



# **CAMINO AUTOPORTANTE IN ACCIAIO SENZA DISTACCO VORTICI**

**Domenico Leone**

**fare sismica**  **APPUNTI**



# CAMINO AUTOPORTANTE IN ACCIAIO SENZA DISTACCO VORTICI

---

**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 SMS-Demag 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 di 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.*

*E' autore di varie pubblicazioni tecniche e dei volumi "Eurocodice 3" edito da Sistemi Editoriali, "Lamiere grecate e pannelli coibentati" edito da Mediasoft s.a.s., "Componenti strutturali in acciaio" e "Elementi di completamento strutturale in acciaio" editi da Wolters Kluwer Italia nonché di numerosi programmi di calcolo automatico, basati sulle direttive europee e nazionali, 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 Stadata s.r.l.)*

*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](http://www.stadata.com)

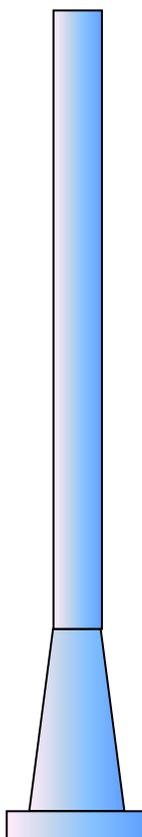


## CAMINO AUTOPORTANTE IN ACCIAIO SENZA DISTACCO VORTICI

In questo articolo pubblico volentieri un calcolo di verifica di un camino autoportante a base tronco-conica e sviluppo cilindrico eseguito da un utente del programma “Chimney” (SAITU – [www.stadata.com](http://www.stadata.com)) dal quale si evidenzia come camini di modesta altezza e alta “rigidezza” non vengono sollecitati dinamicamente dall’effetto del distacco dei vortici generato dalla pressione/depressione del vento poiché tale effetto dipende dalla velocità critica di eccitazione rapportata o alla velocità media del vento, opportunamente maggiorata, nella zona di eccitazione. In questa situazione non sono richiesti particolari accorgimenti (stabilizzatori aerodinamici o smorzatori meccanici a massa accordata) atti a ridurre fenomeni di risonanza e sollecitazioni cicliche di fatica. Inoltre il fenomeno della ovalizzazione della sezione circolare può essere trascurato.

Il calcolo si riferisce ad un camino di altezza 18 m e con base tronco-conica fino ad una altezza di m 4,35. Il diametro di base è m 1,97 mentre la parte cilindrica ha un diametro di m 1,654. Lo spessore è di 8 mm fino alla quota di m 8,35 m e si riduce a 6 mm da questa quota fino alla sommità. La temperatura del fasciame può raggiungere 200°C. Non è previsto rivestimento refrattario interno.

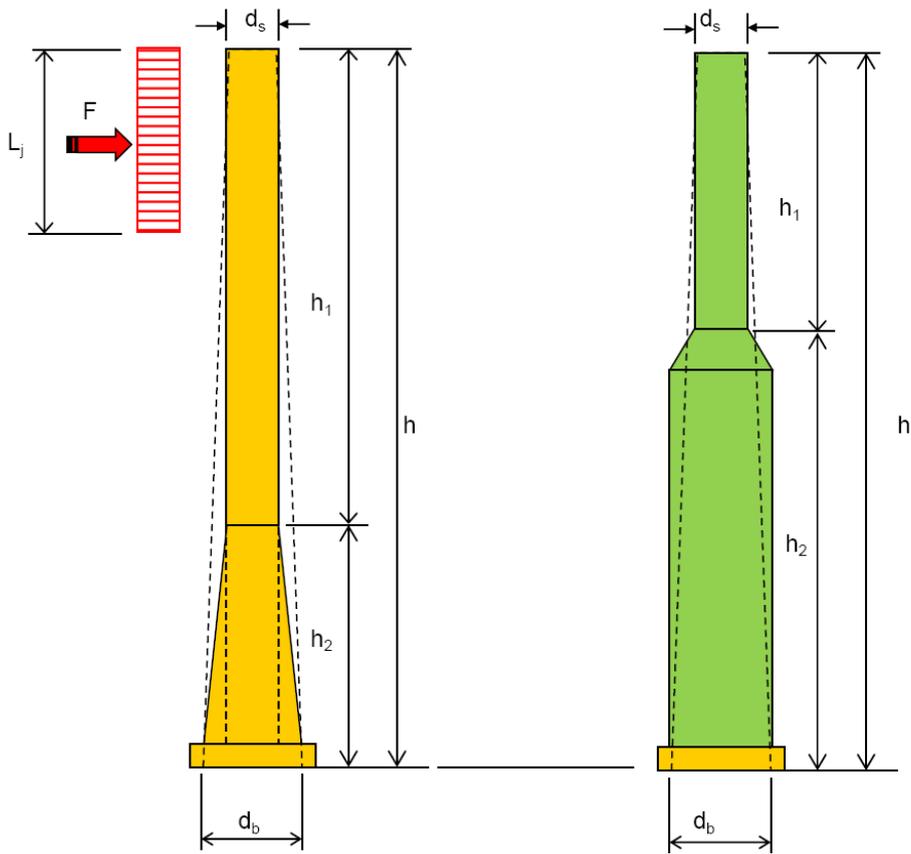
Lo schema seguente illustra la forma del camino



Di seguito si riporta il calcolo completo come eseguito dal progettista con l’uso del programma “Chimney” accompagnato da brevi commenti.

CAMINO AUTOPORTANTE

**CIMINIERA AUTOPORTANTE IN ACCIAIO**  
VERIFICHE CON SISMA E CON VENTO  
< LOCALITA' >  
ANALISI ELASTICA GLOBALE  
**RELAZIONE TECNICA DI PROGETTO**



PROGETTISTA

Ing. ....

## DATI DI PROGETTO

## TIPOLOGIA

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

Non è previsto isolamento termico esterno.

La ciminiera è composta da una base tronco-conica e da un tratto cilindrico il diametro alla base è di m 1,97

Il materiale previsto è Acciaio del tipo :

1 - S235 EN 10025 equivalente a :  
2 - \_\_\_\_\_

con le seguenti caratteristiche meccaniche :

- modulo di elasticità : 204000 N/mm<sup>2</sup>  
- tensione di rottura : 360 N/mm<sup>2</sup>  
- tensione di snervamento : 235 N/mm<sup>2</sup> a temperatura ambiente

- tensioni di snervamento per il materiale base ed equivalente :

a temperatura ambiente : 235 N/mm<sup>2</sup>  
alla temperatura di 200 °C 150 N/mm<sup>2</sup>

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

**1**

*ciminiera in area aperta il cui crollo non causa danni a cose e persone*

Le azioni di progetto comprendono :

- peso proprio medio della ciminiera : 295 daN/m  
- peso proprio strutture di servizio : **100** daN/m  
- peso proprio del rivestimento refrattario : 0 daN/m  
- temperatura di progetto della lamiera : 200 °C  
- azione del vento per una velocità di riferim. di : 28 m/sec

## - azione sismica

	NTC 2008		zona	<b>1</b>
	spettro →	<b>0,067</b>	0,080	0,345 4,277
Fo =	<b>2,269</b>	suolo tipo	<b>C</b>	S = 1,500
Tc* =	<b>0,423</b>	Cc =	1,395	Tb = sec 0,197
ag =	<b>0,231</b>	ag/g =	0,024	Tc = sec 0,590
St =	<b>1</b>	coeff. di struttura	q = 1	Sd(T) /g = <b>0,067</b>

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

ITALIANE

[selezionare paese](#)

**ITALY**

La verifica in condizioni sismiche viene eseguita anche se, data la modesta massa del camino, l'azione sismica non risulta dimensionante rispetto all'azione del vento.

## ANALISI DELL'AZIONE DEL VENTO SULLA CIMINIERA

## Caratteristiche della ciminiera :

			parte sup.		parte inf.	
altezza totale :	$h =$	18 m	$h_1 =$	13,65 m	$h_2 =$	4,35 m
diametro int. di base :	$d_b =$	197 cm	$A_b =$	497,13 cm <sup>2</sup>	$J_b =$	2431285 cm <sup>4</sup>
spessore di base :	$s_b =$	8 mm				
diametro int. di somm. :	$d_s =$	165,4 cm	$A_s =$	312,90 cm <sup>2</sup>	$J_s =$	1077807 cm <sup>4</sup>
spessore di sommità :	$s_s =$	6 mm				
spessore del refrattario :	$s_r =$	mm	peso spec. del refr. =			kN/m <sup>3</sup>
materiale del mantello :	$E =$	20400 kN/cm <sup>2</sup>	$T =$	°C	$p_s =$	80 kN/m <sup>3</sup>
S235 EN 10025	$f_y =$	23,5 kN/cm <sup>2</sup>	200		$f_{yt} =$	15 kN/cm <sup>2</sup>
$\gamma_M = 1,1$	$\sigma_{d207} =$	21,36 kN/cm <sup>2</sup>			$\sigma_{dr} =$	10,50 kN/cm <sup>2</sup>

## Sollecitazione parallela alla direzione del vento :

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



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

$$C_{\eta} = C_{r,0} \times \Psi_{\lambda}$$

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

$\Psi_{\lambda}$  = 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  $\pm 5\%$

$$C_d = \text{coeff. dinamico} = \frac{1 + 2 \cdot g_D \cdot I_V(z_e) \cdot \sqrt{Q_0^2 + R_x^2}}{1 + 7 \cdot I_V(z_e)} = \begin{matrix} \text{EN 1991-1-4} & \text{CNR-DT 207} \\ 0,9817 & 0,9898 \end{matrix}$$

altezza equivalente :

$$z_e = 0,6 \cdot h \geq z_{min} = 10,8 \text{ m} < 300 \text{ m}$$

intensità della turbolenza :

$$I_V(z_e) = k_r / [C_t(z_e) \cdot C_r(z_e)] = 0,2852$$

fattore di categoria del terreno :

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

coefficiente di topografia :

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

coefficiente di rugosità :

$$C_r(z_e) = 0,77 \text{ da diag. press. vento}$$

fattore di picco :

$$g_D = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot t) + 0,6} / \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot t)} = \begin{matrix} \text{EN 1991-1-4} & \text{CNR-DT 207} \\ 3,9306 & 3,9457 \end{matrix}$$

tempo medio di applicaz. di  $v_{ref}$  :

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

frequenza prevista :

$$v = \sqrt{\frac{v_0^2 \cdot Q_0^2 + n_1^2 \cdot R_x^2}{Q_0^2 + R_x^2}} \quad v = \text{Hz} \begin{matrix} \text{EN 1991-1-4} & \text{CNR-DT 207} \\ 2,0449 & 2,2225 \end{matrix}$$

freq. di raffica per struttura rigida :

$$v_0 = \frac{v_m(z_e)}{Li(z_e) \cdot (1,11 \cdot S^{0,615})} = 0,3007 \text{ Hz}$$

$v_m(z_e) = v_{ref} \cdot C_t(z_e) \cdot C_r(z_e) = 21,6 \text{ m/sec}$

per  $T_R = T_{R0} = V_n = \text{anni } 50$

scala di lungh. integr. della turbol.:

$$Li(z_e) = 300 \cdot (z_e / 200)^{\alpha} = 60,25 \text{ per } \alpha = 0,5500$$

diametro medio :  $b_m = 170,47 \text{ cm}$

$$S = \frac{0,46 \cdot (b+h) + 10,58 \cdot \sqrt{b \cdot h}}{Li(z_e)} = 1,1232 \quad b = [(db+ds)/2 \cdot ht + ds \cdot hc]/h$$

diametro cilindro :  $b = 166,60 \text{ cm}$

parte di risposta di fondo :

$$Q_0^2 = 1 / (1 + 0,9 \cdot [(b+h) / Li(z_e)]^{0,65}) = \begin{matrix} \text{EN 1991-1-4} & \text{CNR-DT 207} \\ 0,6923 & 0,6923 \end{matrix}$$

parte di risposta risonante :

$$R_x^2 = \pi^2 / 2\delta \cdot R_N \cdot R_h \cdot R_b = \begin{matrix} \text{EN 1991-1-4} & \text{CNR-DT 207} \\ 0,0576 & 0,0706 \end{matrix}$$

Il calcolo del coefficiente dinamico è eseguito sia in base alla norma EN 1991-1-4 sia in base al documento nazionale CNR-DT 207 per un **utile confronto tra criteri diversi**.

CAMINO AUTOPORTANTE

decr. log. per smorzam. fondam. :  $\delta = \delta_d + \delta_s + \delta_a$   $\delta = \boxed{0,0177}$   $\xi = \boxed{0,0029}$   
 secondo CNR-DT 207  $\delta = \xi$   
 $\xi = \text{smorzamento relativo critico}$   
 $\xi = \xi_s + \xi_a + \xi_d$   
 $\xi_a = \frac{c_{RX} \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_e)}{4 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot m_e}$   
 massa equiv. p.u.l. del tratto  $h_3$  :  $h_3 = m \cdot 6,00$   $m_e = \boxed{250,32}$  kg/m  
 funzione di densità spettrale :  $R_N = \frac{6,8 \cdot N_x}{(1+10,2 \cdot N_x)^{5/3}}$   $R_N = \boxed{0,0188}$   $\boxed{0,0187}$   
 secondo CNR-DT 207  $R_N = S_D$   
 $S_D = \frac{6,868 \cdot n_D \cdot L_v(z_e) / v_m(z_e)}{[1+10,302 \cdot n_D \cdot L_v(z_e) / v_m(z_e)]^{5/3}}$   
 $N_x = n_1 \cdot Li(z_e) / v_m(z_e) = \boxed{20,3797}$   $n_1 = \text{Hz} \boxed{7,31}$   
 EN 1991-1-4 CNR-DT 207  
 funz. di ammittanza aerodinamica  $R_h = 1/\eta_h - 1/2\eta_h^2 \cdot (1-e^{-2\eta_h}) = \boxed{0,0351}$   $\boxed{0,0402}$   
 funz. di ammittanza aerodinamica  $R_b = 1/\eta_b - 1/2\eta_b^2 \cdot (1-e^{-2\eta_b}) = \boxed{0,3118}$   $\boxed{0,3463}$   
 secondo CNR-DT 207 con  $n_D = n_1$   
 $\eta_h = 4 \cdot \frac{n_D \cdot h}{v_m(z_e)}$   $\eta_b = 4 \cdot \frac{n_D \cdot b}{v_m(z_e)}$   
 $\eta_h = 4,6 \cdot N_x \cdot h / Li(z_e) = \boxed{28,0085}$   $\eta_h = \boxed{24,3552}$   
 $\eta_b = 4,6 \cdot N_x \cdot b / Li(z_e) = \boxed{2,5923}$   $\eta_b = \boxed{2,2542}$   
 frequenza naturale del 1° modo sez. troncoconica variabile linearm.  $n_1 = \lambda/2\pi \cdot \sqrt{E \cdot J_b / m_b \cdot h^4} = \boxed{\phantom{000}} \text{ Hz}$   $\lambda = \boxed{3,54}$   
 sez. conico-cilindrica (EC1-1-4 & F.2)  $n_1 = \varepsilon_1 \cdot b / h^2 \cdot \sqrt{W_s / W_t} = \boxed{7,31} \text{ Hz}$  per  $d_s/d_b = 0,84$



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

$C_{\eta} = C_{rD} \cdot \Psi_{\lambda}$   $\lambda = \boxed{10,8043}$   $\lambda = \kappa \cdot h/b$  CNR-DT 207  
 $\Psi_{\lambda} = \boxed{0,7084}$  EN 1991-1-4 e CNR-DT 207  
 $C_r(z_e) = \boxed{0,461}$   $k = \boxed{0,05}$  mm (metallo lucido)

18	h(z)	di (cm)	fl - q (kg/m)	s(mm) / b(cm)	v <sub>m</sub> (z <sub>e</sub> )	J (cm <sup>4</sup> ) - Re	k/b	C <sub>rD</sub>	C <sub>η</sub>
		165,4	250,32	166,6	24,50	2720647	3,001E-05	0,6598316	0,467
15,5		165,4		6					
				166,6	23,67	2629288	3,001E-05	0,6570873	0,465
12,85		165,4		6					
	h <sub>3</sub>								
	12,0	165,4	250,32	166,6	22,72	2523823	3,001E-05	0,6537612	0,463
10,35		165,4		6					
				166,6	21,60	2399084	3,001E-05	0,649586	0,460
8,35		165,4		6					
				166,8	20,23	2249113	2,998E-05	0,6440934	0,456
7,35		165,4		8					
				167,0	20,23	2251809	2,994E-05	0,6441128	0,456
6,35		165,4		8					
				167,0	20,23	2251809	2,994E-05	0,6441128	0,456
5,35		165,4		8					
				167,0	20,23	2251809	2,994E-05	0,6441128	0,456
4,35		165,4		8					
	4,4	165,4	raccordo	174,1	20,23	2347312	2,872E-05	0,6447782	0,457
2,4		179,6		8					
				189,9	20,23	2560358	2,633E-05	0,6461432	0,458
0		197,0	397,70	8					

La frequenza del 1° modo risulta elevata (camino rigido) che anticipa una alta velocità critica. Il coefficiente di forza è calcolato per superficie in acciaio lucida.

CAMINO AUTOPORTANTE

FORZE - SOLLECITAZIONI LUNGO LA CIMINIERA PARALLELE ALLA DIREZIONE DEL VENTO											
CALCOLO SECONDO NORME EN o NTC 2008						$Fw_j = q_{ref} \times C_{e(z_j)} \times C_d \times C_{fj} \times A_j$					
$\gamma_G = 1$		$\gamma_Q = 1,2$									
LIVELLO	DIAM. INT.	QUOTA NODO		$f_{max}$	$\phi$ EST.	AREA	PRESSIONE	FORZA	MOMENTO	PESO	
18	h(z)	di (cm)	Z	$z_j$ (m)	f (cm)	b (cm)	$A_j$ (m <sup>2</sup> )	p(z <sub>j</sub> ) (kN/m <sup>2</sup> )	Fw <sub>j</sub> (kN)	M <sub>n</sub> (kNm)	N <sub>n,tot</sub> (kN)
		165,4	18	16,75	0,10		4,17	0,49	2,05		
15,5		165,4	z			166,6				2,56	8,758
			18	14,18	0,08		4,41	0,47	2,08		
12,85		165,4	z			166,6				10,74	18,042
			12	11,6	0,05		4,17	0,43	1,78		
10,35		165,4	z			166,6				23,28	26,800
			10	9,35	0,02		3,33	0,40	1,33		
8,35		165,4	z			166,6				36,42	33,806
			8	7,85	0,01		1,67	0,37	0,61		
7,35		165,4	z			166,8				43,96	37,729
			8	6,85	0,01		1,67	0,37	0,61		
6,35		165,4	z			167,0				52,11	42,070
			8	5,85	0,00		1,67	0,37	0,61		
5,35		165,4	z			167,0				60,87	46,412
			8	4,85	0,00		1,67	0,37	0,61		
4,35		165,4	z			167,0				70,23	50,753
4,4		165,4	4	3,375	0,00		3,39	0,37	1,24		
2,4		179,6	z			174,1				90,30	59,497
			2	1,2	0,00		4,56	0,37	1,66		
0		197,0				189,9				118,48	71,022
		freccia in sommità		0,3	cm	tot. alla base		12,58	118,48	71,022	

VERIFICA DELLA SEZIONE DI BASE

Carico massimo alla base della ciminiera :	Tensione di progetto : (EN-NTC)
p.p. ciminiera , scala e ballatoi : 71,02 kN	$\sigma_{im} = X \cdot f_{yd}$ kN/cm <sup>2</sup>
p.p. refrattario : 0,00 kN	X = 0,8275755
strutture accessorie ( brancetto ingresso) : 1,00 kN	X . f <sub>yd</sub> = 11,285 kN/cm <sup>2</sup>
N <sub>b</sub> = 72,02 kN	
W <sub>b</sub> = 24484	
$\sigma = \gamma_G \cdot N_b / A_b + \gamma_Q \cdot M_b / W_b =$	<b>0,73</b> kN/cm <sup>2</sup> < 11,29

SPOSTAMENTO MASSIMO PER EFFETTO DELLE FORZE DI PRESSIONE

f<sub>max</sub> = 0,28 cm (calcolata come freccia statica sotto l'azione delle forze Fw<sub>j</sub>)  
 J<sub>e</sub> = 1695575 cm<sup>4</sup> (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.h (Z<sub>e</sub>) e per una scabrosità equivalente k come definita per il calcolo di C<sub>f</sub> (pag. prec.).

$$f_{max} = \frac{\Phi_{1,x}(z) \cdot \rho \cdot b \cdot C_f \cdot v_m^2(z_e) \cdot [1 + 7 \cdot \ln(z_e)] \cdot C_d \cdot K_x}{2 \cdot m_1 \cdot (2\pi \cdot n_1)^2} = \mathbf{0,19} \text{ cm}$$

b = b(z<sub>e</sub>) = 1,67 m

per :  $K_x = \frac{(2 \cdot \zeta + 1) \cdot [(\zeta + 1) \cdot (\ln(z_e/z_0) + 0,5) - 1]}{(\zeta + 1)^2 \cdot \ln(z_e/z_0)} = 1,7442$  dove :  $\zeta = 2$  per ciminiera  
 $C_f(z) = 1$   
 $z_0 = 0,3$

Tensioni e deformazioni nel piano dell'azione statica del vento hanno valori molto bassi rientrando ampiamente nei valori ammissibili.

CAMINO AUTOPORTANTE

EFFETTO DELLE AZIONI DI ECCITAZIONE DEI VORTICI

FORZE DI INERZIA PERPENDICOLARI ALLA DIREZIONE DEL VENTO - METODO ARMONICO

$$F_{1,j} = m_j \cdot (2\pi \cdot n_1)^2 \cdot \Phi_{1,j} \cdot y_{F,max} \cdot C_{TR,j} \quad \text{kg.m/sec}^2 \quad \lambda = h/b = 10,56$$

$m_j$  = massa vibrante nel nodo  $j$   $m_j = m_{j,s} + m_{j,r}$   
 $n_1$  = frequenza naturale del 1° modo  $C_{TR,j} = 0$   
 $\Phi_{1,j} = (z/h)^{0,5}$   $\zeta = 2$  → per ciminiere  $V_{mL,TR} = 27,435$  m/sec

ampiezza max. di vibraz. alla  $v_{cr}$   $y_{F,max} = b_{L,j} \cdot K_w \cdot K \cdot C_{lat} \cdot 1/St^2 \cdot 1/Sc = m$  **0,4613** **0,4405**

fattore di lungh. 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**  $\leq 0,6$

fattore di forma modale :  $\alpha = 1,0000$   $K = 0,13$   
 coeff. di forza eccitante aerodin. :  $C_{lat,0} = 0,2441349$   $C_{lat} = f(v_{cr}/v_{m,L,j}) = 0,2441349$   
 numero di Strouhal :  $St = 0,2$  **CNR-DT 207**  
 numero di Scruton :  $Sc = 2 \cdot m_1 \cdot \delta_s / (\rho \cdot b_{L,j}^2) = 1,7233$  **1,8047**

smorzatore elicoidale ?  no

$b_{L,j}$  = diametro fond. riferito a 5/6 h  
 procedim. iterativo :  $b_{L,j} = 1,670$   $L_j/b_{L,j} = 8,115$   $L_j = 13,55$  L di eccitaz.  
 $L_j/b_{L,j} = 8,115$   $L_j = 13,55$   $b_{L,j} = 1,670$

CNR :  $v_{cr} < v_{m,L,j}$  per  $T_R = 10 \cdot T_{R0}$   
 EN :  $v_{cr} < 1,25 \cdot v_{m,L,j}$   
**NO distacco vortici**  
 $v_{cr,i} = \frac{n_{L,i} \cdot b}{St}$

$v_{cr} = 61,0109$  m/sec  $Re(v_{cr}) = 6792549$   
 $z_{L,j} = 11,225$  m  $C_f(z_{L,j}) = 1,00$   
 $v_{m,L,j} = 22,72$  m/sec  $C_f(z_{L,j}) = 0,81$   
 $y_{F,j} = 0,4613319$   $v_{cr}/v_{m,L,j} = 2,6849265 < 0,83$   
 $y_{F,j}/b_{L,j} = 0,2762466 > 0,1$

$N =$  numero cicli di sollecitazione  
 vita nominale  $V_n =$  anni **50**  
 uguale al periodo di ritorno  $T_{R,0}$   
 $N = 6,4 \cdot 10^7 \cdot V_n \cdot n_1 \cdot \varepsilon_0 \cdot (v_{cr}/v_0)^2 \cdot e^{-10 \cdot (v_{cr}/v_0)^2} = 10000 <$  cicli min.  
 $(v_{cr}/v_0)^2 = 180,22076$   $\varepsilon_0 = 0,3$

forze di inerzia									
18	h(z)	di (cm)	$z_j$ (m)	$A_j$ (cm <sup>2</sup> )	$m_{j,s}$ (kg)	$m_{j,r}$ (kg)	$\Phi_{1,j}$	$F_{1,j}$ (N)	$M_j$ (N.m)
		165,4	16,75	312,90	89,28	0,00	0,87	0	
15,5		165,4		312,90					0
	$L_j$		14,175		94,63	0,00	0,62	0	
12,85		165,4		312,90					0
			11,6		89,28	0,00	0,42	0	
10,35		165,4		312,90					0
			9,35		71,42	0,00	0,27	0	
8,35		165,4		312,90					0
			7,85		39,98	0,00	0,19	0	
7,35		165,4		417,71					0
			6,85		44,26	0,00	0,14	0	
6,35		165,4		417,71					0
			5,85		44,26	0,00	0,11	0	
5,35		165,4		417,71					0
			4,85		44,26	0,00	0,07	0	
4,35		165,4		417,71					0
	4,4		3,375		89,13	0,00	0,04	0	
2,4		179,6		453,31					0
			1,2		117,47	0,00	0,00	0	
0		197,0		497,13					0
<b>totale</b>					<b>723,97</b>	<b>0,00</b>		<b>0</b>	<b>0</b>

La velocità critica vale 61 m/sec che risulta maggiore sia della velocità media maggiorata secondo EN 1991-1-4 ( $1,25 \cdot v_{m,L,j}$ ) sia della velocità media per  $T_R = 10 \cdot T_{R0}$  secondo CNR-DT 207 ( $v_{mL,TR} \cdot C_t \cdot C_r$ )

In questa situazione non si ha distacco dei vortici nella zona di eccitazione  $L_j$  e quindi non viene considerata l'azione dinamica ciclica in direzione trasversale all'azione del vento sia per il metodo armonico che per il metodo spettrale di seguito riportato nella sua impostazione di calcolo.

CAMINO AUTOPORTANTE

EFFETTO DELLE AZIONI DI ECCITAZIONE DEI VORTICI

FORZE DI INERZIA PERPENDICOLARI ALLA DIREZIONE DEL VENTO - METODO SPETTRALE

$$F_{1,j} = m_j \cdot (2\pi \cdot n_1)^2 \cdot \Phi_{1,j} \cdot Y_{F,max} \cdot C_{TR,j} \quad \text{kg.m/sec}^2 \quad \lambda = h/b = 10,80$$

$m_j$  = massa vibrante nel nodo  $j$   $m_j = m_{j,s} + m_{j,r}$   
 $n_1$  = frequenza naturale del 1° modo  $C_{TR,j} = 0$   
 $\Phi_{1,j} = (z/h)^5$   $\zeta = 2 \rightarrow$  per ciminieri  $V_{m,i,TR} = 34$  m/sec

ampiezza max. di vibraz. alla  $v_{cr}$   $Y_{F,max} = 2^{0,5} \cdot [1 + \arctan(0,7 \cdot (Sc / (4 \cdot \pi \cdot K_a))^2)^{1,4}] \cdot \sigma_y =$  **0,8493** **0,8447**

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

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

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

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

smorzamento aerodinamico :

smorzamento aerodinamico max :

fattore di turbolenza :

$v_{cr} = 61,0109$  m/sec

$Re(v_{cr}) = 6792549$

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  $T_{R,0}$

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

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

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

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

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

$$C_I = 0,7000$$

$$C_c = 0,0100$$

$$L_j = 13,55 \text{ m}$$

$$St = 0,2$$

$$Sc = \frac{4\pi \cdot m \cdot v_{cr}}{\rho \cdot b^2} = 1,7233$$

$$Sc = \frac{2 \cdot m_1 \cdot \delta_s}{\rho \cdot b_{ij}^2} = 1,8047$$

valore sperimentale del numero di Scruton  $Sc =$

$$N = 6,4 \cdot 10^7 \cdot V_n \cdot n_1 \cdot \epsilon_0 \cdot (v_{cr}/v_0)^2 \cdot e^{-1/(v_{cr}/v_0)^2} = 10000 < \text{cicli min.}$$

$$(v_{cr}/v_0)^2 = 180,22076 \quad \epsilon_0 = 0,3$$

forze di inerzia

18	h(z)	di (cm)	z <sub>j</sub> (m)	A <sub>i</sub> (cm <sup>2</sup> )	m <sub>j,s</sub> (kg)	m <sub>j,r</sub> (kg)	Φ <sub>1,j</sub>	F <sub>1,j</sub> (N)	M <sub>j</sub> (N.m)
		165,4	16,75	312,90	89,28	0,00	0,87	0	
15,5		165,4		312,90				0	0
	L <sub>j</sub>		14,175		94,63	0,00	0,62	0	0
12,85		165,4		312,90				0	0
			11,6		89,28	0,00	0,42	0	0
10,35		165,4		312,90				0	0
			9,35		71,42	0,00	0,27	0	0
8,35		165,4		312,90				0	0
			7,85		39,98	0,00	0,19	0	0
7,35		165,4		417,71				0	0
			6,85		44,26	0,00	0,14	0	0
6,35		165,4		417,71				0	0
			5,85		44,26	0,00	0,11	0	0
5,35		165,4		417,71				0	0
			4,85		44,26	0,00	0,07	0	0
4,35		165,4		417,71				0	0
	4,4		3,375		89,13	0,00	0,04	0	0
2,4		179,6		453,31				0	0
			1,2		117,47	0,00	0,00	0	0
0		197,0		497,13				0	0
				<b>totale</b>	<b>723,97</b>	<b>0,00</b>		<b>0</b>	<b>0</b>

Di seguito viene riportata la verifica di resistenza che evidenzia un basso stato tensionale mentre la verifica a fatica non viene eseguita per l'assenza di azioni cicliche trasversali ( $N < 10000$ ).

CAMINO AUTOPORTANTE

VERIFICA DI RESISTENZA ED A FATICA

per la verifica a fatica :  $\Delta\sigma_{dl} \leq \Delta\sigma_R' = \Delta\sigma_R/\gamma_{Mr}$  con  $N = 10000 <$  cicli min.  
 e con  $\gamma_{Mr} = 1,15$  (valori di  $\gamma_{Mr}$  : 1 - 1,15 - 1,25 - 1,35 - tab. 3.1 EN 1993-1-9)

RESISTENZE DI PROGETTO A FATICA

DETTAGLIO STRUTTURALE (vedi nota 1)	CATEGORIA EC3 $\Delta\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	LIMITI DI FATICA		RESISTENZA A FATICA $\Delta\sigma_R' < 1,5 \cdot f_{yt}$				
		$\Delta\sigma_p$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\Delta\sigma_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	log a	log $\Delta\sigma_R$	$\Delta\sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\Delta\sigma_R'$ (N/mm <sup>2</sup> )	
giunto longitudinale	125 - 112	125	93	51	12,601	2,867	736,21	225,0
giunto trasversale	112 - 90 - 80 - 71	112	83	45	12,451	2,817	656,15	225,0
irrigidim. circonferenz.	112 - 90 - 80 - 71	112	83	45	12,451	2,817	656,15	225,0
irrigidim. longitudinale	125 - 112 - 80	125	93	51	12,601	2,867	736,21	225,0
bulloni e barre filettate	36* - prec.	36	23	15	11,101	2,367	232,81	232,81

GEOMETRIA			VERIFICA DI RESISTENZA						VERIFICA A FATICA	
QUOTA-DIAMETRO-BULL.			AZIONI PARALLELE ALLA DIREZIONE DEL VENTO				RESIST.		AZ. TRAS.	RES. LIM.
18	h(z)	nb - di (cm)	fb - Ai (cm <sup>2</sup> )	db - Wi (cm <sup>2</sup> )	M <sub>h</sub> (kNm)	N <sub>h</sub> (kN)	$\sigma_{dl}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_I$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\Delta\sigma_{dl}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\Delta\sigma_R'$ (N/mm <sup>2</sup> )
		165,4					S.L.U.	EN-NTC	$\Delta\sigma = 1,2 \cdot \sigma_I$	EN-NTC
15,5		165,4	312,90	12939	256	8,76	0,52	109,28	0,00	225,0
			mm	mm						
12,85		165,4	312,90	12939	1074	18,04	1,57	109,28	0,00	225,0
			mm	mm						
10,35		165,4	312,90	12939	2328	26,80	3,02	109,28	0,00	225,0
			mm	mm						
8,35		165,4	312,90	12939	3642	33,81	4,46	109,28	0,00	225,0
			mm	mm						
7,35		165,4	417,71	17273	4396	37,73	3,96	117,70	0,00	225,0
			mm	mm						
6,35		165,4	417,71	17273	5211	42,07	4,63	117,70	0,00	225,0
			mm	mm						
5,35		165,4	417,71	17273	6087	46,41	5,34	117,70	0,00	225,0
			mm	mm						
4,35		165,4	417,71	17273	7023	50,75	6,09	117,70	0,00	225,0
			mm	mm						
4,4					7023	50,75	5,28			
2,4		179,6	453,31	20350	9030	59,50	6,64	115,52	0,00	225,0
									0,00	
0		197,0	497,13	24484	11848	71,02	7,24	112,85	0,00	225,0
									0,00	
NOTE :			nb = N° bulloni	fb = diam. bull.	db = ø ancor.		$\sigma_{dl}/\sigma_{Lmin}$	0,064	$\Delta\sigma_{dl}/\Delta\sigma_R'$	0,000

CECM			CALCOLO DEL COEFF. $\lambda$ PER LA FREQUENZA DEL 1° MODO		
ds/db	$\lambda$	$\alpha_G/\alpha$	ds/db	ds/db	ds/db
0	5,32	0,5376	0,80	0,85	0,84
0,05	4,9	0,5737			
0,1	4,7	0,5376			
0,15	4,5	0,5891			
0,2	4,3	0,5376			
0,25	4,2	0,5967			
0,3	4,1	0,5376			
0,35	4	0,6007			
0,4	3,85	0,5813			
0,45	3,8	0,6396			
0,5	3,75	0,5813			
0,55	3,7	0,6405			
0,6	3,65	0,5813			
0,65	3,63	0,6414			
0,7	3,6	0,5813			
0,75	3,58	0,6421			
0,8	3,55	0,5691			
0,85	3,54	0,6318			
0,9	3,53	0,5550			
0,95	3,52	0,6199			
1	3,52				

ds/db	$\lambda'$	$\lambda''$	$\lambda$
0,80	3,55	3,54	3,54

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. = $\Delta\sigma_{dl} \cdot \gamma_{Mr} = \min. \text{precarico}$

Anche la verifica in condizioni sismiche produce tensioni molto basse inferiori a quelle dovute alla combinazione con vento nel piano di flessione :

CAMINO AUTOPORTANTE

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											
18	h(z)	di (cm)	z <sub>j</sub> (m)	x / MASSA	COEFF.DIST	COEFF. SIS.	f / FORZA	MOMENTO	TENSIONE	RES. LIM.			
				m	ton	γ <sub>j</sub>	K <sub>s</sub>	cm	kN	kN.m	σ <sub>sl</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	σ <sub>k</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	
15,5	165,4	165,4	16,75	0,01	0,89	2,00	0,16	0,07	1,40	1,74	0,41	109,28	
12,85	165,4	165,4	14,175	0,01	0,95	1,69	0,13	0,05	1,25	7,10	1,13	109,28	
10,35	165,4	165,4	11,6	0,01	0,89	1,38	0,11	0,03	0,97	14,93	2,01	109,28	
8,35	165,4	165,4	9,35	0,01	0,71	1,11	0,09	0,01	0,62	22,79	2,84	109,28	
7,35	165,4	165,4	7,85	0,00	0,40	0,94	0,07	0,00	0,29	27,17	2,48	117,70	
6,35	165,4	165,4	6,85	0,00	0,44	0,82	0,07	0,00	0,28	31,84	2,85	117,70	
5,35	165,4	165,4	5,85	0,00	0,44	0,70	0,06	0,00	0,24	36,78	3,24	117,70	
4,35	165,4	165,4	4,85	0,00	0,44	0,58	0,05	0,00	0,20	41,93	3,64	117,70	
4,4	165,4	165,4	3,375	0,00	0,89	0,40	0,03	0,00	0,28	41,93	3,64	115,52	
2,4	179,6	179,6	3,375	0,00	0,89	0,40	0,03	0,00	0,28	52,46	3,89	115,52	
0	197,0	197,0	1,2	0,00	1,17	0,14	0,01	0,00	0,13	65,90	4,12	112,85	
Q = Σ [m <sub>j</sub> ] =				7,24 t		TOTALE		5,67		65,90		σ <sub>sl</sub> /σ <sub>k,min</sub>	0,037
S = Σ [m <sub>j</sub> · z <sub>j</sub> ] =				61 t.m		freccia		0,2 cm		con spettro di risposta allo S.L.U.			
J = Σ [m <sub>j</sub> · z <sub>j</sub> <sup>4</sup> ] =				706 t.m <sup>4</sup>		espon. k		2,0					

ordinata spettro di progetto	0,067	= Sd(T1)/g
fattore di correzione	1,2	= lamda
coefficiente di struttura q	1	= q
coeff. di distribuzione (1/2/3)	1	= c <sub>d</sub>
periodo fondamentale sec	0,137	= T <sub>1</sub>
coeff. sismico globale	C = 0,080	S.L.U.

$$\gamma_j = z_j \cdot Q/S \quad \text{per } c_d = 1$$

$$\gamma_j = z_j^4 \cdot Q/J \quad \text{per } c_d = 2$$

$$\gamma_j = 1 \quad \text{per } c_d = 3$$

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

VERIFICA DELLA SEZIONE DI BASE

Carico massimo alla base della ciminiera :  
 p.p ciminiera , scala e ballatoi : 71,02 kN  
 p.p. refrattario : 0,00 kN  
 strutture accessorie : 1,00 kN  
 N<sub>b</sub> = 72,02 kN

$$W_b = 24484 \text{ cm}^3 \quad \sigma = \gamma_G \cdot N_b/A_b + \gamma_Q \cdot M_b/W_b = 0,41 \text{ kN/cm}^2 < 11,29 \text{ kN/cm}^2$$

SPOSTAMENTO MASSIMO PER EFFETTO DELLE FORZE SISMICHE

f<sub>max</sub> = 0,17 cm spostamento indotto dall'azione sismica relativa allo S.L.U.  
 J<sub>eq</sub> = 1695575 cm<sup>4</sup>

La verifica del sistema di ancoraggio è eseguita in campo statico ed evidenzia buona resistenza anche per quanto riguarda l'anello di fissaggio dei bulloni (16 barre di acciaio S 275 -  $\phi$  35 mm).

CAMINO AUTOPORTANTE

SISTEMA DI ANCORAGGIO AD ANELLO IRRIGIDITO

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

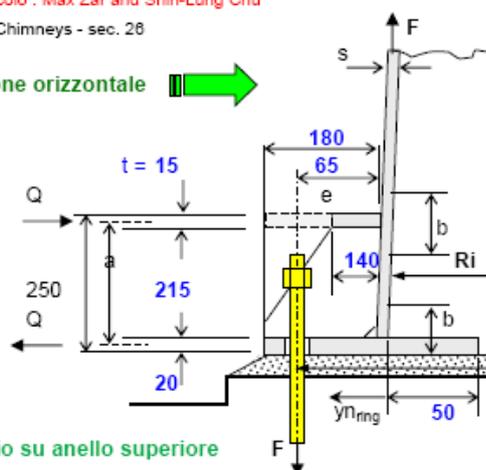
metodo di calcolo D.M. 14/01/2008

stato limite ultimo

azione orizzontale 

acciaio lamiera S 235 - EN 10025

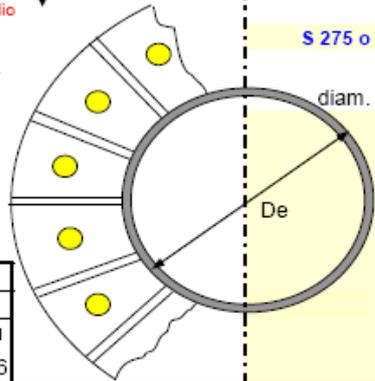
ancor. su anello superiore (S,N) S



numero bulloni :	$n_b =$	16	(mult. di 4)
distanza bulloni :	$i_b =$	415	mm
	$R_i =$	985	mm
	$s =$	8	mm
	$D_e =$	1986	mm
	$D_b =$	2116	mm

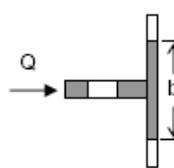
ancoraggio su anello superiore  
 n.b. azioni orizzontali assorbite da barre di taglio

SOLLEC. CICLICHE				
N° CICLI	10000 < cicli min.			
M =	0,00 kNm			
N =	71,02 kN			
azioni allo S.L.U.				
SOLLEC. STATICHE				
M =	142,18 kNm			
N =	71,02 kN			
lamiere	bulloni			
tens. N/mm <sup>2</sup>	trazione	punzonam.		
$f_y =$ 225	$F_{t,Rd} =$ kN	$B_{p,Rd} =$ kN		
$f_u =$ 360	238,30	527,26		
BULLONI E BARRE FILETT	CATEGORIA DETT.	N/mm <sup>2</sup>	LIMITI DI FATICA N/mm <sup>2</sup>	RESISTENZA A FATICA N/mm <sup>2</sup>
	50 . Ks =	48,11	35,456903	19,46584



BULLONI	16	M	35
materiale	S 275		
coeff. di sicur. $\gamma_{M2}$	1,25		
S 275 o equivalente	$f_{ub} =$	430	
	$f_{yb} =$ N/mm <sup>2</sup>	275	
	diam. medio dado : $d_m =$ mm	64,75	
verifica a fatica			
	$A_{res,min} =$	7,70	cm <sup>2</sup>
	$\Delta\sigma_d =$	0,00	N/mm <sup>2</sup>
	$\Delta\sigma_R =$	208,41	N/mm <sup>2</sup>
	precarico min. =	160	kN
	precarico max. =	232	kN
verifica di resistenza			
	$F_{max} =$	12	kN
	$F_{t,Rd} =$	238	kN

AZIONE RADIALE SULL'ANELLO DI ANCORAGGIO :



$$b = 1,56 \cdot \sqrt{R \cdot s} + t = (\text{in}) = 153 \text{ mm}$$

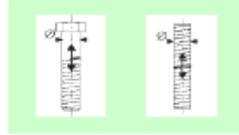
$$F = 4 \cdot M / (n_b \cdot D_b) - N / n_b = 12,36 \text{ kN}$$

$$Q = F \cdot e / a = 3,46 \text{ kN}$$

$$M_{ring} = C \cdot Q \cdot D_b / 2 = 94,32 \text{ kNcm}$$

$$y_{nring} = 46 \text{ mm} \quad W_{yring} = 72 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_{max} = 13,18 \text{ N/mm}^2 < f_{yd} = 204,55 \text{ N/mm}^2$$



$n_b$	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 :  $i_e = 300 \text{ mm}$

momento flettente locale :  $M_l = 46,35 \text{ kNcm}$

modulo di resistenza locale :  $W_l = 3,86 \text{ cm}^3$

$$\sigma_{loc} = 120,11 \text{ N/mm}^2 < 204,55 \text{ N/mm}^2$$



Per la zona di transizione cilindro-cono è previsto un anello di irrigidimento costituito da un piatto di sezione 40 x 150 mm con la seguente verifica.

CAMINO AUTOPORTANTE

**ANELLO DI IRRIGIDIMENTO IN ZONA D'ANGOLO**

per norme ASCE : Chimneys - sec. 26  
per norme EN 1993-1-8 - app. C

$$q_p(z) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot c_e(z)$$

s =	8	mm
R <sub>i</sub> =	827	mm
De = b =	1670	mm
β =	2,080	deg
l =	150	mm
m =		mm
t =	40	mm
1,56 · (R · s) <sup>0,5</sup> + t = b <sub>s</sub> =	167	mm
b <sub>s</sub> · s <= area irrigidimento		
EN 1993-1-6 : b <sub>s</sub> =	167	mm

**SOLLECITAZIONI NELLA SEZIONE**

N =	51	kN
vento M <sub>w</sub> =	7023	kNcm
sisma M <sub>s</sub> =	4193	kNcm
<b>M<sub>cal</sub> =</b>	<b>7023</b>	<b>kNcm</b>
pressione cinetica di picco alla quota del raccordo q <sub>p</sub> (z) =	0,79	kN/m <sup>2</sup>

**è dimensionante l'azione del vento**

Caratteristiche geom. Irrigidimento :

	ASCE	EN-NTC	
Area efficace :	73,35	73,33	cm <sup>2</sup>
Pos. asse neutro (x) :	68,62	68,64	mm
Momento di inerzia :	1807,29	1806,20	cm <sup>4</sup>
Modulo di resistenza :	263,37	263,13	cm <sup>3</sup>



Tensione di progetto :

	ASCE	EN-NTC	
σ <sub>lim</sub> =	X · Y	χ · f <sub>yd</sub>	
ks ; χ =	0,8275755	0,8275755	
X ; χ · f <sub>yd</sub> =	11,285121	11,285121	kN/cm <sup>2</sup>
Y =	0,9912344		kN/cm <sup>2</sup>
σ <sub>k</sub> =	11,19	11,29	kN/cm <sup>2</sup>

SOLLECITAZIONI ALLA BASE DELLA SEZIONE CILINDRICA :

	ASCE	EN-NTC	
Mom. circon. M <sub>max</sub> = γ <sub>Q</sub> · k · q <sub>eq</sub> · R/t · W	variaz. press. vento		
Forza vertic. F = γ <sub>Q</sub> · M / (π · R <sup>2</sup> ) + γ <sub>G</sub> · N / (2π · R)	vento	0,42	0,49 kN/cm
Compr. circ. Q = R <sub>i</sub> · [F · tanβ + k · γ <sub>Q</sub> · p(z) · f(R; s; t)]	sisma	0,23	0,29 kN/cm
	vento	1,36	2,55 kN
	sisma	0,70	1,17 kN

	ASCE	EN-NTC		ASCE	EN-NTC
Area anello A <sub>ring</sub> = Q <sub>max</sub> / σ <sub>k</sub>	0,12	0,23	cm <sup>2</sup>	<	73,35 / 73,33
Inerzia min. J <sub>ring</sub> = Q <sub>max</sub> · R <sup>2</sup> / E	0,46	0,85	cm <sup>4</sup>	<	1807,29 / 1806,20
verifica con vento σ <sub>w</sub> =	0,020	0,040	kN/cm <sup>2</sup>	0,00 <	1 < 0,00 <
verifica con sisma σ <sub>s</sub> =	0,010	0,016	kN/cm <sup>2</sup>	0,00 <	1 < 0,00 <

PRECARICO MASSIMO DEI BULLONI DEI GIUNTI A FLANGIA									
QUOTA m	N° BULLONI nb	DIAM. BULL. φ = mm	AREA RES. mm <sup>2</sup>	RESISTENZA N/mm <sup>2</sup>	COEFF. ATTR. K=0,17-0,21	PRECARICO MAX (kN)	COPPIA SERR. N.m	INT. BULL. >3φ mm	
12,85	0	0	0	0	0,177	0	0		
10,35	0	0	0	0	0,177	0	0		
8,35	0	0	0	0	0,177	0	0		
7,35	0	0	0	0	0,174	0	0		
6,35	0	0	0	0	0,174	0	0		
5,35	0	0	0	0	0,177	0	0		
4,35	0	0	0	0	0,177	0	0		
2,4	0	0	0	0	0,177	0	0		
0	16	35	770	238	0,17	232	1378	415	



## CAMINO AUTOPORTANTE

### 2. WIND FORCES

#### 2.1 WIND FORCES ON STRUCTURES

For lattice structures and for vertical cantilevered structures with a slenderness ratio height / width > 2 and with nearly constant cross-section, the force  $F_{wj}$  on the incremental area  $A_j$  at the height  $Z_j$  is :

$$F_{wj} = q_b \times C_e(Z_j) \times C_d \times C_{\eta} \times A_j$$

For all other structures the global force  $F_w$  shall be obtained from the following formula :

$$F_w = q_b \times C_e(Z_e) \times C_d \times C_r \times A_{ref} \quad q_p(Z_e) = q_b \times C_e(Z_e) \times C_d \times C_r$$

$Z_j$ ;  $Z_e$  = height of the centre of gravity of incremental area  $A_j$  or reference area  $A_{ref}$

$A_j$ ;  $A_{ref}$  = incremental area ; reference area

$C_{\eta}$ ;  $C_r$  = force coefficient for incremental area  $A_j$  or reference area  $A_{ref}$

$C_d$  = dynamic coefficient

$C_e(Z)$  = exposure factor

$$C_e(Z) = C_r^2(Z) \times C_t^2(Z) \times [1 + 7 k_r / (C_r(Z) \times C_t(Z))]$$

$C_r(Z)$  = roughness coefficient

[for Italy  $C_r(Z) = k_r \cdot \alpha(z)$ ]

$C_t(Z)$  = orography coefficient

[for Italy  $C_t(Z) = c_t$ ]

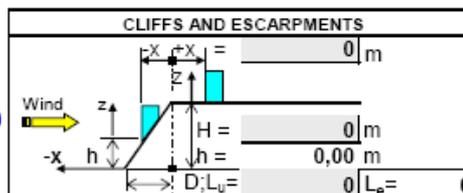
$k_r$  = terrain factor

#### 2.1.1 WIND PARAMETERS

$z$  = refer. height of the construction

$x$  = plan position of the construction

for  $x < 0$  { for  $|x| > Lu/2$  and  $H/Lu < 0,05$  or  $H/Lu > 0,3$  }  $x, H, D = 0$   
 for  $x > 0$  {  $H/Lu > 0,3$  and  $x > 1,5 \cdot Le$  } may be placed  
 {  $H/Lu < 0,3$  and  $x > 5 \cdot H$  }

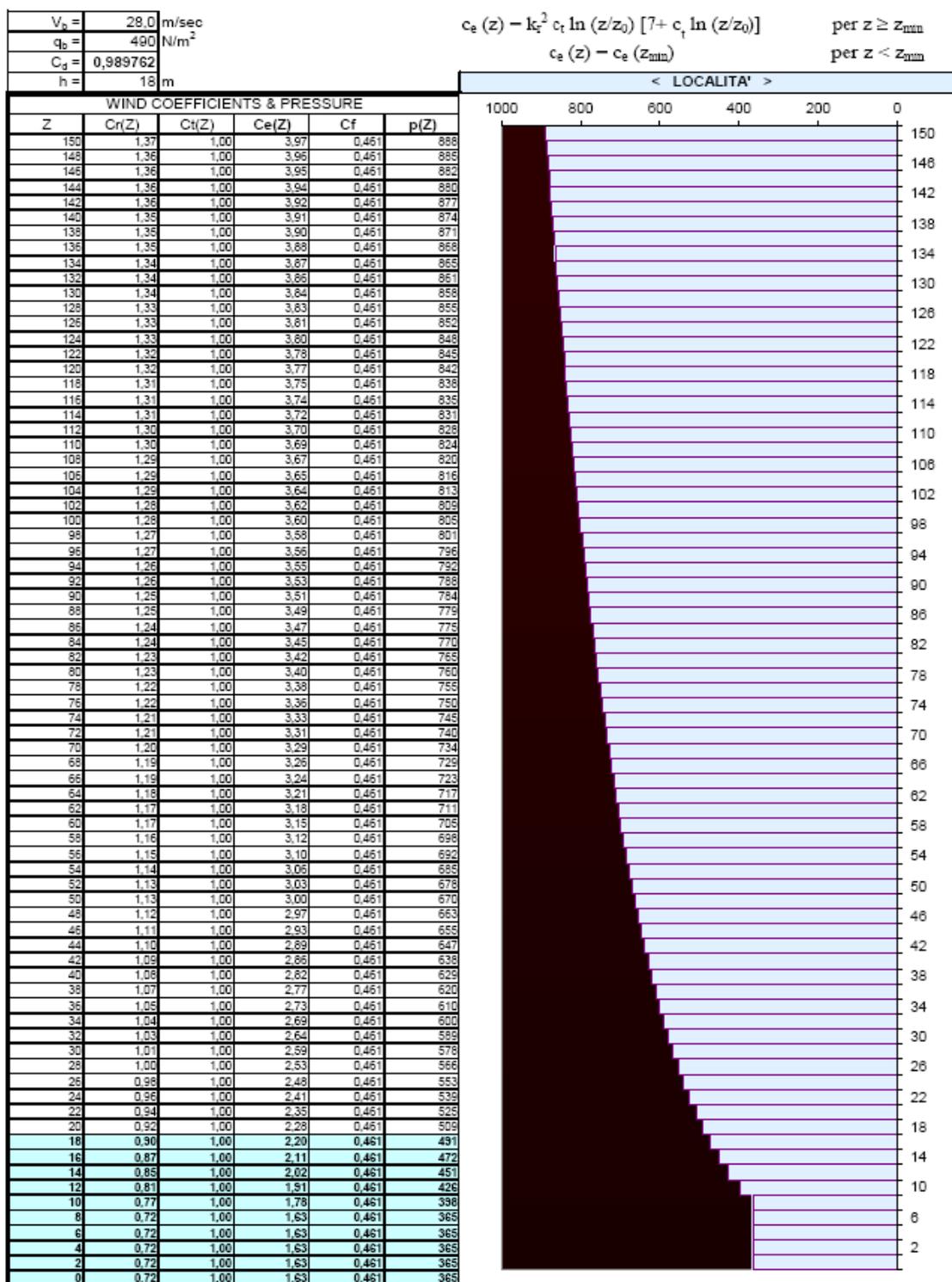


COUNTRIES	for ROUGHNESS COEFFICIENT				for TOPOGRAPHY COEFFICIENT							
	TERR.CAT.	$k_r$	$Z_0$ (m)	$Z_{min}$ (m)	$H/L_e$	$H/D$	$x/L_e$	$x/H$	$h/L_e$	$h/H$	$k_e$	$\gamma.k$
AUSTRIA	0											
BELGIUM	0											
DENMARK	0											
FINLAND	0											
FRANCE	0											
GERMANY	0											
GREECE	0											
ICELAND	0											
IRELAND	0											
ITALY	x	IV	0,22	0,3	8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00
LUXEMBOURG	0											
NETHERLAND	0	AREA										
NORWAY	0											
PORTUGAL	0											
SWEDEN	0											
SWITZERLAND	0											
UN. KINGDOM	0											

CAMINO AUTOPORTANTE

2.1.2

WIND PRESSURE DYAGRAM - ITALY

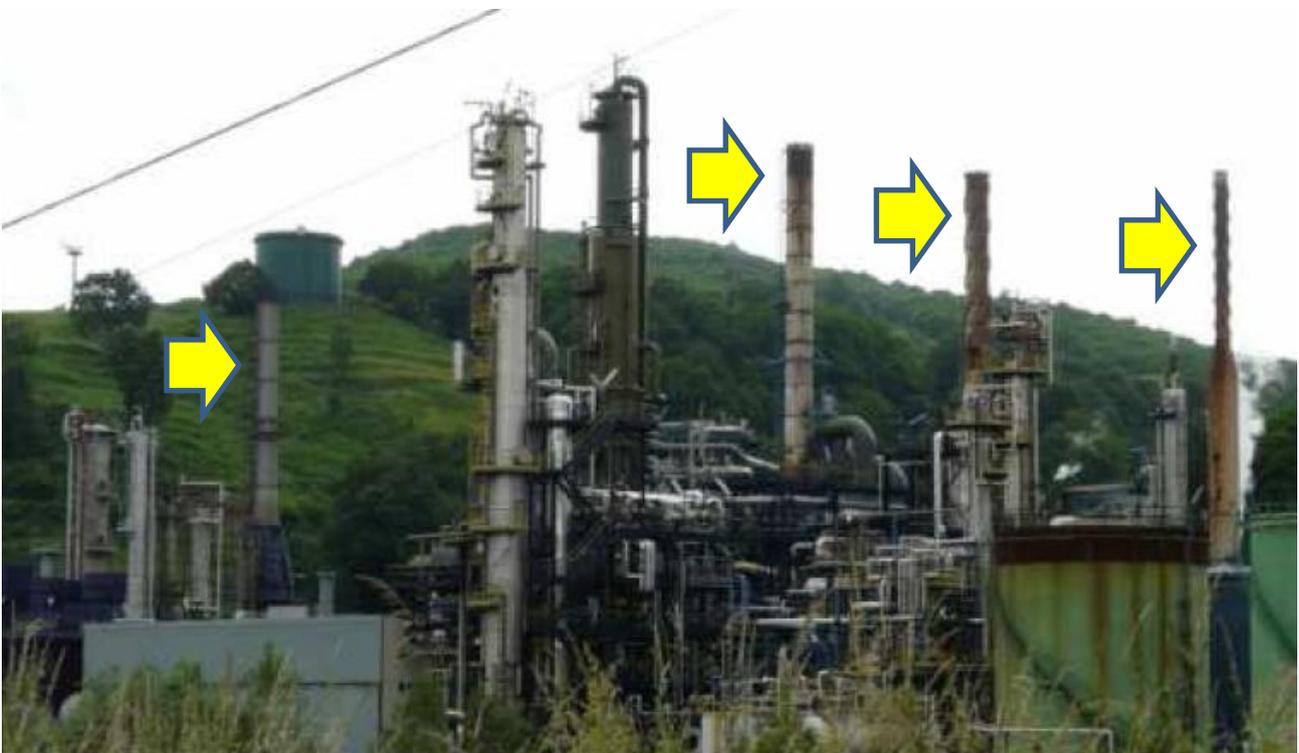


## Conclusioni :

Il progetto di camini autoportanti in acciaio va eseguito ponendo particolare attenzione agli effetti dinamici del vento. Per camini "tozzi" (poco alti e poco snelli con spessori importanti e frequenze alte del primo modo) non si produce generalmente il distacco dei vortici ovvero, non vengono generate vibrazioni trasversali alla direzione del vento quando la velocità critica di eccitazione risulti maggiore della velocità media del vento opportunamente maggiorata rilevata nella zona di eccitazione. In questo caso non sono necessari interventi strutturali che prevedano l'installazione di smorzatori aerodinamici o meccanici a massa accordata.

Si vedono spesso in giro ciminiere in acciaio di modesta altezza e/o grande rigidezza dotate di smorzatori elicoidali messi in opera magari pensando : " ... Male non fa ...!!!" trascurando però l'incremento della spinta del vento che ne consegue. Altre volte si notano camini di impianti industriali anche di notevole altezza senza smorzatori di alcun tipo che fanno pensare a criteri di calcolo semplicistici (ASME) o alla non applicazione del metodo spettrale (CNR-DT 207 o EN 1991-1-4). Alcune immagini di seguito riportate testimoniano quanto asserito :

- 1) Serie di camini di una raffineria con e senza smorzatori aerodinamici.



2) Ciminiere alte e snelle senza smorzatori



k9248495 www.fotosearch.it



k5408064 www.fotosearch.it

La presenza di materiale refrattario interno e/o esterno riduce anche sensibilmente la frequenza naturale del primo modo e quindi la velocità critica di eccitazione ma finchè questa rimane maggiore dei limiti citati non è richiesta la verifica di resistenza alle sollecitazioni cicliche trasversali e agli effetti della ovalizzazione.

Questa condizione non è esplicitamente citata dalle norme ma può essere ottenuta per logica deduzione.

Ribadisco qui quanto da me affermato in un precedente articolo sul calcolo delle ciminiere in acciaio relativamente all'applicazione dei due metodi di analisi degli effetti prodotti dal distacco dei vortici. La norma CNR DT 207 richiede l'applicazione sia del metodo armonico che del metodo spettrale con l'impiego di accorgimenti anti-risonanza conseguenti agli effetti prodotti dal più gravoso dei due. In generale, per camini alti e snelli il metodo più gravoso risulta quello spettrale che richiede l'uso di smorzatori meccanici a massa accordata mentre il metodo armonico (ASME) riguarda in generale camini di modesta altezza e poco snelli; in ogni caso l'applicabilità del metodo armonico è limitata dal valore del numero di Scruton che la norma "consiglia" maggiore di 10 (& 4.10.9 CNR DT-207) ; solo in questo caso possono essere utilizzati smorzatori aerodinamici di tipo elicoidale o porosi o altro.

Successivamente pubblicherò progetti di camini eseguiti da vari utenti con l'uso del programma "Chimney" opportunamente commentati al servizio dei lettori.

D. Leone

Bibliografia :

CNR DT 207 – Istruzione per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni

EN 1991-1-4 – Azioni sulle strutture – Eurocodice 1 parte 1-4 - azioni del vento

Duncan Noakes - Archivio Fotografico - Una fabbrica con ciminiera.....

Fotosearch – Archivio fotografico - <http://www.fotosearch.it/foto-immagini/ciminiere.html>

