



CALCOLO DI CAMINI AUTOPORTANTI parte 2

Domenico Leone

fare sismica  **APPUNTI**

CALCOLO DI CAMINI AUTOPORTANTI

parte 2

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.

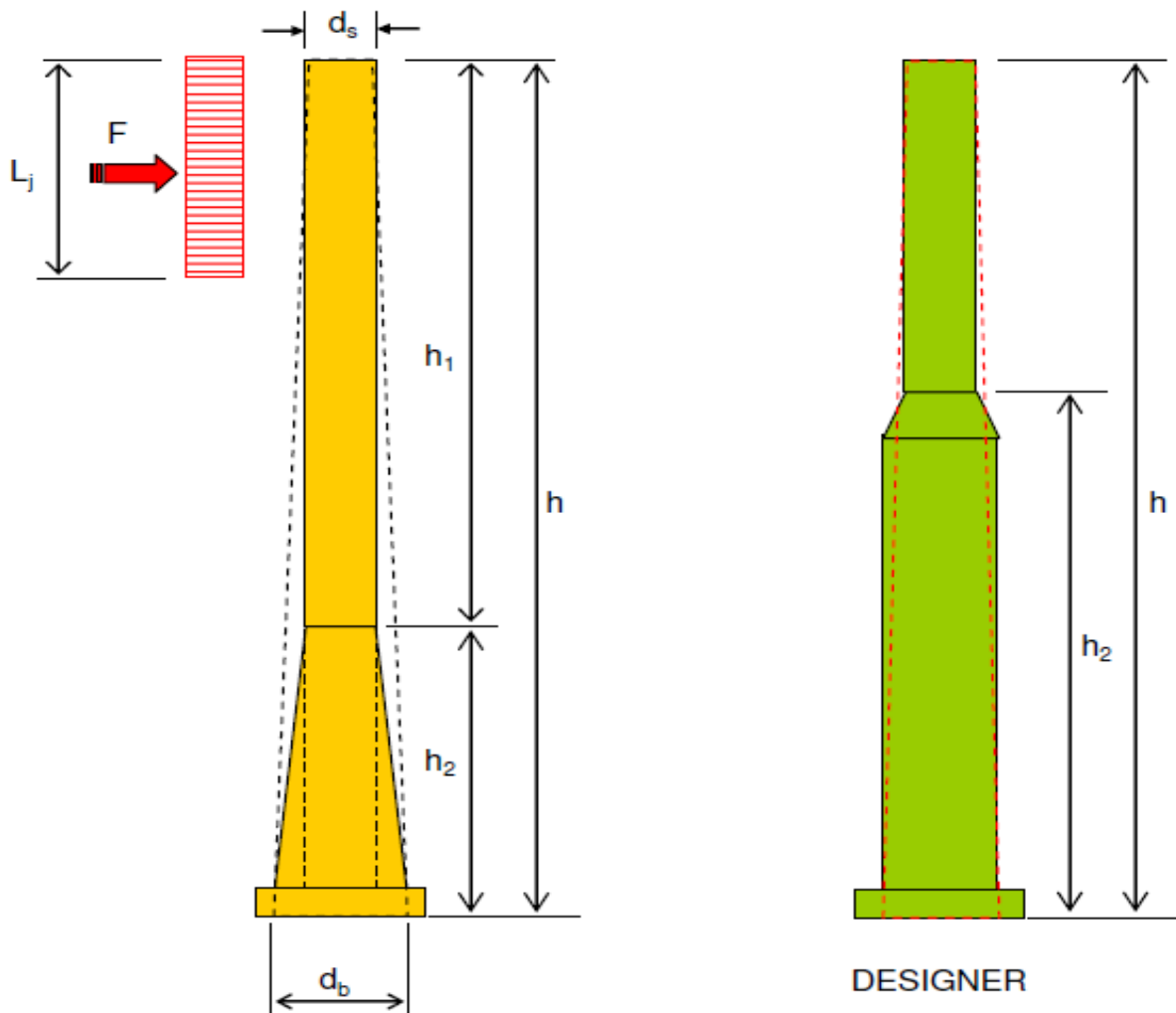
La presente pubblicazione è tutelata dalla legge sul diritto d'autore e non può essere divulgata senza il permesso scritto dell'autore.

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

PROGETTO DI CAMINI AUTOPORTANTI

USO DEL PROGRAMMA AUTOMATICO “CHIMNEY”

PER L'ESAME DI UN CASO TIPICO - **PARTE 2**



Questo articolo conclude la trattazione sul calcolo di ciminiere autoportanti qui affrontato con riferimento alle norme Europee ed italiane e confrontato con il criterio presentato nella prima parte basato sulle norme americane ASCE.

L'analisi degli effetti dell'azione del vento e dell'azione sismica nonché le verifiche di resistenza, stabilità e fatica dell'involucro metallico sono eseguite in conformità alle norme Europee EN 1991-1-4 ; EN 1993-3-2 ; EN 1993-1-6 ; 1-9 e con riferimento comparativo alle norme italiane NTC 2008 e CNR-DT 207 quest'ultima specificatamente dedicata all'analisi statica e dinamica del vento anche su strutture snelle quali le ciminiere autoportanti.

Il calcolo degli effetti dell'azione sismica è eseguito in base alla norma italiana NTC 2008 con riferimento ad un sito posto in zona 2.

L'articolo si sviluppa in due parti :

nella prima sarà presa in considerazione la norma attuale (europea e italiana) con riferimento ad un esempio riportato nella CNR-DT 207 esaminato in modo critico evidenziando gli aspetti meno chiari e problematici del testo normativo.

Nella seconda parte sarà riproposto lo stesso esempio presentato nel primo articolo a titolo di confronto tra norma europea e norma americana.

Si precisa che l'esempio di seguito riportato è stato oggetto di validazione del programma "Chimney" .

Parte 1 :

calcolo di un camino autoportante in base alle norme europee e italiane :
item 4.10 CNR-DT 207

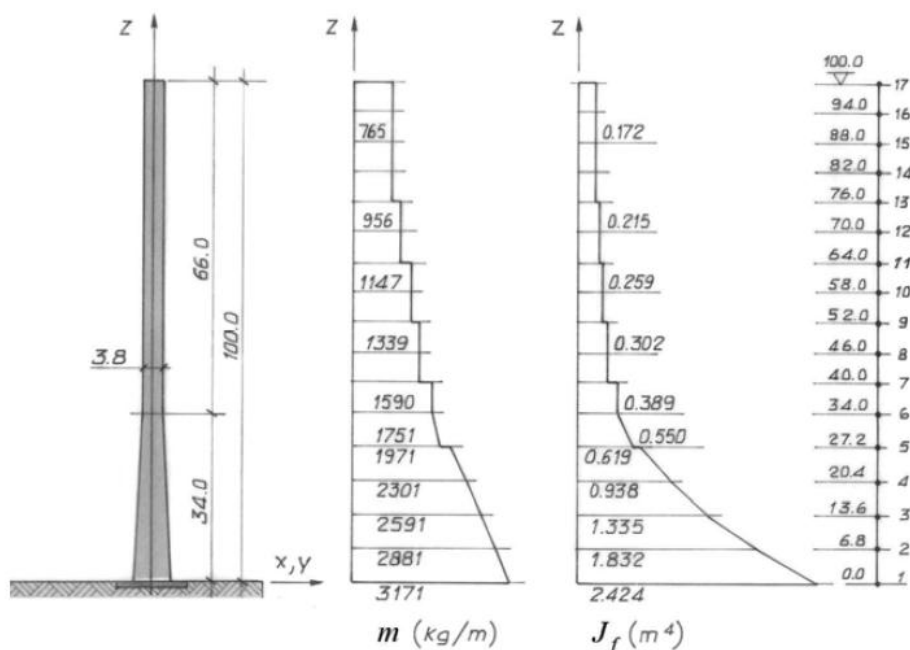


Figura 4.10.1 - Ciminiera metallica.

La struttura esaminata nel presente paragrafo è una ciminiera metallica della classica forma a imbuto rovesciato. La struttura ha un'altezza complessiva di 100 m. La parte tronco-conica alla base è alta 34 m; i diametri esterni alla base e alla sommità della parte tronco-conica misurano rispettivamente 7 e 3,8 m. La canna cilindrica che sormonta la porzione tronco-conica è lunga 66 m e ha diametro esterno costante di 3,8 m. La struttura è integralmente saldata ed è **priva di rivestimenti sia interni sia esterni**. La Figura 4.10.1 riporta i profili verticali della massa per unità di lunghezza, m , e del momento d'inerzia flessionale dell'area della sezione, J_f . La Tabella 4.10.I riporta gli spessori s delle lamiere metalliche nei diversi tronchi, fra le quote z_i e z_s , che compongono la ciminiera.

Tabella 4.10.I - Spessori delle lamiere della ciminiera metallica.

Tronco	z_i (m)	z_s (m)	s (mm)
1	0,0	27,2	18
2	27,2	40,0	16
3	40,0	52,0	14
4	52,0	64,0	12
5	64,0	76,0	10
6	76,0	100,0	8

L'analisi è svolta applicando le Appendici G, I, L, O. [della CNR-DT 207](#)

Partendo dalle valutazioni eseguite nel paragrafo 4.2, l'analisi procede secondo due fasi. Nella prima fase, si determinano le azioni longitudinali del vento. In particolare si valutano le azioni aerodinamiche di picco (paragrafo 4.10.1), i parametri dinamici della struttura (paragrafo 4.10.2), il coefficiente dinamico e la forza statica equivalente longitudinale (paragrafo 4.10.3).

Nella seconda fase, si determinano le azioni relative alle velocità critiche del vento che causano un distacco dei vortici risonante con i modi propri di vibrazione della struttura. In particolare, dapprima si valutano le velocità critiche del vento e i corrispondenti numeri di Scruton (paragrafo 4.10.4).

Successivamente si determinano i valori di picco dello spostamento trasversale in sommità, tramite il **metodo spettrale** (paragrafo 4.10.5) e il **metodo armonico** (paragrafo 4.10.6); da essi si ricavano le forze statiche equivalenti trasversali (paragrafo 4.10.7). Il paragrafo 4.10.8 valuta il numero dei cicli di carico nella prospettiva di analisi a fatica. Il paragrafo 4.10.9 analizza una possibile strategia di mitigazione delle vibrazioni. Il paragrafo 4.10.10 analizza l'ovalizzazione del guscio della ciminiera.

Diciamo subito che i metodi “**spettrale**” e “**armonico**” differiscono tra loro nella valutazione dello spostamento trasversale in sommità in maniera molto significativa e lo stesso normatore non chiarisce in quali casi vada applicato l'uno o l'altro criterio. Viene invece “suggerito” di utilizzare entrambi i metodi e di fare riferimento a quello

che produce l'effetto più gravoso. Vedremo negli esempi che seguono quali siano le conseguenze sul progetto scegliendo il metodo più gravoso; ciò che viene invece "consigliato" dal normatore, quando il numero di Scruton sia minore di 10, è di utilizzare il **metodo spettrale con smorzatori meccanici a "massa accordata"** e di "provare" ad utilizzare il metodo armonico con stabilizzatori aerodinamici (nastri elicoidali, pareti porose) per numeri di Scruton maggiori di 10.

Ciò che risulta chiaro è che un numero di Scruton basso è un **indice di pericolosità statica della ciminiera** ma è anche chiaro che numeri di Scruton alti si ottengono con grande massa smorzante ovvero, nel caso di ciminiera in acciaio, solo con rivestimenti refrattari interni ed esterni e spessori importanti dell'involucro.

L'esempio riportato nella norma considera l'azione del vento con riferimento ad una pressione cinetica di picco alla sommità della ciminiera pari a $q_p(h) = 1,75 \text{ N/m}^2$ cui corrisponde una velocità di riferimento pari a 30 m/sec.

Il calcolo del coefficiente dinamico eseguito secondo la norma CNR-DT 207 è riassunto nella seguente tabella insieme a tutti i parametri di analisi.

Tabella 4.10.II - Fasi di calcolo per la determinazione del coefficiente dinamico longitudinale.

Equazione	Parametro
Figura L.2	$h = 100 \text{ m}$
	$b = 3,8 \text{ m}$
	$z_e = 60 \text{ m}$
(3.5)	$v_m(z_e) = 34,54 \text{ m/s}$
(3.7)	$I_v(z_e) = 0,156$
(3.8)	$L_v(z_e) = 154,71 \text{ m}$
(I.4)	$n_D = 0,77 \text{ Hz}$
(I.28)	$\xi_{D} = 0,013$
(L.4)	$B^2 = 0,588$
(L.6)	$S_D = 0,059$
(L.9)	$\eta_h = 8,917$
(L.9)	$\eta_b = 0,339$
(L.7)	$R_h = 0,106$
(L.8)	$R_b = 0,808$
(L.5)	$R_D^2 = 0,304$
(L.11)	$\nu_D = 0,450 \text{ Hz}$
(L.10)	$g_D = 3,517$
(L.3)	$G_D = 2,038$
(L.2)	$c_{dD} = 0,974$

Nella seguente tabella è riportato il confronto tra i parametri calcolati col programma Chimney e quelli riportati nell'esempio della norma italiana.

	CNR-DT 207 & 4.10	CHIMNEY
Altezza camino	$h = 100 \text{ m}$	$h = 100 \text{ m}$
Larghezza in sommità	$b = 3,8 \text{ m}$	$b = 3,8 \text{ m}$
Altezza equivalente	$z_e = 60 \text{ m}$	$z_e = 60 \text{ m}$
Velocità media del vento	$v_m(z_e) = 34,54 \text{ m/sec}$	$v_m(z_e) = 35 \text{ m/sec}$
Intensità della turbolenza	$I_v(z_e) = 0,156$	$I_v(z_e) = 0,189$
Lunghezza integrale turbolenza	$L_v(z_e) = 154,71 \text{ m}$	$L_i(z_e) = 154,72 \text{ m}$
Frequenza del I° modo	$n_D = 0,77 \text{ Hz}$	$n_1 = 0,73 \text{ Hz}$
Smorzamento fondamentale	$\xi_D = 0,013$	$\xi = 0,0146$
Parte di risposta di fondo	$B^2 = 0,588$	$Q_0^2 = 0,588$
Funzione di densità spettrale	$S_D = 0,059$	$R_N = 0,061$
	$\eta_h = 8,917$	$\eta_h = 8,373$
	$\eta_b = 0,339$	$\eta_b = 0,318$
Ammittanza aerodinamica	$R_h = 0,106$	$R_h = 0,112$
	$R_b = 0,808$	$R_b = 0,818$
Parte di risposta risonante	$R_D^2 = 0,304$	$R_x^2 = 0,303$
Frequenza prevista	$\nu_D = 0,450 \text{ Hz}$	$\nu = 0,427 \text{ Hz}$
Fattore di picco	$g_D = 3,517$	$g = 3,504$
Coefficiente dinamico	$c_{ad} = 0,974$	$c_d = 0,969$

Le modeste differenze sono dovute principalmente al valore della frequenza calcolata con un programma ad elementi finiti nell'esempio normativo e con formule empiriche nel programma Chimney

Di seguito si riportano i fogli di calcolo del programma con i valori dei parametri sopra descritti riferiti anche alla norma Europea EN 1991-1-4

Si notino le modeste differenze tra norma italiana e norma europea; la differenziazione è importante nel calcolo dello smorzamento fondamentale che, secondo la norma europea è calcolato con decremento logaritmico e come tale entra nel calcolo della parte di risposta risonante.

Viene anche riportato il calcolo del coefficiente di forza necessario per la definizione delle forze statiche equivalenti del vento alle varie quote.

ANALISI DELL'AZIONE DEL VENTO SULLA CIMINIERA

Caratteristiche della ciminiera :

		parte sup.		parte inf.					
altezza totale :	$h =$	100	m	$h_1 =$	66	m	$h_2 =$	34	m
diámetro int. di base :	$d_b =$	696,4	cm	$A_b =$	3948,23	cm ²	$J_b =$	240588470	cm ⁴
spessore di base :	$s_b =$	18	mm						
diámetro int. di somm. :	$d_s =$	378,4	cm	$A_s =$	953,03	cm ²	$J_s =$	17129977	cm ⁴
spessore di sommità :	$s_s =$	8	mm						
spessore del refrattario :	$s_r =$	0	mm	peso spec. del refr. =	0	kN/m ³			
materiale del mantello :	$E =$	20600	kN/cm ²	$T =$	°C		$p_s =$	80	kN/m ³
S275 EN 10025	$f_y =$	27,5	kN/cm ²	100			$f_{yt} =$	27,5	kN/cm ²
$\gamma_M = 1,1$	$\sigma_{d 20^\circ} =$	25,00	kN/cm ²				$\sigma_{d t^\circ} =$	19,25	kN/cm ²

Sollecitazione parallela alla direzione del vento :

$$FW_j = q_{ref} \times C_{e(z_j)} \times C_d \times C_{fj} \times A_j$$

$C_{e(z_j)}$ = coeff. di esposizione ricavato dal diagramma della pressione del vento

$$C_{fj} = C_{f,0} \times \Psi_\lambda$$

$C_{f,0}$ = coeff. di forza per un cilindro di snellezza infinita $f(Re)$

Ψ_λ = fattore di riduzione della snellezza

Re = numero di Reynolds = $0,7 \times 10^5 \times v_m(z) \times b$

A_j = area incrementale calcolata per una variazione del diam. del cilindro di +/- 5%

$$C_d = \text{coeff. dinamico} = \frac{1 + 2 \cdot g_D \cdot I_v(z_e) \cdot \sqrt{Q_0^2 + R_x^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_e)} = \begin{matrix} \text{EN 1991-1-4} & \text{CNR-DT 207} \\ \text{0,9568} & \text{0,9688} \end{matrix}$$

altezza equivalente :	$z_e = 0,6 \cdot h \geq z_{min} =$	60	m	< 300 m
intensità della turbolenza :	$I_v(z_e) = k_r / [C_t(z_e) \cdot C_r(z_e)] =$	0,1887		
fattore di categoria del terreno :	$k_r =$	0,22	per zona	IV
coefficiente di topografia :	$C_t(z_e) =$	1,00	da diag. press. vento	
coefficiente di rugosità :	$C_r(z_e) =$	1,17	da diag. press. vento	
fattore di picco:	$g_D = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot t)} + 0,6 / \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot t)} =$	3,5084	3,5037	EN 1991-1-4 CNR-DT 207
tempo medio di applicaz. di v_{ref} :	$t =$	600	sec	
frequenza prevista :	$v = \sqrt{\frac{v_0^2 \cdot Q_0^2 + n_1^2 \cdot R_x^2}{Q_0^2 + R_x^2}} =$	0,4237	0,4270	EN 1991-1-4 CNR-DT 207
freq. di raffica per struttura rigida :	$v_0 = \frac{v_m(z_e)}{Li(z_e) \cdot (1,11 \cdot S^{0,615})} =$	0,1451	Hz	
$v_m(z_e) = v_{ref} \cdot C_t(z_e) \cdot C_r(z_e) =$	35,0 m/sec			
per $T_R = T_{R0} = V_n =$	anni 50			
scala di lung. integr. della turbol.:	$Li(z_e) = 300 \cdot (z_e / 200)^\alpha =$	154,72	per $\alpha = 0,5500$	
diámetro medio : $b_m =$	$S = \frac{0,46 \cdot (b+h) + 10,58 \cdot \sqrt{b \cdot h}}{Li(z_e)} =$		1,7355	$b = [(db+ds)/2 \cdot ht + ds \cdot hc]/h$
diámetro cilindro : $b =$	380,00 cm			
parte di risposta di fondo :	$Q_0^2 = 1 / (1 + 0,9 \cdot [(b+h) / Li(z_e)]^{0,63}) =$	0,5883	0,5883	EN 1991-1-4 CNR-DT 207
parte di risposta risonante :	$R_x^2 = \pi^2 / 2\delta \cdot R_N \cdot R_h \cdot R_b =$	0,2617	0,3033	EN 1991-1-4 CNR-DT 207

decr. log. per smorzam. fondam. :

secondo CNR-DT 207 $\delta = \xi$
 $\xi =$ smorzamento relativo critico

$$\xi = \xi_s + \xi_a + \xi_d$$

$$\xi_a = \frac{c_{FX} \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_e)}{4 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot m_{e,1}}$$

massa equiv. p.u.l. del tratto h_3 :

funzione di densità spettrale :
 secondo CNR-DT 207 $R_N = S_D$

$$S_D = \frac{6,868 \cdot n_D \cdot L_v(z_e) / v_m(z_e)}{[1 + 10,302 \cdot n_D \cdot L_v(z_e) / v_m(z_e)]^{5/3}}$$

funz. di ammittanza aerodinamica
 funz. di ammittanza aerodinamica
 secondo CNR-DT 207 con $n_D = n_1$

$$\eta_h = 4 \cdot \frac{n_D \cdot h}{v_m(z_e)}, \quad \eta_b = 4 \cdot \frac{n_D \cdot b}{v_m(z_e)}$$

frequenza naturale del 1° modo
 sez. troncoconica variabile linearm.

sez. conico-cilindrica (EC1-1-4 & F.2)

$$\delta = \delta_d + \delta_s + \delta_a$$

$$\delta_d = \dots$$

$$\xi_d = \dots$$

$$h/b = 26,3158$$

$$\delta_a = \frac{\rho \cdot b \cdot C_f}{2 \cdot n_1 \cdot m_e} \cdot v_m(z_e) = \dots$$

$$h_3 = m = 22,00$$

$$R_N = \frac{6,8 \cdot N_x}{(1 + 10,2 \cdot N_x)^{5/3}} = \dots$$

$$N_x = n_1 \cdot Li(z_e) / v_m(z_e) = \dots$$

$$R_h = 1/\eta_h - 1/2\eta_h^2 \cdot (1 - e^{-2\eta_h}) = \dots$$

$$R_b = 1/\eta_b - 1/2\eta_b^2 \cdot (1 - e^{-2\eta_b}) = \dots$$

$$\eta_h = 4,6 \cdot N_x \cdot h / Li(z_e) = \dots$$

$$\eta_b = 4,6 \cdot N_x \cdot b / Li(z_e) = \dots$$

$$\delta = 0,0909$$

EN 1991-1-4

$$\delta_s = 0,0120$$

EN 1991-1-4

$$\delta_a = 0,0789$$

EN 1991-1-4

$$m_e = 762,43 \text{ kg/m}$$

$$R_N = 0,0616$$

EN 1991-1-4

$$N_x = 3,2387$$

EN 1991-1-4

$$R_h = 0,0985$$

EN 1991-1-4

$$R_b = 0,7949$$

EN 1991-1-4

$$\eta_h = 9,6293$$

EN 1991-1-4

$$\eta_b = 0,3659$$

$$\xi = 0,0146$$

CNR-DT 207

$$\xi_s = 0,0020$$

CNR-DT 207

$$\xi_a = 0,0126$$

CNR-DT 207

$$n_1 = 0,73 \text{ Hz}$$

CNR-DT 207

$$n_1 = 0,73 \text{ Hz}$$

CNR-DT 207

$$\eta_h = 8,3733$$

CNR-DT 207

$$\eta_b = 0,3182$$

CNR-DT 207

$$n_1 = \lambda/2\pi \cdot \sqrt{E \cdot J_b / m_b \cdot h^4} = 0,73 \text{ Hz}$$

$$\lambda = 3,71$$

$$n_1 = \varepsilon_1 \cdot b / h_{eff}^2 \cdot \sqrt{W_s / W_t} = \dots \text{ Hz}$$

$$\text{per } d_s/d_b = 0,54$$

COEFFICIENTE DI FORZA (EN 1991-1-4 ; CNR-DT 207)

valori della rugosità equivalente k :
 k = 0,02 - sup. verniciata spray
 k = 0,05 - sup. metallo lucido
 k = 0,20 - sup. zincata o metallo ruvido
 secondo EN 1991-1-4 e CNR-DT 207

$$C_{fj} = C_{f,0} \cdot \Psi_\lambda$$

$$C_{f(z_e)} = 0,530$$

$$\lambda = 18,4211$$

$$\Psi_\lambda = 0,7663$$

$$k = 0,05 \text{ mm (metallo lucido)}$$

$$\lambda = k \cdot h/b \text{ CNR-DT 207}$$

EN 1991-1-4 e CNR-DT 207

100	h(z)	di (cm)	fl - q (kg/m)	s(mm) / b(cm)	v _m (z _e)	J (cm ⁴) - Re	k/b	C _{f,0}	C _{fj}	
78,0		378,4	762,43	8	380,0	37,50	9499150	1,316E-05	0,6978366	0,535
76		378,4		8	380,2	35,99	9121325	1,315E-05	0,6952486	0,533
64		378,4		10	380,6	34,75	8816001	1,314E-05	0,6930227	0,531
52		378,4		12	381,0	33,22	8436674	1,312E-05	0,6901365	0,529
40		378,4		14	381,4	31,95	8124911	1,311E-05	0,6876312	0,527
34		378,4		16	413,4	30,39	8376620	1,209E-05	0,6850147	0,525
34,0		378,4	raccordo	16	477,2	28,92	9200854	1,048E-05	0,682977	0,523
27,2		442,0		16	541,0	27,02	9746178	9,242E-06	0,6796536	0,521
20,4		505,6		18	604,6	23,14	9328286	8,27E-06	0,6705392	0,514
13,6		569,2		18	668,2	21,67	9653501	7,483E-06	0,667191	0,511
6,8		632,8		18						
0		696,4	3158,58	18						

Si procede quindi nel calcolo delle forze statiche equivalenti associate al distacco dei vortici in risonanza. E' necessario determinare in primo luogo le velocità critiche, ossia le velocità medie del vento che causano la risonanza, e i relativi **numeri di Scruton**.

La velocità critica del vento per l'*i*-esimo modo di vibrazione trasversale, $v_{cr,i}$ è fornita dall'Eq.(O.2), dove $n_{L,i}$ è la frequenza propria dell'*i*-esimo modo di vibrazione trasversale, b è il diametro, S_t è il numero di Strouhal. Il valore finale della velocità critica $v_{cr,1} = 13,3 \text{ m/s}$ a cui corrisponde $Re = 3,37 \cdot 10^6$.

Essa si attua a patto che $v_{cr,i} \leq v_{m,b}$ dove $v_{m,l}$ è la velocità media del vento alla sommità della struttura, con periodo di ritorno $T_R = 500$ anni (Eq. O.3); **quindi**, $v_{m,l} = 45,02 \text{ m/s}$ (paragrafo 4.2.5).

Spostamento trasversale di picco

Metodo armonico

La valutazione del valore di picco dello spostamento trasversale $y_{pL,1}$ mediante il metodo armonico si basa sulle prescrizioni fornite dal paragrafo O.6, in particolare dall'Eq. (O.14), dove $S_t = 0,22$, $S_{cl} = 1,14$, $K = 0,13$ (Tabella O.V).

Il coefficiente di forza laterale c_{lat} è fornito dalla Tabella O.VI e dalla Figura O.13 in funzione del numero di Reynolds. Essendo $Re = 3,37 \cdot 10^6$, $c_{lat} = 0,2$.

Il coefficiente K_w dipende dai rapporti L_1/b e $\lambda = h/b = 26,32$, dove L_1 è la lunghezza effettiva di correlazione. Esso costituisce l'elemento più critico da valutare e comporta l'applicazione del metodo iterativo descritto nel paragrafo O.6. Si procede come segue.

Si parte assegnando $L_1/b = 6$, assumendo che sia $y_{pL,1}/b < 0,1$. Quindi si determina $K_w = 0,54$ (Tabella O.V) e, conseguentemente $y_{pL,1}/b = 0,254$ (Eq. O.14). Poiché tale valore è maggiore della scelta iniziale, $y_{pL,1}/b > 0,1$, si itera l'analisi valutando $L_1/b = 7,848$ (Tabella O.IV, Figura O.12), $K_w = 0,60$ (Tabella O.V) e, conseguentemente $y_{pL,1}/b = 0,283$ (Eq. O.14). **L'iterazione è conclusa poiché $K_w \geq 0,60$.**

Sul metodo iterativo mi permetto di dissentire per quanto riguarda la "fine dell'iterazione"; viene detto dal normatore che l'iterazione termina quando $K_w \geq 0,6$; in base ad una interpretazione letterale questa limitazione va semplicemente "accolta" e quando K_w supera il valore 0,6 si assume pari a 0,6 e si continua l'iterazione fino al raggiungimento della convergenza sul rapporto $y_{pl,1}/b$. Fermarsi prima significa non definire in modo esatto la lunghezza di correlazione L_j e quindi l'altezza di distacco dei vortici su cui agiranno le forze statiche equivalenti. Il programma Chimney esegue l'iterazione nel modo di seguito riportato ed i vari parametri di calcolo sono confrontati con la norma europea EN 1991-1-4.

EFFETTO DELLE AZIONI DI ECCITAZIONE DEI VORTICI

FORZE DI INERZIA PERPENDICOLARI ALLA DIREZIONE DEL VENTO - METODO ARMONICO

$$F_{1,j} = m_j \cdot (2\pi \cdot n_1)^2 \cdot \Phi_{1,j} \cdot Y_{F,max} \cdot C_{TR,j} \quad \text{kg.m/sec}^2 \quad \lambda = h/b = 23,02$$

m_j = massa vibrante nel nodo j
 n_1 = frequenza naturale del 1° modo
 $\Phi_{1,j} = (z/h)^\zeta$

$m_j = m_{j,s} + m_{j,r}$
 $C_{TR,j} = 1$
 $V_{m,l,TR} = 44,709 \text{ m/sec}$

$\zeta = 2$ → per ciminere

EN 1991-1-4 | CNR-DT 207

ampiezza max. di vibraz. alla v_{cr} . $Y_{F,max} = b_{L,j} \cdot K_w \cdot K \cdot C_{lat} \cdot 1/St^2 \cdot 1/Sc = m$ 1,4619 | 1,3960

fattore di lunghez. di correlaz. effett. $K_w = 3 \cdot L_j/b_{L,j} / \lambda \cdot [1 - L_j/b_{L,j} / \lambda + 1/3 \cdot (L_j/b_{L,j} / \lambda)^2]$ 0,6 <= 0,6

fattore di forma modale : $\alpha = 1,0000$ K = 0,13

coeff. di forza eccitante aerodin. : $C_{lat,0} = 0,2$ C_{lat} = f(v_{cr}/v_{m,Lj}) = 0,2

numero di Strouhal : $St = 0,2$ CNR-DT 207

numero di Scruton : $Sc = \frac{4\pi \cdot m \cdot \xi_{L,i}}{\rho \cdot b^2}$ Sc = 2 \cdot m_1 \cdot \delta_s / (\rho \cdot b_{L,j}^2) = 1,0138 | 1,0616

smorzatore elicoidale ? **no**

$b_{L,j}$ = diametro fond. riferito a 5/6 h

procedim. iterativo : →

L di eccitaz.

$b_{L,j} = 3,800$ → $L_j/b_{L,j} = 9,417$ → $L_j = 35,78$
 $L_j/b_{L,j} = 9,417$ → $L_j = 35,78$ → $b_{L,j} = 3,800$

CNR : $v_{cr} < v_{m,Lj}$ per $T_R = 10 \cdot T_{R0}$

EN : $v_{cr} < 1,25 \cdot v_{m,Lj}$

distacco vortici

$$v_{cr,i} = \frac{n_{L,i} \cdot b}{St}$$

N = numero cicli di sollecitazione

vita nominale V_n = anni **50**

uguale al periodo di ritorno $T_{R,0}$

$v_{cr} = 13,9082 \text{ m/sec}$ Re(v_{cr}) = 3523423
 $z_{L,j} = 82,11 \text{ m}$ → $\begin{cases} C_t(z_{L,j}) = 1,00 \\ C_r(z_{L,j}) = 1,23 \end{cases}$
 $v_{m,Lj} = 37,03 \text{ m/sec}$ $v_{cr}/v_{m,Lj} = 0,3755883 < 0,83$
 $y_{F,j} = 1,4618944$ $y_{F,j}/b_{L,j} = 0,384709 > 0,1$

$N = 6,4 \cdot 10^7 \cdot V_n \cdot n_1 \cdot \epsilon_0 \cdot (v_{cr}/v_0)^2 \cdot e^{-(v_{cr}/v_0)^2} = 72869057,4$ cicli
 $(v_{cr}/v_0)^2 = 3,526665$ $\epsilon_0 = 0,3$

Si noti come l'iterazione che porta a convergenza il rapporto $L_j/b_{L,j}$, dopo aver limitato il valore di R_w a 0,6, definisca una lunghezza di correlazione $L_j = 35,78$ m maggiore di quella definita nell'esempio della norma pari a $7,848 \times 3,8 = 29,8$ m. Gli altri parametri sono molto simili ovvero :

	CNR-DT 207 & 4.10	CHIMNEY
Numero di Strouhal	St = 0,22	St = 0,2 (in accordo con EN)
Numero di Scruton	Sc = 1,14	Sc = 1,06
Velocità media a $T_R=500$ anni	$V_{m,1} = 45,02 \text{ m/sec}$	$V_{m,TR} = 44,71 \text{ m/sec}$
Velocità critica	$v_{cr,1} = 13,3 \text{ m/sec}$	$v_{cr,1} = 13,9 \text{ m/sec}$
Spostamento trasv. di picco	$y_{pl,1} = 1,074 \text{ m}$	$Y_{F,max} = 1,396 \text{ m}$

La differenza è dovuta al diverso approccio dell'iterazione per il calcolo della lunghezza di correlazione e al valore dato al numero di Strouhal (0,22)

A titolo di esempio si riporta il calcolo con un valore del rapporto $L_j/b_{Lj} = 7,848$ e numero di Strouhal = 0,22 come proposto dall'esempio normativo

	EN 1991-1-4	CNR-DT 207
ampiezza max. di vibraz. alla v_{cr} .	$y_{F,max} = b_{Lj} \cdot K_w \cdot K \cdot C_{lat} \cdot 1/St^2 \cdot 1/Sc = m$	1,1001 1,0505
fattore di lung. di correlaz. effett.	$K_w = 3 \cdot L_j/b_{Lj} / \lambda \cdot [1 - L_j/b_{Lj} / \lambda + 1/3 \cdot (L_j/b_{Lj} / \lambda)^2]$	0,6 <= 0,6
fattore di forma modale :	$\alpha = 1,0000$	$K = 0,13$
coeff. di forza eccitante aerodin. :	$C_{lat,0} = 0,2$	$C_{lat} = f(v_{cr}/v_{m,Lj}) = 0,2$
numero di Strouhal :	CNR-DT 207	$St = 0,22$ CNR-DT 207
numero di Scruton :	$Sc = \frac{4\pi \cdot m \cdot \xi_{L,i}}{\rho \cdot b^2}$	$Sc = \frac{2 \cdot m_1 \cdot \delta_s}{\rho \cdot b_{Lj}^2}$
smorzatore elicoidale ?	no	1,0138 1,0616
b_{Lj} = diametro fond. riferito a 5/6 h	$b_{Lj} = 3,800$	$L_j/b_{Lj} = 7,848$ $L_j = 29,82$ L di eccitaz.
procedim. iterativo :	$L_j/b_{Lj} = 8,615$	$L_j = 32,74$ $b_{Lj} = 3,460$
CNR : $v_{cr} < v_{m,Lj}$ per $T_R = 10 \cdot T_{R0}$	$v_{cr} = 12,6439$ m/sec	$Re(v_{cr}) = 3203112$
EN : $v_{cr} < 1,25 \cdot v_{m,Lj}$	$z_{Lj} = 85,09$ m	$C_t(z_{Lj}) = 1,00$
distacco vortici	$v_{m,Lj} = 37,34$ m/sec	$C_r(z_{Lj}) = 1,24$
$v_{cr,i} = \frac{n_{L,i} \cdot b}{St}$	$y_{F,j} = 1,2081772$	$v_{cr}/v_{m,Lj} = 0,3385699 < 0,83$
N = numero cicli di sollecitazione		$y_{F,j}/b_{Lj} = 0,3179414 > 0,1$
vita nominale V_n = anni	50	$N = 6,4 \cdot 10^7 \cdot V_n \cdot n_1 \cdot \epsilon_0 \cdot (v_{cr}/v_0)^2 \cdot e^{-(v_{cr}/v_0)^2} = 114670581$ cicli
uguale al periodo di ritorno $T_{R,0}$	$(v_{cr}/v_0)^2 = 2,8657393$	$\epsilon_0 = 0,3$

Il valore di $y_{F,max} = 1,0505$ (norma CNR-DT 207) è molto vicino a quello dell'esempio normativo $y_{pl,1} = 1,074$, mentre il calcolo in base alla norma europea presenta $y_{F,max} = 1,1$.

Viene evidenziata col color rosso la non raggiunta convergenza dell'iterazione secondo la mia personale interpretazione della norma.

Metodo spettrale

La valutazione del valore di picco dello spostamento trasversale $y_{pL,1}$ mediante il metodo spettrale si basa sulle prescrizioni fornite dal paragrafo O.5, in particolare dall'Eq. (O.7), dove g_L è il fattore di picco e σ_L è la deviazione standard dello spostamento trasversale.

Il parametro g_L dipende dal numero di Scruton $S_c = 1,14$ e dal parametro di smorzamento aerodinamico $K_a = K_{a,max} \cdot C_I$ (Eq. O.9).

Essendo $Re = 3,37 \cdot 10^6$, $K_{a,max} = 1$ (Tabella O.II, Figura O.8); inoltre, poiché $v_{cr,1} = 13,3$ m/s > 10 m/s (Eq. O.10, Figura O.9), $C_I = 0,7$; quindi $K_a = 0,7$.

Pertanto, in virtù dell'Eq. (O.8), $g_L = 1,42$.

Il parametro σ_L è fornito dalle Eqq. (O.11)-(O.13) sulla base di numerose grandezze: $a_L = 0,4$, $S_{cI} = 1,14$, $K_a = 0,7$, quindi $c_I = 0,0696$; $\rho = 1,25$ kg/m³, $b = 3,8$ m, $h =$

100 m, $m_{e,1} = 821 \text{ kg/m}$, $K_a = 0,7$, $C_c = 0,01$, $S_t = 0,22$, quindi $c_2 = 8,152 \cdot 10^{-6}$.

Pertanto, $\sigma_L/b = 0,373$, $\sigma_L = 1,418 \text{ m}$.

Infine, applicando l'Eq. (O.7), $y_{pL,1} = 1,42 \cdot 1,418 = 2,014 \text{ m}$. **E' chiaramente un valore eccessivo**

Il calcolo automatico è riassunto nel seguente foglio del programma :

EFFETTO DELLE AZIONI DI ECCITAZIONE DEI VORTICI							
FORZE DI INERZIA PERPENDICOLARI ALLA DIREZIONE DEL VENTO - METODO SPETTRALE							
$F_{1,j} = m_j \cdot (2\pi \cdot n_1)^2 \cdot \Phi_{1,j} \cdot y_{F,max} \cdot C_{TR,j}$	kg.m/sec ²	$\lambda = h/b =$	18,42				
$m_j =$ massa vibrante nel nodo j		$m_j =$	$m_{j,s} + m_{j,r}$				
$n_1 =$ frequenza naturale del 1° modo		$C_{TR,j} =$	1				
$\Phi_{1,j} = (z/h)^\zeta$	$\zeta = 2$ → per ciminiere	$v_{m,j,TR} =$	36 m/sec				
ampiezza max. di vibraz. alla v_{cr}	$y_{F,max} = 2^{0,5} \cdot [1 + \arctan(0,7 \cdot (Sc / (4 \cdot \pi \cdot K_a))^{2,5})^{1,4}] \cdot \sigma_y =$		<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 50%;">2,0232</td> <td style="width: 50%;">2,0171</td> </tr> <tr> <td style="font-size: 8px;">EN 1991-1-4</td> <td style="font-size: 8px;">CNR-DT 207</td> </tr> </table>	2,0232	2,0171	EN 1991-1-4	CNR-DT 207
2,0232	2,0171						
EN 1991-1-4	CNR-DT 207						
$y_{pL,1} = g_L \cdot \sigma_L$	$\left(\frac{\sigma_y}{b}\right)^2 = c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2}$	$\sigma_y; \sigma_L =$	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 50%;">1,4302</td> <td style="width: 50%;">1,4257938</td> </tr> <tr> <td style="font-size: 8px;">EN 1991-1-4</td> <td style="font-size: 8px;">CNR-DT 207</td> </tr> </table>	1,4302	1,4257938	EN 1991-1-4	CNR-DT 207
1,4302	1,4257938						
EN 1991-1-4	CNR-DT 207						
deviazione standard dello spostam. secondo CNR-DT 207 $R_N = S_D$	$c_1 = \frac{a_L^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{Sc}{4 \cdot \pi \cdot K_a}\right)$	$c_1 =$	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 50%;">0,0707804</td> <td style="width: 50%;">0,0703452</td> </tr> <tr> <td style="font-size: 8px;">EN 1991-1-4</td> <td style="font-size: 8px;">CNR-DT 207</td> </tr> </table>	0,0707804	0,0703452	EN 1991-1-4	CNR-DT 207
0,0707804	0,0703452						
EN 1991-1-4	CNR-DT 207						
$\frac{\sigma_L}{b} = \sqrt{c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2}}$	$c_2 = \frac{\rho \cdot b^2}{m_e} \cdot \frac{a_L^2}{K_a} \cdot \frac{C_c^2}{St^4} \cdot \frac{b}{h}$	$c_2 =$	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 50%;">1,285E-05</td> <td style="width: 50%;">1,285E-05</td> </tr> <tr> <td style="font-size: 8px;">EN 1991-1-4</td> <td style="font-size: 8px;">CNR-DT 207</td> </tr> </table>	1,285E-05	1,285E-05	EN 1991-1-4	CNR-DT 207
1,285E-05	1,285E-05						
EN 1991-1-4	CNR-DT 207						
smorzamento aerodinamico :	$K_a = K_{a,max} \cdot C_I$	$K_a =$	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 50%;">0,7000</td> <td style="width: 50%;">0,7000</td> </tr> </table>	0,7000	0,7000		
0,7000	0,7000						
smorzamento aerodinamico max :	$K_a = K_{a,max} \cdot C_I$	$K_{a,max} =$	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 50%;">1,0000</td> <td style="width: 50%;">1,0000</td> </tr> </table>	1,0000	1,0000		
1,0000	1,0000						
fattore di turbolenza :	$K_a = K_{a,max} \cdot C_I$	$C_I =$	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 50%;">0,7000</td> <td style="width: 50%;">0,7000</td> </tr> </table>	0,7000	0,7000		
0,7000	0,7000						
$v_{cr} =$ 13,9082 m/sec	$K_a = K_{a,max} \cdot C_I$	$C_c =$	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 50%;">0,0100</td> <td style="width: 50%;">0,0100</td> </tr> </table>	0,0100	0,0100		
0,0100	0,0100						
Re (v_{cr}) = 3523423	$K_a = K_{a,max} \cdot C_I$	$L_j =$	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 50%;">35,78</td> <td style="width: 50%;">m</td> </tr> </table>	35,78	m		
35,78	m						
lunghezza di eccitazione :	$L_j =$	$St =$	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 50%;">0,2</td> <td style="width: 50%;">CNR-DT 207</td> </tr> </table>	0,2	CNR-DT 207		
0,2	CNR-DT 207						
numero di Strouhal :	$St =$	$Sc = \frac{4\pi \cdot m \cdot \xi_{L,i}}{\rho \cdot b^2}$	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 50%;">1,0138</td> <td style="width: 50%;">1,0616</td> </tr> </table>	1,0138	1,0616		
1,0138	1,0616						
numero di Scruton :	$Sc = \frac{4\pi \cdot m \cdot \xi_{L,i}}{\rho \cdot b^2}$	$Sc = \frac{2 \cdot m_1 \cdot \delta_s}{\rho \cdot b_{Lj}^2}$	$Sc =$				
stabilizz. aerodin. solo per $Sc > 10$ possibili solo smorzatori meccanici	valore sperimentale del numero di Scruton	$Sc =$					
vita nominale $V_n =$ anni	50	$N = 6,4 \cdot 10^7 \cdot V_n \cdot n_1 \cdot \varepsilon_0 \cdot (v_{cr}/V_0)^2 \cdot e^{-(v_{cr}/V_0)^2}$	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 50%;">72869057,4</td> <td style="width: 50%;">cicli</td> </tr> </table>	72869057,4	cicli		
72869057,4	cicli						
uguale al periodo di ritorno $T_{R,0}$	$(v_{cr}/V_0)^2 =$ 3,526665	$\varepsilon_0 =$ 0,3					

Il confronto tra il calcolo automatico e l'esempio normativo è riassunto nella seguente tabella :

	CNR-DT 207 & 4.10	CHIMNEY
Fattore di turbolenza	$C_I = 0,7$	$C_I = 0,7$
Smorzamento aerodinamico	$K_a = 0,7$	$K_a = 0,7$

Coeff. c_1	$c_1 = 0,0696$	$c_1 = 0,0708$
Coeff. c_2	$c_2 = 8,15 \cdot 10^{-6}$	$c_2 = 1,285 \cdot 10^{-5}$
Deviazione standard spostam.	$\sigma_L = 1,418$	$\sigma_y = 1,426$
Spostamento trasv. di picco	$y_{pl,1} = 2,014$ m	$Y_{F,max} = 2,017$ m

Si fa notare nell'esempio riportato nella norma italiana quanto siano alti i valori dello spostamento trasversale di picco e come il metodo spettrale presenti valori quasi doppi rispetto al metodo armonico. Il dubbio che resta al progettista è "quale metodo seguire" ma lo stesso normatore non da una risposta chiara "suggerendo" di utilizzare il peggiore dei due ovvero, **nella generalità dei casi, il metodo spettrale.**

Ripeto qui che il metodo armonico è "suggerito" per valori del numero di Scruton > 10 e quando si intenda usare smorzatori aerodinamici che però producono un modesto effetto sull'azione di distacco dei vortici ed incrementano l'effetto longitudinale del vento.

Forza statica equivalente trasversale

La forza statica equivalente trasversale associata al distacco risonante dei vortici sul primo modo di vibrazione trasversale è data dall'Eq. (O.5), dove m è la massa per unità di lunghezza fornita dalla Figura 4.10.1, $n_{L,1} = 0,77$ Hz, $\Phi_{L,i}(z) = (z/h)^2$.

Applicando **a favore di sicurezza** il metodo spettrale (paragrafo 4.10.5), $y_{pL,1} = 2,014$ m.

Il coefficiente $C_{TR,1}$ dipende dalla velocità critica, $v_{cr,1} = 13,3$ m/s, dalla velocità media in sommità (con $T_R = 50$ anni), $v_{m,0} = 37,3$ m/s (paragrafo 4.2.5), e dalla velocità media in sommità (con $TR = 500$ anni), $v_{m,l} = 45,02$ m/s.

Pertanto, applicando l'Eq. O.6, $C_{TR,1} = 1$.

In conclusione la forza statica equivalente trasversale è fornita dalle seguenti relazioni in base a diverse normative :

CNR-DT 207 (forza statica equivalente distribuita)

$$F_{L,i}(s) = m(s) \cdot (2\pi \cdot n_{L,i})^2 \cdot \Phi_{L,i}(s) \cdot y_{pL,i} \cdot C_{TR,i}$$

EN 1991-1-4 (forza statica equivalente distribuita)

$$F_w(s) = m(s) \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_{l,y})^2 \cdot \Phi_{l,y}(s) \cdot Y_{F,max}$$

ENV 1991-2-4 (forza statica equivalente nodale)

$$F_{i,j} = m_j \cdot (2 \pi \cdot n_{i,y})^2 \cdot \Phi_{i,y,j} \cdot \max. Y_F$$

L'espressione data dalla normativa sperimentale ENV 1991-2-4 è, a mio avviso, la più chiara e direttamente applicabile poiché considera le forze statiche equivalenti

applicate in nodi previsti sulla struttura dentro la lunghezza di eccitazione anziché considerare un carico uniformemente distribuito.

La tabella che segue riporta il confronto tra i parametri calcolati dal programma Chimney e quelli dell'esempio normativo :

	CNR-DT 207 & 4.10	CHIMNEY
Velocità media a $T_R = 50$ anni	$v_{m,0} = 37,3$ m/sec	$v_{m,L,j} = 37,03$ m/sec
Velocità media a $T_R = 500$ anni	$v_{m,1} = 45,02$ m/sec	$v_{m,TR} = 44,71$ m/sec
Coeff. $C_{TR,j}$	$C_{TR,j} = 1$	$C_{TR,j} = 1$

Cicli di carico

La valutazione del numero dei cicli di carico causati dal distacco risonante dei vortici nel corso della vita nominale della struttura, $V_N = 50$ anni, è svolta applicando le Eqq. (O.15) e (O.16), dove $V_N = 50 \times 32 \cdot 10^6$ s, $n_{L,1} = 0,77$ Hz, $\epsilon_0 = 0,3$, $v_{cr,1} = 13,3$ m/s, $v_0 = 0,2 \cdot 37,3 = 7,46$ m/s. Quindi, $N = N_1 = 98 \cdot 10^6$ cicli.

L'espressione data dalla norma per il calcolo del numero dei cicli è la seguente :

$$N_i = 2 \cdot V_N \cdot n_{L,i} \cdot \epsilon_0 \cdot \left(\frac{v_{cr,i}}{v_{0,i}} \right)^2 \cdot \exp \left[- \left(\frac{v_{cr,i}}{v_{0,i}} \right)^2 \right]$$

Nel calcolo automatico, essendo : $n_{L,1} = 0,73$ Hz, $\epsilon_0 = 0,3$, $v_{cr,1} = 13,9$ m/s, $v_0 = 0,2 \cdot 37,03 = 7,406$ m/s. si ha il seguente risultato :

vita nominale $V_n =$ anni	50	$N = 6,4 \cdot 10^7 \cdot V_n \cdot n_1 \cdot \epsilon_0 \cdot (v_{cr}/v_0)^2 \cdot e^{-(v_{cr}/v_0)^2} =$	72869057,4 cicli
uguale al periodo di ritorno $T_{R,0}$		$(v_{cr}/v_0)^2 = 3,526665$ $\epsilon_0 = 0,3$	

Se a questo punto dovessimo eseguire la verifica di resistenza e stabilità dell'involucro del camino (cosa che l'esempio normativo non fa) questo non risulterebbe assolutamente in sicurezza come di seguito dimostrato.

Applicando il metodo spettrale (più penalizzante) le forze statiche equivalenti dovute al distacco dei vortici sono riportate nella seguente parte del programma in cui è evidenziata in giallo la lunghezza di correlazione (eccitazione) e quindi le forze concentrate applicate a quote diverse espresse in Newton:

								forze di inerzia	
100	h(z)	di (cm)	z _j (m)	A _i (cm ²)	m _{j,s} (kg)	m _{j,r} (kg)	Φ _{1,j}	F _{1,j} (N)	M _j (N.m)
76	↓	378,4	88	953,03	1865,26	0,00	0,77	616362	
		378,4		953,03					7396344
64	L _j	378,4	70	1191,92	1049,52	0,00	0,49	219440	16109330
52		378,4	58	1431,06	1283,41	0,00	0,34	0	26138957
40		378,4	46	1670,45	1517,56	0,00	0,21	0	36168585
34		378,4	37	1910,09	875,97	0,00	0,14	0	41183398
34,0			30,6		1147,85	0,00	0,09	0	
27,2		442,0		2229,78					46866854
20,4		505,6	23,8	2869,28	1413,81	0,00	0,06	0	52550310
13,6		569,2	17	3228,93	1690,84	0,00	0,03	0	58233765
6,8		632,8	10,2	3588,58	1890,28	0,00	0,01	0	63917221
0		696,4	3,4	3948,23	2089,72	0,00	0,00	0	69600676
totale					14824,22	0,00		835802	69600676

La verifica di resistenza (qui eseguita sia per le forze longitudinali che per le forze trasversali) da i risultati di seguito riportati con riferimento allo stato limite di fatica.

E' evidente che il numero di Scruton molto basso è l'indice di pericolo per la ciminiera che in questo caso collaserebbe addirittura sotto le azioni statiche non cicliche. Sinceramente mi pare un'analisi esagerata ma seguendo il ragionamento del normatore, l'unica **possibilità di salvezza** della ciminiera è la sistemazione in sommità di **smorzatori meccanici a massa accordata (Tuned Mass Dumper TMD)**.

L'uso di uno smorzatore meccanico a massa accordata (Tuned Mass Damper, TMD) alla sommità della ciminiera riduce entrambe le vibrazioni longitudinali e trasversali, non ha preclusioni legate al valore del numero di Scruton, è ormai molto diffuso quindi largamente sperimentato. L'esperienza dimostra che, progettando un tale apparecchio in modo adeguato, è ragionevole ipotizzare il conseguimento di un rapporto di smorzamento complessivo pari a $\xi_D = \xi_L = 0,05$.

In questo caso, l'analisi della risposta dinamica della ciminiera in direzione longitudinale dà luogo a un valore del coefficiente dinamico pari $d_{Dc} = 0,888$. Esso comporta una riduzione del 9 % rispetto al valore $d_{Dc} = 0,974$ stimato in assenza del TMD (paragrafo 4.10.3).

Il vantaggio di usare il TMD è largamente maggiore nei riguardi delle vibrazioni trasversali dovute al distacco dei vortici, principalmente a causa del drastico aumento del numero di Scruton; essendo proporzionale allo smorzamento, esso passa da $S_{c1} = 1,14$ (paragrafo 4.10.4) a $S_{c1} = 28,58$. Quindi, applicando il metodo spettrale, lo spostamento trasversale di picco è pari a $y_{pL,1} = 0,071$ m, rispetto a $y_{pL,1} = 2,014$ m stimato in assenza del TMD.

Caso di ciminiera senza smorzatori

VERIFICA DI RESISTENZA ED A FATICA

per la verifica a fatica : $\Delta\sigma_{di} \leq \Delta\sigma_R' = \Delta\sigma_R/\gamma_{Mf}$ con $N = 72869057,4$ cicli

e con $\gamma_{Mf} = 1,15$ (valori di γ_{Mf} : 1 - 1,15 - 1,25 - 1,35 - tab. 3.1 EN 1993-1-9)

RESISTENZE DI PROGETTO A FATICA								
DETTAGLIO STRUTTURALE	CATEGORIA EC3		LIMITI DI FATICA		RESISTENZA A FATICA $\Delta\sigma_R' < 1,5 \cdot f_{yt}$			
(vedi nota 1)	$\Delta\sigma_C$ (N/mm ²)		$\Delta\sigma_D$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_L$ (N/mm ²)	log a	log $\Delta\sigma_R$	$\Delta\sigma_R$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_R'$ (N/mm ²)
giunto longitudinale	125 - 112	125	93	51	16,536	1,73469137	54,29	51,0
giunto trasversale	112 - 90 - 80 - 71	90	66	36	15,786	1,58469137	38,43	36,0
irrigidim. circonferenz.	112 - 90 - 80 - 71	112	83	45	16,286	1,68469137	48,38	45,0
irrigidim. longitudinale	125 - 112 - 80	112	83	45	16,286	1,68469137	48,38	45,0
bulloni e barre filettate	36* - prec.	prec	-----	-----	-----	-----	-----	prec.

GEOMETRIA		VERIFICA DI RESISTENZA					VERIFICA A FATICA		
QUOTA-DIAMETRO-BULL.		AZIONI PARALLELE ALLA DIREZIONE DEL VENTO			RESIST.		AZ. TRAS.	RES. LIM.	
100 h(z)	nb - di (cm)	ϕb - Ai (cm ²)	db - Wi (cm ³)	M _h (kNcm)	N _h (kN)	σ_{si} (N/mm ²)	σ_I (N/mm ²)	$\Delta\sigma_{di}$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_R'$ (N/mm ²)
76	378,4	953,03	90158	89341	182,98	S.L.U.	EN-NTC	$\Delta\sigma = 2 \cdot \sigma_I $	EN-NTC
64,2	378,4	mm	mm					164,08	36,0
64	378,4	1191,92	112757	199742	285,94	27,44	134,66	285,73	36,0
		mm	mm						
52	378,4	1431,06	135381	351250	411,84	39,49	154,16	386,15	36,0
		mm	mm						
40	378,4	1670,45	158029	541628	560,72	51,68	167,24	457,75	36,0
		mm	mm						
34	378,4	1910,09	180701	650688	646,65	54,14	179,05	455,82	36,0
		mm	mm	650688	646,65	39,39			
34,0									
27,2	442,0	2229,78	246397	785245	759,25	48,36	166,48	380,42	36,0
		mm	mm						
20,4	505,6	2869,28	362686	931939	897,95	39,42	165,02	289,78	36,0
		mm	mm						
13,6	569,2	3228,93	459486	1091305	1063,82	36,87	153,96	253,47	36,0
		mm	mm						
6,8	632,8	3588,58	567722	1263355	1249,25	34,98	142,97	225,17	36,0
		mm	mm						
0	696,4	3948,23	687396	1447560	1454,26	33,53	132,04	202,51	36,0
NOTE :	nb = N° bulloni	ϕb = diam. bull.	db = ϕ ancor.			$\sigma_{si}/\sigma_{l.min}$	0,309	$\Delta\sigma_{di}/\Delta\sigma_R'$	12,715

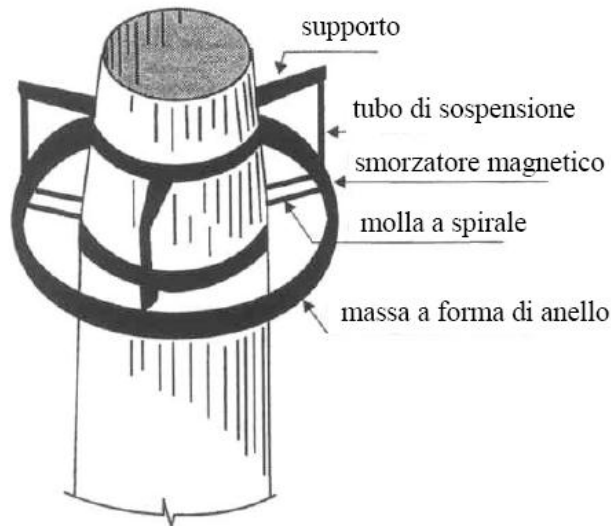
BULL. PRECARICATI

Caso di ciminiera con smorzatore meccanico

Viene inserito nel programma Chimney il numero di Scruton ottenuto sperimentalmente nel tunnel del vento adottando un particolare tipo di smorzatore meccanico rappresentato nella seguente figura . Il numero di Scruton dichiarato dall'esempio normativo è :

$$Sc = 28,58$$

Viene contemporaneamente ridefinito lo smorzamento fondamentale $\xi = 0,05$



I risultati sono riportati nei seguenti fogli di calcolo del programma Chimney :

$C_d = \text{coeff. dinamico} =$	$\frac{1 + 2 \cdot g_D \cdot I_v(z_e) \cdot \sqrt{Q_0^2 + R_x^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_e)}$	<small>EN 1991-1-4</small>	<small>CNR-DT 207</small>
		0,8978	0,8813
altezza equivalente :	$z_e = 0,6 \cdot h \geq z_{\min} =$	60 m	< 300 m
intensità della turbolenza :	$I_v(z_e) = k_r / [C_t(z_e) \cdot C_r(z_e)] =$	0,1887	
fattore di categoria del terreno :	$k_r =$	0,22	per zona IV
coefficiente di topografia :	$C_t(z_e) =$	1,00	da diagr. press. vento
coefficiente di rugosità :	$C_r(z_e) =$	1,17	da diagr. press. vento
fattore di picco:	$g_D = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot t) + 0,6} / \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot t)}$	3,4298	<small>EN 1991-1-4</small> <small>CNR-DT 207</small> 3,3658
tempo medio di applicaz. di v_{ref} :	$t =$	600 sec	
frequenza prevista :	$v = \sqrt{\frac{v_0^2 \cdot Q_0^2 + n_1^2 \cdot R_x^2}{Q_0^2 + R_x^2}}$	$v = \text{Hz}$	<small>EN 1991-1-4</small> <small>CNR-DT 207</small> 0,3223 0,2655
freq. di raffica per struttura rigida :	$v_0 = \frac{v_m(z_e)}{Li(z_e) \cdot (1,11 \cdot S^{0,615})}$	0,1451 Hz	
$v_m(z_e) = v_{\text{ref}} \cdot C_t(z_e) \cdot C_r(z_e) =$	35,0 m/sec		
per $T_R = T_{R0} = V_n =$ anni	50		
scala di lungh. integr. della turbol.:	$Li(z_e) = 300 \cdot (z_e / 200)^\alpha =$	154,72	per $\alpha = 0,5500$
diametro medio : $b_m =$	434,40 cm		
diametro cilindro : $b =$	380,00 cm		
parte di risposta di fondo :	$Q_0^2 = 1 / (1 + 0,9 \cdot [(b+h) / Li(z_e)]^{0,63}) =$	<small>EN 1991-1-4</small>	<small>CNR-DT 207</small> 0,5883 0,5883
parte di risposta risonante :	$R_x^2 = \pi^2 / 2\delta \cdot R_N \cdot R_h \cdot R_b =$	<small>EN 1991-1-4</small>	<small>CNR-DT 207</small> 0,1128 0,0891

Il coeff. dinamico è molto vicino a quello dichiarato nell'esempio normativo (0,888)

EFFETTO DELLE AZIONI DI ECCITAZIONE DEI VORTICI

FORZE DI INERZIA PERPENDICOLARI ALLA DIREZIONE DEL VENTO - METODO ARMONICO

$$F_{1,j} = m_j \cdot (2\pi \cdot n_1)^2 \cdot \Phi_{1,j} \cdot y_{F,max} \cdot C_{TR,j} \quad \text{kg.m/sec}^2 \quad \lambda = h/b = 23,02$$

m_j = massa vibrante nel nodo j $m_j = m_{j,s} + m_{j,r}$
 n_1 = frequenza naturale del 1° modo $C_{TR,j} = 1$
 $\Phi_{1,j} = (z/h)^{\zeta}$ $\zeta = 2$ → per ciminiere $v_{ml,TR} = 45,272$ m/sec

EN 1991-1-4 | CNR-DT 207

ampiezza max. di vibraz. alla v_{cr} . $y_{F,max} = b_{L,j} \cdot K_w \cdot K \cdot C_{lat} \cdot 1/St^2 \cdot 1/Sc = m$ **0,0515** **0,0515**

fattore di lunghez. di correlaz. effett. $K_w = 3 \cdot L_j/b_{L,j} / \lambda \cdot [1 - L_j/b_{L,j} / \lambda + 1/3 \cdot (L_j/b_{L,j} / \lambda)^2]$ **0,5958265** <= 0,6

fattore di forma modale : $\alpha = 1,0000$ $K = 0,13$
 coeff. di forza eccitante aerodin. : $C_{lat,0} = 0,2$ $C_{lat} = f(v_{cr}/v_{m,L,j}) = 0,2$
 numero di Strouhal : $St = 0,2$ CNR-DT 207
numero di Scruton : $Sc = \frac{4\pi \cdot m \cdot \xi_{L,i}}{\rho \cdot b^2}$ $Sc = \frac{2 \cdot m_1 \cdot \delta_s}{\rho \cdot b_{L,j}^2}$ **28,5800** **28,5800**
 smorzatore elicoidale ? no

$b_{L,j}$ = diametro fond. riferito a 5/6 h **L di eccitaz.**
 procedim. iterativo : $b_{L,j} = 3,800$ $L_j/b_{L,j} = 6$ $L_j = 22,80$
 $L_j/b_{L,j} = 6,000$ $L_j = 22,8$ $b_{L,j} = 3,800$

CNR : $v_{cr} < v_{m,L,j}$ per $T_R = 10 \cdot T_{R0}$
 EN : $v_{cr} < 1,25 \cdot v_{m,L,j}$
distacco vortici
 $v_{cr,i} = \frac{n_{L,i} \cdot b}{St}$

$v_{cr} = 13,9082$ m/sec $Re(v_{cr}) = 3523423$
 $z_{L,j} = 88,6$ m
 $C_t(z_{L,j}) = 1,00$
 $C_r(z_{L,j}) = 1,25$

 $v_{m,L,j} = 37,50$ m/sec $v_{cr}/v_{m,L,j} = 0,3709199 < 0,83$
 $y_{F,j} = 0,0514938$ $y_{F,j}/b_{L,j} = 0,013551 < 0,1$

N = numero cicli di sollecitazione
 vita nominale $V_n =$ anni **50**
 uguale al periodo di ritorno $T_{R,0}$
 $N = 6,4 \cdot 10^7 \cdot V_n \cdot n_1 \cdot \epsilon_0 \cdot (v_{cr}/v_0)^2 \cdot e^{-(v_{cr}/v_0)^2} = 77538558,3$ cicli
 $(v_{cr}/v_0)^2 = 3,4395384$ $\epsilon_0 = 0,3$

forze di inerzia

100	h(z)	di (cm)	z _j (m)	A _i (cm ²)	m _{j,s} (kg)	m _{j,r} (kg)	Φ _{1,j}	F _{1,j} (N)	M _j (N.m)
76	77,2	378,4	88	953,03	1865,26	0,00	0,77	15735	188816
64		378,4	70	1191,92	1049,52	0,00	0,49	0	377632
52		378,4	58	1431,06	1283,41	0,00	0,34	0	566448
40		378,4	46	1670,45	1517,56	0,00	0,21	0	755264
34		378,4	37	1910,09	875,97	0,00	0,14	0	849672
27,2	34,0	442,0	30,6	2229,78	1147,85	0,00	0,09	0	956668
20,4		505,6	23,8	2869,28	1413,81	0,00	0,06	0	1063664
13,6		569,2	17	3228,93	1690,84	0,00	0,03	0	1170660
6,8		632,8	10,2	3588,58	1890,28	0,00	0,01	0	1277656
0		696,4	3,4	3948,23	2089,72	0,00	0,00	0	1384651
totale					14824,22	0,00		15735	1384651

EFFETTO DELLE AZIONI DI ECCITAZIONE DEI VORTICI

FORZE DI INERZIA PERPENDICOLARI ALLA DIREZIONE DEL VENTO - METODO SPETTRALE

$$F_{1,j} = m_j \cdot (2\pi \cdot n_1)^2 \cdot \Phi_{1,j} \cdot y_{F,max} \cdot C_{TR,j} \quad \text{kg.m/sec}^2 \quad \lambda = h/b = 18,42$$

m_j = massa vibrante nel nodo j

n_1 = frequenza naturale del 1° modo

$$\Phi_{1,j} = (z/h)^{\zeta}$$

$\zeta = 2$ → per ciminiere

$$m_j = m_{j,s} + m_{j,r}$$

$$C_{TR,j} = 1$$

$$v_{m,l,TR} = 36 \text{ m/sec}$$

EN 1991-1-4 | CNR-DT 207

ampiezza max. di vibraz. alla v_{cr}

$$y_{F,max} = 2^{0,5} \cdot [1 + [\arctan(0,7 \cdot (Sc / (4 \cdot \pi \cdot K_a))^{2,5})]^{1,4}] \cdot \sigma_y = 0,0885 \quad 0,0885$$

$$y_{pL,1} = g_L \cdot \sigma_L$$

deviazione standard dello spostam.

secondo CNR-DT 207 $R_N = S_D$

$$\frac{\sigma_L}{b} = \sqrt{c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2}}$$

$$c_2 = \frac{a_L^2}{K_a} \cdot \frac{\rho \cdot b^3}{m_e h} \cdot \frac{C_c^2}{St^4}$$

$$\left(\frac{\sigma_y}{b}\right)^2 = c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2}$$

$$c_1 = \frac{a_L^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{Sc}{4 \cdot \pi \cdot K_a}\right)$$

$$c_2 = \frac{\rho \cdot b^2}{m_e} \cdot \frac{a_L^2}{K_a} \cdot \frac{C_c^2}{St^4} \cdot \frac{b}{h}$$

$$\sigma_y; \sigma_L = 0,0227 \quad 0,0227084$$

$$c_1 = -0,179923 \quad -0,179923$$

$$c_2 = 1,285E-05 \quad 1,285E-05$$

smorzamento aerodinamico :

smorzamento aerodinamico max :

fattore di turbolenza :

$$v_{cr} = 13,9082 \text{ m/sec}$$

$$Re(v_{cr}) = 3523423$$

lunghezza di eccitazione :

numero di Strouhal :

numero di Scruton :

stabilizz. aerodin. solo per $Sc > 10$

possibili solo smorzatori meccanici

$$K_a = K_{a,max} \cdot C_I \quad K_a = K_{a,max} \cdot C_I$$

$$K_a = 0,7000 \quad 0,7000$$

$$K_{a,max} = 1,0000 \quad 1,0000$$

$$C_I = 0,7000 \quad 0,7000$$

$$C_c = 0,0100 \quad 0,0100$$

$$L_j = 22,80 \text{ m}$$

$$St = 0,2 \quad \text{CNR-DT 207}$$

$$Sc = \frac{4\pi \cdot m \cdot \xi_{L,i}}{\rho \cdot b^2}$$

$$Sc = \frac{2 \cdot m_1 \cdot \delta_s}{\rho \cdot b_{L_j}^2}$$

$$28,5800 \quad 28,5800$$

valore sperimentale del numero di Scruton

$$Sc = 28,58$$

vita nominale V_n = anni

50

$$N = 6,4 \cdot 10^7 \cdot V_n \cdot n_1 \cdot \epsilon_0 \cdot (v_{cr}/v_0)^2 \cdot e^{-(v_{cr}/v_0)^2} = 77538558,3 \text{ cicli}$$

uguale al periodo di ritorno $T_{R,0}$

$$(v_{cr}/v_0)^2 = 3,4395384$$

$$\epsilon_0 = 0,3$$

forze di inerzia

100	h(z)	di (cm)	z_j (m)	A_i (cm ²)	$m_{j,s}$ (kg)	$m_{j,r}$ (kg)	$\Phi_{1,j}$	$F_{1,j}$ (N)	M_i (N.m)	
77,2	↓ L_j	378,4	88	953,03	1865,26	0,00	0,77	27058		
76		378,4		953,03					324691	
64		378,4	70	1191,92	1049,52	0,00	0,49	0	649382	
52		378,4	58	1431,06	1283,41	0,00	0,34	0	974073	
40		378,4	46	1670,45	1517,56	0,00	0,21	0	1298764	
34		378,4	37	1910,09	875,97	0,00	0,14	0	1461110	
34,0				30,6		1147,85	0,00	0,09	0	
27,2		442,0		23,8	2229,78					1645101
20,4		505,6		17	2869,28	1413,81	0,00	0,06	0	1829093
13,6		569,2		10,2	3228,93	1690,84	0,00	0,03	0	2013084
6,8		632,8		3,4	3588,58	1890,28	0,00	0,01	0	2197076
0		696,4			3948,23	2089,72	0,00	0,00	0	2381067
				totale	14824,22	0,00		27058	2381067	

I valori degli spostamenti trasversali di picco calcolati per i due metodi differiscono da quelli dell'esempio normativo per il diverso valore attribuito al numero di Strouhal (0,22 anziché 0,2).

Ponendo Strouhal = 0,22 si ha :

per il metodo spettrale

ampiezza max. di vibraz. alla v_{cr}	$y_{F,max} = 2^{0,5} \cdot [1 + [\arctan(0,7 \cdot (Sc / (4 \cdot \pi \cdot K_a))^2)^{2,5}]]^{1,4} \cdot \sigma_y =$	EN 1991-1-4	CNR-DT 207
		0,0732	0,0732

per il metodo armonico

ampiezza max. di vibraz. alla v_{cr}	$y_{F,max} = b_{L,j} \cdot K_w \cdot K \cdot C_{lat} \cdot 1/St^2 \cdot 1/Sc = m$	EN 1991-1-4	CNR-DT 207
		0,0426	0,0426

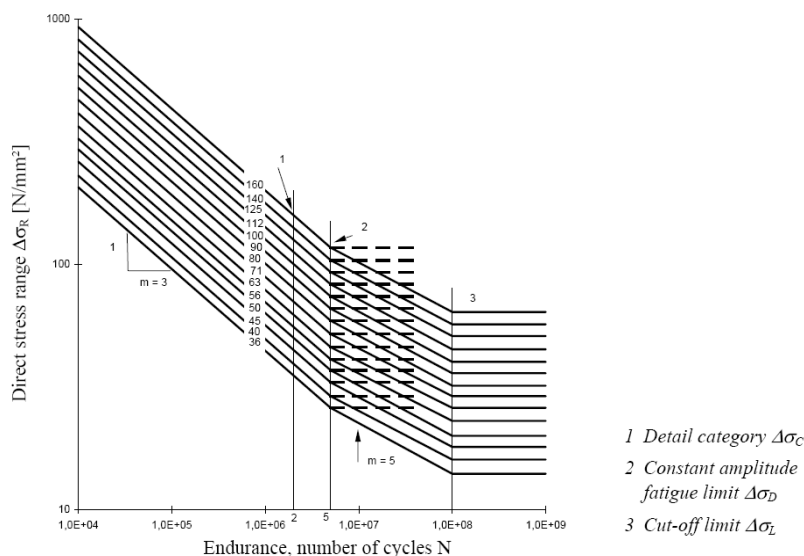
Molto vicini a quelli dell'esempio normativo

Le verifiche che seguono sono effettuate usando il numero di Strouhal $St = 0,2$ a favore di sicurezza.

Si noti dal calcolo automatico come la lunghezza di eccitazione si sia ridotta a 22,8 m concentrando le forze eccitanti nella parte alta della ciminiera.

Le verifiche che seguono dimostrano l'efficacia dello smorzatore sia per le azioni longitudinali del vento che per le azioni trasversali cicliche quest'ultime riferite al valore minimo della resistenza ciclica calcolata per un numero di oscillazioni pari a $77,5 \cdot 10^6$ e per il dettaglio strutturale maggiormente pericoloso ovvero la saldatura cinconferenziale dell'involucro (cat. 90 = saldatura di testa di seconda classe con ripresa) adottando un coefficiente di sicurezza $\gamma_{Mf} = 1,15$ valido per componenti sicure, con ispezione e manutenzione periodica ma scarsa accessibilità.

Il numero di cicli generalmente elevato sposta il valore della categoria del dettaglio strutturale verso i valori minimi costanti (per $N > 10^8$ $\Delta\sigma_R = \Delta\sigma_L$)



VERIFICA DI RESISTENZA ED A FATICA

per la verifica a fatica : $\Delta\sigma_{di} \leq \Delta\sigma_R' = \Delta\sigma_R / \gamma_{Mf}$

con N = **77538558,3** cicli

e con $\gamma_{Mf} =$ **1,15** (valori di γ_{Mf} : 1 - 1,15 - 1,25 - 1,35 - tab. 3.1 EN 1993-1-9)

RESISTENZE DI PROGETTO A FATICA

DETTAGLIO STRUTTURALE	CATEGORIA EC3		LIMITI DI FATICA		RESISTENZA A FATICA $\Delta\sigma_R' < 1,5 \cdot f_{yt}$			
	$\Delta\sigma_C$ (N/mm ²)		$\Delta\sigma_D$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_L$ (N/mm ²)	log a	log $\Delta\sigma_R$	$\Delta\sigma_R$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_R'$ (N/mm ²)
(vedi nota 1)								
giunto longitudinale	125 - 112	125	93	51	16,536	1,72929646	53,62	51,0
giunto trasversale	112 - 90 - 80 - 71	90	66	36	15,786	1,57929646	37,96	36,0
irrigidim. circonferenz.	112 - 90 - 80 - 71	112	83	45	16,286	1,67929646	47,79	45,0
irrigidim. longitudinale	125 - 112 - 80	112	83	45	16,286	1,67929646	47,79	45,0
bulloni e barre filettate	36° - prec.	prec	-----	-----	-----	-----	-----	prec.

GEOMETRIA

VERIFICA DI RESISTENZA

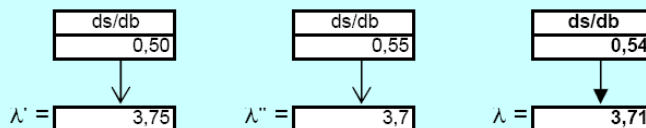
VERIFICA A FATICA

QUOTA-DIAMETRO-BULL.		AZIONI PARALLELE ALLA DIREZIONE DEL VENTO						RESIST.	AZ. TRAS.	RES. LIM.
100 h(z)	nb - di (cm)	ϕb - Ai (cm ²)	db - Wi (cm ³)	M _h (kNm)	N _h (kN)	σ_{Si} (N/mm ²)	σ_I (N/mm ²)	$\Delta\sigma_{di}$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_R'$ (N/mm ²)	
77,2	378,4					S.L.U.	EN-NTC	$\Delta\sigma = 1,2 \cdot \sigma_I$	EN-NTC	
76	378,4	953,03	90158	81270	182,98	14,73	91,99	7,20	36,0	
		mm	mm							
64	378,4	1191,92	112757	181698	285,94	25,20	134,66	11,52	36,0	
		mm	mm							
52	378,4	1431,06	135381	319520	411,84	36,21	154,16	14,39	36,0	
		mm	mm							
40	378,4	1670,45	158029	492700	560,72	47,34	167,24	16,44	36,0	
		mm	mm							
34	378,4	1910,09	180701	591908	646,65	49,58	179,05	16,17	36,0	
		mm	mm							
34,0				591908	646,65	36,14				
27,2	442,0	2229,78	246397	714310	759,25	44,33	166,48	13,35	36,0	
		mm	mm							
20,4	505,6	2869,28	362686	847752	897,95	36,17	165,02	10,09	36,0	
		mm	mm							
13,6	569,2	3228,93	459486	992723	1063,82	33,87	153,96	8,76	36,0	
		mm	mm							
6,8	632,8	3588,58	567722	1149230	1249,25	32,17	142,97	7,74	36,0	
		mm	mm							
0	696,4	3948,23	687396	1316795	1454,26	30,87	132,04	6,93	36,0	
		mm	mm							
NOTE :	nb = N° bulloni	ϕb = diam. bull.	db = ϕ ancor.			$\sigma_{Si} / \sigma_{I,min}$	0,283	$\Delta\sigma_{di} / \Delta\sigma_R'$	0,457	

BULL. PRECARICATI

CALCOLO DEL COEFF. λ PER LA FREQUENZA DEL 1° MODO

ds/db	λ	α_0 / α
0	5,32	0,4454
0,05	4,9	0,5317
0,1	4,7	0,4876
0,15	4,5	0,5718
0,2	4,3	0,5166
0,25	4,2	0,5979
0,3	4,1	0,5407
0,35	4	0,6189
0,4	3,85	0,5612
0,45	3,8	0,6362
0,5	3,75	0,5373
0,55	3,7	0,6154
0,6	3,65	0,5347
0,65	3,63	0,6121
0,7	3,6	0,5161
0,75	3,58	0,5954
0,8	3,55	0,4994
0,85	3,54	0,5800
0,9	3,53	0,4841
0,95	3,52	0,5658
1	3,52	



Nota 1: TIPI DI GIUNZIONI

G. LONGIT.	cat. 125	saldatura di testa con ripresa al rovescio
	cat. 112	sald. da un lato su controguida - superf. interna levigata
G. TRASV.	cat. 112	saldatura di testa I° classe con ripresa
	cat. 90	saldatura di testa II° classe con ripresa
	cat. 80	sald. da un lato su controguida - superf. interna levigata
	cat. 71	saldatura da un lato con piatto di supporto e saldatura flangia
RINF. CIRC.	cat. 112	doppia saldatura d'angolo di qualità : t <= 12 mm
	cat. 90	doppia saldatura d'angolo di qualità : t > 12 mm
	cat. 80	doppia saldatura d'angolo normale : t <= 12 mm
	cat. 71	doppia saldatura d'angolo normale : t > 12 mm
RINF. LONG	cat. 125	doppia saldatura d'angolo di qualità
	cat. 112	doppia saldatura d'angolo normale
	cat. 80	doppia saldatura d'angolo - sollecitazione tangenziale
FLANGIA	cat. 36°	bulloni e barre filettate non pre-tese (minima resist. a fatica)
	cat. prec.	per bulloni precaricati Res. Lim. = $\Delta\sigma_{di} \cdot \gamma_{Mf} = \text{min. precarico}$

La verifica sismica per struttura non dissipativa (q=1) posta in zona 3 con categoria di terreno D e accelerazione al suolo pari a $a_g = 1,354$ m/sec da il seguente risultato :

VERIFICA SISMICA S.L.U.												
metodo di calcolo		2		resistenza limite secondo NTC 2008								
secondo NTC 2008		1,000										
coeff. sic. permanenti		1,000										
coeff. sic. sisma		1,000										
100	h(z)	di (cm)	z _j (m)	x / MASSA	COEFF.DIST.	COEFF. SIS.	f / FORZA	MOMENTO	TENSIONE	RES. LIM.		
				m	ton	γ _j	Ks	cm	kN	kN.m	σ _{si} (N/mm ²)	σ _k (N/mm ²)
76		378,4		0,41				17,48				
		378,4	88	18,65	2,42	0,84		154,47	1853,66	22,48		91,99
64		378,4	70	10,50	1,93	0,67		5,37	69,14	4122,14	38,96	134,66
52		378,4	58	12,83	1,60	0,56		3,93	70,05	7225,76	56,25	154,16
40		378,4	46	15,18	1,27	0,44		2,43	65,69	11143,85	73,87	167,24
34		378,4	37	8,76	1,02	0,35		0,76	30,50	13391,49	77,49	179,05
34,0		378,4		0,08				0,57		13391,49	77,49	
27,2		442,0	30,6	11,48	0,84	0,29		0,34	33,05	16154,90	68,97	166,48
20,4		505,6	23,8	14,14	0,66	0,23		0,15	31,67	19138,35	55,90	165,02
13,6		569,2	17	16,91	0,47	0,16		0,04	27,05	22321,45	51,87	153,96
6,8		632,8	10,2	18,90	0,28	0,10		0,00	18,14	25658,21	48,68	142,97
0		696,4	3,4	20,90	0,09	0,03			6,69	29079,39	45,99	132,04
Q = Σ [m _j] =				148,24	t	TOTALE		506,46	29079,39	σ _{si} /σ _{k.min}	0,465	
S = Σ [m _j · z _j] =				5382	t.m	freccia		31,1	cm	con spettro di risposta allo S.L.U.		
J = Σ [m _j · z _j ^k] =				309001	t.m ^k	espon. k		2,0				

ordinata spettro di progetto	0,348	= Sd(T ₁)/g
fattore di correzione	1	= lamda
coefficiente di struttura q	1	= q
coeff. di distribuzione (1/2/3)	1	= c _d
periodo fondamentale sec	1,366	= T ₁
coeff. sismico globale	C =	0,348 S.L.U.

$\gamma_j = z_j \cdot Q/S$ per c_d = 1
 $\gamma_j = z_j^k \cdot Q/J$ per c_d = 2
 $\gamma_j = 1$ per c_d = 3

$$T_1 = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\sum m_j \cdot x_j^2}{\sum (m_j \cdot x_j) \cdot g}} \geq$$

VERIFICA DELLA SEZIONE DI BASE

Carico massimo alla base della ciminiera :

- p.p ciminiera , scala e ballatoi : 1454,26 kN
- p.p. refrattario : 0,00 kN
- strutture accessorie : 50,00 kN
- N_b = 1504,26 kN

W_b = 687396 cm³ σ = γ_G · N_b/A_b + γ_Q · M_b/W_b = **4,61** kN/cm² < 13,20 kN/cm²

Vengono omesse le verifiche di dettaglio del sistema di ancoraggio e degli irrigidimenti che sono invece presentate più avanti per il calcolo del camino dell'esempio del primo articolo. Si fa invece notare quanto la normativa sia punitiva nei confronti del fenomeno dell'ovalizzazione dell'involucro imponendo quanto segue :

Si tralascia lo studio dell'ovalizzazione statica e si passa direttamente ad analizzare l'ovalizzazione dinamica, applicando i due criteri forniti al paragrafo O.10.

*Dapprima si considera il caso in cui la canna metallica sia priva di anelli irrigidimenti. Applicando il criterio indicato al paragrafo I.2.6, la frequenza fondamentale di ovalizzazione, $n_{0,1}$, è fornita dall'Eq. (I.11), dove $b = 3,8$ m; considerando il tratto di canna della parte sommitale, lo spessore della lamiera è pari a $t = 0,008$ m. Pertanto **$n_{0,1} = 1,418$ Hz.***

*Applicando il primo criterio introdotto al paragrafo O.10, il valore minimo della velocità critica di ovalizzazione (quindi il più pericoloso) è fornito dall'Eq. (O.19) ponendo $n_{0,1} = 1,418$ Hz, $b = 3,8$ m, $\Omega = 4$. Il numero di Strouhal St è una funzione del numero di Reynolds (paragrafo O.2); nel caso in esame $St = 0,22$. Pertanto, **$v_{0,1} = 6,123$ m/s.***

*Applicando il secondo criterio introdotto al paragrafo O.10, il valore minimo della velocità critica di ovalizzazione è fornito dall'Eq. (O.20) ponendo **$n_{0,1} = 1,418$ Hz**, $\rho_s = 7850$ kg/m³, $\rho = 1,25$ kg/m³, $t = 0,008$ m, $b = 3,8$ m, $\xi_{0,1} = 0,002$.*

*Pertanto, **$v_{0,1} = 5,273$ m/s.***

*Si noti che, in questo caso, le velocità critiche di ovalizzazione sono molto simili, quindi i due criteri forniscono un risultato sostanzialmente robusto. Il valore minore, da considerare nella successiva verifica, è pari a **$v_{0,1} = 5,273$ m/s.***

La velocità media del vento alla sommità della ciminiera, $h = 100$ m, con periodo di ritorno di progetto $T_R = 500$ anni è pari a $v_{m,1} = 45,02$ m/s (paragrafo 4.10.4).

*Pertanto, essendo la velocità critica di ovalizzazione minore, la verifica definita dall'Eq. (O.21) non è soddisfatta. Una tecnica efficace per superare questo problema è costituita dall'impiego di anelli irrigidimenti **opportunamente dimensionati e distanziati.***

Nulla è detto dalla norma su come dimensionare gli irrigidimenti per rispondere all'esigenza di portare la velocità critica di ovalizzazione al valore della velocità media di sommità riferita ad un periodo di ritorno di 500 anni. Dall'esempio si deduce che se si ricava dal criterio sperimentale lo spessore dell'involucro necessario ad evitare l'ovalizzazione imponendo una velocità critica pari alla velocità media per $T_R = 500$ anni, non sarebbero sufficienti 10 cm, il che è assurdo.

Il sottoscritto fa riferimento al calcolo degli anelli di irrigidimento come proposto dalle norme ASCE.

Di seguito si riporta il calcolo di verifica del fenomeno dell'ovalizzazione come eseguito dal programma Chimney.

VERIFICA OVALIZZAZIONE INVOLUCRO NON IRRIGIDITO

frequenza fondamentale di ovalizzazione : $n_{O,i} = 0,49 \cdot t/b^2 \cdot [E/\rho_s]^{0,5} = 2534 \cdot t/b^2 = \text{Hz}$ 1,4039

velocità critica di ovalizzazione : criterio 1 $v_{O,i} = n_{O,i} \cdot b / (\Omega \cdot St)$ in cui $\Omega =$ modo di ovalizzazione

$\Omega = 1,2,3,4$ 4 *il modo più probabile è il modo 2*
 $v_{O,i} =$ 6,6684 m/sec

velocità critica di ovalizzazione : criterio 2 $v_{O,i} = n_{O,i} \cdot b \cdot [25,66 \cdot \rho_s/\rho \cdot t/b \cdot \xi_{O,i} + 0,3] =$ 5,2201

verifica di resistenza all'ovalizzazione : $v_{O,i,min} \geq v_{m,I,TR}$ 5,2201 < 45,272 m/sec
è necessario prevedere anelli di rinforzo circolarziali

I valori della velocità critica sono molto vicini a quelli dell'esempio normativo. I modi di ovalizzazione descritti dalla norma sono di seguito riportati ma non si "intuisce" il modo 4 citato nell'esempio peraltro applicabile al criterio 1.

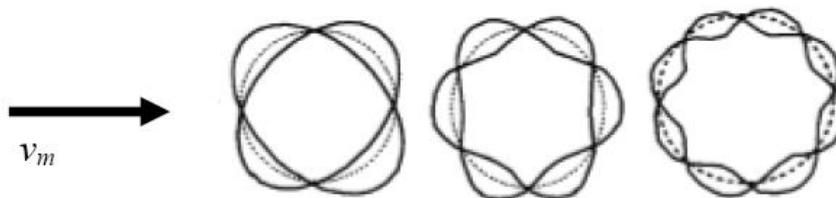


Figura O.18 – Modi di ovalizzazione (sezione del guscio circolare).

Se il modo di ovalizzazione fossi il modo 1 si avrebbe il seguente risultato :

VERIFICA OVALIZZAZIONE INVOLUCRO NON IRRIGIDITO

frequenza fondamentale di ovalizzazione : $n_{O,i} = 0,49 \cdot t/b^2 \cdot [E/\rho_s]^{0,5} = 2534 \cdot t/b^2 = \text{Hz}$ 1,4039

velocità critica di ovalizzazione : criterio 1 $v_{O,i} = n_{O,i} \cdot b / (\Omega \cdot St)$ in cui $\Omega =$ modo di ovalizzazione

$\Omega = 1,2,3,4$ 1 *il modo più probabile è il modo 2*
 $v_{O,i} =$ 26,6737 m/sec

velocità critica di ovalizzazione : criterio 2 $v_{O,i} = n_{O,i} \cdot b \cdot [25,66 \cdot \rho_s/\rho \cdot t/b \cdot \xi_{O,i} + 0,3] =$ 5,2201

verifica di resistenza all'ovalizzazione : $v_{O,i,min} \geq v_{m,I,TR}$ 5,2201 < 45,272 m/sec
è necessario prevedere anelli di rinforzo circolarziali

che avvicina la velocità critica di ovalizzazione a quella calcolata col criterio 1. Resta comunque vincolante il criterio 2 per cui se si deve fare riferimento al criterio più pericoloso **non si vedono possibilità di rinforzo ragionevoli.**

Di seguito viene presentato il calcolo del camino illustrato nel precedente articolo qui eseguito in base alla norma italiana ed europea vigente con pochi commenti già considerati esaustivi per l'esempio precedente.

Si lascia alla cura del lettore il confronto tra i due metodi di calcolo americano ed europeo ; segnalo in anticipo che il camino oggetto dell'analisi e privo di smorzatori **non** sarebbe più dichiarato stabile in base alle vigenti normative a causa dell'effetto prodotto al distacco dei vortici applicando il **metodo spettrale**.

DATI DI PROGETTO

TIPOLOGIA

La ciminiera oggetto della seguente verifica è del tipo autoportante con rivestimento refrattario interno.

La protezione è del tipo : ebanite su gomma butilica

Non è previsto isolamento termico esterno.

La ciminiera è composta da due tratti cilindrici raccordati

il diametro alla base è di m 2

Il materiale previsto è Acciaio del tipo :

1 - S275 EN 10025 equivalente a :
 2 - _____

con le seguenti caratteristiche meccaniche :

- modulo di elasticità : 206000 N/mm²
- tensione di rottura : 430 N/mm²
- tensione di snervamento : 275 N/mm² a temperatura ambiente

- tensioni di snervamento per il materiale base ed equivalente :

- a temperatura ambiente : 275 N/mm²
- alla temperatura di 100 °C 210 N/mm²

Lo spessore della lamiera della ciminiera è tale da garantire oltre alla resistenza meccanica sotto le azioni di progetto anche una adeguata flessibilità per le risposte armoniche all'azione dinamica del vento.

La classe di importanza secondo EN 1993-3-2 è la seguente 2

ciminiera normale costruita in impianto industriale o in altro sito non catalogabile di classe 1 o 3

Le azioni di progetto comprendono :

- peso proprio medio della ciminiera : 403 daN/m
- peso proprio strutture di servizio : 50 daN/m
- peso proprio del rivestimento refrattario : 165 daN/m
- temperatura di progetto della lamiera : 100 °C
- azione del vento per una velocità di riferim. di : 29 m/sec

<p>- azione sismica</p> <p>Fo = 2,5</p> <p>Tc* = 0,4</p> <p>ag = 2,4525</p> <p>St = 1</p>		<p>NTC 2008 ▼</p> <p>spettro → <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"><tr><td style="padding: 2px 10px;">3,928</td><td style="padding: 2px 10px;">0,625</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: yellow;">0,191</td><td style="padding: 2px 10px;">0,380</td></tr></table></p> <p>suolo tipo A</p> <p>Cc = 1,000</p> <p>ag/g = 0,250</p> <p>coeff. di struttura q = 1</p>	3,928	0,625	0,191	0,380	<p>zona 2</p> <p>S = 1,000</p> <p>Tb = sec 0,133</p> <p>Tc = sec 0,400</p> <p>Sd(T) /g = 0,191</p>
3,928	0,625	0,191	0,380				

L'azione sismica è determinata in accordo con le NTC 2008 ipotizzando un comportamento strutturale non dissipativo (q=1) col metodo dell'analisi elastica globale

L'azione del vento è esaminata sia in condizioni statiche che dinamiche in conformità alle norme NTC 2008 e CNR-DT 207 - 2008

L'azione del vento è conforme alle norme

selezionare paese

ITALIANE ▼ ITALY

I due fogli successivi eseguono il calcolo dell'effetto dell'azione del vento (coeff. di forza) .

ANALISI DELL'AZIONE DEL VENTO SULLA CIMINIERA

Caratteristiche della ciminiera :

		cilindro		tronco-cono					
altezza totale :	h =	50	m	h ₁ =	20	m	h ₂ =	30	m
diámetro int. di base :	d _b =	200	cm	A _b =	758,51	cm ²	J _b =	3838314	cm ⁴
spessore di base :	s _b =	12	mm						
diámetro int. di somm. :	d _s =	150	cm	A _s =	379,00	cm ²	J _s =	1077373	cm ⁴
spessore di sommità :	s _s =	8	mm						
spessore del refrattario :	s _r =	20	mm	peso spec. del refr. =	15	kN/m ³			
materiale del mantello :	E =	20600	kN/cm ²	T = °C			p _s =	78,5	kN/m ³
S275 EN 10025	f _y =	27,5	kN/cm ²	100			f _{yt} =	21	kN/cm ²
γ _M = 1,1	σ _{d 20°} =	25,00	kN/cm ²				σ _{d t°} =	14,70	kN/cm ²

Sollecitazione parallela alla direzione del vento :

$$F_{Wj} = q_{ref} \times C_{e(zj)} \times C_d \times C_{fj} \times A_j$$

C_{e(zj)} = coeff. di esposizione ricavato dal diagramma della pressione del vento

$$C_{fj} = C_{f,0} \times \Psi_\lambda$$

C_{f,0} = coeff. di forza per un cilindro di snellezza infinita f(Re)

Ψ_λ = fattore di riduzione della snellezza

Re = numero di Reynolds = 0,7 x 10⁵ x v_m(z) x b

A_j = area incrementale calcolata per una variazione del diam. del cilindro di +/- 5%

C_d = coeff. dinamico =

$$\frac{1 + 2 \cdot g_D \cdot I_v(z_e) \cdot \sqrt{Q_0^2 + R_x^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_e)}$$

EN 1991-1-4 | CNR-DT 207

1,0565 1,0724

altezza equivalente :

$$z_e = 0,6 \cdot h \geq z_{min} = \text{30} \text{ m} < 300 \text{ m}$$

intensità della turbolenza :

$$I_v(z_e) = k_r / [C_t(z_e) \cdot C_r(z_e)] = \text{0,2171}$$

fattore di categoria del terreno :

$$k_r = \text{0,22} \text{ per zona IV}$$

coefficiente di topografia :

$$C_t(z_e) = \text{1,00} \text{ da diag. press. vento}$$

coefficiente di rugosità :

$$C_r(z_e) = \text{1,01} \text{ da diag. press. vento}$$

fattore di picco:

$$g_D = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot t)} + 0,6 / \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot t)}$$

EN 1991-1-4 | CNR-DT 207

3,5759 3,5631

tempo medio di applicaz. di v_{ref} :

$$t = \text{600} \text{ sec}$$

frequenza prevista :

$$v = \sqrt{\frac{v_0^2 \cdot Q_0^2 + n_1^2 \cdot R_x^2}{Q_0^2 + R_x^2}}$$

$$v = \text{Hz}$$

EN 1991-1-4 | CNR-DT 207

0,5384 0,5268

freq. di raffica per struttura rigida :

$$v_0 = \frac{v_m(z_e)}{Li(z_e) \cdot (1,11 \cdot S^{0,615})} = \text{0,2312} \text{ Hz}$$

$$v_m(z_e) = v_{ref} \cdot C_t(z_e) \cdot C_r(z_e) = \text{29,4 m/sec}$$

per T_R = T_{R0} = V_n = anni 50

scala di lungh. integr. della turbol.:

$$Li(z_e) = 300 \cdot (z_e / 200)^\alpha = \text{105,67} \text{ per } \alpha = 0,5500$$

diámetro medio : b_m = 166,84 cm

$$S = \frac{0,46 \cdot (b+h)}{Li(z_e)} + \frac{10,58 \cdot \sqrt{b \cdot h}}{Li(z_e)} = \text{1,1393}$$

$$b = [(db+ds)/2 \cdot ht + ds \cdot hc] / h$$

diámetro cilindro : b = 151,60 cm

parte di risposta di fondo :

$$Q_0^2 = 1 / (1 + 0,9 \cdot [(b+h) / Li(z_e)]^{0,63}) =$$

EN 1991-1-4 | CNR-DT 207

0,6360 0,6360

parte di risposta risonante :

$$R_x^2 = \pi^2 / 2\delta \cdot R_N \cdot R_h \cdot R_b =$$

EN 1991-1-4 | CNR-DT 207

0,5100 0,5746

decr. log. per smorzam. fondam. :

secondo CNR-DT 207 $\delta = \xi$

ξ = smorzamento relativo critico

$$\xi = \xi_s + \xi_a + \xi_d$$

$$\xi_a = \frac{c_{fX} \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_e)}{4 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot m_{e1}}$$

massa equiv. p.u.l. del tratto h_3 :

funzione di densità spettrale :

secondo CNR-DT 207 $R_N = S_D$

$$S_D = \frac{6,868 \cdot n_D \cdot L_v(z_e) / v_m(z_e)}{[1 + 10,302 \cdot n_D \cdot L_v(z_e) / v_m(z_e)]^{5/3}}$$

funz. di ammittanza aerodinamica

funz. di ammittanza aerodinamica

secondo CNR-DT 207 con $n_D = n_1$

$$\eta_h = 4 \cdot \frac{n_D \cdot h}{v_m(z_e)}, \quad \eta_b = 4 \cdot \frac{n_D \cdot b}{v_m(z_e)}$$

frequenza naturale del 1° modo

sez. troncoconica variabile linearm.

sez. conico-cilindrica (EC1-1-4 & F.2)

$$\delta = \delta_d + \delta_s + \delta_a$$

$$\delta_d = 0, \quad \xi_d = 0$$

$$\delta = 0,0897$$

$$\delta_s = 0,0300$$

$$\xi = 0,0145$$

$$\xi_s = 0,0050$$

$$h/b = 32,9815 \quad \text{1 strato di gunite} \quad \text{senza isolante esterno}$$

$$\delta_a = \frac{\rho \cdot b \cdot C_f \cdot v_m(z_e)}{2 \cdot n_1 \cdot m_e} = 0,0597$$

$$\xi_a = 0,0095$$

$$h_3 = m \cdot 6,67 \quad m_e = 367,73 \text{ kg/m}$$

$$R_N = \frac{6,8 \cdot N_x}{(1 + 10,2 \cdot N_x)^{5/3}} = 0,0681$$

$$0,0677$$

$$N_x = n_1 \cdot Li(z_e) / v_m(z_e) = 2,7503$$

$$n_1 = \text{Hz} \quad 0,76$$

$$R_h = 1/\eta_h - 1/2\eta_h^2 \cdot (1 - e^{-2\eta_h}) = 0,1531$$

$$0,1737$$

$$R_b = 1/\eta_b - 1/2\eta_b^2 \cdot (1 - e^{-2\eta_b}) = 0,8892$$

$$0,9026$$

$$\eta_h = 4,6 \cdot N_x \cdot h / Li(z_e) = 5,9860$$

$$\eta_h = 5,2052$$

$$\eta_b = 4,6 \cdot N_x \cdot b / Li(z_e) = 0,1815$$

$$\eta_b = 0,1578$$

$$n_1 = \lambda/2\pi \cdot \sqrt{E \cdot J_b / m_b \cdot h^4} = 0,76 \text{ Hz}$$

$$\lambda = 3,58$$

$$n_1 = \varepsilon_1 \cdot b / h_{\text{eff}}^2 \cdot \sqrt{W_s / W_t} = \text{-----} \text{ Hz}$$

$$\text{per } d_s/d_b = 0,75$$

COEFFICIENTE DI FORZA (EN 1991-1-4 ; CNR-DT 207)

valori della rugosità equivalente k :

k = 0,02 - sup. verniciata spray

k = 0,05 - sup. metallo lucido

k = 0,20 - sup. zincata o metallo ruvido

secondo EN 1991-1-4 e CNR-DT 207

$$C_{fj} = C_{f,0} \cdot \Psi_\lambda$$

$$\lambda = 23,0871 \quad \lambda = \kappa \cdot h/b \quad \text{CNR-DT 207}$$

$$\Psi_\lambda = 0,7908 \quad \text{EN 1991-1-4 e CNR-DT 207}$$

$$C_f(z_e) = 0,603$$

$$k = 0,2 \text{ mm (metallo ruvido)}$$

50	h(z)	di (cm)	fl - q (kg/m)	s(mm) / b(cm)	$v_m(z_e)$	J (cm ⁴) - Re	k/b	$C_{f,0}$	C_{fj}
		150,0	367,73	8	151,6	3272499	0,0001319	0,7701815	0,609
45		150,0		8	151,6	3186397	0,0001319	0,7685242	0,608
40	43,3	150,0	367,73	8	151,6	3121863	0,0001319	0,7672438	0,607
		150,0	flangia	8	151,6	3011053	0,0001319	0,7649635	0,605
35		150,0		8	151,6	3407298	0,0001133	0,7628288	0,603
30	30,0	150,0	flangia	8	176,6	3682855	9,921E-05	0,7592055	0,600
		150,0	raccordo	8	201,6	3514269	9,911E-05	0,7561969	0,598
25		200,0		8	201,6	3301829	9,901E-05	0,7521515	0,595
		200,0	flangia	8	202,0	2823815	9,891E-05	0,741778	0,587
20,5		200,0		8	202,2	2826608	9,881E-05	0,7417792	0,587
		200,0	flangia	8	202,4				
15,5		200,0		10	202,4				
		200,0	flangia	10	202,4				
10,5		200,0		10	202,4				
		200,0	flangia	10	202,4				
4,5		200,0		12	202,4				
		200,0	flangia	12	202,4				
0		200,0	689,20	12	202,4				

Nella tabella sopra riportata vengono definiti i livelli di calcolo delle sezioni lungo l'altezza del camino e, con l'inserimento della parola "flangia" il livello al quale è prevista la giunzione bullonata.

FORZE - SOLLECITAZIONI LUNGO LA CIMINIERA PARALLELE ALLA DIREZIONE DEL VENTO											
CALCOLO SECONDO NORME EN o NTC 2008					$F_{Wj} = q_{ref} \times C_{e(z_j)} \times C_d \times C_{fj} \times A_j$						
$\gamma_G = 1,1$					$\gamma_Q = 1,4$						
LIVELLO	DIAM. INT.	QUOTA NODO	f_{max}	ϕ EST.	AREA	PRESSIONE	FORZA	MOMENTO	PESO		
50	h(z)	di (cm)	Z	z_j (m)	f (cm)	b (cm)	A_j (m ²)	p(z _j) (kN/m ²)	F_{Wj} (kN)	M_h (kNm)	$N_{h,tot}$ (kN)
45	150,0	150,0	48	47,5	5,64		7,58	1,01	7,66	19,14	24,350
40	150,0	150,0	44	42,5	4,59	151,6	7,58	0,98	7,43	75,99	48,700
35	150,0	150,0	38	37,5	3,59	151,6	7,58	0,94	7,13	169,22	73,050
30	150,0	150,0	34	32,5	2,73	151,6	7,58	0,91	6,90	297,52	97,401
25	150,0	200,0	28	27,5	2,24	176,6	8,83	0,86	7,59	462,04	125,395
20,5	200,0	200,0	24	22,75	1,56	201,6	9,07	0,82	7,44	643,93	153,870
15,5	200,0	200,0	18	18	1,03	201,8	10,09	0,75	7,57	883,55	187,997
10,5	200,0	200,0	14	13	0,51	202,0	10,10	0,68	6,87	1159,25	224,612
4,5	200,0	200,0	8	7,5	0,17	202,2	12,13	0,55	6,67	1530,73	271,542
0	200,0	200,0	4	2,25	0,01	202,4	9,11	0,55	5,01	1835,61	308,984
			freccia in sommità		22,1	cm	tot. alla base		70,26	1835,61	308,984

VERIFICA DELLA SEZIONE DI BASE

Carico massimo alla base della ciminiera :
 p.p ciminiera , scala e ballatoi : 226,28 kN
 p.p. refrattario : 82,70 kN
 strutture accessorie (branchetto ingresso) : **50,00** kN
 $N_b = 358,98$ kN

Tensione di progetto : (EN-NTC)
 $\sigma_{lim} = X \cdot f_{yd}$ kN/cm²
 $X = 0,8522539$
 $X \cdot f_{yd} = 16,270$ kN/cm²

$W_b = 37928$ $\sigma = \gamma_G \cdot N_b / A_b + \gamma_Q \cdot M_b / W_b = \mathbf{7,30}$ kN/cm² < **16,27**

SPOSTAMENTO MASSIMO PER EFFETTO DELLE FORZE DI PRESSIONE

$f_{max} = 22,06$ cm (calcolata come freccia statica sotto l'azione delle forze F_{Wj})
 $J_e = 2540874$ cm⁴ (riferita alle lunghezze e caratteristiche delle sezioni dei tratti)

SPOSTAMENTO IN SOMMITA' PER LO STATO LIMITE DI SERVIZIO nella direzione del vento

Lo spostamento è calcolato per un diametro della ciminiera riferito ad una altezza pari a $0,6 \cdot h$ (Z_e) e per una scabrosità equivalente k come definita per il calcolo di C_f (pag. prec.).

$f_{max} = \frac{\Phi_{1,x}(z) \cdot \rho \cdot b \cdot C_f \cdot v_m^2(z_e) \cdot [1 + 7 \cdot \ln(z_e)] \cdot C_d \cdot K_x}{2 \cdot m_1 \cdot (2\pi \cdot n_1)^2} = \mathbf{24,12}$ cm
 $b = b(z_e) = 1,52$ m

per : $K_x = \frac{(2 \cdot \zeta + 1) \cdot [(\zeta + 1) \cdot (\ln(z_e/z_0) + 0,5) - 1]}{(\zeta + 1)^2 \cdot \ln(z_e/z_0)} = 1,7270$ dove : $\zeta = 2$ per ciminiera
 $C_f(z) = 1$
 $z_0 = 0,3$

L'effetto delle azioni di eccitazione per distacco dei vortici è rappresentato nel foglio che segue in cui viene applicato il metodo armonico.

EFFETTO DELLE AZIONI DI ECCITAZIONE DEI VORTICI

FORZE DI INERZIA PERPENDICOLARI ALLA DIREZIONE DEL VENTO - METODO ARMONICO

$$F_{1,j} = m_j \cdot (2\pi \cdot n_1)^2 \cdot \Phi_{1,j} \cdot y_{F,max} \cdot C_{TR,j} \quad \text{kg.m/sec}^2 \quad \lambda = h/b = 29,97$$

m_j = massa vibrante nel nodo j $m_j = m_{j,s} + m_{j,r}$
 n_1 = frequenza naturale del 1° modo $C_{TR,j} = 1$
 $\Phi_{1,j} = (z/h)^{\xi}$ $\xi = 2$ → per ciminiere $v_{m,i,TR} = 38,766$ m/sec

EN 1991-1-4 | CNR-DT 207

ampiezza max. di vibraz. alla v_{cr} $y_{F,max} = b_{L,j} \cdot K_w \cdot K \cdot C_{lat} \cdot 1/St^2 \cdot 1/Sc = m$ **0,0632** **0,0603**

fattore di lung. di correlaz. effett. $K_w = 3 \cdot L_j/b_{L,j} / \lambda \cdot [1 - L_j/b_{L,j} / \lambda + 1/3 \cdot (L_j/b_{L,j} / \lambda)^2]$ **0,4883993** <= 0,6

fattore di forma modale : $\alpha = 1,0000$ $K = 0,13$
 coeff. di forza eccitante aerodin. : $C_{lat,0} = 0,2$ $C_{lat} = f(v_{cr}/v_{m,L,j}) = 0,2$
 numero di Strouhal : $St = 0,2$ CNR-DT 207
numero di Scruton : $Sc = 2 \cdot m_1 \cdot \delta_s / (\rho \cdot b_{L,j}^2) = 7,6398$ **8,0004**
 smorzatore elicoidale ? **no** $Sc = \frac{4\pi \cdot m \cdot \xi_{L,i}}{\rho \cdot b^2}$

$b_{L,j}$ = diametro fond. riferito a 5/6 h $b_{L,j} = 1,520$ $L_j/b_{L,j} = 6$ $L_j = 9,12$ L di eccitaz.
 procedim. iterativo : $L_j/b_{L,j} = 6,000$ $L_j = 9,12$ $b_{L,j} = 1,520$

CNR : $v_{cr} < v_{m,L,j}$ per $T_R = 10 \cdot T_{R0}$
 EN : $v_{cr} < 1,25 \cdot v_{m,L,j}$
distacco vortici
 $v_{cr,i} = \frac{n_{L,i} \cdot b}{St}$

$v_{cr} = 5,8115$ m/sec $Re(v_{cr}) = 588900$
 $z_{L,j} = 45,44$ m $C_t(z_{L,j}) = 1,00$
 $C_r(z_{L,j}) = 1,11$
 $v_{m,L,j} = 32,11$ m/sec $v_{cr}/v_{m,L,j} = 0,1809985 < 0,83$
 $y_{F,j} = 0,0631608$ $y_{F,j}/b_{L,j} = 0,0415532 < 0,1$

$N =$ numero cicli di sollecitazione
 vita nominale $V_n =$ anni **50**
 uguale al periodo di ritorno $T_{R,0}$
 $N = 6,4 \cdot 10^4 \cdot V_n \cdot n_1 \cdot \epsilon_0 \cdot (v_{cr}/v_0)^2 \cdot e^{-(v_{cr}/v_0)^2} = 265060270$ cicli
 $(v_{cr}/v_0)^2 = 0,8190111$ $\epsilon_0 = 0,3$

								forze di inerzia		
50	h(z)	di (cm)	z_j (m)	A_i (cm ²)	$m_{j,s}$ (kg)	$m_{j,r}$ (kg)	$\Phi_{1,j}$	$F_{1,j}$ (N)	M_j (N.m)	
		150,0	47,5	379,00	177,12	71,09	0,90	3119		
45		150,0	47,5	379,00	177,12	71,09	0,90		7797	
	40,9		42,5	379,00	177,12	71,09	0,72	2497		
40		150,0	42,5	379,00	177,12	71,09	0,72		29634	
		150,0	37,5	379,00	177,12	71,09	0,56	0	57714	
		150,0	32,5	379,00	177,12	71,09	0,42	0	85793	
		150,0	27,5	379,00	202,26	83,10	0,30	0	113872	
	30,0		22,75	504,67	204,66	85,60	0,21	0	139144	
25		200,0	22,75	504,67	204,66	85,60	0,21	0	139144	
		200,0	18	631,46	252,77	95,11	0,13	0	167223	
		200,0	13	631,46	278,13	95,11	0,07	0	195302	
		200,0	7,5	631,46	364,26	114,13	0,02	0	228997	
		200,0	2,25	758,51	296,07	85,60	0,00	0	254269	
0		200,0	2,25	758,51	296,07	85,60	0,00	0	254269	
totale					2306,64	843,04		5616	254269	

Fin qui il confronto con il calcolo dell'articolo precedente non presenta particolari differenze se non nell'applicazione oggi del metodo degli stati limite. Il problema nasce se si deve applicare anche il metodo spettrale e si deve scegliere il peggiore degli effetti prodotti dai due metodi quando, nella maggior parte dei casi è quest'ultimo fortemente penalizzante.

Si noti in particolare la notevole differenza delle forze di eccitazione trasversale.

La scelta del metodo peggiore non lascia dubbi al fatto che sia necessario prevedere un sistema di smorzamento aerodinamico o meccanico ma, in base alla norma CNR-DT 207, un sistema di smorzamento elicoidale può essere applicato quando il numero di Scruton $Sc < 10$ e il metodo usato sia quello armonico.

Quello che a norma ASCE pareva un camino staticamente valido non lo è più con la norma nazionale poiché è necessario prevedere in sommità uno **smorzatore meccanico a massa accordata** (con la soddisfazione dei produttori !!!)

EFFETTO DELLE AZIONI DI ECCITAZIONE DEI VORTICI

FORZE DI INERZIA PERPENDICOLARI ALLA DIREZIONE DEL VENTO - METODO SPETTRALE

$$F_{1,j} = m_j \cdot (2\pi \cdot n_1)^2 \cdot \Phi_{1,j} \cdot y_{F,max} \cdot C_{TR,j} \quad \text{kg.m/sec}^2 \quad \lambda = h/b = 23,09$$

m_j = massa vibrante nel nodo j $m_j = m_{j,s} + m_{j,r}$
 n_1 = frequenza naturale del 1° modo $C_{TR,j} = 1$
 $\Phi_{1,j} = (z/h)^\zeta$ $\zeta = 2 \longrightarrow$ per ciminiere $V_{m,I,TR} = 35$ m/sec

ampiezza max. di vibraz. alla v_{cr}

$$y_{pL,1} = g_L \cdot \sigma_L$$

deviazione standard dello spostam.

secondo CNR-DT 207 $R_N = S_D$

$$\frac{\sigma_L}{b} = \sqrt{c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2}}$$

$$c_2 = \frac{a_L^2 \cdot \rho \cdot b^3 \cdot C_c^2}{K_a \cdot m_e h \cdot St^4}$$

smorzamento aerodinamico:

smorzamento aerodinamico max:

fattore di turbolenza:

$$v_{cr} = 5,8115 \text{ m/sec}$$

$$Re(v_{cr}) = 588900$$

lunghezza di eccitazione:

numero di Strouhal:

numero di Scruton:

stabilizz. aerodin. solo per $Sc > 10$
possibili solo smorzatori meccanici

vita nominale $V_n =$ anni **50**

uguale al periodo di ritorno $T_{R,0}$

$$y_{F,max} = 2^{0,5} \cdot [1 + [\arctan(0,7 \cdot (Sc / (4 \cdot \pi \cdot K_a))^{2,5})]^{1,4}] \cdot \sigma_y = \mathbf{0,5587} \quad \mathbf{0,5663}$$

$$\left(\frac{\sigma_y}{b}\right)^2 = c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2}$$

$$c_1 = \frac{a_L^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{Sc}{4 \cdot \pi \cdot K_a}\right)$$

$$c_2 = \frac{\rho \cdot b^2}{m_e} \cdot \frac{a_L^2}{K_a} \cdot \frac{C_c^2}{St^4} \cdot \frac{b}{h}$$

$$K_a = K_{a,max} \cdot C_I \quad K_a = K_{a,max} \cdot C_I$$

$$Sc = \frac{4\pi \cdot m \cdot \xi_{L,i}}{\rho \cdot b^2}$$

valore sperimentale del numero di Scruton

$$Sc = \frac{2 \cdot m_1 \cdot \delta_s}{\rho \cdot b_{Lj}^2}$$

$$\sigma_y : \sigma_L = \mathbf{0,3419} \quad \mathbf{0,3499085}$$

$$c_1 = \mathbf{0,0252724} \quad \mathbf{0,0264609}$$

$$c_2 = \mathbf{2,345E-06} \quad \mathbf{3,797E-06}$$

$$K_a = \mathbf{0,8887} \quad \mathbf{0,9513}$$

$$K_{a,max} = \mathbf{0,9342} \quad \mathbf{1,0000}$$

$$C_I = \mathbf{0,9513} \quad \mathbf{0,9513}$$

$$C_c = \mathbf{0,0093} \quad \mathbf{0,0123}$$

$$L_j = \mathbf{9,12} \text{ m}$$

$$St = \mathbf{0,2} \quad \mathbf{CNR-DT 207}$$

$$\mathbf{7,6398} \quad \mathbf{8,0004}$$

$$Sc = \mathbf{\quad}$$

$$N = 6,4 \cdot 10^4 \cdot V_n \cdot n_1 \cdot \epsilon_0 \cdot (v_{cr}/V_0)^2 \cdot e^{-(v_{cr}/V_0)^2} = \mathbf{265060270}$$
 cicli

$$(v_{cr}/V_0)^2 = 0,8190111 \quad \epsilon_0 = 0,3$$

forze di inerzia

50	h(z)	di (cm)	z_j (m)	A_i (cm ²)	$m_{j,s}$ (kg)	$m_{j,r}$ (kg)	$\Phi_{1,j}$	$F_{1,j}$ (N)	M_j (N.m)
		150,0	47,5	379,00	177,12	71,09	0,90	29286	
45		150,0		379,00					73214
	40,9		42,5		177,12	71,09	0,72	23445	
40		150,0		379,00					278255
			37,5		177,12	71,09	0,56	0	
35		150,0		379,00					541907
			32,5		177,12	71,09	0,42	0	
30		150,0		379,00					805560
	30,0		27,5		202,26	83,10	0,30	0	
25		200,0		504,67					1069212
			22,75		204,66	85,60	0,21	0	
20,5		200,0		504,67					1306499
			18		252,77	95,11	0,13	0	
15,5		200,0		631,46					1570152
			13		278,13	95,11	0,07	0	
10,5		200,0		631,46					1833804
			7,5		364,26	114,13	0,02	0	
4,5		200,0		758,51					2150187
			2,25		296,07	85,60	0,00	0	
0		200,0		758,51					2387474
			totale		2306,64	843,04		52730	2387474

Si riporta a titolo di esempio la verifica a fatica per l'azione eccitante trasversale ottenuta col metodo spettrale :

VERIFICA DI RESISTENZA ED A FATICA

per la verifica a fatica : $\Delta\sigma_{di} \leq \Delta\sigma_R' = \Delta\sigma_R / \gamma_{Mf}$ con N = 265060270 cicli

e con $\gamma_{Mf} = 1,35$ (valori di γ_{Mf} : 1 - 1,15 - 1,25 - 1,35 - tab. 3.1 EN 1993-1-9)

RESISTENZE DI PROGETTO A FATICA								
DETTAGLIO STRUTTURALE	CATEGORIA EC3		LIMITI DI FATICA		RESISTENZA A FATICA			$\Delta\sigma_R' < 1,5 \cdot f_{yt}$
(vedi nota 1)	$\Delta\sigma_c$ (N/mm ²)		$\Delta\sigma_D$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_L$ (N/mm ²)	log a	log $\Delta\sigma_R$	$\Delta\sigma_R$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_R'$ (N/mm ²)
giunto longitudinale	125 - 112	112	83	45	16,286	1,6572	45,42	45,0
giunto trasversale	112 - 90 - 80 - 71	90	66	36	15,786	1,5572	36,07	36,0
irrigidim. circonferenz.	112 - 90 - 80 - 71	71	52	29	15,286	1,4572	28,65	29,0
irrigidim. longitudinale	125 - 112 - 80	80	59	32	15,536	1,5072	32,15	32,0
bulloni e barre filettate	36* - prec.	36	23	15	13,835	1,167	14,69	15,0

GEOMETRIA		VERIFICA DI RESISTENZA						VERIFICA A FATICA		
QUOTA-DIAMETRO-BULL.		AZIONI PARALLELE ALLA DIREZIONE DEL VENTO				RESIST.		AZ. TRAS.	RES. LIM.	
50	h(z)	nb - di (cm)	ϕb - Ai (cm ²)	db - W _i (cm ³)	M _h (kNcm)	N _h (kN)	σ_{si} (N/mm ²)	σ_I (N/mm ²)	$\Delta\sigma_{di}$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_R'$ (N/mm ²)
		150,0					S.L.U.	EN-NTC	$\Delta\sigma = 2 \cdot \sigma_I $	EN-NTC
45		150,0	379,00	14213	1914	24,35	2,59	155,70	10,30	36,0
40,9		40 5.6	20 mm	1620 mm					65,13	15,0
40		150,0	379,00	14213	7599	48,70	8,90	155,70	39,15	36,0
			mm	mm						
35		150,0	379,00	14213	16922	73,05	18,79	155,70	76,25	36,0
		40 5.6	24 mm	1620 mm					134,02	15,0
30		150,0	379,00	14213	29752	97,40	32,13	155,70	113,35	36,0
30,0			mm	mm	29752	97,40	23,50			
25		200,0	504,67	25234	46204	125,40	28,37	145,15	84,74	36,0
		40 5.6	24 mm	2160 mm					180,51	15,0
20,5		200,0	504,67	25234	64393	153,87	39,08	145,15	103,55	36,0
			mm	mm						
15,5		200,0	631,46	31575	88355	188,00	42,45	155,60	99,46	36,0
		40 5.6	27 mm	2160 mm					177,53	15,0
10,5		200,0	631,46	31575	115925	224,61	55,31	155,60	116,16	36,0
			mm	mm						
4,5		200,0	758,51	37928	153073	271,54	60,44	160,79	113,38	36,0
0		200,0	758,51	37928	183561	308,98	72,24	162,70	125,90	29,0
NOTE :		nb = N° bulloni	ϕb = diam. bull.	db = ϕ ancor.			$\sigma_{si} / \sigma_{I.min}$	0,444	$\Delta\sigma_{di} / \Delta\sigma_R'$	4,341

Per rientrare nelle verifiche di resistenza, stabilità e fatica sarebbe necessario predisporre uno smorzatore che garantisca un numero di Scruton (ottenuto sperimentalmente) non inferiore a **Sc = 12,5**

Di seguito si riporta l'effetto che lo smorzatore ha sulle forze di eccitazione trasversale :

EFFETTO DELLE AZIONI DI ECCITAZIONE DEI VORTICI

FORZE DI INERZIA PERPENDICOLARI ALLA DIREZIONE DEL VENTO - METODO SPETTRALE

$$F_{1,j} = m_j \cdot (2\pi \cdot n_1)^2 \cdot \Phi_{1,j} \cdot y_{F,max} \cdot C_{TR,j} \quad \text{kg.m/sec}^2 \quad \lambda = h/b = 23,09$$

m_j = massa vibrante nel nodo j $m_j = m_{j,s} + m_{j,r}$
 n_1 = frequenza naturale del 1° modo $C_{TR,j} = 1$
 $\Phi_{1,j} = (z/h)^5$ $\zeta = 2 \longrightarrow$ per ciminiere $V_{m,I,TR} = 35$ m/sec

ampiezza max. di vibraz. alla v_{cr} .

$$y_{pL,1} = g_L \cdot \sigma_L$$

deviazione standard dello spostam.
secondo CNR-DT 207 $R_N = S_D$

$$\frac{\sigma_L}{b} = \sqrt{c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2}}$$

$$c_2 = \frac{a_L^2 \cdot \rho \cdot b^3 \cdot C_c^2}{K_a \cdot m_{ie} h \cdot St^4}$$

smorzamento aerodinamico :

smorzamento aerodinamico max :

fattore di turbolenza :

$$v_{cr} = 5,8115 \text{ m/sec}$$

$$Re(v_{cr}) = 588900$$

lunghezza di eccitazione :

numero di Strouhal :

numero di Scruton :

stabilizz. aerodin. solo per $Sc > 10$

possibili solo smorzatori meccanici

vita nominale $V_n =$ anni **50**

uguale al periodo di ritorno $T_{R,0}$

$$y_{F,max} = 2^{0,5} \cdot [1 + [\arctan(0,7 \cdot (Sc / (4 \cdot \pi \cdot K_a))^{2,5})]^{1,4}] \cdot \sigma_y = \mathbf{0,0396} \quad \mathbf{0,0742}$$

$$\left(\frac{\sigma_y}{b}\right)^2 = c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2}$$

$$c_1 = \frac{a_L^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{Sc}{4 \cdot \pi \cdot K_a}\right)$$

$$c_2 = \frac{\rho \cdot b^2}{m_e} \cdot \frac{a_L^2}{K_a} \cdot \frac{C_c^2}{St^4} \cdot \frac{b}{h}$$

$$K_a = K_{a,max} \cdot C_I \quad K_a = K_{a,max} \cdot C_I$$

$$Sc = \frac{4\pi \cdot m \cdot \xi_{L,i}}{\rho \cdot b^2}$$

$$Sc = \frac{2 \cdot m_1 \cdot \delta_s}{\rho \cdot b_{Lj}^2}$$

valore sperimentale del numero di Scruton

$$L_j = 9,12 \text{ m}$$

$$St = 0,2 \quad \text{CNR-DT 207}$$

$$Sc = 12,5000 \quad \mathbf{12,5000}$$

$$Sc = \mathbf{12,5}$$

$$N = 6,4 \cdot 10^7 \cdot V_n \cdot n_1 \cdot \epsilon_0 \cdot (v_{cr}/v_0)^2 \cdot e^{-(v_{cr}/v_0)^2} = \mathbf{265060270} \text{ cicli}$$

$$(v_{cr}/v_0)^2 = 0,8190111 \quad \epsilon_0 = 0,3$$

forze di inerzia

50	h(z)	di (cm)	z _j (m)	A _i (cm ²)	m _{j,s} (kg)	m _{j,r} (kg)	Φ _{1,j}	F _{1,j} (N)	M _j (N.m)
		150,0	47,5	379,00	177,12	71,09	0,90	3838	
45		150,0		379,00					9595
	40,9		42,5		177,12	71,09	0,72	3072	
40		150,0		379,00					36465
			37,5		177,12	71,09	0,56	0	
35		150,0		379,00					71016
			32,5		177,12	71,09	0,42	0	
30		150,0		379,00					105568
	30,0		27,5		202,26	83,10	0,30	0	
25		200,0		504,67					140119
			22,75		204,66	85,60	0,21	0	
20,5		200,0		504,67					171215
			18		252,77	95,11	0,13	0	
15,5		200,0		631,46					205766
			13		278,13	95,11	0,07	0	
10,5		200,0		631,46					240318
			7,5		364,26	114,13	0,02	0	
4,5		200,0		758,51					281779
			2,25		296,07	85,60	0,00	0	
0		200,0		758,51					312875
			totale		2306,64	843,04		6910	312875

Le verifiche risultano così soddisfatte :

VERIFICA DI RESISTENZA ED A FATICA

per la verifica a fatica : $\Delta\sigma_{di} \leq \Delta\sigma_R' = \Delta\sigma_R / \gamma_{Mf}$ con N = **265060270** cicli

e con $\gamma_{Mf} =$ **1,35** (valori di γ_{Mf} : 1 - 1,15 - 1,25 - 1,35 - tab. 3.1 EN 1993-1-9)

RESISTENZE DI PROGETTO A FATICA								
DETTAGLIO STRUTTURALE	CATEGORIA EC3	LIMITI DI FATICA			RESISTENZA A FATICA $\Delta\sigma_R' < 1,5 \cdot f_{yt}$			
(vedi nota 1)	$\Delta\sigma_C$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_D$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_L$ (N/mm ²)	log a	log $\Delta\sigma_R$	$\Delta\sigma_R$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_R'$ (N/mm ²)	
giunto longitudinale	125 - 112	112	83	45	16,286	1,6572	45,42	45,0
giunto trasversale	112 - 90 - 80 - 71	90	66	36	15,786	1,5572	36,07	36,0
irrigidim. circonferenz.	112 - 90 - 80 - 71	71	52	29	15,286	1,4572	28,65	29,0
irrigidim. longitudinale	125 - 112 - 80	80	59	32	15,536	1,5072	32,15	32,0
bulloni e barre filettate	36* - prec.	36	23	15	13,835	1,167	14,69	15,0

GEOMETRIA		VERIFICA DI RESISTENZA						VERIFICA A FATICA		
QUOTA-DIAMETRO-BULL.		AZIONI PARALLELE ALLA DIREZIONE DEL VENTO				RESIST.		AZ. TRAS.	RES. LIM.	
50	h(z)	nb - di (cm)	ϕb - Ai (cm ²)	db - Wi (cm ³)	M _h (kNcm)	N _h (kN)	σ_{si} (N/mm ²)	σ_I (N/mm ²)	$\Delta\sigma_{di}$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_R'$ (N/mm ²)
	150,0						S.L.U.	EN-NTC	$\Delta\sigma = 2 \cdot \sigma_I $	EN-NTC
45	150,0		379,00	14213	1914	24,35	2,59	155,70	1,35	36,0
40,9		40 5.6	20 mm	1620 mm					4,22	15,0
40	150,0		379,00	14213	7599	48,70	8,90	155,70	5,13	36,0
			mm	mm						
35	150,0		379,00	14213	16922	73,05	18,79	155,70	9,99	36,0
		40 5.6	24 mm	1620 mm					11,57	15,0
30	150,0		379,00	14213	29752	97,40	32,13	155,70	14,85	36,0
30,0			mm	mm	29752	97,40	23,50			
25	200,0		504,67	25234	46204	125,40	28,37	145,15	11,11	36,0
		40 5.6	24 mm	2160 mm					11,56	15,0
20,5	200,0		504,67	25234	64393	153,87	39,08	145,15	13,57	36,0
			mm	mm						
15,5	200,0		631,46	31575	88355	188,00	42,45	155,60	13,03	36,0
		40 5.6	27 mm	2160 mm					12,34	15,0
10,5	200,0		631,46	31575	115925	224,61	55,31	155,60	15,22	36,0
			mm	mm						
4,5	200,0		758,51	37928	153073	271,54	60,44	160,79	14,86	36,0
			mm	mm						
0	200,0		758,51	37928	183561	308,98	72,24	162,70	16,50	29,0
NOTE :		nb = N° bulloni	ϕb = diam. bull.	db = ϕ ancor.			$\sigma_{si} / \sigma_{I,min}$	0,444	$\Delta\sigma_{di} / \Delta\sigma_R'$	0,569

CECM			CALCOLO DEL COEFF. λ PER LA FREQUENZA DEL 1° MODO		
ds/db	λ	α_0 / α	ds/db	ds/db	ds/db
0	5,32	0,5955	0,70	0,75	0,75
0,05	4,9	0,6472			
0,1	4,7	0,5955			
0,15	4,5	0,6571			
0,2	4,3	0,5955			
0,25	4,2	0,6612			
0,3	4,1	0,5955			
0,35	4	0,6635			
0,4	3,85	0,5527			
0,45	3,8	0,6270			
0,5	3,75	0,5527			
0,55	3,7	0,6281			
0,6	3,65	0,5862			
0,65	3,63	0,6567			
0,7	3,6	0,5862			
0,75	3,58	0,6574			
0,8	3,55	0,6122			
0,85	3,54	0,6794			
0,9	3,53	0,6122			
0,95	3,52	0,6797			
1	3,52				

$\lambda' =$	$\lambda'' =$	$\lambda =$
3,6	3,58	3,58

Nota 1 : TIPI DI GIUNZIONI

TIPO	CATEGORIA	DESCRIZIONE
G. LONGIT.	cat. 125	saldatura di testa con ripresa al rovescio
G. LONGIT.	cat. 112	sald. da un lato su controguida - superf. interna levigata
G. TRASV.	cat. 112	saldatura di testa I° classe con ripresa
G. TRASV.	cat. 90	saldatura di testa II° classe con ripresa
G. TRASV.	cat. 80	sald. da un lato su controguida - superf. interna levigata
G. TRASV.	cat. 71	saldatura da un lato con piatto di supporto e saldatura flangia
RINF. CIRC.	cat. 112	doppia saldatura d'angolo di qualità : t <= 12 mm
RINF. CIRC.	cat. 90	doppia saldatura d'angolo di qualità : t > 12 mm
RINF. CIRC.	cat. 80	doppia saldatura d'angolo normale : t <= 12 mm
RINF. CIRC.	cat. 71	doppia saldatura d'angolo normale : t > 12 mm
RINF. LONG.	cat. 125	doppia saldatura d'angolo di qualità
RINF. LONG.	cat. 112	doppia saldatura d'angolo normale
RINF. LONG.	cat. 80	doppia saldatura d'angolo - sollecitazione tangenziale
FLANGIA	cat. 36*	bulloni e barre filettate non pre-tese (minima resist. a fatica)
FLANGIA	cat. prec.	per bulloni precaricati Res. Lim. = $\Delta\sigma_{di} \cdot \gamma_{Mf} = \min. precarico$

La verifica in condizioni sismiche è riportata nel foglio che segue :

VERIFICA SISMICA S.L.U.											
metodo di calcolo		2		resistenza limite secondo NTC 2008							
secondo NTC 2008		1,000									
coeff. sic. permanenti		1,000									
coeff. sic. sisma		1,000									
50	h(z)	di (cm)	z _j (m)	x / MASSA	COEFF.DIST.	COEFF. SIS.	f / FORZA	MOMENTO	TENSIONE	RES. LIM.	
				m ton	γ _j	Ks	cm kN	kN.m	σ _{si} (N/mm ²)	σ _k (N/mm ²)	
45	150,0	150,0	47,5	0,73	2,48	2,15	7,36	24,97	2,40	155,70	
40	150,0	150,0	42,5	0,62	2,48	1,92	5,53	97,25	8,13	155,70	
35	150,0	150,0	37,5	0,52	2,48	1,69	3,97	211,59	16,81	155,70	
30	150,0	150,0	32,5	0,42	2,48	1,47	2,70	362,72	28,09	155,70	
30,0	150,0	150,0	27,5	0,33	2,85	1,24	1,96	362,72	28,09	155,70	
25	200,0	200,0	27,5	0,33	2,85	1,24	1,96	547,56	24,18	145,15	
20,5	200,0	200,0	22,75	0,24	2,90	1,03	1,17	741,46	32,43	145,15	
15,5	200,0	200,0	18	0,16	3,48	0,81	0,72	984,15	34,15	155,60	
10,5	200,0	200,0	13	0,09	3,73	0,59	0,30	1250,38	43,16	155,60	
4,5	200,0	200,0	7,5	0,03	4,78	0,34	0,08	1591,31	45,54	160,79	
0	200,0	200,0	2,25	0,00	3,82	0,10	0,00	1855,48	52,99	162,70	
Q = Σ [m _j] =				31,50 t		TOTALE		59,07	1855,48	σ _{si} /σ _{k,min}	0,326
S = Σ [m _j · z _j] =				697 t.m		freccia		23,8 cm	con spettro di risposta allo S.L.U.		
J = Σ [m _j · z _j ^k] =				21903 t.m ^k		espon. k		2,0			

ordinata spettro di progetto

fattore di correzione

coefficiente di struttura q

coeff. di distribuzione (1/2/3)

periodo fondamentale sec

coeff. sismico globale

0,191 = Sd(T1)/g

1 = lamda

1 = q

1 = c_d

1,308 = T₁

C = 0,191 S.L.U.

γ_j = z_j · Q/S per c_d = 1

γ_j = z_j^k · Q/J per c_d = 2

γ_j = 1 per c_d = 3

$T_1 = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\sum m_j \cdot x_j^2}{[\sum (m_j \cdot x_j) \cdot g]}}$ >=

VERIFICA DELLA SEZIONE DI BASE

Carico massimo alla base della ciminiera :

p.p ciminiera , scala e ballatoi : 226,28 kN

p.p. refrattario : 82,70 kN

strutture accessorie : 50,00 kN

N_b = 358,98 kN

W_b = 37928 cm³ σ = γ_G · N_b/A_b + γ_Q · M_b/W_b = 5,37 kN/cm² < 16,27 kN/cm²

SPOSTAMENTO MASSIMO PER EFFETTO DELLE FORZE SISMICHE

f_{max} = 23,79 cm spostamento indotto dall'azione sismica relativa allo S.L.U.

J_{eq} = 2540874 cm⁴

SISTEMA DI ANCORAGGIO AD ANELLO IRRIGIDITO

critero di calcolo : Max Zar and Shih-Lung Chu
 estratto da : Chimneys - sec. 26

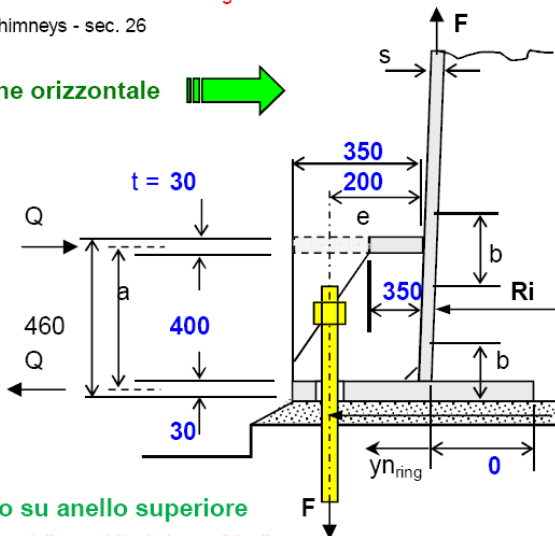
metodo di calcolo D.M. 14/01/2008

stato limite ultimo

azione orizzontale 

acciaio lamiera S 275 - EN 10025

ancor. su anello superiore (S,N) **S**



numero bulloni :	$n_b =$	32	(mult. di 4)
distanza bulloni :	$i_b =$	237	mm
	$R_i =$	1000	mm
	$s =$	12	mm
	$D_e =$	2024	mm
	$D_b =$	2424	mm

ancoraggio su anello superiore

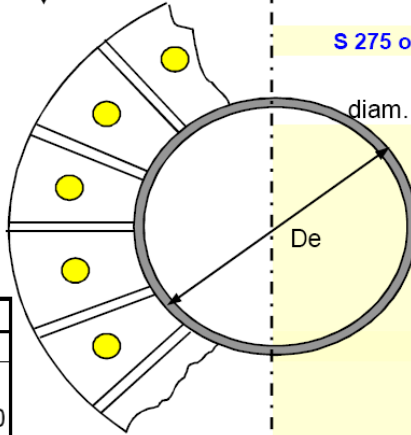
n.b. azioni orizzontali assorbite da barre di taglio

SOLLEC. CICLICHE	
N° CICLI	265060270
M =	312,88 kNm
N =	308,98 kN

azioni allo S.L.U.

SOLLEC. STATICHE	
M =	1855,48 kNm
N =	308,98 kN

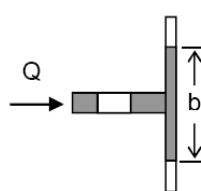
lamiere	bulloni	
tens. N/mm ²	trazione	punzonam.
$f_y = 265$	$F_{t,Rd} =$ kN	$B_{p,Rd} =$ kN
$f_u = 430$	311,24	1439,50



BULLONI	32 M	40
	materiale	S 275
	coeff. di sicur. $\gamma_{M2} =$	1,25
S 275 o equivalente	$f_{ub} =$	430
	$f_{yb} =$ N/mm ²	275
	diam. medio dado : $d_m =$ mm	74
verifica a fatica		
	$A_{res,min} =$	10,05 cm ²
	$\Delta\sigma_d =$	6,44 N/mm ²
	$\Delta\sigma_R =$	13,95 N/mm ²
	precarico min. =	14 kN
	precarico max. =	303 kN
verifica di resistenza		
	$F_{max} =$	86 kN
	$F_{t,Rd} =$	311 kN

BULLONI E	CATEGORIA DETT.	N/mm ²	LIMITI DI FATICA	N/mm ²	RESISTENZA A FATICA	N/mm ²
BARRE FILETT	50 . Ks =	46,53	34,292789	18,826741	$\gamma_{Mf} =$ 1,35	18,83 13,95

AZIONE RADIALE SULL'ANELLO DI ANCORAGGIO :



$$b = 1,56 \cdot \sqrt{R \cdot s} + t = (\text{in}) = \boxed{201} \text{ mm}$$

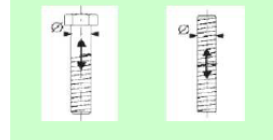
$$F = 4 \cdot M / (n_b \cdot D_b) - N / n_b = \boxed{86,03} \text{ kN}$$

$$Q = F \cdot e / a = \boxed{40,01} \text{ kN}$$

$$M_{ring} = C \cdot Q \cdot D_b / 2 = \boxed{2216,23} \text{ kNcm}$$

$$y_{nring} = \boxed{147} \text{ mm} \quad W_{yring} = \boxed{773} \text{ cm}^3$$

$$\sigma_{max} = \boxed{28,67} \text{ N/mm}^2 < f_{yd} = 240,91 \text{ N/mm}^2$$



n_b	C
4	0,165
8	0,191
12	0,217
16	0,258
20	0,305
24	0,355
28	0,406
32	0,457
36	0,51
40	0,563
44	0,616
48	0,67
52	0,724
56	0,778
60	0,832

AZIONE LOCALE SULL'ANELLO DI ANCORAGGIO :

interasse irrigidimenti : $i_s = \boxed{237} \text{ mm}$

momento flettente locale : $M_l = \boxed{254,85} \text{ kNcm}$

modulo di resistenza locale : $W_l = \boxed{46,14} \text{ cm}^3$

$$\sigma_{loc} = \boxed{55,23} \text{ N/mm}^2 < 240,91 \text{ N/mm}^2$$

Anelli di rinforzo e flange bullonate sono automaticamente verificate nei fogli che seguono . La coppia di serraggio minima dei bulloni deve essere prescritta a disegno onde evitare allentamento per sollecitazione ciclica.

PRECARICO MASSIMO DEI BULLONI DEI GIUNTI A FLANGIA								
QUOTA m	N° BULLONI nb	DIAM. BULL. φ = mm	AREA RES. mm ²	RESISTENZA N/mm ²	COEFF. ATTR. K=0,17-0,21	PRECARICO MAX (kN)	COPPIA SERR. N.m	INT. BULL. >3φ mm
40	40	20	245	500	0,177	86	304	127
35	0	0	0	0	0,177	0	0	
30	40	24	353	500	0,177	124	525	127
25	0	0	0	0	0,174	0	0	
20,5	40	24	353	500	0,174	124	516	170
15,5	0	0	0	0	0,177	0	0	
10,5	40	27	447	500	0,177	156	747	170
4,5	0	0	0	0	0,177	0	0	
0	32	40	1005	311	0,17	303	2058	237

QUOTA m	ECC. BULL. e = mm	SOLLECIT. MAX (kN)	INT. IRRIGID. i = mm	SP. FLANGIA t = mm	Mf locale kNcm	W locale cm ³	σ loc. N/mm ²	σ _K N/mm ²
40	52	4,22	127	25	6,71	13,3	5,06	29,00
35		0,00						
30	52	11,57	127	25	18,40	13,3	13,88	29,00
25		0,00						
20,5	72	11,56	170	25	24,52	17,7	13,87	29,00
15,5		0,00						
10,5	70	12,34	170	25	26,17	17,7	14,81	29,00
4,5		0,00						

VERIFICA OVALIZZAZIONE INVOLUCRO NON IRRIGIDITO

frequenza fondamentale di ovalizzazione : $n_{0,i} = 0,49 \cdot t/b^2 \cdot [E/\rho_s]^{0,5} = 2534 \cdot t/b^2 = \text{Hz}$ 8,8206

velocità critica di ovalizzazione : criterio 1 $v_{0,i} = n_{0,i} \cdot b / (\Omega \cdot St)$ in cui $\Omega = \text{modo di ovalizzazione}$

$\Omega = 1,2,3,4$ 1 *il modo più probabile è il modo 2*
 $v_{0,i} = \frac{66,8602}{1} \text{ m/sec}$

velocità critica di ovalizzazione : criterio 2 $v_{0,i} = n_{0,i} \cdot b \cdot [25,66 \cdot \rho_s/\rho \cdot t/b \cdot \xi_{0,i} + 0,3] =$ 60,8674

verifica di resistenza all'ovalizzazione : $v_{0,i,\text{min}} \geq v_{m,i,\text{TR}}$ **60,8674** < 38,766 m/sec
 l'involucro non richiede anelli di rinforzo circolari

Si noti come per il **modo di ovalizzazione 1** (criterio1) e per il criterio 2 non sia necessario predisporre anelli di rinforzo.

Lascio un'ultimo dubbio al lettore...come si comporta il dissipatore meccanico nei confronti dell'azione sismica ?...è efficace anche contro le azioni sismiche o la massa deve essere **appropriatamente ri-accordata** ???... al normatore l'ardua sentenza !!!