



CALCOLO DI CAMINI AUTOPORTANTI

Domenico Leone

fare sismica  **APPUNTI**

CALCOLO DI CAMINI AUTOPORTANTI

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

Indice

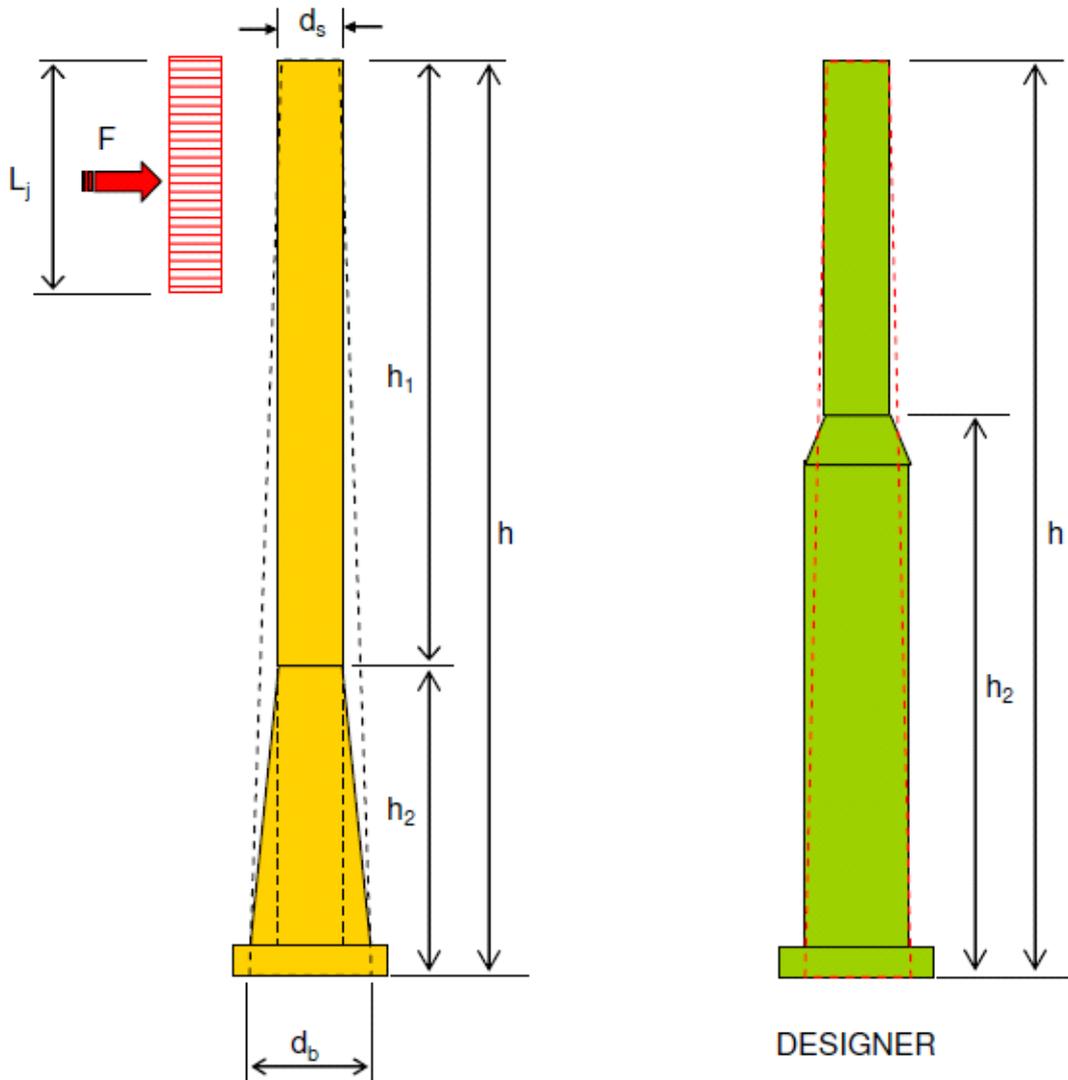
Parte I Calcolo di Camini autoportanti

6

1 Calcolo di Camini autoportanti

USO DEL PROGRAMMA "CHIMNEY" (CAMINI AUTOPORTANTI)

PER L'ESAME DI UN CASO TIPICO



In questo articolo viene presentato il calcolo completo di un camino autoportante in acciaio rivestito internamente di refrattario e costituito da una serie di conci uniti tra loro da flange circolari bullonate.

Le verifiche del fasciame sono eseguite in conformità alle norme americane A.S.C.E. che, prima dell'entrata in vigore delle norme europee, costituivano l'unico valido riferimento per un calcolo dettagliato e completo. In un successivo articolo saranno presentate le differenze con la norma europea EN 1993-3-2 che, per le verifiche in campo lineare elastico rimanda alla norma EN 1993-1-6 ipotizzando un calcolo a membrana e trascurando l'effetto flessionale dell'anello soggetto a pressione non uniforme del vento lungo il contorno della sezione qualora siano soddisfatte le seguenti condizioni (item 5.2.1 EN 1993-3-2) :

NOTE: The criteria for neglecting shell effects may be given in the National Annex. The recommended criteria are as follows:

$$\ell / r_m \geq 0,14 r_m / t + 10 \quad \dots (5.1)$$

where ℓ is the total height

r_m is the medium radius of the shell (i.e. in the middle of the plate)

t is the corroded plate thickness

The circumferential bending moments per unit length may be approximately determined from:

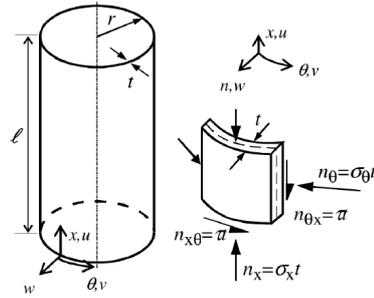
$$m_y = 0,5 r_m^2 w_e \quad \dots (5.2)$$

where w_e is the wind pressure, acting on the external surface of a structure, determined from 5.1 of EN 1991-1-4 taking z as the height of the chimney.

Circumferential bending moments due to wind pressure (for basic wind velocities up to 25m/sec (see EN 1991-1-4) may be neglected in unstiffened cylindrical shells where:

$$r_m / t \leq 160 \quad \dots (5.3)$$

L'instabilità locale del mantello per effetto delle tensioni "meridiane" è tenuta in conto dalle norme A.S.C.E. mediante una opportuna riduzione della tensione ammissibile (S.L.U.) mentre in base alla norma EN 1993-1-6 (cap. 8.5.2) si deve fare riferimento alla tensione caratteristica di instabilità ottenuta moltiplicando la tensione di snervamento di progetto per un fattore di riduzione (χ) espresso in funzione di un fattore di riduzione per imperfezione elastica (α) e della snellezza adimensionale (λ). L'allegato D della EN 1993-1-6 fornisce i valori dei parametri di calcolo.

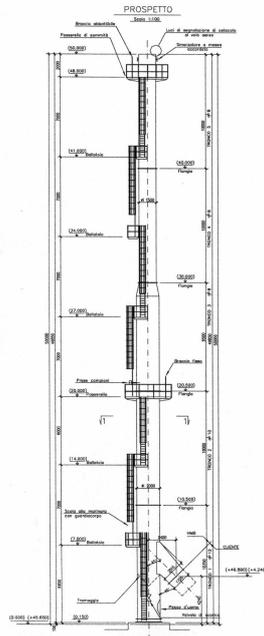


E' noto che il fasciame dell'involucro di camini autoportanti come pure il suo sistema di ancoraggio sono soggetti a variazioni cicliche di tensione dovute agli effetti oscillatori della pressione non uniforme del vento lungo il contorno. In questo esempio le verifiche a fatica sono eseguite sia in conformità alle regole europee C.E.C.M. che alle regole americane A.S.C.E. per opportuno confronto. Si farà successivamente riferimento anche alle regole della norma EN 1993-1-6 - cap. 9.

Il calcolo degli effetti dell'azione sismica è eseguito in base alla'O.P.C.M. 3274 in vigore al momento del calcolo qui presentato (2006) ma l'analisi statica lineare di struttura non dissipativa ($q=1$) qui presentata è universalmente applicata da tutte le norme internazionali con definizioni diverse del coefficiente di distribuzione delle masse sull'altezza qualora applicato.

Si precisa che l'esempio di seguito riportato è stato oggetto di validazione con calcolo numerico a elementi finiti in base agli schemi e risultati di seguito riportati :

SISTEMI A N GRADI DI LIBERTA
ESEMPIO: CIMINIERA AUTOPORTANTE IN ACCIAIO



Altezza	H= 50 m
Diametro interno	$\phi_{top} = 1.5 \text{ m} / \phi_{bottom} = 2.0 \text{ m}$
Spessori lamiere	da 8 mm a 12 mm
Modulo di elasticità	E=210000 MPa

L'analisi dinamica modale ha dato i risultati di seguito riportati :

1 – dati di calcolo

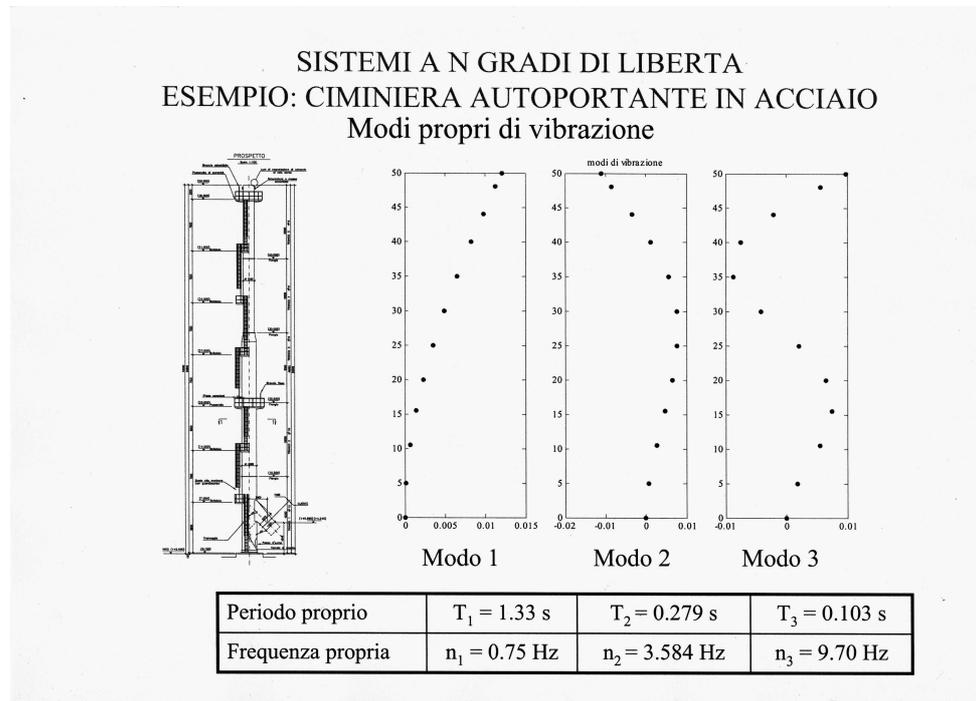
SISTEMI A N GRADI DI LIBERTA
ESEMPIO: CIMINIERA AUTOPORTANTE IN ACCIAIO

quota [m]

Nodo	Quota [m]	Massa [kg]
1	0,0	0
2	5,0	4179
3	10,5	4104
4	15,5	3297
5	20,0	4032
6	25,0	2980
7	30,0	2840
8	35,0	2340
9	40,0	2286
10	44,0	1872
11	48,0	2840
12	50,0	468

Elemento	Diametro Esterno (mm)	Spessore (mm)
1	2024	12
2	2024	12
3	2020	10
4	2020	10
5	2016	8
6	2016	8
7	1516	8
8	1516	8
9	1516	8
10	1516	8
11	1516	8

2 - Periodi dei primi 3 modi



Da cui si evince che il periodo del primo modo (dominante) coincide con quello del calcolo analitico più avanti riportato. Le sollecitazioni alla base del camino sono riassunte nella seguente tabella per diverse combinazioni modali spettrali e accelerogrammi di progetto .

SISTEMI A N GRADI DI LIBERTA
ESEMPIO: CIMINIERA AUTOPORTANTE IN ACCIAIO
Sintesi dei risultati

	q sommità (m)	T base (N)	M base (Nm)
Spettro di risposta modo 1	0.1313	32084	1198000
Spettro di risposta SRSS	0.1318	55161	1318800
Spettro di risposta SUM	0.1432	89133	1846900
Forze statiche eq. modo 1	0.1313	32004	1182900
Forze statiche eq. SRSS	0.1318	55069	1306900
Forze statiche eq. SUM	0.1432	88930	1833800
Accelerogramma 1	0.1233	60716	1172100
Accelerogramma 2	0.122	63875	1535800
Accelerogramma 3	0.116	45087	1237000

La condizione che più si avvicina al calcolo sismico con analisi statica lineare ($T = 59000 \text{ kN}$; $M = 1855000 \text{ Nm}$) è l'analisi dinamica modale spettrale con criterio SRSS (combinazione quadratica degli effetti sismici), mentre il metodo delle forze statiche equivalenti con uguale criterio SRSS presenta un taglio globale alla base più elevato (88930 N) ma un momento quasi uguale (1833800 Nm) .

In questo quadro generale di analisi dell'azione sismica eseguita su modello a elementi finiti che produce risultati anche molto diversi tra loro, si inserisce bene e con buon grado di sicurezza l'analisi statica lineare algoritmica di seguito presentata.

Dopo una breve presentazione del programma "Chimney" viene illustrato il calcolo completo del camino oggetto dell'articolo, attraverso i fogli di calcolo stampati.

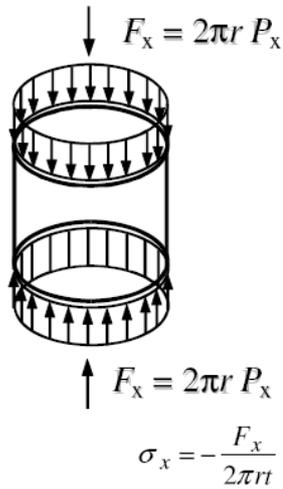
Nel caso in esame si può trascurare l'effetto flessionale locale della lamiera poiché l'involucro del camino è irrigidito dagli anelli delle flange dei conci pur risultando (per camino non irrigidito) non soddisfatta la disugualianza :

$$l / r_m = 50 / [(2+1,5)/2] = 28,57 < 0,14 \cdot r_m / t + 10 = 0,14 \cdot 1,75 / 0,01 + 10 = 34,5$$

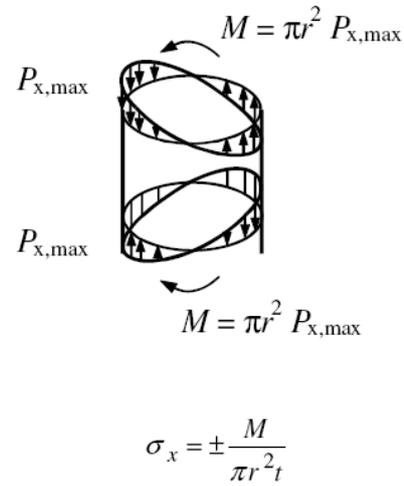
Il calcolo delle tensioni di membrana è, in ogni caso, uguale a quello proposto nell'allegato A della norma EN 1993-1-6 :

A.2 Unstiffened cylindrical shells

A.2.1 Uniform axial load

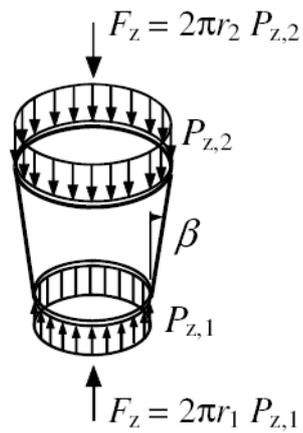


A.2.2 Axial load from global bending

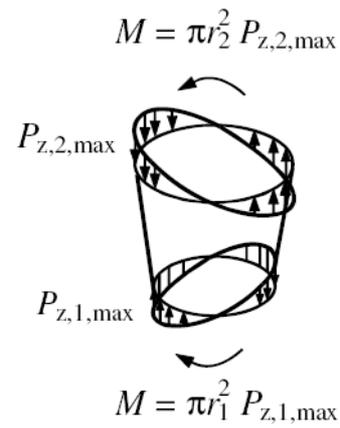


A.3 Unstiffened conical shells

A.3.1 Uniform axial load



A.3.2 Axial load from global bending



Il programma di calcolo automatico “Chimney” esegue il progetto completo di camini autoportanti (direttamente ancorati al suolo) di forma cilindrica, troncoconica oppure composta da una parte inferiore troncoconica o cilindrica e da una parte superiore cilindrica.

Il camino può essere costituito da sola lamiera oppure può essere rivestito internamente con gettata refrattaria o mattoni refrattari.

Il calcolo è eseguito in base alle seguenti norme e regolamenti:

- *Materiali per fasciame camino e strutture di servizio: EN 10025*
- *Effetti statici e dinamici dell'azione del vento: EN 1991-1-4*
- *Azione sismica: EN 1998-1 o O.P.C.M. n° 3274*
- *Verifica a fatica: EN 1993-1-9*
- *Verifica di resistenza e stabilità del mantello: norme A.S.C.E e C.E.C.M*
- *Verifica delle flange bullonate : norme ANCC o EN 12516-2*
- *Verifica delle strutture accessorie : EN 1993-1-1*

E' previsto l'aggiornamento del calcolo in conformità alle norme EN 1993-3-2 e EN 1993-1-6 nonché, per la parte trattata, alle norme NTC 2008

Il programma consente di esaminare anche camini realizzati in elementi flangiati uniti tra loro da unione bullonata verificata a fatica sotto l'azione dinamica del vento.

Particolare attenzione è riservata alla valutazione dell'effetto del distacco dei vortici attraverso un calcolo iterativo atto ad individuare la lunghezza di eccitazione lungo il camino e quindi le forze di inerzia eccitanti ed il numero di cicli di eccitazione durante la vita di progetto del manufatto.

Il programma “Chimney” esegue anche il progetto del sistema di ancoraggio secondo il criterio di Max Zar e Shih-Lung Chu (Chimney – sect. 26) verificando a fatica la resistenza dei bulloni.

Se sono previsti anelli di rinforzo nelle zone di variazione di pendenza del fasciame il programma ne esegue la verifica secondo le norme A.S.C.E

Per camini costituiti da elementi flangiati e bullonati viene eseguita la verifica delle flange per diverse tipologie di guarnizione e viene definito il precarico minimo per il serraggio dei bulloni in base alle norme ANCC (regole VSR).

Il programma è costruito in ambiente Excel in forma di relazione tecnica finale.

Di seguito sono riportati alcuni stralci del calcolo eseguito per un camino tipico.

Il foglio iniziale del programma riporta le condizioni di progetto fondamentali in parte inserite nel foglio stesso ed in parte ricavate dai fogli di calcolo successivi.

I dati di input devono essere inseriti nelle celle color grigio

DATI DI PROGETTO

TIPOLOGIA

1-2 **1** La ciminiera oggetto della seguente verifica è del tipo autoportante con protezione isolante interna.

1-2-3 **1** La protezione è del tipo : 1 strato di ebanite su gomma butilica

La ciminiera è composta da una base tronco-conica e da un tratto cilindrico il diametro alla base è di m 2

Il materiale previsto è Acciaio del tipo :

1 - Fe 430 B - EN10025 equivalente a :
2 -

con le seguenti caratteristiche fisiche e meccaniche :

- modulo di elasticità : 206000 N/mm²
- tensione di rottura : 430 N/mm²
- tensione di snervamento : 275 N/mm² a temperatura ambiente
- tensioni ammissibili normative per entrambi i materiali :
 - a temperatura ambiente : 190 N/mm²
 - alla temperatura di 100 °C : 147 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.

Le azioni di progetto comprendono :

- peso proprio medio della ciminiera : 403 daN/m
- peso proprio scala marinara e ballatoi : **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

- azione sismica	metodo	2	zona :	2
	suolo	A	S =	1,00
	ag/g =	0,25	T _B = sec	0,15
	coeff. di struttura : q =	1	T _C = sec	0,4

L'azione sismica è determinata in accordo all'O.P.C.M. n° 3274 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 europee ENV 1991-2-4 (Eurocodice 1).

Il diagramma del vento è del tipo (1, 2, 3)

1 **ITALY**

↑
PAESE EUROPEO

I due fogli successivi eseguono il calcolo dell'effetto dell'azione del vento (coeff. di forza) dopo aver definito nelle caselle di input la geometria e le caratteristiche dei materiali.

ANALISI DELL'AZIONE DEL VENTO SULLA CIMINIERA

Caratteristiche della ciminiera :

			cilindro sup.		cilindro inf.	
altezza totale :	h =	50	m	h ₁ =	20	m
diámetro int. di base :	d _b =	200	cm	A _b =	758,51	cm ²
spessore di base :	s _b =	12	mm	J _b =	3838314	cm ⁴
diámetro int. di somm. :	d _s =	150	cm	A _s =	379,00	cm ²
spessore di sommità :	s _s =	8	mm	J _s =	1077373	cm ⁴
spessore del refrattario	s _r =	20	mm	peso spec. del refr. =	15	kN/m ³
materiale del mantello :	E =	20600	kN/cm ²	ps =	78,5	kN/m ³
Fe 430 B - EN10025	f _y =	27,5	kN/cm ²	alla temperat. di rif. f _y =	21	kN/cm ²
	σ _{amm 20°} =	19,00	kN/cm ²	σ _{amm t°} =	14,70	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 × 10⁵ × v_m(z) × b

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

$$C_d = \text{coeff. dinamico} = \frac{1 + 2 \cdot g \cdot \text{Iv}(z_{equ}) \cdot \sqrt{Q_0^2 + R_x^2}}{1 + 7 \cdot \text{Iv}(z_{equ})} = 1,0396007$$

altezza equivalente : $z_{equ} = 0,6 \cdot h \geq z_{min} = 30 \text{ m} < 300 \text{ m}$

intensità della turbolenza : $\text{Iv}(z_{equ}) = kr / [Ct(z_{equ}) \cdot Cr(z_{equ})] = 0,2171472$

fattore di categoria del terreno : kr = 0,22 per zona IV
 coefficiente di topografia : Ct(z_{equ}) = 1,00 da diag. press. vento
 coefficiente di rugosità : Cr(z_{equ}) = 1,01 da diag. press. vento

fattore di picco : $g = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot t) + 0,6} / \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot t)} = 3,5602932$

tempo medio di applicaz. di v_{ref} : t = 600 sec

frequenza prevista : $v = \frac{\sqrt{v_0^2 \cdot Q_0^2 + n_1^2 \cdot R_x^2}}{\sqrt{Q_0^2 + R_x^2}} = 0,5092511 \text{ Hz}$

freq. di raffica per struttura rigida : $v_0 = \frac{v_m(z_{equ})}{Li(z_{equ}) \cdot (1,11 \cdot S^{0,615})} = 0,2147424 \text{ Hz}$
 $v_m(z_{equ}) = v_{ref} \cdot Ct \cdot Cr = 29,4 \text{ m/sec}$

scala di lungh. integr. della turbol. : $Li(z_{equ}) = 300 \cdot (z_{equ} / 300)^\epsilon = 127,97$ per ε = 0,37

diámetro medio : b = 166,84 cm $S = \frac{0,46 \cdot (b+h) + 10,58 \cdot \sqrt{b \cdot h}}{Li(z_{equ}) \cdot Li(z_{equ})} = 0,9408126$ b=[(db+ds)/2xht + dsxhc]/h

parte di risposta di fondo : $Q_0^2 = 1 / (1 + 0,9 \cdot [(b+h) / Li(z_{equ})]^{0,6}) = 0,6630147$

parte di risposta risonante : $R_x^2 = \pi^2 / 2\delta \cdot R_N \cdot R_h \cdot R_b = 0,4344649$

decr. log. per smorzam. fondam. : $\delta = \delta d + \delta s + \delta a =$ $\delta d =$

decr. log. per smorzam. struttur. : $\delta s = a_1 \cdot n_1 + b_1 =$ $> \delta_{min} = 0$

$a_1 =$ $b_1 =$ 1 strato refrattario

decr. log. per smorzam. aerodin. : $\delta a = \frac{\rho \cdot b \cdot C_f \cdot v_m(z_{equ})}{2 \cdot n_1 \cdot m_1} =$ per $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$

massa equiv. p.u.l. del tratto h_3 : $h_3 = m$ $m_1 =$ kg/m

funzione di densità spettrale : $R_N = \frac{6,8 \cdot N_x}{(1+10,2 \cdot N_x)^{5/3}} =$

$N_x = n_1 \cdot Li(z_{equ}) / v_m(z_{equ}) =$ $n_1 = \text{Hz}$

funz. di ammittanza aerodinamica : $R_h = 1/\eta_h - 1/2\eta_h^2 \cdot (1-e^{-2\eta_h}) =$

funz. di ammittanza aerodinamica : $R_b = 1/\eta_b - 1/2\eta_b^2 \cdot (1-e^{-2\eta_b}) =$

$\eta_h = 4,6 \cdot N_x \cdot h / Li(z_{equ}) =$

$\eta_b = 4,6 \cdot N_x \cdot b / Li(z_{equ}) =$

frequenza naturale del I° modo :

sez. troncoconica variabile lineari. : $n_1 = \lambda/2\pi \cdot \sqrt{E \cdot J_b / m_b \cdot h^4} =$ Hz $\lambda =$

sez. conico-cilindrica (EC1- C.4.2) : $n_1 = \epsilon_1 \cdot b / h^2 \cdot \sqrt{W_s / W_t} =$ Hz $\text{per } d_s/d_b =$



COEFFICIENTE DI FORZA (DIN 1055/4 - ENV 1991-2-4)

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

in accordo con ENV 1991-2-4 tab.10.8.1

$C_{fj} = C_{f,0} \cdot \Psi_\lambda$ $\lambda_{eff} =$ $\lambda_{eff} = h/b \leq 70$

$\Psi_\lambda =$ ENV 1991 - 10.14

$C_f =$ $k =$ mm (metallo ruvido)

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}
50	150,0	367,73	151,6	32,38	3272499	0,0001319	0,7701815	0,631
45	150,0	367,73	8	31,53	3186397	0,0001319	0,7685242	0,630
40	150,0	367,73	8	30,89	3121863	0,0001319	0,7672438	0,629
35	150,0	367,73	8	29,79	3011053	0,0001319	0,7649635	0,627
30	150,0	367,73	8	28,94	3407298	0,0001133	0,7628288	0,625
25	200,0	689,20	8	27,40	3682855	9,921E-05	0,7592055	0,622
20,5	200,0	689,20	8	26,12	3514269	9,911E-05	0,7561969	0,619
15,5	200,0	689,20	10	24,52	3301829	9,901E-05	0,7521515	0,616
10,5	200,0	689,20	10	20,95	2823815	9,891E-05	0,741778	0,608
4,5	200,0	689,20	12	20,95	2826608	9,881E-05	0,7417792	0,608

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.

Per ciascun livello deve essere definito lo spessore del mantello.

Il foglio seguente esegue il calcolo delle sollecitazioni nella direzione parallela alla direzione del vento e quindi la verifica di resistenza della sezione di base allo SLU (in accordo con le norme A.S.C.E) e il calcolo dello spostamento in sommità per lo SLS.

FORZE - SOLLECITAZIONI LUNGO LA CIMINIERA PARALLELE ALLA DIREZIONE DEL VENTO

$$Fw_j = q_{ref} \times C_{e(z)} \times C_d \times C_{fj} \times A_j$$

LIVELLO	DIAM. INT.	QUOTA NODO	f_{max}	ϕ EST.	AREA	PRESSIONE	FORZA	MOMENTO	PESO
50 h(z)	di (cm)	Z z _j (m)	l (cm)	b (cm)	A _j (m ²)	p(z _j) (kN/m ²)	Fw _j (kN)	M _h (kNm)	N _{h,tot} (kN)
	150,0	48	47,5	5,61	7,58	1,01	7,62		
45	150,0	z		151,6				19,05	24,350
		44	42,5	4,60	7,58	0,98	7,44		
40	150,0	z		151,6				75,74	48,700
		38	37,5	3,59	7,58	0,94	7,13		
35	150,0	z		151,6				168,84	73,050
		34	32,5	2,73	7,58	0,91	6,90		
30	150,0	z		151,6				297,02	97,401
30,0	150,0	28	27,5	2,24	8,83	0,86	7,58		
25	200,0	z		176,6				461,39	125,395
		24	22,75	1,56	9,07	0,82	7,42		
20,5	200,0	z		201,6				643,09	153,870
		18	18	1,02	10,09	0,75	7,52		
15,5	200,0	z		201,8				882,32	187,997
		14	13	0,51	10,10	0,68	6,90		
10,5	200,0	z		202,0				1157,61	224,612
		8	7,5	0,17	12,13	0,55	6,72		
4,5	200,0	z		202,2				1528,83	271,542
		4	2,25	0,01	9,11	0,55	5,04		
0	200,0	z		202,4				1833,72	308,984
			freccia in sommità	22,0	cm	tot. alla base	70,27	1833,72	308,984

VERIFICA DELLA SEZIONE DI BASE

Carico massimo alla base della ciminiera :		Tensione ammissibile : (A.S.C.E.)
p.p ciminiera , scala e ballatoi :	226,28 kN	$\sigma_{amm} = X \cdot Y \text{ kN/cm}^2$
p.p. refrattario :	82,70 kN	ks = 0,3265306
strutture accessorie (branchetto ingresso) :	30,00 kN	X = 9,4714286 kN/cm ²
N _b =	338,98 kN	Y = 1
W _b =	37928 cm ³	
$\sigma = N_p/A_b + M_p/W_b =$	5,28 kN/cm ²	< 9,47

SPOSTAMENTO MASSIMO PER EFFETTO DELLE FORZE DI PRESSIONE

$f_{max} =$	22,04 cm	(calcolata come freccia statica sotto l'azione delle forze Fw _j)
J _{eq} =	2540874 cm ⁴	(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_{equ}) e per una scabrosità equivalente k come definita per il calcolo di C_f (pag. prec.).

$$f_{max} = \frac{\Phi_{1,x}(z) \cdot \rho \cdot b \cdot C_f \cdot v_m^2(z_{equ}) \cdot [1 + 7 \cdot \ln(z_{equ})] \cdot C_d \cdot K_x}{2 \cdot m_1 \cdot (2\pi \cdot n_1)^2} = \boxed{24,40} \text{ cm}$$

b = b(z_{equ}) = 1,52 m

per : $K_x = \frac{(2 \cdot \zeta + 1) \cdot [(\zeta + 1) \cdot (\ln(z_{equ}/Z_0) + 0,5) - 1]}{(\zeta + 1)^2 \cdot \ln(z_{equ}/Z_0)} = 1,7270$ 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 iterativamente calcolata la lunghezza di eccitazione (automaticamente evidenziata in giallo nello schema in tabella) e le forze di inerzia per la verifica a fatica.

EFFETTO DELLE AZIONI DI ECCITAZIONE DEI VORTICI

FORZE DI INERZIA PERPENDICOLARI ALLA DIREZIONE DEL VENTO

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

m_j = massa vibrante nel nodo j $m_j = m_{j,s} + m_{j,r}$

n_1 = frequenza naturale del 1° modo

$\Phi_{1,j} = (z/h)^\zeta$ $\zeta = 2 \rightarrow$ per ciminiera

ampiezza max. di vibraz. alla v_{cr} . $\max y_F = b_{L,j} \cdot K_w \cdot K \cdot C_{lat} \cdot 1/St^2 \cdot 1/Sc = 0,0751962 \text{ m}$

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

fattore di forma modale : $K = 0,13$
 coeff. di forza eccitante aerodin. : $C_{lat,0} = 0,2$ $C_{lat} = f(v_{cr}/v_{m,L,j}) = 0,2$
 numero di Strouhal : $St = 0,2$
 numero di Scruton : $Sc = \frac{2 \cdot m_1 \cdot \delta_s}{\rho \cdot b_{L,j}^2} = 6,400174$

$b_{L,j}$ = diametro fond. riferito a 5/6 h procedim. iterativo :
 $b_{L,j} = 1,516$ $L_j/b_{L,j} = 6$ $L_j = 9,096$ (L di eccitaz.)
 $L_j/b_{L,j} = 6$ $L_j = 9,096$ $b_{L,j} = 1,516$

$v_{cr} < 1,25 \times v_{m,L,j}$ condizioni di risonanza
 $v_{cr} = 5,7962195 \text{ m/sec}$ $Re(v_{cr}) = 585805$
 $z_{L,j} = 45,452 \text{ m}$ $Ct(z_{L,j}) = 1,00$
 $v_{m,L,j} = 32,11 \text{ m/sec}$ $Cr(z_{L,j}) = 1,11$
 $y_{F,j} = 0,0751962$ $v_{cr}/v_{m,L,j} = 0,1805222 < 0,83$
 $y_{F,j}/b_{L,j} = 0,0496017 < 0,1$ C_{lat}

N = numero cicli di sollecitazione vita di prog. $T = \text{anni } 50$
 $N = 6,3 \cdot 10^7 \cdot T \cdot n_1 \cdot \epsilon_0 \cdot (v_{cr}/v_0)^2 \cdot e^{-\ln(v_{cr}/v_0) \cdot z} = 260667134 \text{ cicli}$

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	3889	
45		150,0		379,00					9721
	40,9		42,5		177,12	71,09	0,72	3113	
40		150,0		379,00					36947
			37,5		177,12	71,09	0,56	0	
35		150,0		379,00					71954
			32,5		177,12	71,09	0,42	0	
30		150,0		379,00					106962
	30,0		27,5		202,26	83,10	0,30	0	
25		200,0		504,67					141969
			22,75		204,66	85,60	0,21	0	
20,5		200,0		504,67					173476
			18		252,77	95,11	0,13	0	
15,5		200,0		631,46					208484
			13		278,13	95,11	0,07	0	
10,5		200,0		631,46					243492
			7,5		364,26	114,13	0,02	0	
4,5		200,0		758,51					285501
			2,25		296,07	85,60	0,00	0	
0		200,0		758,51					317008
					2306,64	843,04		7002	317008

Viene quindi eseguita la verifica di resistenza e a fatica per effetto dell'azione del vento sia nel piano delle forze che in direzione trasversale (distacco dei vortici) avendo opportunamente scelto la categoria dei dettagli strutturali dalla tabella in calce al foglio. La resistenza limite tiene conto della instabilità del mantello con riferimento alle norme A.S.C.E e C.E.C.M.

VERIFICA DI RESISTENZA ED A FATICA

per la verifica a fatica : $\Delta\sigma_{dl} \leq \Delta\sigma_R' = \Delta\sigma_R/\gamma_{Mf}$ con $N = 260667134$ cicli
 e con $\gamma_{Mf} = 1,35$ (valori di γ_{Mf} : 1 - 1,15 - 1,25 - 1,35 - tab. 9.3.1 EC3)

RESISTENZE DI PROGETTO A FATICA								
DETTAGLIO STRUTTURALE	CATEGORIA EC3		LIMITI DI FATICA		RESISTENZA A FATICA $\Delta\sigma_R' < 1,5 \cdot f_{t1}$			
(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*	36	23	15	13,835	1,167	14,69	15,0

GEOMETRIA		VERIFICA DI RESISTENZA (1) A.S.C.E. ; (2) C.E.C.M.					VERIFICA A FATICA			
QUOTA-DIAMETRO-BULL.		AZIONI PARALLELE ALLA DIREZIONE DEL VENTO					RES. AMM.	AZ. TRAS.	RES. LIM.	
50	h(z)	nb - di (cm)	$\phi b - A_i$ (cm ²)	db - W_i (cm ³)	M_h (kNm)	N_h (kN)	σ_{Sj} (N/mm ²)	σ_k (N/mm ²)	$\Delta\sigma_{dl}$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_R'$ (N/mm ²)
		150,0					(1) 83,77			
45		150,0	379,00	14213	1905	24,35	(2) 115,15	1,37	36,0	
40,9		40	cl 5.6	20 mm	1620 mm		83,77	4,34	15,0	
40		150,0	379,00	14213	7574	48,70	115,38	5,20	36,0	
		cl 5.6					83,77			
35		150,0	379,00	14213	16884	73,05	115,47	10,12	36,0	
		40	cl 5.6	24 mm	1620 mm		83,77	11,81	15,0	
30		150,0	379,00	14213	29702	97,40	115,52	15,05	36,0	
		cl 5.6			29702	97,40	23,47	82,57		
30,0		200,0	504,67	25234	46139	125,40	109,93	11,25	36,0	
		40	cl 5.6	24 mm	2160 mm		82,57	11,86	15,0	
25		200,0	504,67	25234	64309	153,87	109,96	13,75	36,0	
		cl 5.6					89,22			
15,5		200,0	631,46	31575	88232	188,00	114,40	13,21	36,0	
		40	cl 5.6	27 mm	2160 mm		89,22	12,67	15,0	
10,5		200,0	631,46	31575	115761	224,61	114,42	15,42	36,0	
		cl 5.6					94,71			
4,5		200,0	758,51	37928	152883	271,54	117,51	15,05	36,0	
		cl 5.6					94,71			
0		200,0	758,51	37928	183372	306,98	117,51	16,72	29,0	
		cl 5.6					94,71			
NOTE :	nb = N° bulloni	ϕb = diam. bull.	db = ϕ ancor.				$\sigma_{Sj}/\sigma_{k,min}$	0,553	$\Delta\sigma_{dl}/\Delta\sigma_R$	0,576

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

ds/db	λ	α_0 / α
0	5,32	0,5955
0,05	4,9	0,6471
0,1	4,7	0,5955
0,15	4,5	0,6570
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	

ds/db	λ'	λ''	λ
0,70	3,6	3,58	3,58

Nota 1 : TIPI DI GIUNZIONI

	cat.	descrizione
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 1° 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)

La verifica in condizioni sismiche è riportata nel foglio che segue nel quale è possibile scegliere diversi criteri di distribuzione delle masse lungo l'altezza del camino in base alla norma di riferimento. L'esempio riporta un calcolo in base all'O.P.C.M. 3274 e la resistenza limite tiene sempre conto degli effetti di instabilità.

VERIFICA SISMICA S.L.U.												
metodo di calcolo		2		(1) resistenza limite secondo A.S.C.E. (2) resistenza limite secondo C.E.C.M.								
secondo O.P.C.M. n° 3274		1,364										
coeff. amplific. tens.		1,35										
coeff. secur. perman.		1,35										
50	h(z)	di (cm)	z _j (m)	x / MASSA	COEFF. DIST.	COEFF. SIS.	f / FORZA	MOMENTO	TENSIONE	RES. LIM.		
				m ton	γ _j	K _s	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	0,41	7,36	9,99	24,97	2,62	(1) 114,23 (2) 157,03
40	150,0	150,0	42,5	0,62	2,48	1,92	0,37	5,53	8,94	97,25	8,58	114,23 157,33
35	150,0	150,0	37,5	0,52	2,48	1,69	0,32	3,97	7,89	211,59	17,49	114,23 157,46
30	150,0	150,0	32,5	0,42	2,48	1,47	0,28	2,70	6,83	362,72	28,99	114,23 157,53
30,0	150,0	150,0	27,5	0,33	2,85	1,24	0,24	1,96	6,65	362,72	28,99	112,59 149,91
25	200,0	200,0	27,5	0,24	2,85	1,24	0,24	1,17	6,65	547,56	25,05	112,59 149,91
20,5	200,0	200,0	22,75	0,16	2,90	1,03	0,20	0,72	5,59	741,46	33,50	112,59 149,95
15,5	200,0	200,0	18	0,09	3,48	0,81	0,16	0,90	5,30	984,15	35,19	121,67 156,01
10,5	200,0	200,0	13	0,03	3,73	0,59	0,11	0,70	4,11	1250,38	44,40	121,67 156,03
4,5	200,0	200,0	7,5	0,00	4,78	0,34	0,06	0,04	3,04	1591,31	46,79	129,16 160,23
0	200,0	200,0	2,25	0,00	3,82	0,10	0,02	0,00	0,73	1855,48	54,42	129,16 160,24
Q = Σ [m _j] =				31,50 t								
S = Σ [m _j · z _j] =				697 t.m								
J = Σ [m _j · z _j ²] =				21903 t.m ²								
							TOTALE	59,07	1855,48	σ _{si} /σ _{k,min}	0,421	
							freccia	23,8 cm	con spettro di risposta allo S.L.U.			

ordinata spettro di progetto / g	0,191 = Sd(T1)/g	
fattore di correzione	1 = lamda	
coefficiente di struttura q	1 = q	
coeff. di distribuzione (1/2/3/4)	1 = cd	
periodo fondamentale sec	1,308 = T ₁	
coeff. sismico globale	K _s = 0,191 S.L.U.	

γ ₁ = z _j x Q/S	per cd = 1
γ ₂ = z _j x S/J	per cd = 2
γ ₃ = z _j ² x Q/J	per cd = 3
γ ₄ = 1 + 0,02 x dh	per cd = 4

controllo periodo fondamentale 1,383 = T₁ = 2π · √ [Σ m_j · x_j² / [Σ (m_j · x_j) · g] > 1,308 OK!

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 : 30,00 kN
- N_b = 338,98 kN

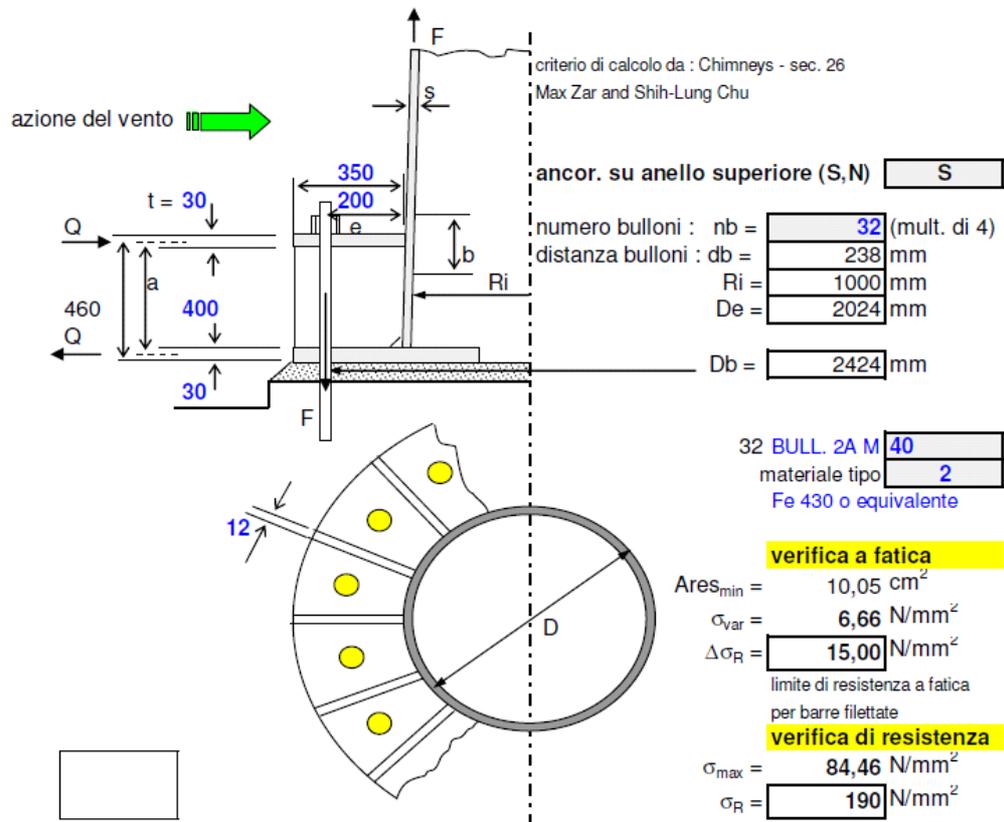
W_b = 37928 cm³ τ = γ_p · N_b / A_b + M_b / W_b = 5,50 kN/cm² < 12,92 kN/cm²

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

Infine viene eseguito il calcolo del sistema di ancoraggio in base alla sollecitazione dimensionante (vento o sisma con fattore di struttura $q = 1$) che viene automaticamente segnalata.

SISTEMA DI ANCORAGGIO



AZIONE RADIALE SULL'ANELLO DI ANCORAGGIO : **è dimensionante l'azione del vento**

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

$$F = 4 \cdot M / (nb \cdot Db) - N / nb = \boxed{84,90} \text{ kN}$$

$$Q = F \cdot e / a = \boxed{39,49} \text{ kN}$$

$$M_{\text{ring}} = C \cdot Q \cdot Db / 2 = \boxed{2187,32} \text{ kNcm}$$

$$y_{\text{ring}} = \boxed{153} \text{ mm} \quad W_{y_{\text{ring}}} = \boxed{821,117} \text{ cm}^3$$

$$\sigma_{\text{max}} = \boxed{26,64} \text{ N/mm}^2 < \sigma_{\text{amm}} = \boxed{94,71} \text{ N/mm}^2$$

A.S.C.E.

nb	C
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 : $ib = \boxed{238} \text{ mm}$

momento flettente locale : $M_f = \boxed{252,57} \text{ kNcm}$

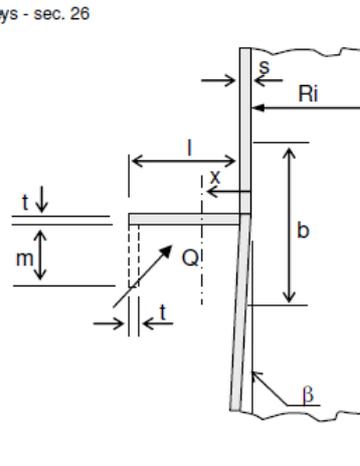
modulo di resistenza locale : $W_I = \boxed{35,70} \text{ cm}^3$

$$\sigma_{\text{loc}} = \boxed{70,75} \text{ N/mm}^2 < 94,71 \quad \text{A.S.C.E.}$$

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

ANELLO DI IRRIGIDIMENTO IN ZONA D'ANGOLO

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



NON RICHIESTO

s = 8 mm
Ri = 750 mm
De = 1516 mm
 $\beta = 0,477$ deg

l = 0 mm
m = 0 mm
t = 0 mm
 $1,56\sqrt{R \cdot s} + t = b = 0$ mm
b . s <= area irrigidimento

SOLLECITAZIONI NELLA SEZIONE

N = 97 kN
vento Mw = 29702 kNcm
sisma Ms = 36272 kNcm
Mcal = 29702 kNcm
 $p(z) = 0,86$ kN/m²

è dimensionante l'azione del vento

Caratteristiche geom. Irrigidimento :

Area efficace : 0 cm²
Pos. asse neutro (x) : 0 mm
Mom. di inerzia : 0 cm⁴

Tensione ammissibile : (A.S.C.E.)

$\sigma_k = X \cdot Y$ kN/cm²
ks = 0,4386184
X = 9,118352 kN/cm²
Y = 0,9186491
 $\sigma_{k,amm} = 8,38$ kN/cm²
 $\sigma_{k,lim} =$ kN/cm²

FORZA MASSIMA VERTICALE PER UNITA' DI LUNGHEZZA DI CIRCONFERENZA ALLA BASE DELLA SEZIONE CILINDRICA :

$$F = M / (\pi \cdot Ri^2) + \gamma_p \cdot N / (2\pi \cdot Ri) = 1,96 \text{ kN/cm}$$

$$\text{Compr. circ. } Q = Ri \cdot [F \cdot \tan\beta + 2,159 \cdot p(z) \cdot (\sqrt{Ri \cdot s} + \sec\beta \cdot \sqrt{Ri \cdot t \cdot \sec\beta})] = 1,50 \text{ kN}$$

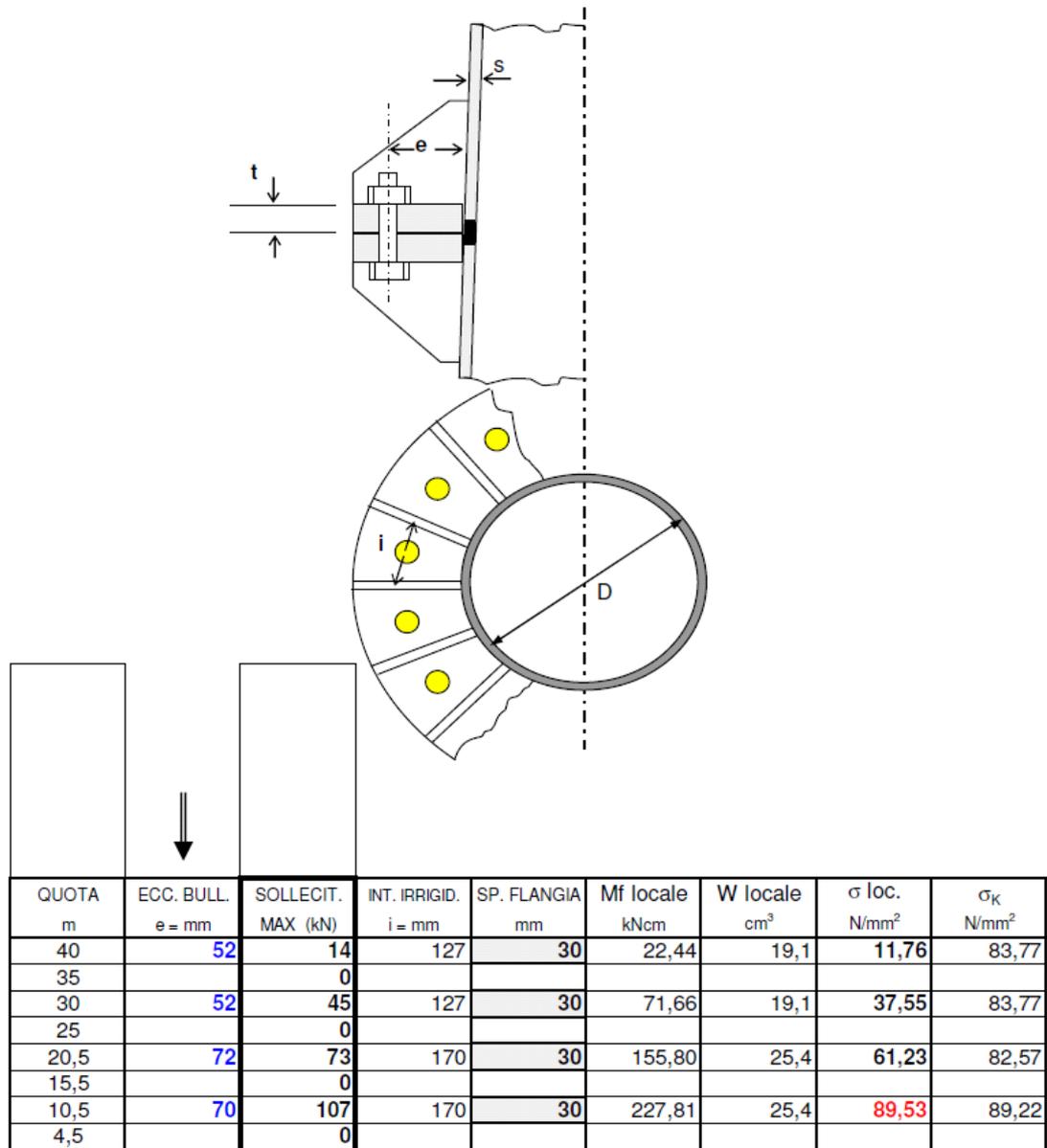
$$\text{Area anello } A_{ring} = Q / \sigma_k = 0,18 \text{ cm}^2 < 0 \text{ cm}^2$$

$$\text{Inerzia min. } J_{ring} = Q \cdot Ri^2 / E = 0 \text{ cm}^4 < 0 \text{ cm}^4$$

PRECARICO MASSIMO DEI BULLONI DEI GIUNTI A FLANGIA

QUOTA m	N° BULLONI nb	DIAM. BULL. $\phi = \text{mm}$	AREA RES. mm ²	RESISTENZA N/mm ²	COEFF. ATTR K=0,17-0,21	PRECARICO MAX (kN)	COPIA SERR. N.m	INT. BULL. >3 ϕ mm
40	40	20	245	500	0,2	86	343	127
35								
30	40	24	353	500	0,2	124	593	127
25								
20,5	40	24	353	500	0,2	124	593	170
15,5								
10,5	40	27	447	500	0,2	156	844	170
4,5								
0	32	40	1005	430	0,17	303	2058	238

VERIFICA FLANGE DI GIUNZIONE CONCI



Come si può notare dalla descrizione tecnica qui riportata , il calcolo automatico è svolto in forma di relazione finale che può essere ufficialmente emessa per gli adempimenti legislativi.