarda i silos rettangolari. Per analogia si può ipotizzare un appoggio continuo lungo il perimetro irrigidito e usare il criterio proposto per i silos circolari, ovvero, trasformare lo spessore della lamiera della tramoggia confluyente nel nodo in uno spessore equivalente della lamiera verticale al di sotto dell'irrigidimento in base al seguente schema :

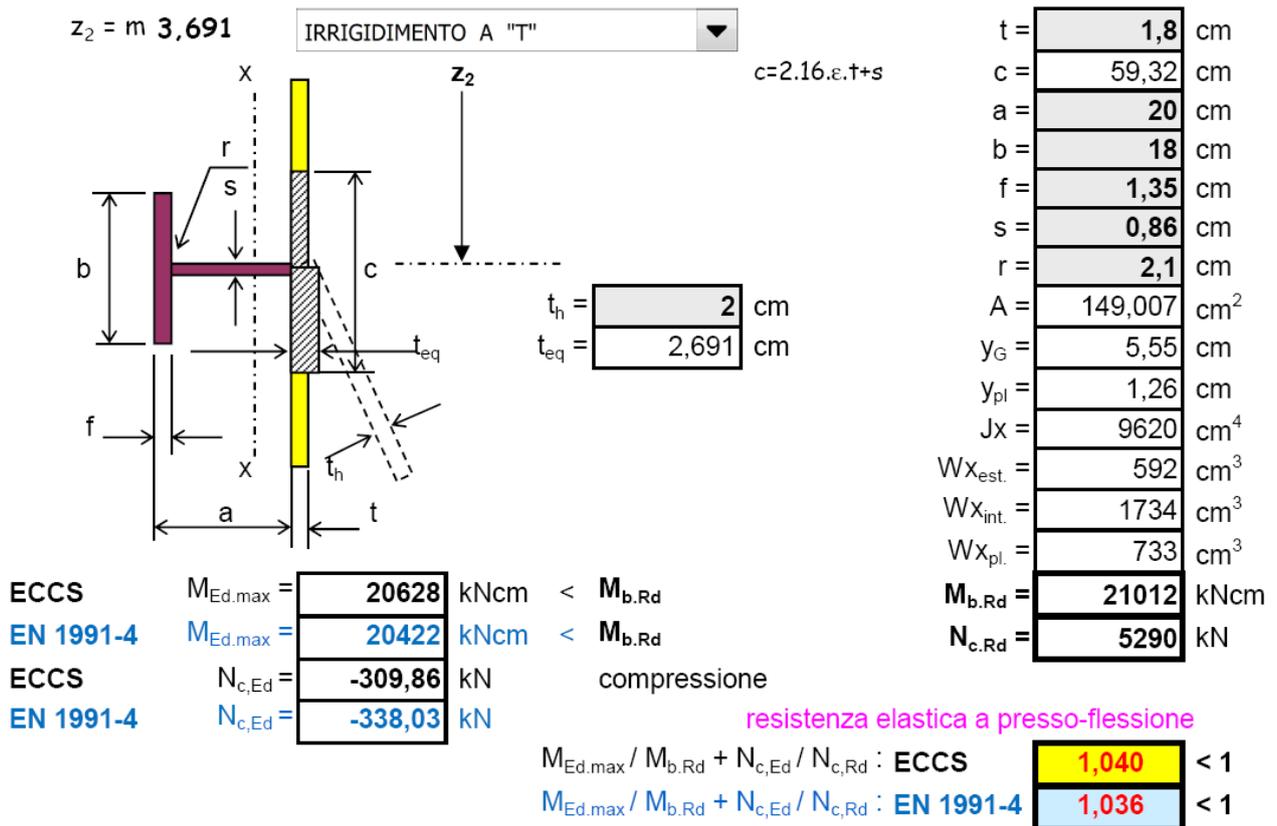


Lo spessore al di sopra dell'irrigidimento è quello della parete verticale mentre lo spessore equivalente al di sotto dell'irrigidimento è dato dall'espressione :

$$t_{eqB} = \sqrt{t_s^2 + t_h^2}$$

Per la definizione delle lunghezze efficaci si può usare il criterio precedentemente esposto poiché la norma europea definisce tali lunghezze solo per silos cilindrici.

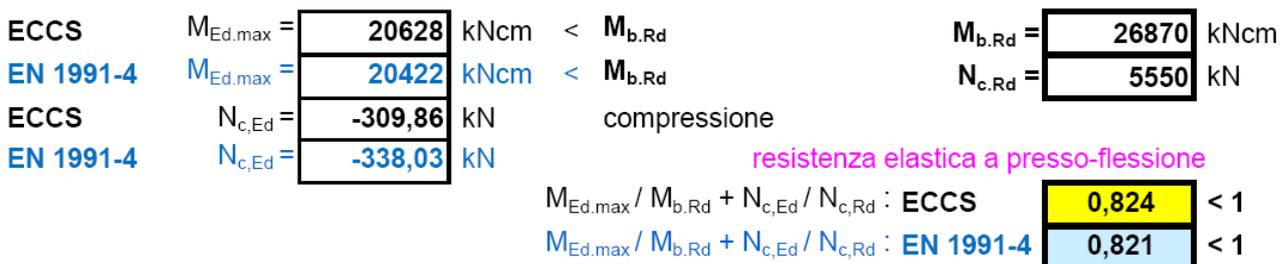
Il calcolo è di seguito eseguito per un irrigidimento costituito da ½ IPE 400



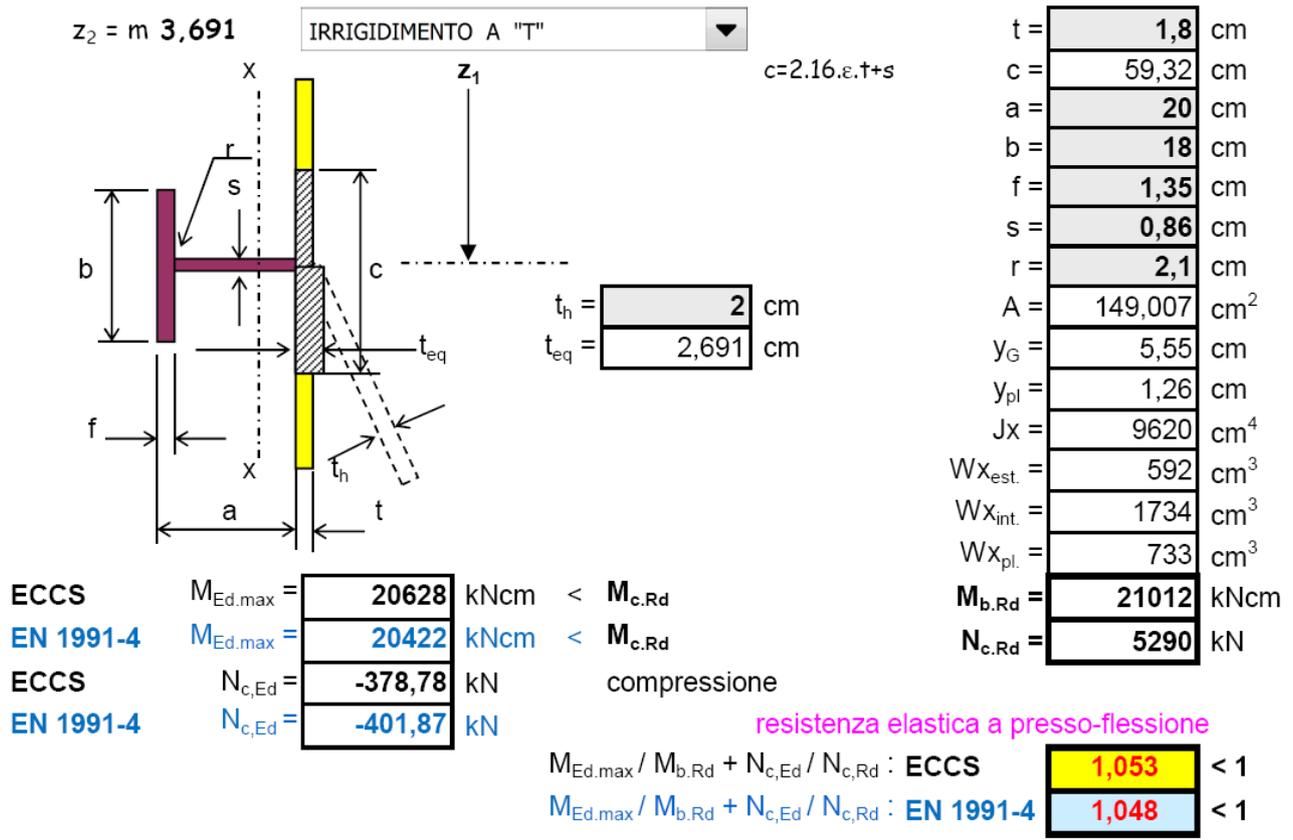
La verifica non risulta soddisfatta per cui si dovrà aumentare la dimensione dell'irrigidimento o aumentare gli spessori almeno nella zona di transizione.

Si noti il valore negativo della forza assiale sull'irrigidimento dovuta alla prevalenza della compressione trasmessa dalle pareti inclinate della tramoggia rispetto alla trazione dovuta alle contrapposte pressioni sulle pareti alle estremità del tratto irrigidito.

Se l'irrigidimento fosse costituito da ½ IPE 450 il risultato sarebbe il seguente :



Stesso calcolo è eseguito per la parete lato "b" di cui si riporta la verifica a livello della zona di transizione :



Anche su questo lato conviene usare un irrigidimento costituito da ½ IPE 450.

Viene quindi eseguito il calcolo di verifica del pannello di lamiera compressa tra 2 irrigidimenti posto alla profondità massima per ciascuno dei lati del silo.

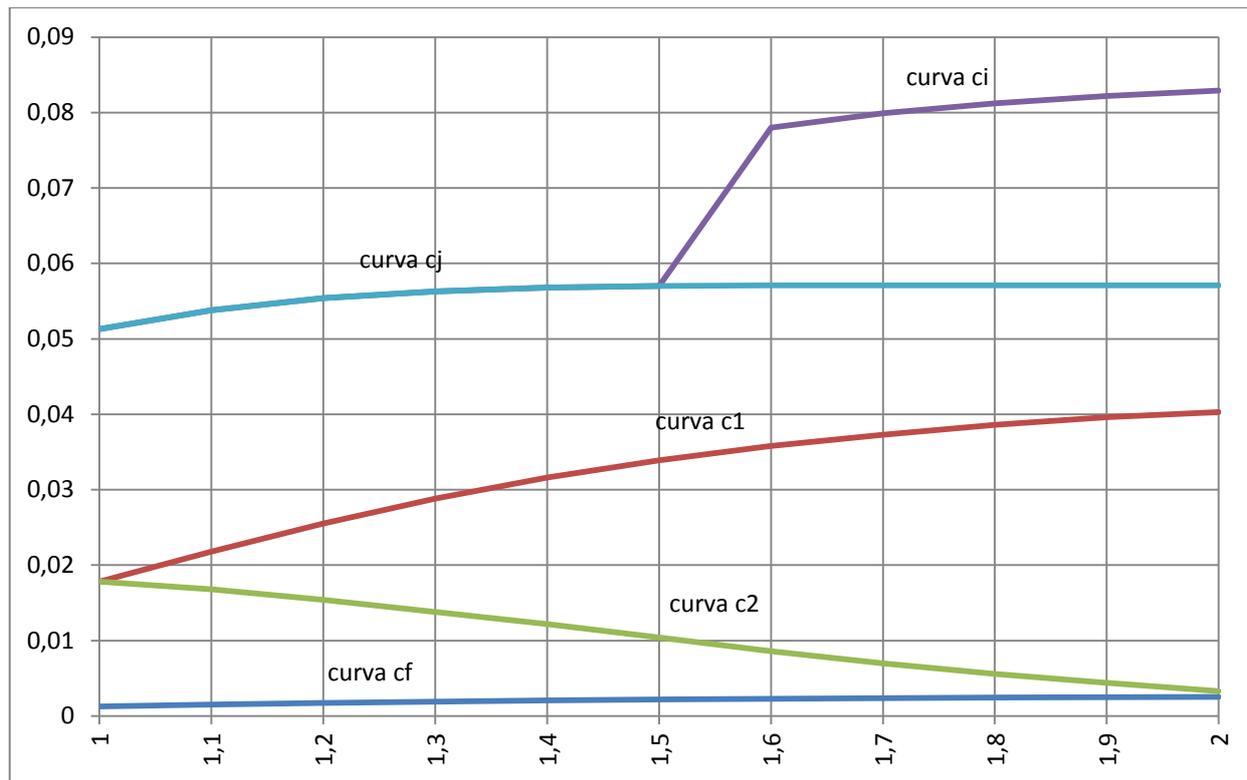
Come già anticipato il calcolo è eseguito sia in campo elastico (in base alle ECCS) che in campo plastico (in base alla EN 1993-1-7) per un utile confronto dei due criteri basati su metodologie e curve dei fattori di momento diversi.

La stessa norma suggerisce di eseguire il calcolo elastico a favore di sicurezza ma si vedrà nel seguito quanto i due metodi siano vicini nei risultati.

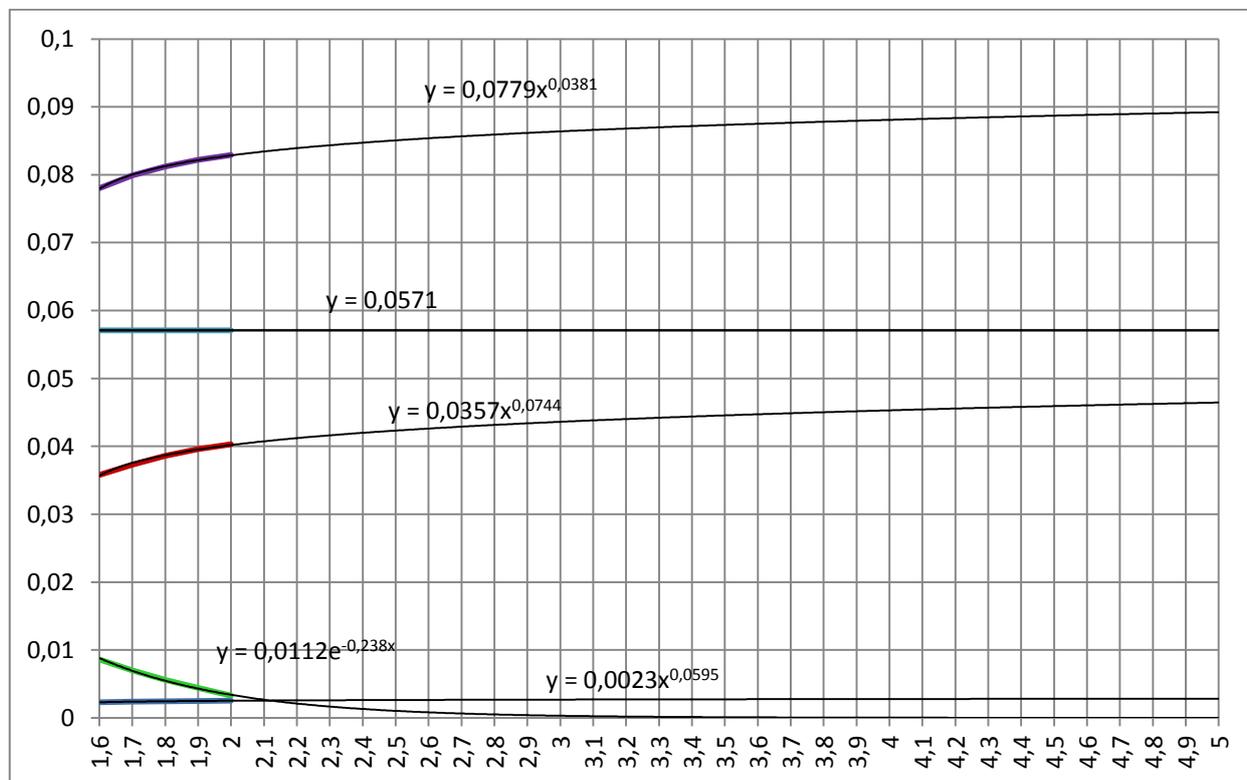
Le curve dei coefficienti di momento secondo ECCS si limitano ad un rapporto larghezza/altezza (L/H) del pannello minore o uguale a 2 mentre secondo EN 1993-1-7 tale rapporto è esteso a 3.

Siccome nei silos si hanno rapporti L/H dei pannelli di parete spesso maggiori di 3 ho ritenuto opportuno estendere le curve fino a rapporti L/H = 5 mediante opportune linee di tendenza come rappresentato nelle seguenti figure.

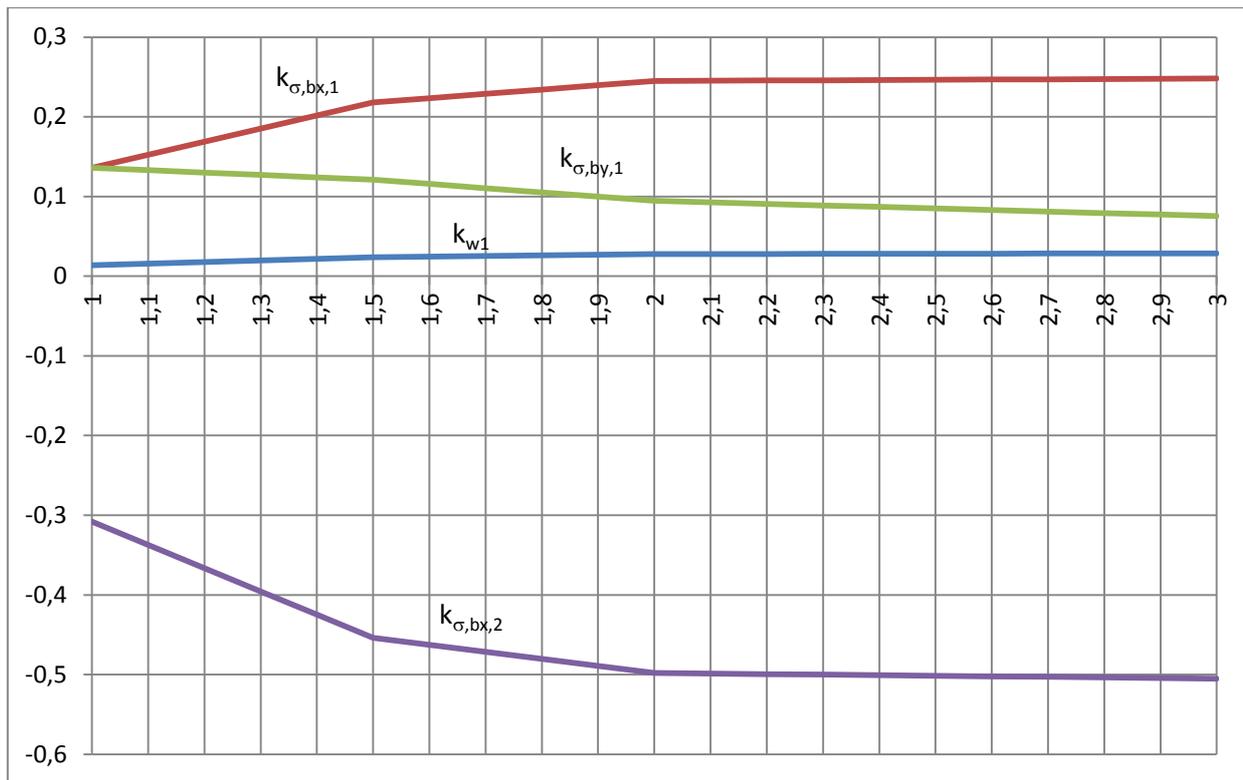
CURVE DEI FATTORI DI MOMENTO secondo ECCS



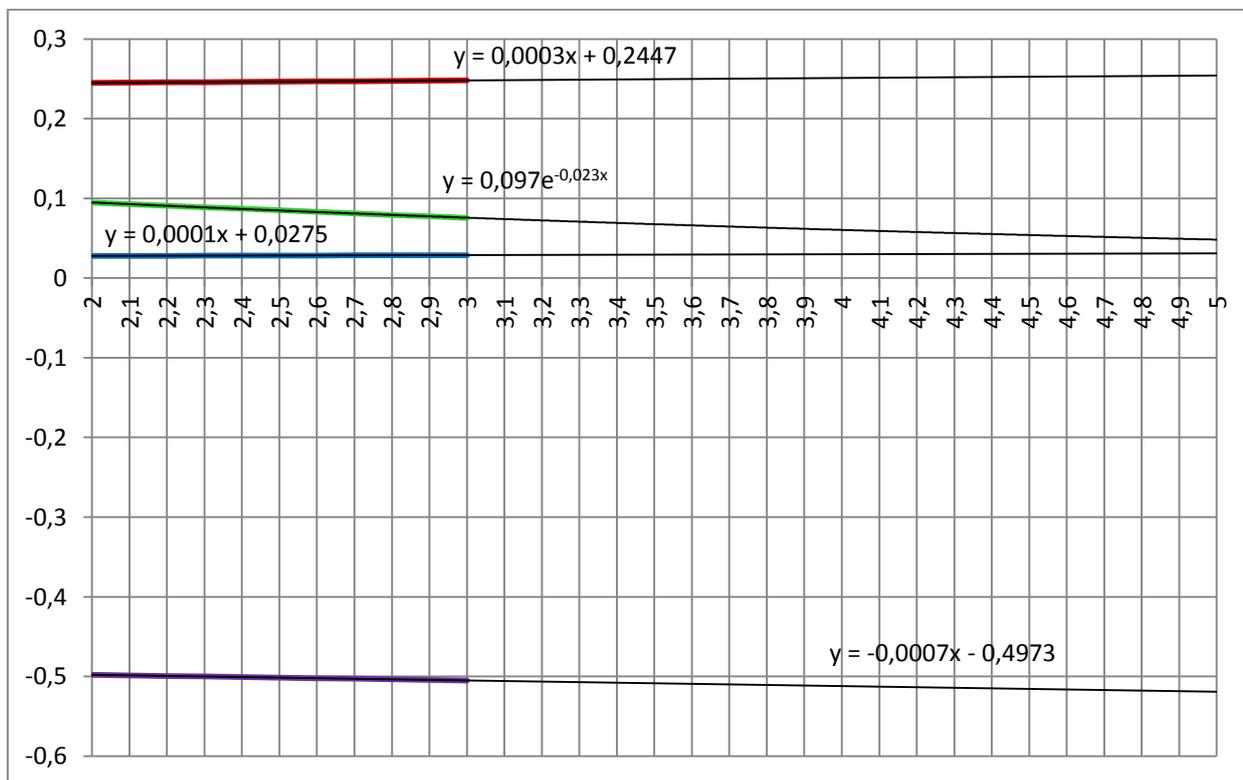
Estensione delle curve dei fattori di momento secondo ECCS



CURVE DEI FATTORI DI MOMENTO secondo EN 1993-1-7

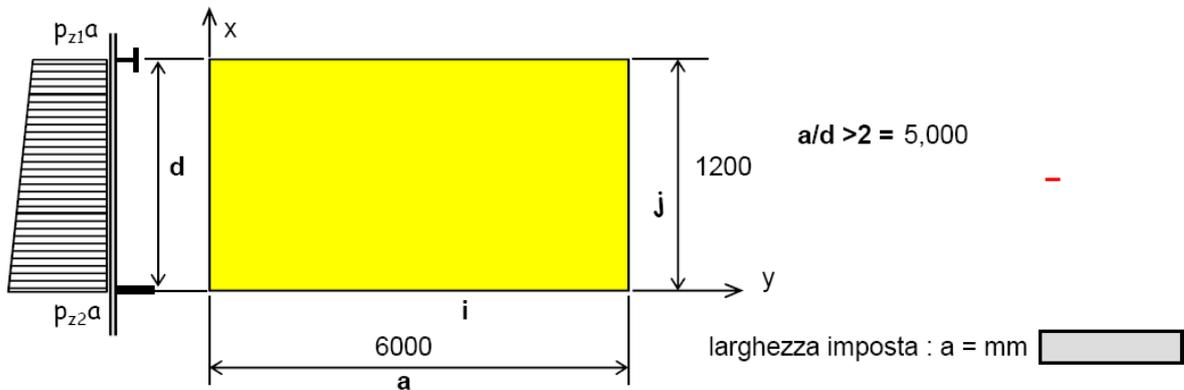


Estensione delle curve dei fattori di momento secondo EN 1993-1-7



La verifica di resistenza e deformazione del pannello di parete sul lato "a" con un rapporto larghezza/altezza (a/d) pari a $5 > 2$, produce il seguente risultato secondo ECCS

VERIFICA DI UN CAMPO DI LAMIERA COMPRESO TRA DUE IRRIGIDIMENTI LONGITUDINALI :
CALCOLO ELASTICO SECONDO ECCS
PANNELLO LATO "a"



lato a : $p_{z1a} = 20,803 \text{ kN/m}^2$
 $p_{z2a} = 27,596 \text{ kN/m}^2$ } pressione media : $p_{zm}a = 24,200 \text{ kN/m}^2$
 spessore lamiera : $t = 1,80 \text{ cm}$

Momenti flettenti sulla piastra :

$$m_{c_x} = (c_1 + c_2 \cdot v) \cdot p \cdot d^2$$

$$m_{c_y} = (c_2 + c_1 \cdot v) \cdot p \cdot d^2$$

$$m_{i_x} = -c_i \cdot p \cdot d^2$$

$$m_{j_y} = -c_j \cdot p \cdot d^2$$

$$m_{c_x} = 1,620786 \text{ kNcm/cm}$$

$$m_{c_y} = 0,486322 \text{ kNcm/cm}$$

$$m_{i_x} = -3,10841 \text{ kNcm/cm}$$

$$m_{j_y} = -1,98979 \text{ kNcm/cm}$$

Freccia massima :

$$f = c_f \cdot p \cdot d^4 / B$$

$$B = E \cdot t^3 / (12 \cdot (1 - \nu^2))$$

$$B = 11215 \text{ kNcm}$$

$$f = 0,1272 \text{ cm}$$

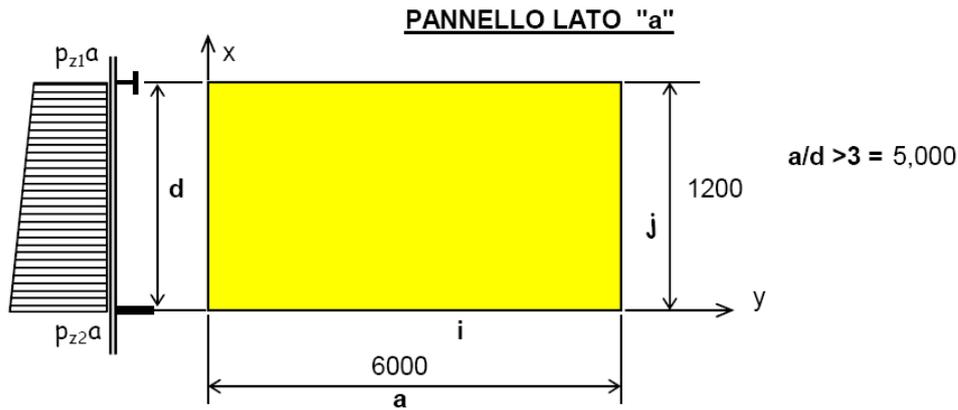
$$M_{Ed,max} = 4,663 \text{ kNcm} < M_{b,Rd} = 19,170 \text{ kNcm}$$

$$M_{Ed,max} / M_{b,Rd} = 0,243 < 1$$

Mentre secondo EN 1993-1-7 si ha (calcolo plastico)

a/d	c_f	c_1	c_2	c_i	c_j
1	0,00126	0,0178	0,0178	0,0513	0,0513
1,1	0,0015	0,0218	0,0168	0,0538	0,0538
1,2	0,00172	0,0255	0,0154	0,0554	0,0554
1,3	0,00191	0,0288	0,0138	0,0563	0,0563
1,4	0,00207	0,0316	0,0122	0,0568	0,0568
1,5	0,0022	0,0339	0,0104	0,057	0,057
1,6	0,0023	0,0358	0,0086	0,078	0,0571
1,7	0,00238	0,0373	0,007	0,0799	0,0571
1,8	0,00245	0,0386	0,0056	0,0812	0,0571
1,9	0,00249	0,0396	0,0044	0,0822	0,0571
2	0,00253	0,0403	0,0033	0,0829	0,0571
5,000	0,00284	0,04651	0,00000	0,08920	0,05710
a/d	0,00284	0,04651	0,00000	0,08920	0,05710
5,000	0,00284	0,04651	0,00000	0,08920	0,05710
a/d	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
5,000	0,00284	0,04651	0,00000	0,08920	0,05710

CALCOLO PLASTICO SECONDO EN 1993-1-7 & B.2 e EN 1993-1-6 & 6 ; azioni EN 1991-4



lato a : $p_{z1a} = 21,421 \text{ kN/m}^2$
 $p_{z2a} = 28,562 \text{ kN/m}^2$ } pressione media : $p_{zm} = 24,992 \text{ kN/m}^2$
 spessore lamiera : $t = 1,80 \text{ cm}$

Momenti flettenti sulla piastra :

$$m_{c_x} = k_{\sigma, bx1} / 4 \cdot p \cdot d^2$$

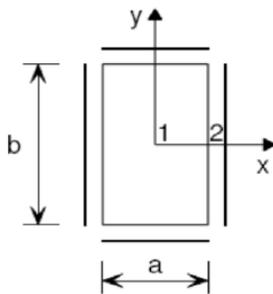
$$m_{c_y} = k_{\sigma, by1} / 4 \cdot p \cdot d^2$$

$$m_{i_x} = k_{\sigma, bx2} / 4 \cdot p \cdot d^2$$

$$m_{c_x} = 2,285249 \text{ kNcm/cm}$$

$$m_{c_y} = 0,427779 \text{ kNcm/cm}$$

$$m_{i_x} = -4,66947 \text{ kNcm/cm}$$



Freccia massima :

$$f = k_{w1} \cdot p \cdot d^4 / B$$

$$B = E \cdot t^3$$

$$B = 122472 \text{ kNcm}$$

$$f = 0,1295 \text{ cm}$$

a/d	k_{w1}	$k_{\sigma, bx1}$	$k_{\sigma, by1}$	$k_{\sigma, bx2}$	a/d
1	0,01375	0,136	0,136	-0,308	
1,1	0,015786	0,1524	0,133	-0,3372	
1,2	0,017822	0,1688	0,13	-0,3664	
1,3	0,019858	0,1852	0,127	-0,3956	
1,4	0,021894	0,2016	0,124	-0,4248	
1,5	0,02393	0,218	0,121	-0,454	
1,6	0,02467	0,2234	0,1157	-0,4628	
1,7	0,02541	0,2288	0,1104	-0,4716	
1,8	0,02615	0,2342	0,1051	-0,4804	
1,9	0,02689	0,2396	0,0998	-0,4892	
2	0,02763	0,245	0,0945	-0,498	
2,1	0,027737	0,2453	0,09259	-0,4987	
2,2	0,027844	0,2456	0,09068	-0,4994	
2,3	0,027951	0,2459	0,08877	-0,5001	
2,4	0,028058	0,2462	0,08686	-0,5008	
2,5	0,028165	0,2465	0,08495	-0,5015	
2,6	0,028272	0,2468	0,08304	-0,5022	
2,7	0,028379	0,2471	0,08113	-0,5029	
2,8	0,028486	0,2474	0,07922	-0,5036	
2,9	0,028593	0,2477	0,07731	-0,5043	
3	0,0287	0,248	0,0754	-0,505	
5,000	0,03060	0,2540	0,0475	-0,5190	5,000
a/d	0,03060	0,25400	0,04755	-0,51900	5,00000
5,000	0,03060	0,25400	0,04755	-0,51900	5,000
a/d	31,00	31,00	31,00	31,00	
5,000	0,03060	0,25400	0,04755	-0,51900	5,000

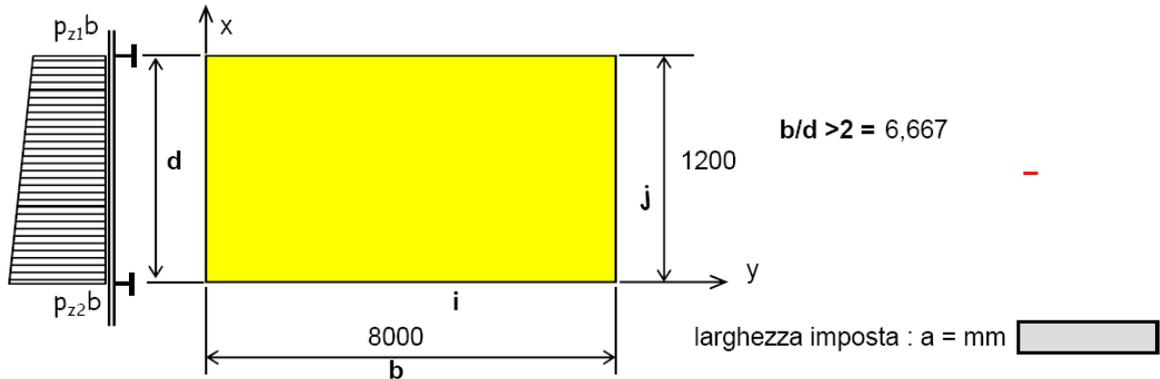
$$M_{Ed, max} = 7,004 \text{ kNcm} < M_{b, Rd} = 28,755 \text{ kNcm} \quad M_{Ed} / M_{b, rd} = 0,244 < 1$$

$$\sigma_{eq, Ed} = \sqrt{\sigma_{bx, Ed}^2 + \sigma_{by, Ed}^2 - \sigma_{bx, Ed} \sigma_{by, Ed}} = 2,5978 \text{ kN/cm}^2 < 35,50 \text{ kN/cm}^2$$

Dal confronto si può notare che la differenza tra i due metodi di calcolo è veramente minima. Inoltre, la freccia calcolata col metodo elastico è di **0,1272** cm mentre la freccia col metodo plastico vale **0,1295** cm avendo usato criteri e parametri diversi. Analogo calcolo è eseguito sulla parete lato "b" con i seguenti risultati :

CALCOLO ELASTICO SECONDO ECCS

PANNELLO LATO "b"



lato b : $p_{z1b} = 21,746 \text{ kN/m}^2$
 $p_{z2b} = 29,379 \text{ kN/m}^2$ } pressione media : $p_{zm}b = 25,563 \text{ kN/m}^2$
 spessore lamiera : $t = 1,80 \text{ cm}$

Momenti flettenti sulla piastra :

$mc_x = (c_1 + c_2 \cdot v) \cdot p \cdot d^2$
 $mc_y = (c_2 + c_1 \cdot v) \cdot p \cdot d^2$
 $mi_x = -c_i \cdot p \cdot d^2$
 $mj_y = -c_j \cdot p \cdot d^2$
 $mc_x = 1,762387 \text{ kNcm/cm}$
 $mc_y = 0,528718 \text{ kNcm/cm}$
 $mi_x = -3,33258 \text{ kNcm/cm}$
 $mj_y = -2,10187 \text{ kNcm/cm}$

Freccia massima :

$f = c_f \cdot p \cdot d^4 / B$
 $B = E \cdot t^3 / 12 \cdot (1 - \nu^2)$
 $B = 11215 \text{ kNcm}$

$f = 0,1375 \text{ cm}$

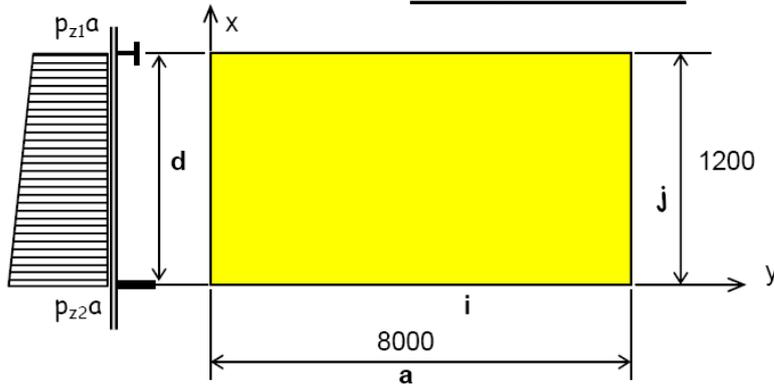
b/d	c_f	c_1	c_2	c_i	c_j
1	0,00126	0,0178	0,0178	0,0513	0,0513
1,1	0,0015	0,0218	0,0168	0,0538	0,0538
1,2	0,00172	0,0255	0,0154	0,0554	0,0554
1,3	0,00191	0,0288	0,0138	0,0563	0,0563
1,4	0,00207	0,0316	0,0122	0,0568	0,0568
1,5	0,0022	0,0339	0,0104	0,057	0,057
1,6	0,0023	0,0358	0,0086	0,078	0,0571
1,7	0,00238	0,0373	0,007	0,0799	0,0571
1,8	0,00245	0,0386	0,0056	0,0812	0,0571
1,9	0,00249	0,0396	0,0044	0,0822	0,0571
2	0,00253	0,0403	0,0033	0,0829	0,0571
6,667	0,00291	0,04788	0,00000	0,09053	0,05710
b/d	0,00291	0,04788	0,00000	0,09053	0,05710
b/d	51,67	51,67	51,67	51,67	51,67
6,667	0,00291	0,04788	0,00000	0,09053	0,05710

$M_{Ed,max} = 4,999 \text{ kNcm} < M_{b,Rd} = 19,170 \text{ kNcm}$

$M_{Ed,max} / M_{b,Rd} = 0,261 < 1$

CALCOLO PLASTICO SECONDO EN 1993-1-7 & B.2 e EN 1993-1-6 & 6 ; azioni EN 1991-4

PANNELLO LATO "b"



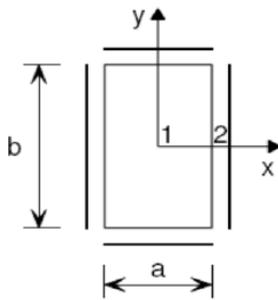
$a/d > 3 = 6,667$

lato a : $p_{z1a} = 21,421 \text{ kN/m}^2$
 $p_{z2a} = 28,562 \text{ kN/m}^2$ } pressione media : $p_{zm} = 24,992 \text{ kN/m}^2$
 spessore lamiera : $t = 1,80 \text{ cm}$

Momenti flettenti sulla piastra :

$mc_x = k_{\sigma, bx1} / 4 \cdot p \cdot d^2$
 $mc_y = k_{\sigma, by1} / 4 \cdot p \cdot d^2$
 $mi_x = k_{\sigma, bx2} / 4 \cdot p \cdot d^2$

$mc_x = 2,330235 \text{ kNcm/cm}$
 $mc_y = 0,291568 \text{ kNcm/cm}$
 $mi_x = -4,77443 \text{ kNcm/cm}$



Freccia massima :

$f = k_{w1} \cdot p \cdot d^4 / B$

$B = E \cdot t^3$

$B = 122472 \text{ kNcm}$

$f = 0,1365 \text{ cm}$

a/d	k_{w1}	$k_{\sigma, bx1}$	$k_{\sigma, by1}$	$k_{\sigma, bx2}$	a/d
1	0,01375	0,136	0,136	-0,308	
1,1	0,015786	0,1524	0,133	-0,3372	
1,2	0,017822	0,1688	0,13	-0,3664	
1,3	0,019858	0,1852	0,127	-0,3956	
1,4	0,021894	0,2016	0,124	-0,4248	
1,5	0,02393	0,218	0,121	-0,454	
1,6	0,02467	0,2234	0,1157	-0,4628	
1,7	0,02541	0,2288	0,1104	-0,4716	
1,8	0,02615	0,2342	0,1051	-0,4804	
1,9	0,02689	0,2396	0,0998	-0,4892	
2	0,02763	0,245	0,0945	-0,498	
2,1	0,027737	0,2453	0,09259	-0,4987	
2,2	0,027844	0,2456	0,09068	-0,4994	
2,3	0,027951	0,2459	0,08877	-0,5001	
2,4	0,028058	0,2462	0,08686	-0,5008	
2,5	0,028165	0,2465	0,08495	-0,5015	
2,6	0,028272	0,2468	0,08304	-0,5022	
2,7	0,028379	0,2471	0,08113	-0,5029	
2,8	0,028486	0,2474	0,07922	-0,5036	
2,9	0,028593	0,2477	0,07731	-0,5043	
3	0,0287	0,248	0,0754	-0,505	
6,667	0,03227	0,2590	0,0324	-0,5307	6,667
a/d	0,03227	0,25900	0,03241	-0,53067	6,6667
6,667	0,03227	0,25900	0,03241	-0,53067	6,667
a/d	47,67	47,67	47,67	47,67	
6,667	0,03227	0,25900	0,03241	-0,53067	6,667

$M_{Ed, max} = 7,162 \text{ kNcm} < M_{b, Rd} = 28,755 \text{ kNcm} \quad M_{Ed}/M_{b, rd} = 0,249 < 1$

$\sigma_{eq, Ed} = \sqrt{\sigma_{bx, Ed}^2 + \sigma_{by, Ed}^2 - \sigma_{bx, Ed} \sigma_{by, Ed}} = 2,7148 \text{ kN/cm}^2 < 35,50 \text{ kN/cm}^2$

Con gli stessi criteri usati per il calcolo delle pareti verticali viene di seguito riportato il calcolo di verifica della tramoggia tronco-piramidale. Il calcolo delle sollecitazioni tiene conto dell'inclinazione delle pareti anche nel caso di disassamento della bocca di scarico.

CALCOLO DELLA TRAMOGGIA TRONCO-PIRAMIDALE

Profondità baricentrica delle pareti inclinate

$$h' = v \cdot b / (b-u) = 5,556 \text{ m}$$

$$z' = z_2 + h'/3 = 5,543 \text{ m}$$

$$a' = (2 \cdot a \cdot b - a^2) / b = 7,50 \text{ m}$$

Ascissa caratteristica corrispondente :

$$\text{lato a : } A_1 = a / [\pi \cdot \text{tg} \varphi' \cdot \text{tg}^2(\pi/4 - \varphi'/2)] - l/3 = 12,59785 \text{ m}$$

$$l = e \cdot \text{tg} \varphi = 1,109 \text{ m}$$

$$\text{lato b : } A_2 = a' / [\pi \cdot \text{tg} \varphi' \cdot \text{tg}^2(\pi/4 - \varphi'/2)] - l/3 = 15,839695 \text{ m}$$

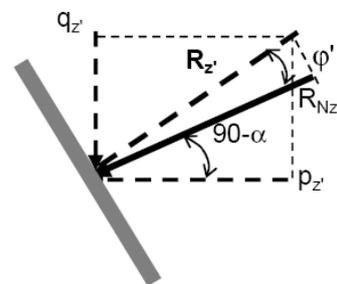
Pressione laterale pz sulle pareti :

$$\text{lato a : } p_{z',a} = p_{\max,a} \cdot [1 - (z'/A_1 + 1)^{-2}] = 35,553 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{lato b : } p_{z',b} = p_{\max,b} \cdot [1 - (z'/A_2 + 1)^{-2}] = 38,734 \text{ kN/m}^2$$

Pressione verticale unitaria media qz a profondità z' :

$$q_{z'} = C_h \cdot \delta \cdot [z' \cdot (z'/A_2 + 1)^{-1} + l/3] = 86,972 \text{ kN/m}^2$$



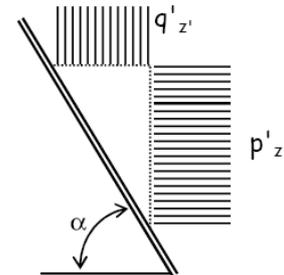
Pressioni sulla unità di superficie delle pareti inclinate :

$$\text{lato a : } p'_{z',a} = p_{z',a} \cdot \text{sen} \alpha_a = 28,853 \text{ kN/m}^2$$

$$q'_{z',a} = q_{z'} \cdot \text{cos} \alpha_a = 50,818 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{lato b : } p'_{z',b} = p_{z',b} \cdot \text{sen} \alpha_b = 34,366 \text{ kN/m}^2$$

$$q'_{z',b} = q_{z'} \cdot \text{cos} \alpha_b = 40,125 \text{ kN/m}^2$$



Risultanti delle pressioni :

$$\text{lato a : } R_{z',a} = \sqrt{p'_{z',a}{}^2 + q'_{z',a}{}^2} = 58,438 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{lato b : } R_{z',b} = \sqrt{p'_{z',b}{}^2 + q'_{z',b}{}^2} = 52,830 \text{ kN/m}^2$$

$$\varphi'_a = 24,660^\circ$$

$$\varphi'_b = 21,946^\circ$$

Azione normale sulle pareti inclinate per effetto del carico sopra la tramoggia:

$$\text{lato a : } R_{Nz',a} = R_{z',a} \cdot \text{cos} \varphi'_a = 53,108 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{lato b : } R_{Nz',b} = R_{z',b} \cdot \text{cos} \varphi'_b = 49,002 \text{ kN/m}^2$$

EN 1991-4

$$\text{lato a : } P_{N,a} = C_b \cdot q_{z2} \cdot \text{cos}^2 \alpha_a + [q_{z2} \cdot (C_b \cdot \text{cos}^2 \alpha_a + \text{sen}^2 \alpha_a) - C_b \cdot q_{z2} \cdot \text{cos}^2 \alpha_a] \cdot x_a / l_a$$

$$\text{lato b : } P_{N,b} = C_b \cdot q_{z2} \cdot \text{cos}^2 \alpha_b + [q_{z2} \cdot (C_b \cdot \text{cos}^2 \alpha_b + \text{sen}^2 \alpha_b) - C_b \cdot q_{z2} \cdot \text{cos}^2 \alpha_b] \cdot x_b / l_b$$

$$\text{lato a : } P_{N,a} = 53,872 \quad P_{N,a,\min} = 26,004 \quad P_{N,a,\max} = 67,806 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{lato b : } P_{N,b} = 49,520 \quad P_{N,b,\min} = 16,212 \quad P_{N,b,\max} = 66,174 \text{ kN/m}^2$$

Azione normale sulle pareti inclinate per effetto del carico della tramoggia:

$$\text{lato a : } R_{Nz',a} = 3 \cdot A / U \cdot \delta \cdot K_s / \mu^{0,5} \cdot \text{sen}^2 \alpha_a = P_{n3,a} = 39,770 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{lato b : } R_{Nz',b} = 3 \cdot A / U \cdot \delta \cdot K_s / \mu^{0,5} \cdot \text{sen}^2 \alpha_b = P_{n3,b} = 47,533 \text{ kN/m}^2$$

Peso della tramoggia e del materiale contenuto :

Superficie pareti tramoggia :	$S_t =$	91,49 m ²	peso P1 =	195,33 kN
Volume tramoggia :	$V_t =$	88,77 m ³	peso P2 =	1509,10 kN
Area proiez. orizz. tramoggia :	$S' =$	48,00 m ²	peso P =	1704,42 kN

Pressioni normale e tangenziale sulle pareti : carico verticale din. = $C_b \cdot q_s =$ 42,611 kN/m²

ECCS modificata

EN 1991-4

lato a :	$P_{N,a} = R_{z',a,s} \cdot \cos \varphi''_a =$	37,963 kN/m ²	$\varphi''_a =$	° 5,04	39,770 kN/m ²
	$P_{T,a} = R_{z',a,s} \cdot \mu =$	16,177 kN/m ²			16,881 kN/m ²
T tang. TOTALE		$R_{Tm} = 38,386$ kN/m ²			$R_{Tm} = 40,533$ kN/m ²

lato b :	$P_{N,b} = R_{z',b,s} \cdot \cos \varphi''_b =$	39,560 kN/m ²	$\varphi''_b =$	° 2,30	47,533 kN/m ²
	$P_{T,b} = R_{z',b,s} \cdot \mu =$	16,806 kN/m ²			20,177 kN/m ²

Azioni normali globali sulle pareti inclinate (incluso effetto riempimento):

EN 1991-4 (medio)

lato a :	$R_{N,a} = R_{Nz',a} + P_{N,a} =$	91,07 kN/m ²	93,64 kN/m ²
lato b :	$R_{N,b} = R_{Nz',b} + P_{N,b} =$	88,56 kN/m ²	97,05 kN/m ²

Momento flettente sulle pareti :

$$K = J_b/J_a \cdot a/b = 0,75$$

$$J_b/J_a = 1$$

$z'_1 =$	4,691 m	$a_{z'_1} =$	m 4,960	$b_{z'_1} =$	m 6,560	$S_{t,1} =$	m ² 61,573
$z'_2 =$	5,691 m	$a_{z'_2} =$	m 3,920	$b_{z'_2} =$	m 5,120	$S_{t,2} =$	m ² 37,466
$z'_3 =$	6,691 m	$a_{z'_3} =$	m 2,880	$b_{z'_3} =$	m 3,680	$S_{t,3} =$	m ² 28,752
$z'_4 =$	7,691 m	$a_{z'_4} =$	m 1,840	$b_{z'_4} =$	m 2,240	$S_{t,4} =$	m ² 20,039

Momento flettente negli angoli :

EN 1991-4

prof. $z'_1 :$	$M_{z'_1} = -(R_{N,a} \cdot a_{z'_1}^2 \cdot K + R_{N,b} \cdot b_{z'_1}^2)/12/(1+K) =$	-261,499 kNm/m	-299,707 kNm/m
prof. $z'_2 :$	$M_{z'_2} = -(R_{N,a} \cdot a_{z'_2}^2 \cdot K + R_{N,b} \cdot b_{z'_2}^2)/12/(1+K) =$	-160,531 kNm/m	-166,855 kNm/m
prof. $z'_3 :$	$M_{z'_3} = -(R_{N,a} \cdot a_{z'_3}^2 \cdot K + R_{N,b} \cdot b_{z'_3}^2)/12/(1+K) =$	-84,089 kNm/m	-78,433 kNm/m
prof. $z'_4 :$	$M_{z'_4} = -(R_{N,a} \cdot a_{z'_4}^2 \cdot K + R_{N,b} \cdot b_{z'_4}^2)/12/(1+K) =$	-32,172 kNm/m	-26,582 kNm/m

Momento flettente lungo i lati :

EN 1991-4

lato a :	$M_{z'_1,a} = R_{N,a} \cdot a_{z'_1}^2 / 8 + M_{z'_1} =$	18,562 kNm/m	5,399 kNm/m
	$M_{z'_2,a} = R_{N,a} \cdot a_{z'_2}^2 / 8 + M_{z'_2} =$	14,398 kNm/m	7,659 kNm/m
	$M_{z'_3,a} = R_{N,a} \cdot a_{z'_3}^2 / 8 + M_{z'_3} =$	10,333 kNm/m	7,098 kNm/m
	$M_{z'_4,a} = R_{N,a} \cdot a_{z'_4}^2 / 8 + M_{z'_4} =$	6,369 kNm/m	4,791 kNm/m
lato b :	$M_{z'_1,b} = R_{N,b} \cdot b_{z'_1}^2 / 8 + M_{z'_1} =$	214,890 kNm/m	258,195 kNm/m
	$M_{z'_2,b} = R_{N,b} \cdot b_{z'_2}^2 / 8 + M_{z'_2} =$	129,666 kNm/m	140,254 kNm/m
	$M_{z'_3,b} = R_{N,b} \cdot b_{z'_3}^2 / 8 + M_{z'_3} =$	65,828 kNm/m	63,305 kNm/m
	$M_{z'_4,b} = R_{N,b} \cdot b_{z'_4}^2 / 8 + M_{z'_4} =$	23,374 kNm/m	19,666 kNm/m

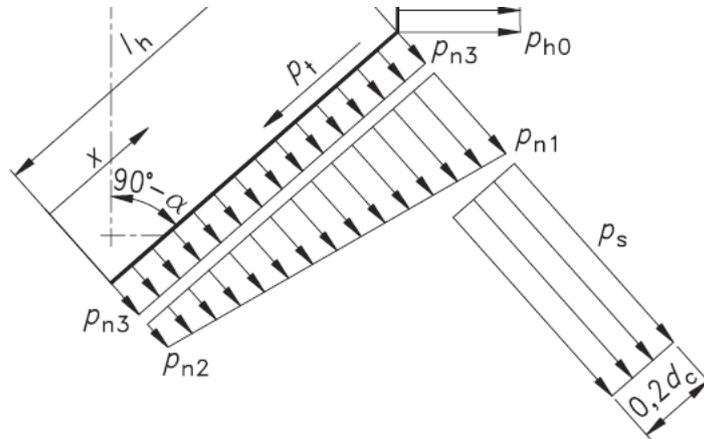
Momento flettente assoluto massimo :

$M_{z'_1,max} =$	261,499 kNm/m	299,707 kNm/m
$M_{z'_2,max} =$	160,531 kNm/m	166,855 kNm/m
$M_{z'_3,max} =$	84,089 kNm/m	78,433 kNm/m
$M_{z'_4,max} =$	32,172 kNm/m	26,582 kNm/m

Momento riferito all'interasse degli irrigidimenti :

$M_{z'_1,eff} =$	322,227 kNm	369,309 kNm
$M_{z'_2,eff} =$	197,812 kNm	205,604 kNm
$M_{z'_3,eff} =$	103,617 kNm	96,647 kNm
$M_{z'_4,eff} =$	39,643 kNm	32,756 kNm

Le diversità tra i momenti flettenti sono principalmente dovute ad una distribuzione diversa della pressione normale alle pareti. Secondo ECS la pressione è uniformemente distribuita mentre secondo EN 1991-4 varia linearmente da un valore massimo nella zona di transizione ad un valore minimo presso la bocca di scarico secondo il seguente schema :



A livello dell'irrigidimento più vicino alla zona di transizione è richiesto un profilo a T (1/2) IPE 400 come di seguito dimostrato dal calcolo.

VERIFICA IRRIGIDIMENTI DI PARETE : metodo di calcolo allo stato limite ultimo
resistenza elastica flessionale sotto tensioni primarie

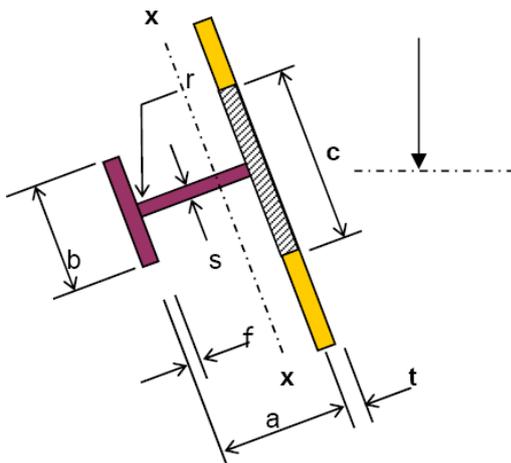
Pareti tramogge - verifica alla profondità z'_1 e z'_2 :

materiale lamiere : S 355 $f_y = \text{kN/cm}^2$ 35,50 $\epsilon = 0,81$
 coeff. sic. mater. $\gamma_{M0} = 1$ $f_{yd} = \text{kN/cm}^2$ 35,50 $\gamma_Q = 1,5$

$z'_1 = \text{m } 4,691$

IRRIGIDIMENTO A "T"

$c = 2.16. \epsilon. t + s$



t =	2	cm	
c =	53,57	cm	
a =	25	cm	
b =	25	cm	
f =	2,5	cm	
s =	1,5	cm	
r =	1,5	cm	
A =	204,359	cm ²	
y _G =	10,70	cm	
y _{pl} =	1,91	cm	
J _x =	26133	cm ⁴	
W _{x,est.} =	1604	cm ³	
W _{x,int.} =	2442	cm ³	
W _{x,pl.} =	1992	cm ³	
M _{b,Rd} =	56928	kNcm	
R _{T,Rd} =	163584	kN	
$\sigma_{y,Ed}$ =	19,797	22,689	kN/cm ²
$\sigma_{x,Ed}$ =	0,769	0,812	kN/cm ²
[[$(\sigma_{y,Ed})^2 + (\sigma_{x,Ed})^2 - (\sigma_{y,Ed}) \cdot (\sigma_{x,Ed})$] ^{0,5} / f _{yd} = 0,547 < 1			
[[$(\sigma_{y,Ed})^2 + (\sigma_{x,Ed})^2 - (\sigma_{y,Ed}) \cdot (\sigma_{x,Ed})$] ^{0,5} / f _{yd} = 0,628 < 1			

ECCS $M_{Ed,max} = 48334$ kNcm < $M_{b,Rd}$
 $R_{T,Ed} = 3545$ kN < $R_{T,Rd}$

EN 1991-4 $M_{Ed,max} = 55396$ kNcm < $M_{b,Rd}$
 $R_{T,Ed} = 3744$ kN < $R_{T,Rd}$

rapp. tens. lembo int.

ECCS

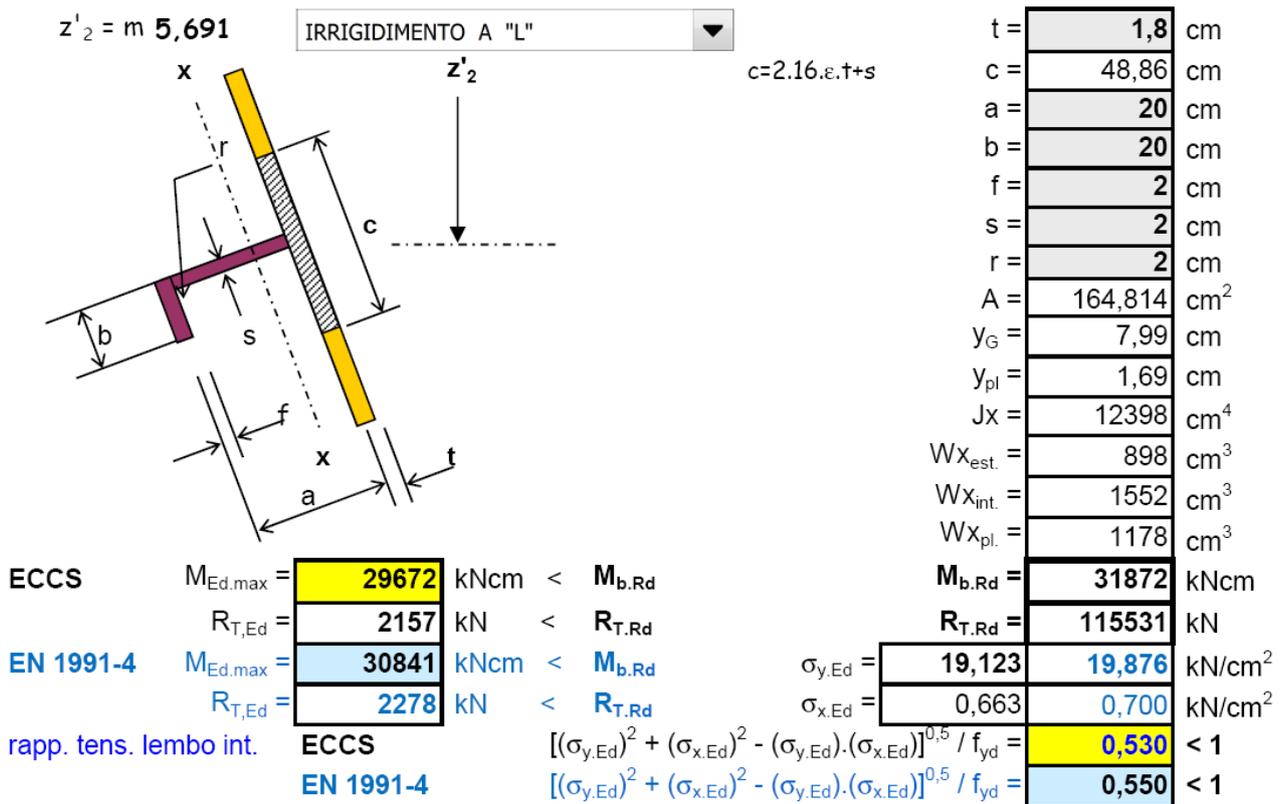
EN 1991-4

[[$(\sigma_{y,Ed})^2 + (\sigma_{x,Ed})^2 - (\sigma_{y,Ed}) \cdot (\sigma_{x,Ed})$]^{0,5} / f_{yd} = 0,547 < 1

[[$(\sigma_{y,Ed})^2 + (\sigma_{x,Ed})^2 - (\sigma_{y,Ed}) \cdot (\sigma_{x,Ed})$]^{0,5} / f_{yd} = 0,628 < 1

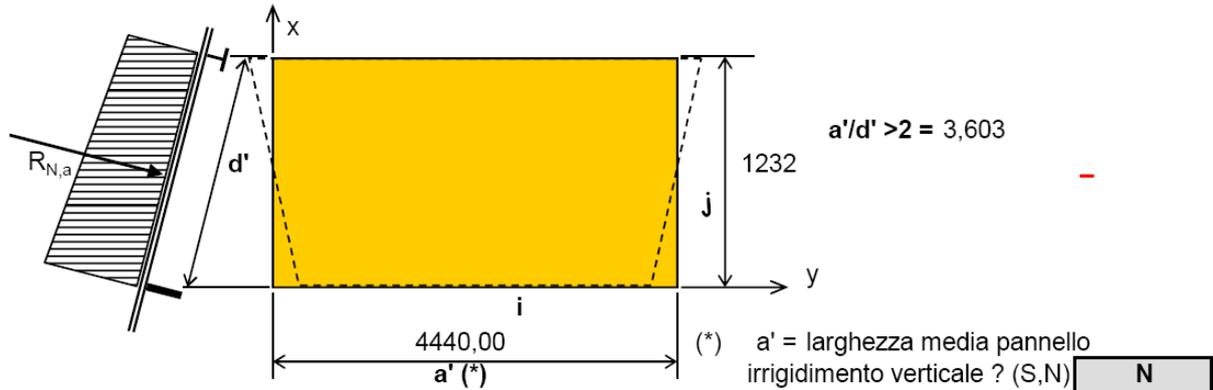
Il calcolo riportato è eseguito controllando due aspetti della resistenza : il primo riguarda la limitazione del momento di progetto al momento resistente elastico (plastico per silos di classe 3) ; il secondo riguarda la limitazione allo snervamento di progetto della tensione elastica secondo von Mises (calcolata al lembo interno della parete dove si combinano la trazione lungo la pendenza e la tensione flessionale massima).

Analogo calcolo è eseguito ai vari livelli della tramoggia e, a titolo di esempio, per notare la riduzione possibile della sezione dell'irrigidimento, si riporta di seguito la verifica a livello $z = 5,691$ m dove è previsto l'uso di un profilo a L.



Anche per la tramoggia viene eseguita la verifica di resistenza e deformazione della lamiera maggiormente sollecitata compresa tra due irrigidimenti sia in base alle ECCS (calcolo elastico) sia in base alla EN 1993-1-7 (calcolo plastico).
 In questo caso si fa riferimento alla larghezza media del pannello di forma trapezoidale.
 Ovviamente il calcolo è ripetuto per entrambi i lati della tramoggia che hanno geometrie differenti specie nel caso di bocca di scarico eccentrica.

VERIFICA DI UN CAMPO DI LAMIERA COMPRESO TRA DUE IRRIGIDIMENTI LONGITUDINALI :
CALCOLO ELASTICO SECONDO ECCS
PANNELLO LATO "a"



lato a : pressione media : $R_{N,a} = 91,071 \text{ kN/m}^2$
 spessore lamiera : $t = 1,80 \text{ cm}$

Momenti flettenti sulla piastra :

$$m_{c_x} = (c_1 + c_2 \cdot v) \cdot p \cdot d^2$$

$$m_{c_y} = (c_2 + c_1 \cdot v) \cdot p \cdot d^2$$

$$m_{i_x} = -c_i \cdot p \cdot d^2$$

$$m_{j_y} = -c_j \cdot p \cdot d^2$$

$$m_{c_x} = 6,195471 \text{ kNcm/cm}$$

$$m_{c_y} = 1,868084 \text{ kNcm/cm}$$

$$m_{i_x} = -12,0978 \text{ kNcm/cm}$$

$$m_{j_y} = -7,8959 \text{ kNcm/cm}$$

Freccia massima :

$$f = c_f \cdot p \cdot d^4 / B$$

$$B = E \cdot t^3 / 12 \cdot (1 - \nu^2)$$

$$B = 11215 \text{ kNcm}$$

$$f = 0,5162 \text{ cm}$$

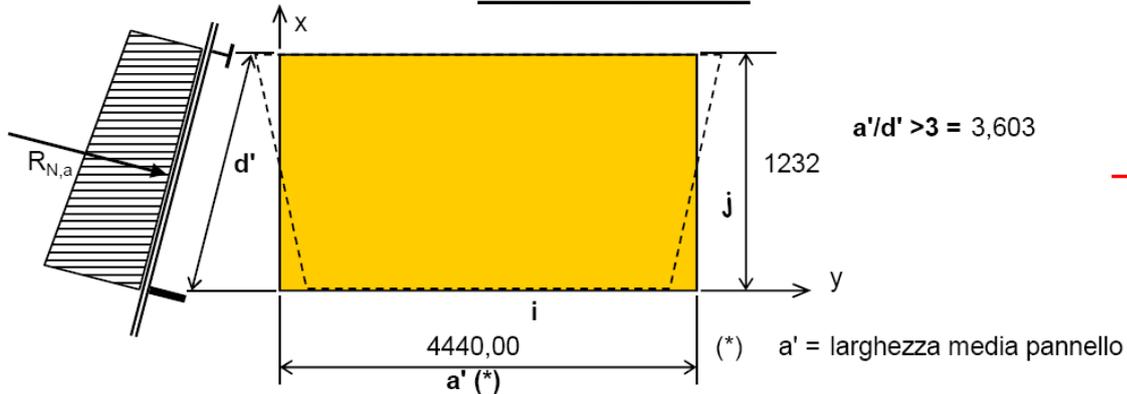
a'/d'	c_f	c_1	c_2	c_i	c_j
1	0,00126	0,0178	0,0178	0,0513	0,0513
1,1	0,0015	0,0218	0,0168	0,0538	0,0538
1,2	0,00172	0,0255	0,0154	0,0554	0,0554
1,3	0,00191	0,0288	0,0138	0,0563	0,0563
1,4	0,00207	0,0316	0,0122	0,0568	0,0568
1,5	0,0022	0,0339	0,0104	0,057	0,057
1,6	0,0023	0,0358	0,0086	0,078	0,0571
1,7	0,00238	0,0373	0,007	0,0799	0,0571
1,8	0,00245	0,0386	0,0056	0,0812	0,0571
1,9	0,00249	0,0396	0,0044	0,0822	0,0571
2	0,00253	0,0403	0,0033	0,0829	0,0571
3,603	0,00276	0,04478	0,00008	0,08749	0,05710
a'/d'	0,00276	0,04478	0,00008	0,08749	0,05710
3,603	0,00276	0,04478	0,00008	0,08749	0,05710
a'/d'	21,03	21,03	21,03	21,03	21,03
3,603	0,00276	0,04478	0,00008	0,08749	0,05710

$$M_{Ed,max} = 18,147 \text{ kNcm} < M_{b,Rd} = 19,170 \text{ kNcm}$$

$$M_{Ed,max} / M_{b,Rd} = 0,947 < 1$$

CALCOLO PLASTICO SECONDO EN 1993-1-7 & B.2 e EN 1993-1-6 & 6

PANNELLO LATO "a"



lato a : pressione media : $R_{N,a} = 93,642 \text{ kN/m}^2$
 spessore lamiera : $t = 1,80 \text{ cm}$

Momenti flettenti sulla piastra :

$$m_{c_x} = k_{\sigma, bx1} / 4 \cdot p \cdot d^2$$

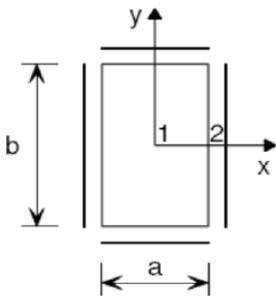
$$m_{c_y} = k_{\sigma, by1} / 4 \cdot p \cdot d^2$$

$$m_{i_x} = k_{\sigma, bx2} / 4 \cdot p \cdot d^2$$

$$m_{c_x} = 8,838455 \text{ kNcm/cm}$$

$$m_{c_y} = 1,851607 \text{ kNcm/cm}$$

$$m_{i_x} = -18,3498 \text{ kNcm/cm}$$



Freccia massima :

$$f = k_{w1} \cdot p \cdot d^4 / B$$

$$B = E \cdot t^3$$

$$B = 122472 \text{ kNcm}$$

$$f = 0,5112 \text{ cm}$$

a/d	k_{w1}	$k_{\sigma, bx1}$	$k_{\sigma, by1}$	$k_{\sigma, bx2}$	a/d
1	0,01375	0,136	0,136	-0,308	
1,1	0,015786	0,1524	0,133	-0,3372	
1,2	0,017822	0,1688	0,13	-0,3664	
1,3	0,019858	0,1852	0,127	-0,3956	
1,4	0,021894	0,2016	0,124	-0,4248	
1,5	0,02393	0,218	0,121	-0,454	
1,6	0,02467	0,2234	0,1157	-0,4628	
1,7	0,02541	0,2288	0,1104	-0,4716	
1,8	0,02615	0,2342	0,1051	-0,4804	
1,9	0,02689	0,2396	0,0998	-0,4892	
2	0,02763	0,245	0,0945	-0,498	
2,1	0,027737	0,2453	0,09259	-0,4987	
2,2	0,027844	0,2456	0,09068	-0,4994	
2,3	0,027951	0,2459	0,08877	-0,5001	
2,4	0,028058	0,2462	0,08686	-0,5008	
2,5	0,028165	0,2465	0,08495	-0,5015	
2,6	0,028272	0,2468	0,08304	-0,5022	
2,7	0,028379	0,2471	0,08113	-0,5029	
2,8	0,028486	0,2474	0,07922	-0,5036	
2,9	0,028593	0,2477	0,07731	-0,5043	
3	0,0287	0,248	0,0754	-0,505	
3,603	0,02900	0,2486	0,0521	-0,5162	3,603
a/d	0,02900	0,24865	0,05209	-0,51622	3,60321
3,603	0,02900	0,24865	0,05209	-0,51622	3,603
a/d	27,03	27,03	27,03	27,03	
3,603	0,02900	0,24865	0,05209	-0,51622	3,603

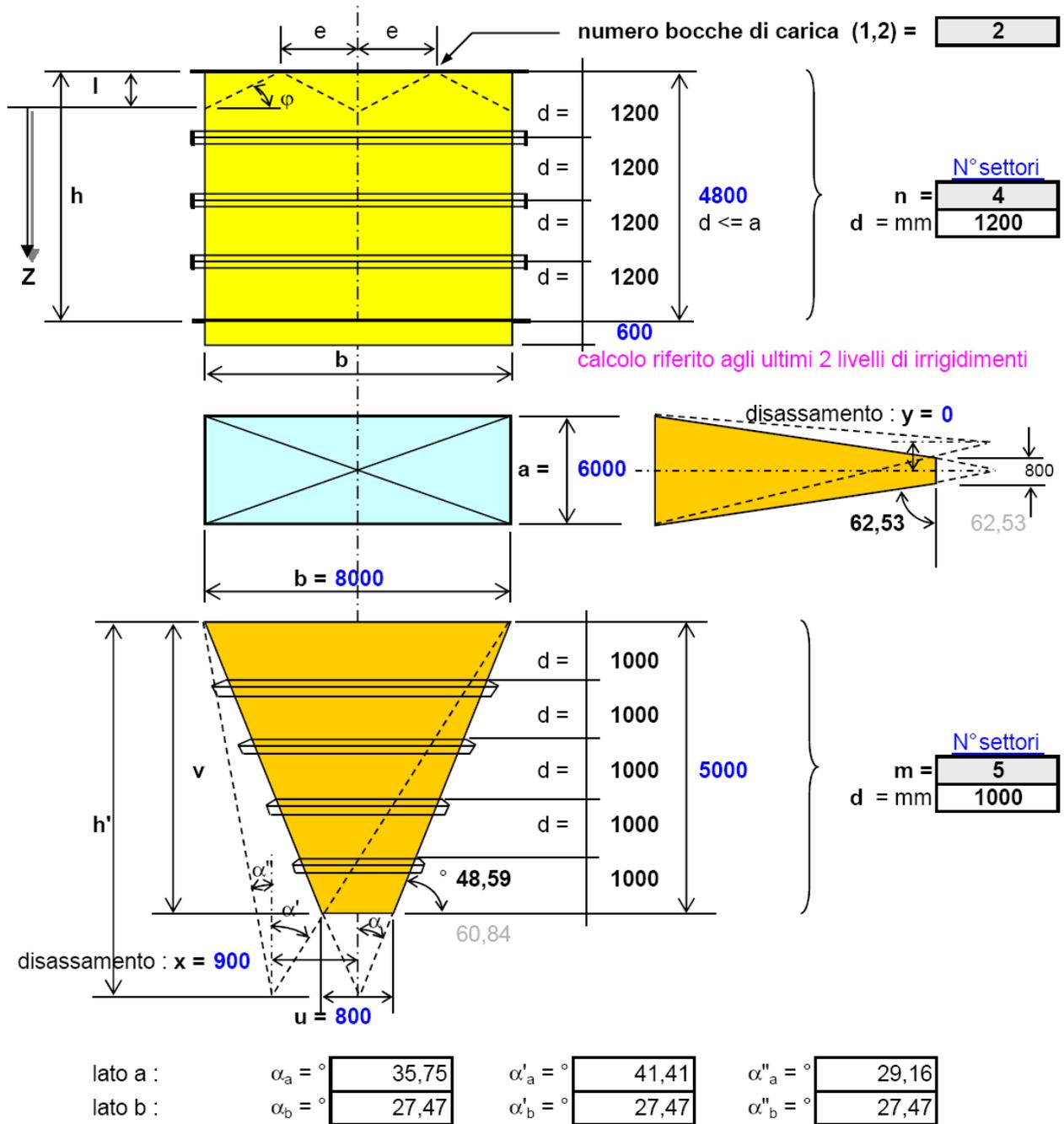
$$M_{Ed, \max} = 27,525 \text{ kNcm} < M_{b, Rd} = 28,755 \text{ kNcm} \quad M_{Ed}/M_{b, Rd} = 0,957 < 1$$

$$\sigma_{eq, Ed} = \sqrt{\sigma_{bx, Ed}^2 + \sigma_{by, Ed}^2 - \sigma_{bx, Ed} \sigma_{by, Ed}} = 9,967 \text{ kN/cm}^2 < 35,50 \text{ kN/cm}^2$$

Anche qui si può notare che il risultato del calcolo elastico differisce di poco da quello del calcolo plastico. In particolare, la freccia calcolata in campo elastico vale **0,5162** cm contro una freccia calcolata in campo plastico pari a **0,5112** cm utilizzando criteri e parametri differenti.

Il calcolo eseguito per i pannelli sul lato "b" non viene qui riportato essendo ridondante.

Si vuole invece far notare la differenza che si ha nel calcolo di verifica del silo qualora la bocca di scarico non sia centrata ma sia posta ad una eccentricità di **900** mm secondo lo schema seguente :



Il silo diviene automaticamente di **classe 3** e viene eseguito il **calcolo plastico**.

Senza eseguire il ricalcolo delle sollecitazioni viene di seguito riportata la verifica dell'irrigidimento più alto che evidenzia un maggior stato tensionale al lembo interno ma un rapporto minore $M_{Ed}/M_{b,Rd}$ poiché il momento resistente di progetto è calcolato con riferimento al modulo di resistenza plastico della sezione efficace :

VERIFICA IRRIGIDIMENTI DI PARETE :

metodo di calcolo allo stato limite ultimo

resistenza plastica di collasso sotto tensioni primarie

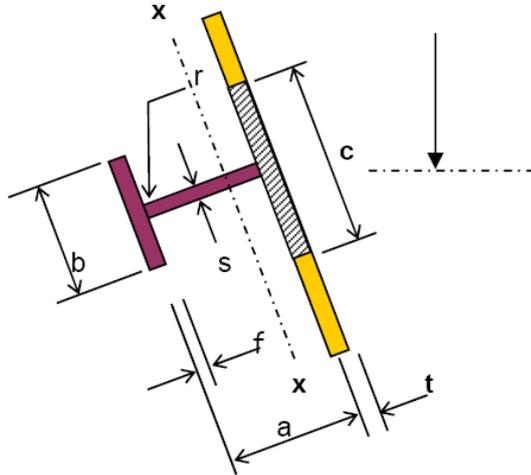
Pareti tramogge - verifica alla profondità z'_1 e z'_2 :

materiale lamiera : S 355 $f_y = \text{kN/cm}^2$ 35,50 $\epsilon = 0,81$
 coeff. sic. mater. $\gamma_{M0} = 1$ $f_{yd} = \text{kN/cm}^2$ **35,50** $\gamma_Q = 1,5$

$z'_1 = m$ **4,691**

IRRIGIDIMENTO A "T"

$c = 2.16 \cdot \epsilon \cdot t + s$

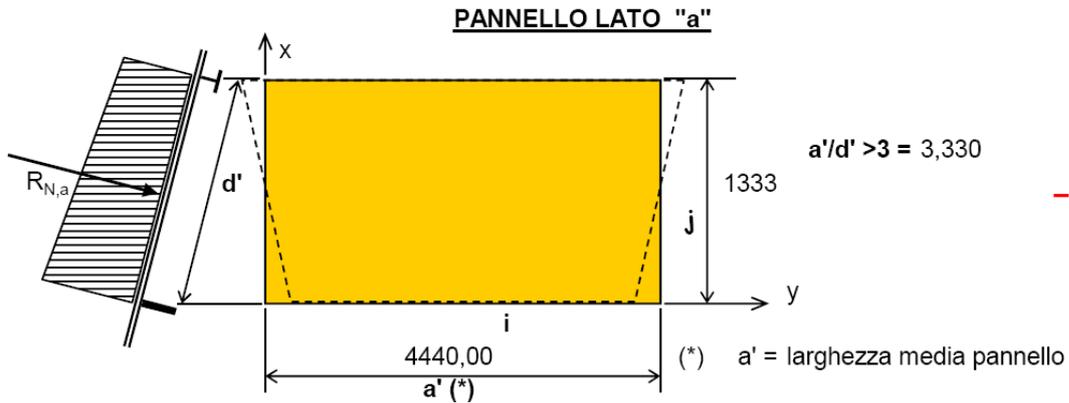


t =	2	cm	
c =	53,57	cm	
a =	25	cm	
b =	25	cm	
f =	2,5	cm	
s =	1,5	cm	
r =	1,5	cm	
A =	204,359	cm ²	
y _G =	10,70	cm	
y _{pl} =	1,91	cm	
J _X =	26133	cm ⁴	
W _{X,est.} =	1604	cm ³	
W _{X,int.} =	2442	cm ³	
W _{X,pl.} =	1992	cm ³	
M_{b,Rd} =	70733	kNcm	
R_{T,Rd} =	163584	kN	
$\sigma_{y,Ed} =$	21,827	24,310	kN/cm ²
$\sigma_{x,Ed} =$	0,843	0,861	kN/cm ²
ECSS	$[(\sigma_{y,Ed})^2 + (\sigma_{x,Ed})^2 - (\sigma_{y,Ed}) \cdot (\sigma_{x,Ed})]^{0,5} / f_{yd} =$	0,603	< 1
EN 1991-4	$[(\sigma_{y,Ed})^2 + (\sigma_{x,Ed})^2 - (\sigma_{y,Ed}) \cdot (\sigma_{x,Ed})]^{0,5} / f_{yd} =$	0,673	< 1

ECSS	$M_{Ed,max} =$	53291	kNcm	< M_{b,Rd}
	$R_{T,Ed} =$	3883	kN	< R_{T,Rd}
EN 1991-4	$M_{Ed,max} =$	59353	kNcm	< M_{b,Rd}
	$R_{T,Ed} =$	3967	kN	< R_{T,Rd}
rapp. tens. lembo int.	ECSS	$[(\sigma_{y,Ed})^2 + (\sigma_{x,Ed})^2 - (\sigma_{y,Ed}) \cdot (\sigma_{x,Ed})]^{0,5} / f_{yd} =$		
	EN 1991-4	$[(\sigma_{y,Ed})^2 + (\sigma_{x,Ed})^2 - (\sigma_{y,Ed}) \cdot (\sigma_{x,Ed})]^{0,5} / f_{yd} =$		

Il problema dell'inclinazione della parete della tramoggia si evidenzia nella verifica della lamiera che produce il seguente risultato in campo plastico :

CALCOLO PLASTICO SECONDO EN 1993-1-7 & B.2 e EN 1993-1-6 & 6



lato a : pressione media : $R_{N,a} = 91,091 \text{ kN/m}^2$
 spessore lamiera : $t = 1,80 \text{ cm}$

Momenti flettenti sulla piastra :

$$m_{c_x} = k_{\sigma, bx1} / 4 \cdot p \cdot d^2$$

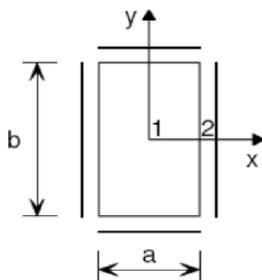
$$m_{c_y} = k_{\sigma, by1} / 4 \cdot p \cdot d^2$$

$$m_{i_x} = k_{\sigma, bx2} / 4 \cdot p \cdot d^2$$

$$m_{c_x} = 10,06172 \text{ kNcm/cm}$$

$$m_{c_y} = 2,245873 \text{ kNcm/cm}$$

$$m_{i_x} = -20,8234 \text{ kNcm/cm}$$



Freccia massima :

$$f = k_{w1} \cdot p \cdot d^4 / B$$

$$B = E \cdot t^3$$

$$B = 122472 \text{ kNcm}$$

$$f = 0,6806 \text{ cm}$$

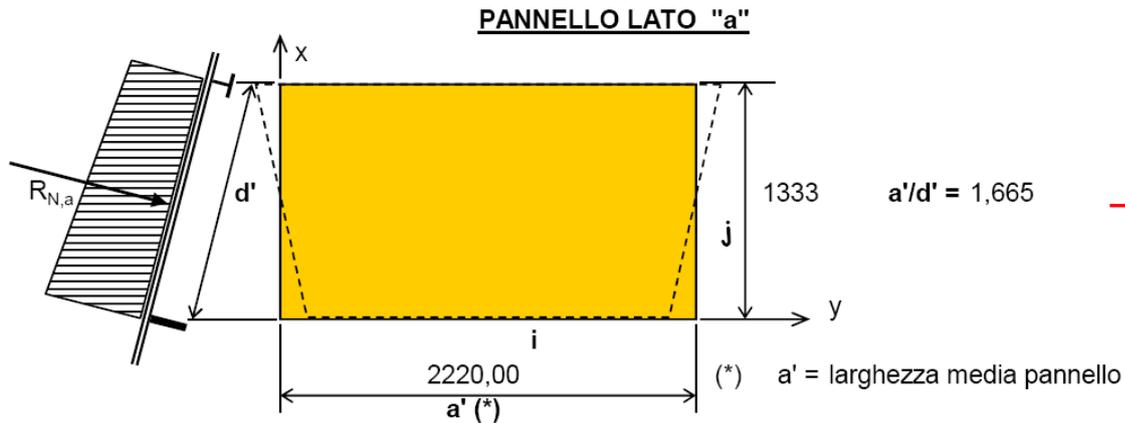
a/d	k_{w1}	$k_{\sigma, bx1}$	$k_{\sigma, by1}$	$k_{\sigma, bx2}$	a/d
1	0,01375	0,136	0,136	-0,308	
1,1	0,015786	0,1524	0,133	-0,3372	
1,2	0,017822	0,1688	0,13	-0,3664	
1,3	0,019858	0,1852	0,127	-0,3956	
1,4	0,021894	0,2016	0,124	-0,4248	
1,5	0,02393	0,218	0,121	-0,454	
1,6	0,02467	0,2234	0,1157	-0,4628	
1,7	0,02541	0,2288	0,1104	-0,4716	
1,8	0,02615	0,2342	0,1051	-0,4804	
1,9	0,02689	0,2396	0,0998	-0,4892	
2	0,02763	0,245	0,0945	-0,498	
2,1	0,027737	0,2453	0,09259	-0,4987	
2,2	0,027844	0,2456	0,09068	-0,4994	
2,3	0,027951	0,2459	0,08877	-0,5001	
2,4	0,028058	0,2462	0,08686	-0,5008	
2,5	0,028165	0,2465	0,08495	-0,5015	
2,6	0,028272	0,2468	0,08304	-0,5022	
2,7	0,028379	0,2471	0,08113	-0,5029	
2,8	0,028486	0,2474	0,07922	-0,5036	
2,9	0,028593	0,2477	0,07731	-0,5043	
3	0,0287	0,248	0,0754	-0,505	
3,330	0,02895	0,2485	0,0555	-0,5143	3,330
a/d	0,02895	0,24851	0,05547	-0,51431	3,32986
3,330	0,02895	0,24851	0,05547	-0,51431	3,330
a/d	24,30	24,30	24,30	24,30	
3,330	0,02895	0,24851	0,05547	-0,51431	3,330

$$M_{Ed, max} = 31,235 \text{ kNcm} < M_{b, Rd} = 28,755 \text{ kNcm} \quad M_{Ed} / M_{b, Rd} = 1,086 < 1$$

$$\sigma_{eq, Ed} = \sqrt{\sigma_{bx, Ed}^2 + \sigma_{by, Ed}^2 - \sigma_{bx, Ed} \sigma_{by, Ed}} = 11,294 \text{ kN/cm}^2 < 35,50 \text{ kN/cm}^2$$

La soluzione è di aumentare lo spessore della lamiera della tramoggia oppure, più agevolmente, disporre un irrigidimento intermedio verticale con il seguente risultato :

CALCOLO PLASTICO SECONDO EN 1993-1-7 & B.2 e EN 1993-1-6 & 6



lato a : pressione media : $R_{N,a} = 91,091 \text{ kN/m}^2$
 spessore lamiera : $t = 1,80 \text{ cm}$

Momenti flettenti sulla piastra :

$$m_{c_x} = k_{\sigma, bx1} / 4 \cdot p \cdot d^2$$

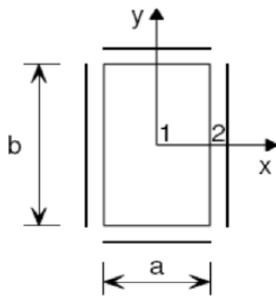
$$m_{c_y} = k_{\sigma, by1} / 4 \cdot p \cdot d^2$$

$$m_{i_x} = k_{\sigma, bx2} / 4 \cdot p \cdot d^2$$

$$m_{c_x} = 9,186997 \text{ kNcm/cm}$$

$$m_{c_y} = 4,545135 \text{ kNcm/cm}$$

$$m_{i_x} = -18,9692 \text{ kNcm/cm}$$



Freccia massima :

$$f = k_{w1} \cdot p \cdot d^4 / B$$

$$B = E \cdot t^3$$

$$B = 122472 \text{ kNcm}$$

$$f = 0,5913 \text{ cm}$$

a/d	k_{w1}	$k_{\sigma, bx1}$	$k_{\sigma, by1}$	$k_{\sigma, bx2}$	a/d
1	0,01375	0,136	0,136	-0,308	
1,1	0,015786	0,1524	0,133	-0,3372	
1,2	0,017822	0,1688	0,13	-0,3664	
1,3	0,019858	0,1852	0,127	-0,3956	
1,4	0,021894	0,2016	0,124	-0,4248	
1,5	0,02393	0,218	0,121	-0,454	
1,6	0,02467	0,2234	0,1157	-0,4628	1,6
1,7	0,02541	0,2288	0,1104	-0,4716	1,7
1,8	0,02615	0,2342	0,1051	-0,4804	
1,9	0,02689	0,2396	0,0998	-0,4892	
2	0,02763	0,245	0,0945	-0,498	
2,1	0,027737	0,2453	0,09259	-0,4987	
2,2	0,027844	0,2456	0,09068	-0,4994	
2,3	0,027951	0,2459	0,08877	-0,5001	
2,4	0,028058	0,2462	0,08686	-0,5008	
2,5	0,028165	0,2465	0,08495	-0,5015	
2,6	0,028272	0,2468	0,08304	-0,5022	
2,7	0,028379	0,2471	0,08113	-0,5029	
2,8	0,028486	0,2474	0,07922	-0,5036	
2,9	0,028593	0,2477	0,07731	-0,5043	
3	0,0287	0,248	0,0754	-0,505	
1,665	0,02842	0,2471	0,0814	-0,5027	1,665
a/d	0,02515	0,22691	0,11226	-0,46851	1,70000
1,700	0,02541	0,22880	0,11040	-0,47160	1,700
a/d	7,65	7,65	7,65	7,65	
1,600	0,02467	0,22340	0,11570	-0,46280	1,600

$$M_{Ed, max} = 28,454 \text{ kNcm} < M_{b, Rd} = 28,755 \text{ kNcm} \quad M_{Ed}/M_{b, Rd} = 0,990 < 1$$

$$\sigma_{eq, Ed} = \sqrt{\sigma_{bx, Ed}^2 + \sigma_{by, Ed}^2 - \sigma_{bx, Ed} \sigma_{by, Ed}} = 9,823 \text{ kN/cm}^2 < 35,50 \text{ kN/cm}^2$$

Il calcolo si conclude con una stima dei pesi strutturali riportati in una tabella riepilogativa :

RIEPILOGO QUANTITA' E PESI

	u.m.	quantità	spessore		peso (max)
			min. (mm)	max. (mm)	kg
lamiera pareti verticali lato a :	m ²	68,40		16,00	8591
lamiera pareti verticali lato b :	m ²	91,20		16,00	11455
lamiera pareti inclinate lato a :	m ²	47,87		16,00	6013
lamiera pareti inclinate lato b :	m ²	57,90		16,00	7272
irrigidimenti intermedi pareti verticali :	m	57,60	8,60	13,50	1910
irrigidimenti estremi pareti verticali :	m	57,60	8,60	13,50	1910
irrigidimenti intermedi pareti inclinate :	m	65,60	10,00	20,00	3958
flangia tramoggia :	m	3,60		36,00	102
lamiera di copertura e irrigidimenti :	m ²	48,00		12,00	6782
piatti (10%)	kg	4799			4799
TOTALE					52791

CONCLUSIONI

Questo esempio dimostra che si può affrontare un tema complesso senza ricorrere sempre ad una analisi a elementi finiti anche se la stessa norma EN 1993-4-1 sembra suggerire questa strada salvo poi smentirsi con le norme EN 1993-1-6 e EN 1993-1-6 che, riducendo il problema all'analisi di singole componenti disgiunte dalla globalità della struttura, consentono di eseguire verifiche di resistenza affidabili e in sicurezza.

Inoltre, il calcolo DBF (design by formula) consente di controllare anche fisicamente ciò che si sta facendo senza perdere quella sensibilità statica che un progettista deve sempre avere e che spesso scompare affidandosi completamente ad un calcolo a elementi finiti dove già la creazione del modello, prossimo al comportamento reale, è un problema ed i risultati dell'analisi possono essere "criptati" o erroneamente interpretati

E' chiaro che punti singolari e interazioni con altre parti strutturali (branchetti, portelli di ispezione, flange di raccordo) richiedono un'analisi più rigorosa con il ricorso a metodi FEA come riportato nella tab. 5.2 della EN 1993-4-1. In questo caso è sempre utile un confronto "manuale" almeno delle parti fondamentali della struttura che il programma "Silorett" può offrire.

Questo tipo di approccio è particolarmente utile in fase di predimensionamento e stima dei pesi ma può essere accettato anche come verifica statica se concordato con la committenza.