

dott. ing. maurizio milan
n. 1413
ordine degli ingegneri
della provincia di venezia

PROGETTO ARCHITETTONICO:

RPBW

RENZO PIANO BUILDING WORKSHOP

Via P.P. Rubens 29, 16158 Genova - Italy - tel. 010 61711

PROGETTO STRUTTURALE:

milaningegneria

Via Thaon di Revel n. 21 - 20159 Milano - tel. 02 36798890

PROGETTO IMPIANTI:

 **Manens-Tifs**
INGEGNERIA

Via Campofiore n. 21 - 37129 - Verona - tel. 045 8036100

CONSULENTE ANTINCENDIO - SICUREZZA:



GAE Engineering S.r.L.

Corso Marconi n. 20 - 10125 - Torino - tel. 011 0566426

PROGETTO:

Torre Piloti
Genova

OGGETTO

Analisi delle azioni del vento
sulle strutture della torre

TAVOLA

S_R.002

DATA

SCALA

Giugno 2015

REDAZIONE

Milan Ingegneria

LIVELLO PROGETTAZIONE

REVISIONE

Progetto Preliminare

NOME FILE

TPG_PP_S_R.002

CODICE ELABORATO

SOMMARIO

1	PREMESSA	1
2	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	2
2.1.	LEGGI, DECRETI E CIRCOLARI	2
2.2.	NORMATIVA EUROPEA ED INTERNAZIONALE.....	2
2.3.	NORME NAZIONALI	2
3	VELOCITÀ DI RIFERIMENTO DEL VENTO	3
3.1.	DETERMINAZIONI SECONDO NORMATIVA	3
3.1.1	Profilo di velocità del vento	4
3.1.1.1	<i>Formulazione secondo DM 14.1.2008</i>	<i>4</i>
3.1.1.2	<i>Formulazione secondo UNI EN 1991:2010-1-4.....</i>	<i>5</i>
3.2.	ANALISI STATISTICA DELLA VELOCITÀ E DELLA DIREZIONE DEL VENTO	6
3.2.1	Velocità massima del vento	7
3.2.2	Direzione prevalente del vento.....	8
4	DETERMINAZIONE DEI COEFFICIENTI DI PRESSIONE C_p	10
4.1.	ANALISI CFD	10
4.2.	CRITERI DI MODELLAZIONE	10
4.3.	ANALISI DEI RISULTATI	12
4.3.1	Copertura	12
4.3.2	Traliccio principale	13
4.3.3	Sala operativa.....	16
4.3.4	Corpo basso a servizio.....	17
5	CALCOLO DEL FATTORE DI STRUTTURA	18
6	VERIFICA DI INSTABILITA' AEROELASTICA	20
7	VERIFICA DEL COMFORT	24

1 PREMESSA

E' sostanziale il comportamento degli effetti del vento sulle strutture della nuova torre piloti che a Genova ritornerà la funzione di controllo portuale dopo il tragico incidente occorso il 7 maggio 2013. Sarà una struttura in acciaio strallata, alta 66m, con la sala operativa 10x10m, in sommità, e copertura quadrata di 30m.

Questo fascicolo si propone:

- determinare i coefficienti di pressione sulle superfici esposte e il fattore di struttura che integra gli effetti dinamici. Entrambi i coefficienti saranno determinanti delle sollecitazioni sugli elementi (rif. TPG_PP_S_R.001).
- stimare la velocità critica del vento oltre la quale si instaurano fenomeni vorticosi e di instabilità aeroelastica;
- verificare le condizioni di comfort degli occupanti nelle varie condizioni di vento.

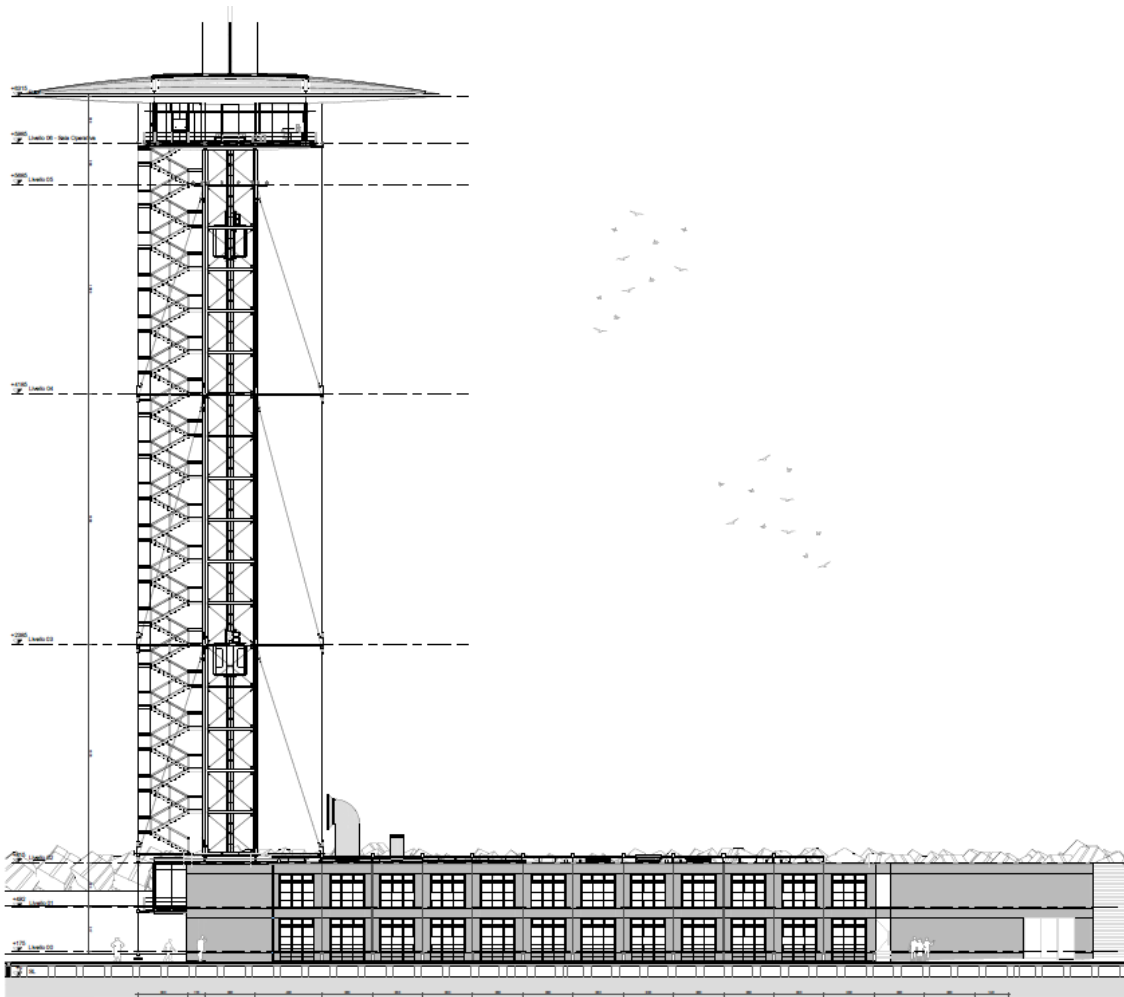


Figura 1. Prospetto nord

L'Autorità Portuale di Genova sarà la Stazione Appaltante, il Progetto è dell'Architetto Renzo Piano, RPBW, gli impianti di Manens-Tifs ingegneria, consulente antincendio e per la sicurezza GAE Engineering srl, il progetto delle strutture a cura di Milan Ingegneria.

2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

2.1. LEGGI, DECRETI E CIRCOLARI

- [1] D.M. 14.1.2008 – *Norme tecniche per le costruzioni*;
- [2] Circolare n.617, 2.2.2009 – *Istruzioni per l'applicazione delle Nuove Norme Tecniche per le costruzioni* di cui al D.M. 14 gennaio 2008;

2.2. NORMATIVA EUROPEA ED INTERNAZIONALE

- [3] UNI EN 1991-1-1:2010 – *Eurocodice 1: Azioni sulle strutture – Parte 1-4: Azioni in generale – Azioni del vento*;

2.3. NORME NAZIONALI

- [4] CNR-DT 207/2008 – *Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni*
- [5] UNI 9614 – *Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo*

3 VELOCITÀ DI RIFERIMENTO DEL VENTO

3.1. DETERMINAZIONI SECONDO NORMATIVA

La normativa italiana suddivide il territorio nazionale in 9 zone (8 di terra, cui si aggiunge la zona 9 "isole e mare aperto"). A ciascuna zona è assegnata una specifica velocità base di riferimento a livello del mare $v_{b,0}$, da incrementare in funzione della quota del sito. Genova è classificata in "zona 7 - Liguria".

L'edificio è di importanza strategica e pertanto si deve applicare incremento della velocità del vento (cfr. TPG_PP_S_R.001, §4.1).

Il calcolo del coefficiente di ritorno risulta:

- dalla CNR DT207/2008, formulazione 3.4d:

$$c_r = 0,65 \left\{ 1 - 0,138 \cdot \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T_R} \right) \right] \right\} \quad \text{per } T_R \geq 50 \text{ anni}$$

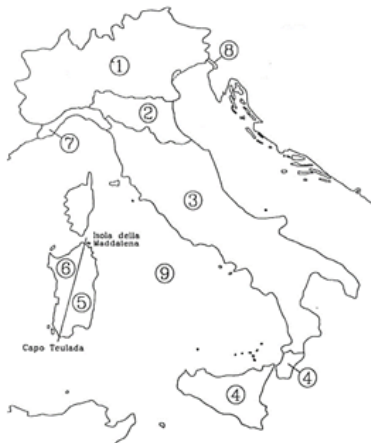
- dalla circolare applicativa nr. 617 del 2.2.2009, formulazione C3.3.2:

$$\alpha_R = 0,75 \sqrt{1 - 0,2 \cdot \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T_R} \right) \right]}$$

Si applica il maggiore tra:

$$c = \max (c_r ; \alpha_r) = \max (1.125 - 1.076) = 1.125$$

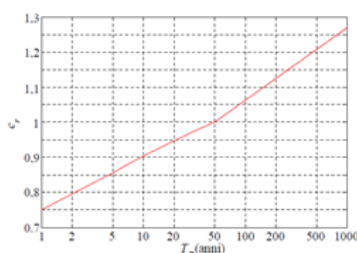
3.2.1 - Velocità base di riferimento



Zona: **7** Liguria

$v_{b,0} =$	28 m/s	velocità base di riferimento a livello del mare
$a_0 =$	1000 m	
$k_a =$	0.54 s^{-1}	
$a_s =$	0 m	altitudine sul livello del mare del sito
$c_a =$	1	coefficiente di altitudine
$v_b =$	28.00 m/s	velocità base di riferimento

3.2.2 - Periodo di ritorno e velocità di riferimento di progetto



$T_R =$	200 anni	tempo di ritorno
$c_r =$	1.13	coefficiente di ritorno
$v_r =$	31.50 m/s	velocità di riferimento di progetto

La velocità di riferimento di progetto, a 10m di altezza è: **31.5 m/s** (113.4 km/h).

3.1.1 PROFILO DI VELOCITÀ DEL VENTO

3.1.1.1 Formulazione secondo DM 14.1.2008

La normativa italiana dispone che la variazione della pressione del vento con l'altezza dipenda dal coefficiente di esposizione c_e e dal quadrato della velocità di riferimento v_b .

Il coefficiente di esposizione è correlato alla categoria di esposizione del sito e alla classe di rugosità del terreno. La Tabella 3.3.III si assegna classe di rugosità D "aree prive di ostacoli (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, pascoli, zone paludose o sabbiose, superfici innevate o ghiacciate, mare, laghi...)" e, con riferimento ai grafici di figura 3.3.2, segue una categoria di esposizione III.

Tabella 3.3.III - Classi di rugosità del terreno

Classe di rugosità del terreno	Descrizione
A	Aree urbane in cui almeno il 15% della superficie sia coperto da edifici la cui altezza media superi i 15m
B	Aree urbane (non di classe A), suburbane, industriali e boschive
C	Aree con ostacoli diffusi (alberi, case, muri, recinzioni,...); aree con rugosità non riconducibile alle classi A, B, D
D	Aree prive di ostacoli (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, pascoli, zone paludose o sabbiose, superfici innevate o ghiacciate, mare, laghi,...)

L'assegnazione della classe di rugosità non dipende dalla conformazione orografica e topografica del terreno. Affinché una costruzione possa dirsi ubicata in classe A o B è necessario che la situazione che contraddistingue la classe permanga intorno alla costruzione per non meno di 1 km e comunque non meno di 20 volte l'altezza della costruzione. Laddove sussistano dubbi sulla scelta della classe di rugosità, a meno di analisi dettagliate, verrà assegnata la classe più sfavorevole.

ZONE 7,8		
A	--	IV
B	--	IV
C	--	III
D	I	II
* Categoria II in zona 8 Categoria III in zona 7		

Il coefficiente di esposizione alle varie quote risulta:

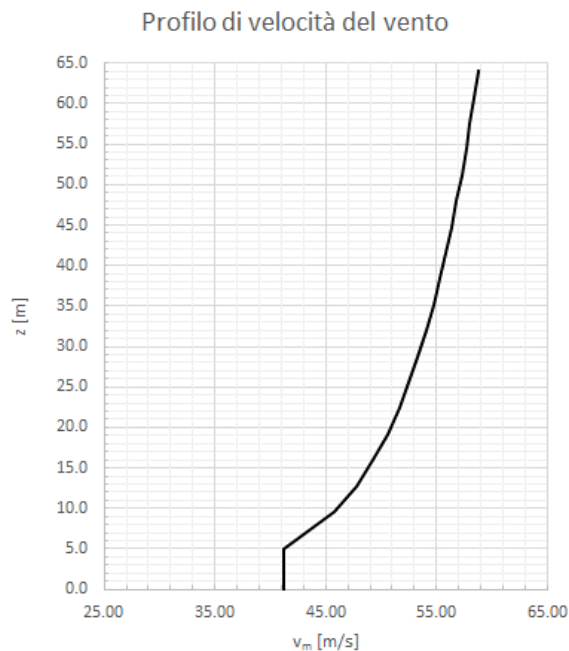
$$c_e(z) = k_r^2 c_t \ln(z/z_0) [7 + c_t \ln(z/z_0)] \quad \text{per } z \geq z_{\min} \quad (3.3.5)$$

$$c_e(z) = c_e(z_{\min}) \quad \text{per } z < z_{\min}$$

con $k_r = 0.20$, $z_0 = 0.10$, $z_{\min} = 5$ da Tabella 3.3.II. e $c_t = 1$ (coefficiente di topografia).

Il profilo della velocità ha distribuzione logaritmica per $z > z_{\min}$, e risulta:

z [m]	$c_e(z)$ []	$v_m(z)$ [m/s]	$v_m(z)$ [km/h]	$v_m(z)$ [nodi]
0.0	1.71	41.16	148	80
3.2	1.71	41.16	148	80
5.0	1.71	41.16	148	80
9.6	2.11	45.77	165	89
12.8	2.30	47.77	172	93
16.0	2.45	49.32	178	96
19.2	2.58	50.57	182	98
22.4	2.69	51.63	186	100
25.6	2.78	52.55	189	102
28.8	2.87	53.35	192	103
32.0	2.95	54.07	195	105
35.2	3.02	54.71	197	106
38.4	3.08	55.31	199	107
41.6	3.14	55.85	201	108
44.8	3.20	56.35	203	109
48.0	3.25	56.82	205	110
51.2	3.30	57.25	206	111
54.4	3.35	57.66	208	112
57.6	3.40	58.05	209	113
60.8	3.44	58.41	210	113
64.0	3.48	58.76	212	114



Dal confronto con il profilo di UNI EN 1991:2010, a seguire, si evidenzia che il DM14.1.2008 esprime la maggiore intensità del vento.

3.1.1.2 Formulazione secondo UNI EN 1991:2010-1-4

L'Eurocodice 1, parte 4, definisce in § 4.3.1. l'incremento della velocità del vento in funzione della quota. Il prospetto 4.1 stabilisce la classe di rugosità 0 "mare o area costiera esposta al mare aperto", cui segue la definizione di z_0 e z_{min} , fissati rispettivamente in 0.003m e 1m; k_r , variabile dipendente, risulta 0.16.

prospetto 4.1 Categorie e parametri del terreno

Categoria del terreno	z_0 m	z_{min} m
0 Mare o area costiera esposta al mare aperto	0,003	1
I Laghi o aree pianeggianti con vegetazione trascurabile e senza ostacoli	0,01	1
II Aree con vegetazione bassa come prati e ostacoli isolati (alberi, edifici) separati da una distanza almeno pari a 20 volte a quella degli stessi ostacoli	0,05	2
III Aree ricoperte uniformemente da vegetazione o edifici o da ostacoli isolati separati da una distanza massima pari a 20 volte quella degli ostacoli stessi (come edifici, periferie o foreste permanenti)	0,3	5
IV Aree nelle quali almeno il 15% della superficie è ricoperta da edifici la cui altezza media eccede i 15 m	1,0	10

Nota Le categorie del terreno sono illustrate nell'appendice A.1.

Si procede al calcolo del fattore di rugosità alle varie quote secondo:

$$c_r(z) = k_r \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{per} \quad z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \quad \text{per} \quad z \leq z_{min}$$

Il profilo della velocità ha andamento logaritmico ove:

$$v_m(z) = c_r(z) \times c_o(z) \times v_b \tag{4.3}$$

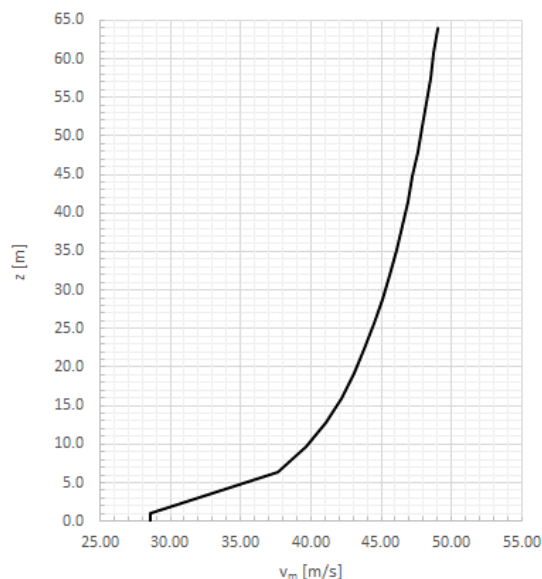
dove:

$c_r(z)$ è il fattore di rugosità, fornito nel punto 4.3.2;

$c_o(z)$ è il fattore di orografia, pari a 1,0 se non diversamente specificato nel punto 4.3.3.

z [m]	$c_r(z)$ []	$v_m(z)$ [m/s]	$v_m(z)$ [km/h]	$v_m(z)$ [nodi]
0.0	0.91	28.55	103	55
1.0	0.91	28.55	103	55
6.4	1.20	37.68	136	73
9.6	1.26	39.67	143	77
12.8	1.30	41.08	148	80
16.0	1.34	42.18	152	82
19.2	1.37	43.08	155	84
22.4	1.39	43.83	158	85
25.6	1.41	44.49	160	86
28.8	1.43	45.07	162	87
32.0	1.45	45.59	164	88
35.2	1.46	46.06	166	89
38.4	1.48	46.48	167	90
41.6	1.49	46.88	169	91
44.8	1.50	47.24	170	92
48.0	1.51	47.58	171	92
51.2	1.52	47.90	172	93
54.4	1.53	48.20	174	93
57.6	1.54	48.48	175	94
60.8	1.55	48.74	175	95
64.0	1.56	48.99	176	95

Profilo di velocità del vento



Eurocodice 1-4 indica condizioni meno cautelative, pertanto essendo edificio di rilevante importanza strategica, si andrà ad applicare quanto in NTC-08.

3.2. ANALISI STATISTICA DELLA VELOCITÀ E DELLA DIREZIONE DEL VENTO

L'analisi statistica della velocità e delle direzioni prevalenti del vento perviene dai dati delle stazioni meteorologiche nell'intorno dell'area di interesse.

Sono 5 stazioni:

- "Porto di Genova", nell'insenatura portuale;
- "Genova Sestri", Aeroporto Cristoforo Colombo;
- "Genova Erzelli", a nord dell'aeroporto;
- "Genova Brignole";
- "Genova Boccadasse", sulla costa, ad est della zona;



Figura 2. Principali stazioni meteorologiche nei dintorni del porto

I dati elaborati¹ fanno riferimento ad osservazioni in periodi differenti per ciascuna stazione: vengono considerati valori rilevati nell'arco temporale da Gennaio 1973 a Gennaio 2015.

¹ Fonte: <http://it.windfinder.com/>
<http://archivio-meteo.distile.it>

3.2.1 VELOCITÀ MASSIMA DEL VENTO



Figura 3. Grafici della velocità media, di picco e di raffica in km/h rilevata giornalmente dal 1.1.1973 al 31.1.2015

Si evidenziano:

- valori di picco che raggiungono 100 km/h (27.8 m/s).
- valori medi delle velocità del vento di poco inferiore ai 14 km/h (3.9 m/s).
- il massimo dei valori medi 45 km/h (12.5 m/s).

Il valore di raffica che dispone la normativa, utilizzato per la progettazione, è di 165 km/h, ben superiore a quello rilevato (100 km/h).

3.2.2 DIREZIONE PREVALENTE DEL VENTO

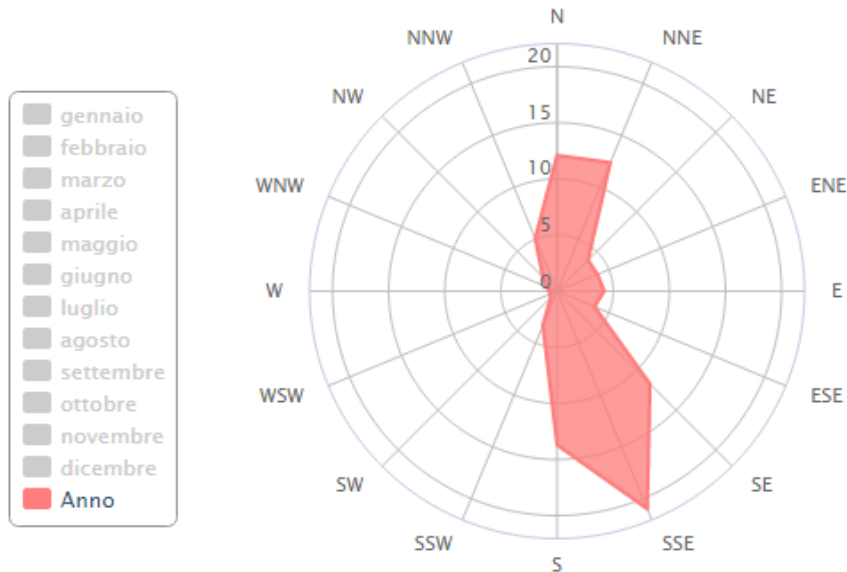


Figura 4. Direzione prevalente del vento nell'ultimo anno – Stazione *Porto di Genova*

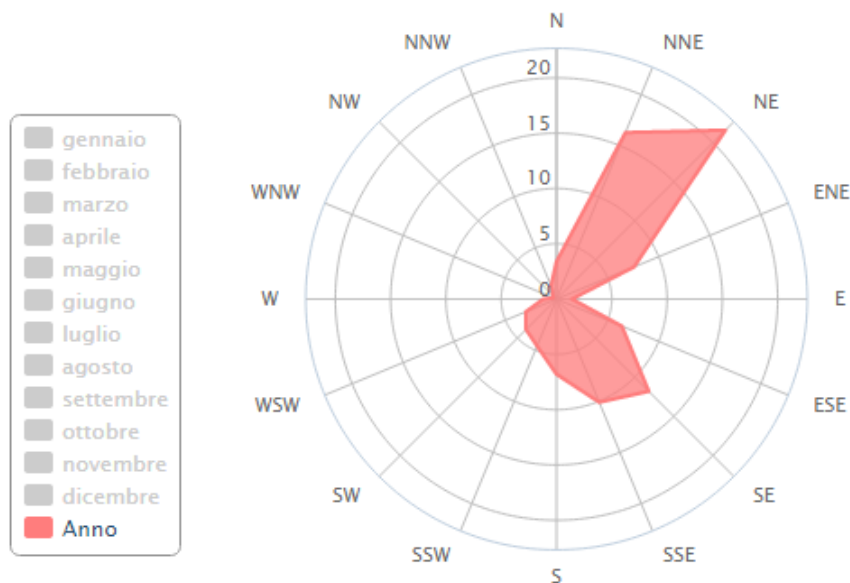


Figura 5. Direzione prevalente del vento nel periodo compreso fra ottobre 2010 e gennaio 2015
Stazione *Genova Sestri* (aeroporto "C. Colombo")

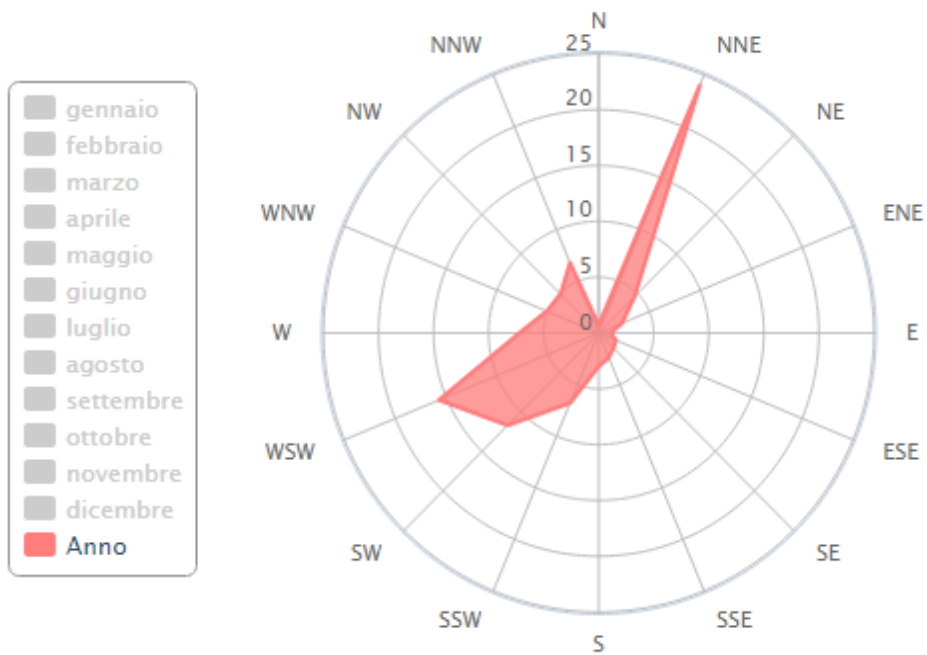


Figura 6. Direzione prevalente del vento nel periodo compreso fra gennaio 2013 e gennaio 2015
Stazione Genova- Enzelli

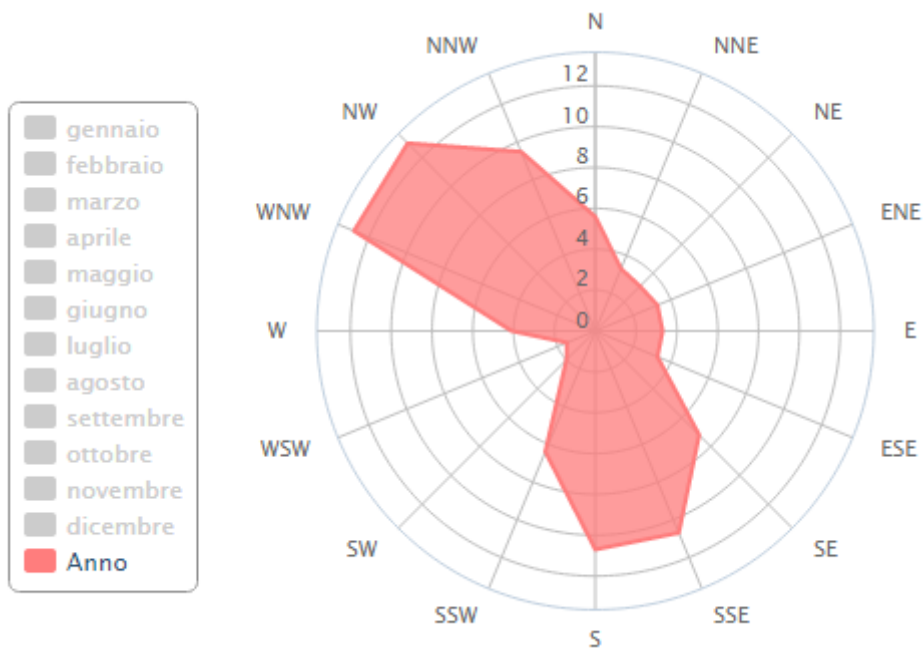


Figura 7. Direzione prevalente del vento nel periodo compreso fra febbraio 2014 e gennaio 2015
Stazione Genova- Brignole

In considerazione del maggior numero di rilevazioni disponibili, la stazione statisticamente più significativa è Genova-Sestri ove si legge che la direzione prevalente del vento è N-E (vento di **grecale**).

4 DETERMINAZIONE DEI COEFFICIENTI DI PRESSIONE C_p

4.1. ANALISI CFD

Data la complessità geometrica dell'edificio, non riconducibile alle tipologie classiche contemplate dalle norme di riferimento, sono state applicate analisi numeriche fluidodinamiche (CFD) per il calcolo della distribuzione dei coefficienti di pressione sulle superfici investite dal vento.

La fluidodinamica computazionale utilizza il metodo alla differenze finite per la risoluzione delle equazioni differenziali non lineari che regolano la dinamica dei fluidi, note come le equazioni di Navier-Stokes.

L'attendibilità dei risultati è stata verificata sulla base di un'attenta analisi dei parametri di convergenza del solutore numerico: equazioni di continuità (bilancio tra flusso entrante e flusso uscente dal volume di calcolo) ed equazioni della quantità di moto nelle tre direzioni x, y e z (bilancio tra forze di pressione e forze di inerzia).

Il risultato di tale analisi ha fornito la mappa dei coefficienti di pressione sulle superfici principali investite dal flusso d'aria, attraverso i quali è possibile determinare le forze aerodinamiche agenti sulla struttura.

4.2. CRITERI DI MODELLAZIONE

Le analisi CFD sono state condotte con un modello fluidodinamico tridimensionale dell'edificio con le seguenti caratteristiche:

- Mesh solida formata da tetraedri
- Volume di controllo 200x200x300m
- 2 552 831 di elementi
- 238 574 nodi virtuali
- Modello di turbolenza: Laminare
- Modello di calcolo: Regime stazionario

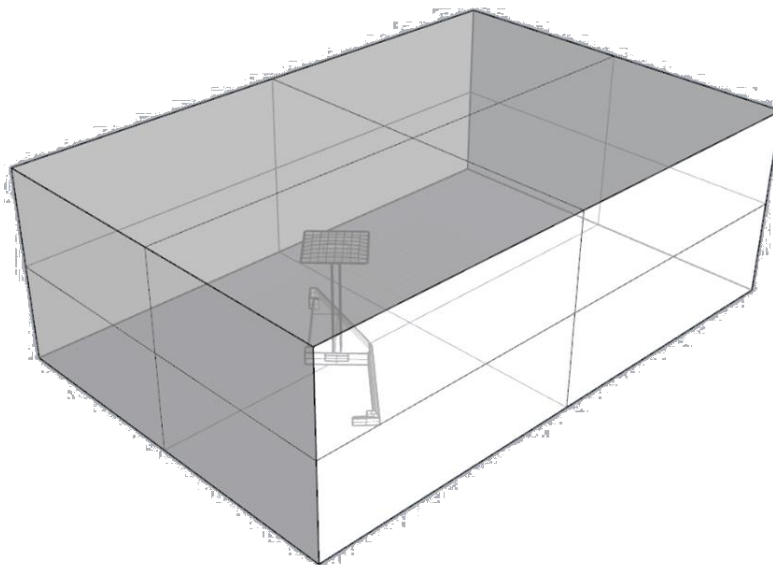


Figura 8. Volume di controllo con la torre immersa (rotazione a 45° per simulare la direzione N-E)

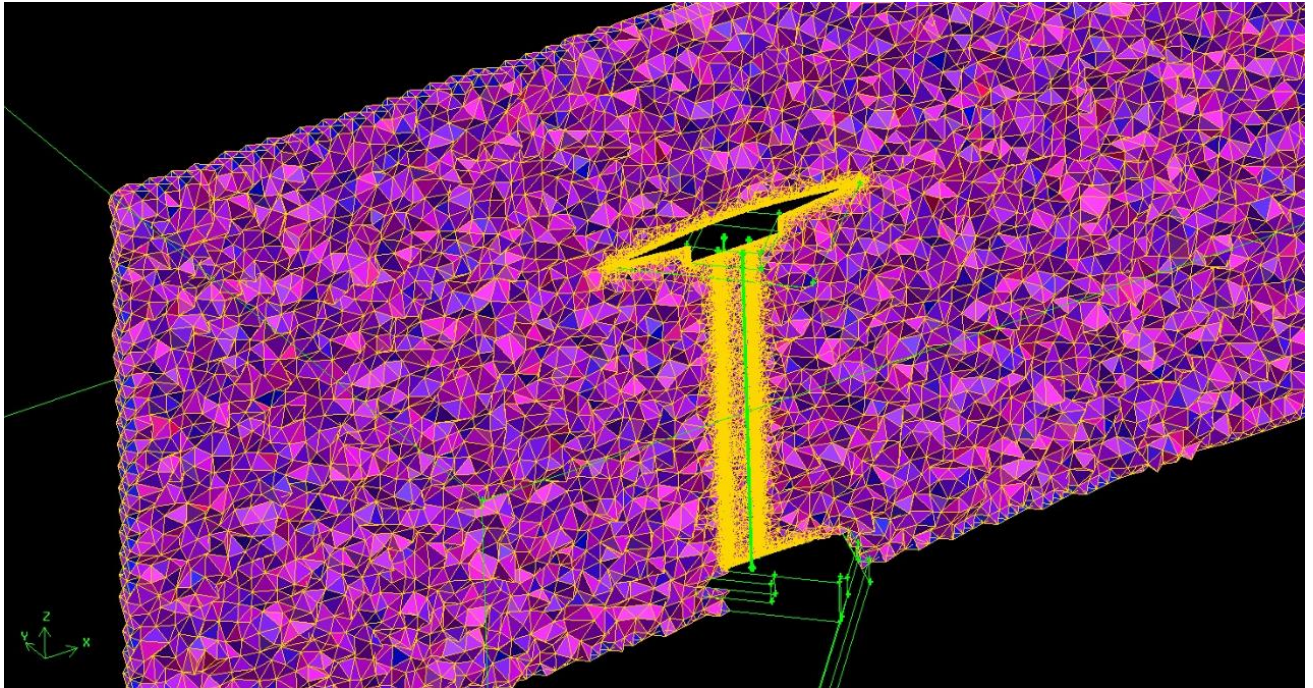


Figura 9. Mesh tetraedrica sul piano medio della torre

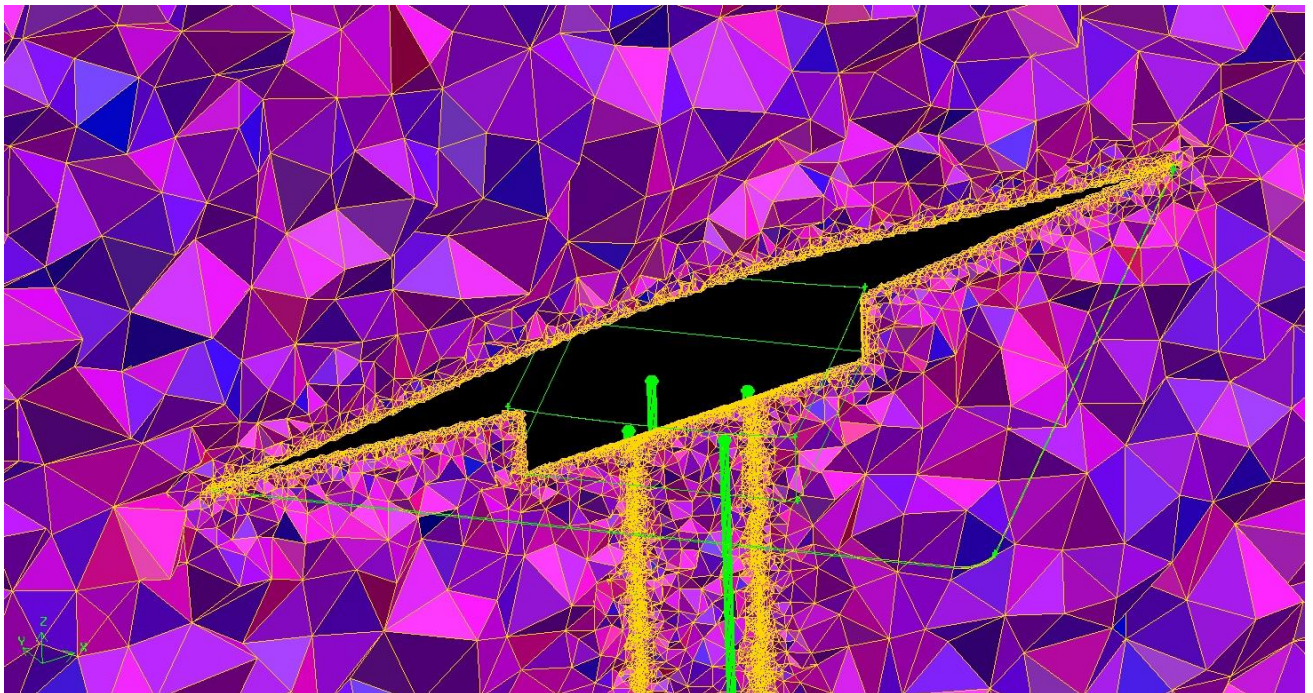


Figura 10. Mesh tetraedrica sul piano medio della torre - dettaglio

4.3. ANALISI DEI RISULTATI

4.3.1 COPERTURA

La copertura è assimilabile a “*tettoia e pensilina isolata*” per cui valgono le prescrizioni al §C3.3.10.3 della Circolare applicativa n.617 del 2.2.2009.

Il coefficiente di pressione per i due spioventi con displuvio vale:

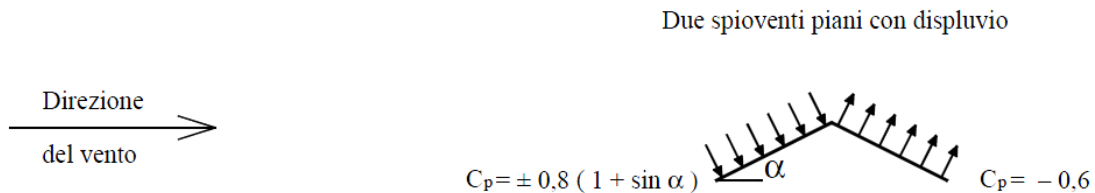


Figura 11. Estratto da figura C3.3.4 Circolare n. 617, 2.2.2009

C 3.3.10.3 - Tettoie e pensiline isolate

$\alpha =$	8 °	inclinazione sull'orizzontale (0° = orizzontale, 90° = verticale)
$n =$	2	numero degli spioventi (1 o 2)
$z =$	65.00 m	altezza sul suolo
$L =$	30.00 m	dimensione massima in pianta
		$c_p = + 0.91$ (sopravento)
		$c_p = - 0.60$ (sottovento)

L'analisi CFD ha evidenziato:

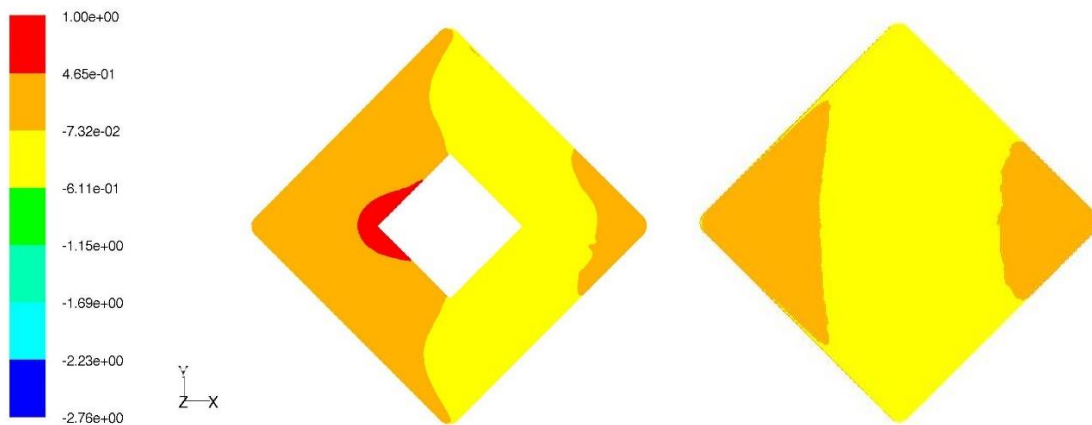


Figura 12. Coefficienti di pressione – superficie inferiore (sx) e superiore (dx)

Da cui:

- $c_p = 1.0 + 0.4 = \mathbf{1.4}$ per superfici sopravento
- $c_p = -0.6 - 0.6 = \mathbf{-1.2}$ per superfici sottovento

Entrambe sono superiori ai valori della normativa e vengono assunti per il calcolo delle sollecitazioni d'insieme.

4.3.2 TRALICCIO PRINCIPALE

Il calcolo del coefficiente di pressione per i componenti il traliccio principale ricade nella disciplina di cui al §C3.3.10.5 della Circolare applicativa n.617 del 2.2.2009, "Torri e pali a traliccio a sezione rettangolare o quadrata", ove:

$$c_p = 2.4 \quad \text{per torri con elementi tubolari a sezione circolare,}$$

L'azione di insieme fa riferimento alla superficie della parte piena di una sola faccia. Nel caso di vento spirante secondo la bisettrice dell'angolo formato dalle pareti l'azione di insieme è 1.15 volte quella sopra definita:

$$c_p = 2.4 \cdot 1.15 = 2.76$$

Nel caso in esame, considerando solo le superfici esposte si hanno due possibili configurazioni: con vento che spirava perpendicolare alle direzioni principali e in direzione della diagonale.

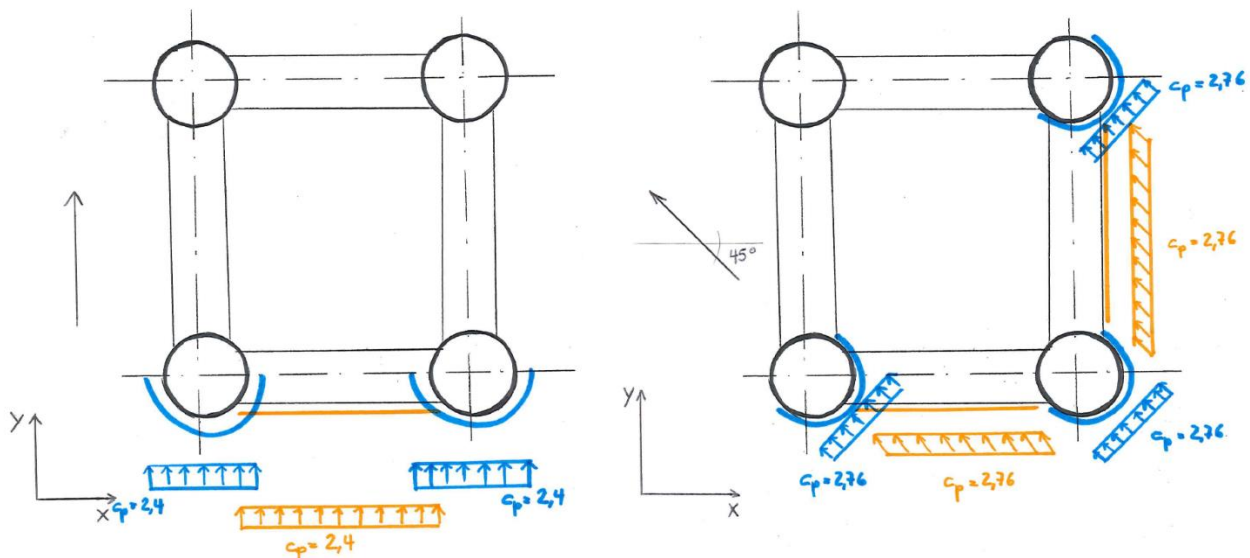


Figura 13. Configurazioni possibili per il traliccio

I c_p di normativa permettono la valutazione dell'azione complessiva, intesa come integrazione sulla superficie cilindrica, applicata alla proiezione del cilindro. L'andamento delle pressioni locali è evidenziato dall'analisi CFD.

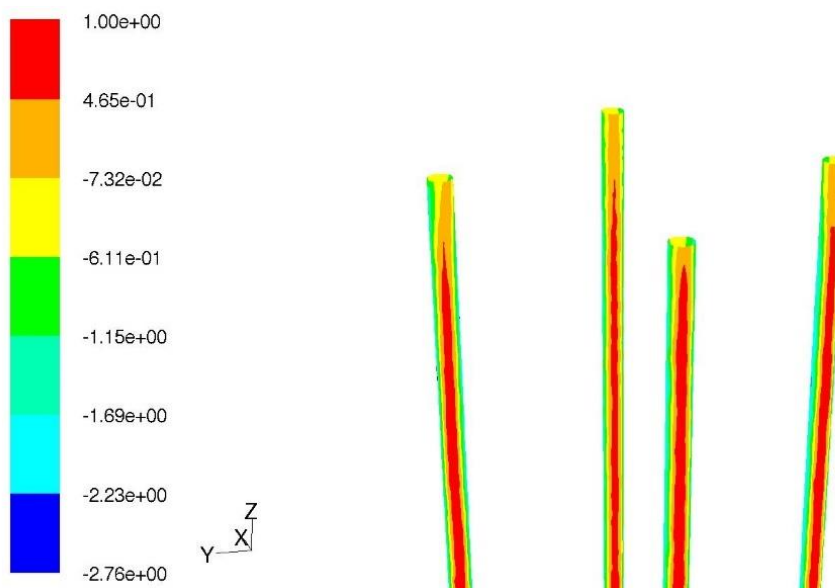


Figura 14. Cp sul fronte investito dal vento (vento in direzione X)

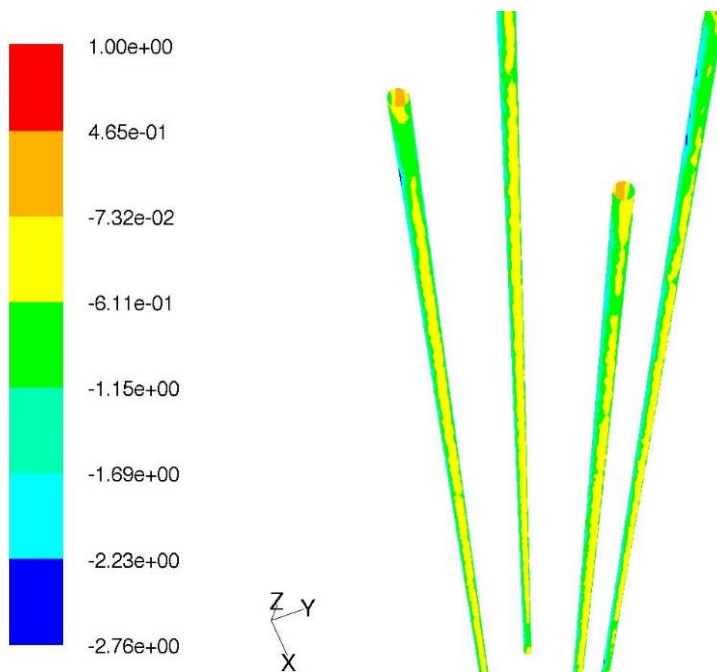


Figura 15. Cp sul fronte sottovento (vento in direzione X)

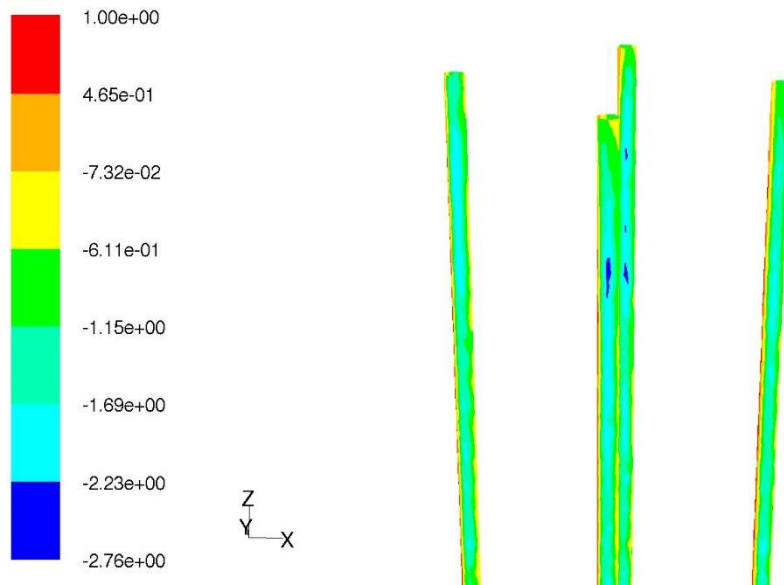
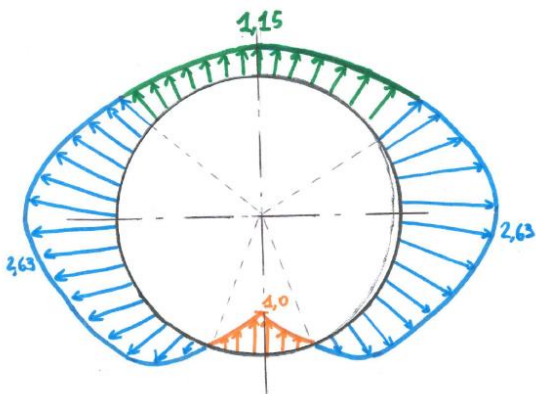


Figura 16. Cp sul fronte perpendicolare all'azione del vento (vento in direzione X)

L'andamento delle pressioni può essere approssimato secondo lo schema seguente:



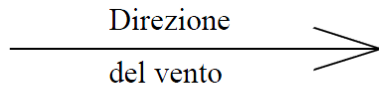
le pressioni "laterali" si compensano avendo c_p uguali e contrari; le pressioni nella zona sopravvento e sottovento si sommano avendo direzione concorde.

Si ottiene $c_p = 1 + 1.15 = 2.15$ da applicare a tutte le colonne. Questa configurazione, massimizza le sollecitazioni. Per i traversi, non modellati, si adotteranno c_p e schema di carico da normativa (**2.76**). In modo analogo per i cosciali della scala, con l'accortezza che non avendo forma tonda si ha $c_p = 2.8 \cdot 1.15 = 3.22$.

4.3.3 SALA OPERATIVA

La normativa italiana dispone l'applicazione di coefficienti di pressione:

- $C_p = 0.8$ per superfici sopravento
- $C_p = -0.4$ per superfici sottovento



Costruzioni aventi una parete con aperture di superficie < 33 % di quella totale

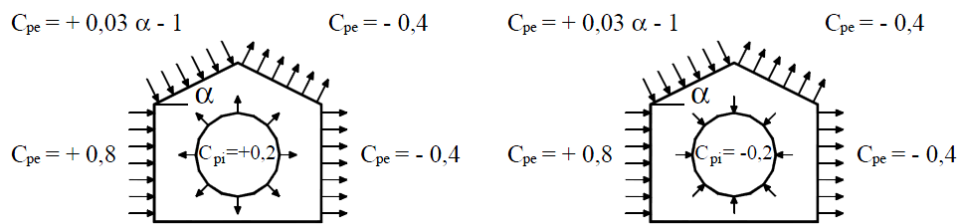


Figura 17. Estratto da figura C3.3.3 Circolare n.617, 2.2.2009

L'analisi CFD ha evidenziato:

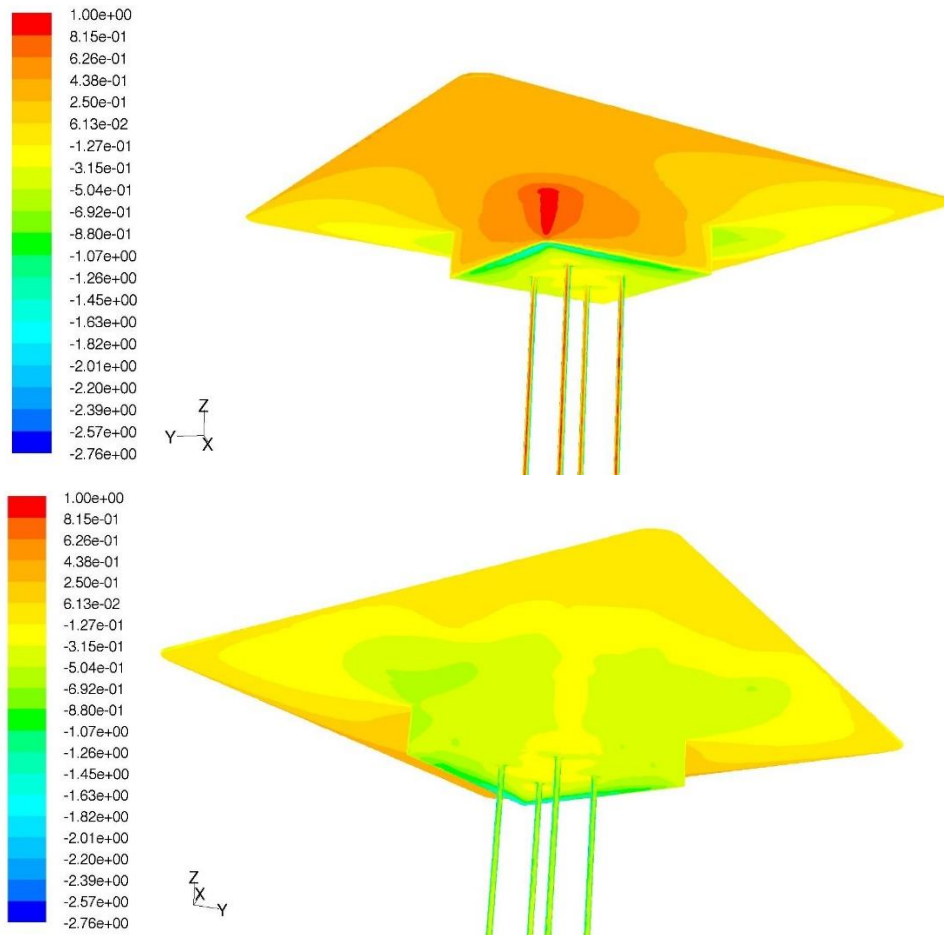


Figura 18. Coefficienti di pressione – superficie sopravento (sopra) e sottovento (sotto)

Da cui:

- $C_p = \mathbf{1.00}$ per superfici sopravento
- $C_p = \mathbf{-0.69}$ per superfici sottovento

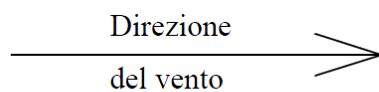
Entrambe sono superiori ai valori di normativa e vengono assunte nel calcolo delle sollecitazioni d'insieme.

4.3.4 CORPO BASSO A SERVIZIO

La normativa italiana dispone l'applicazione di coefficienti di pressione:

- $C_p = \mathbf{0.8}$ per superfici sopravento
- $C_p = \mathbf{-0.4}$ per superfici sottovento

Stante la forma ordinaria della struttura e la modesta rilevanza nel dimensionamento dell'azione del vento nel caso di edifici bassi sono direttamente applicati i coefficienti dettati dalla normativa.



Costruzioni aventi una parete con aperture di superficie < 33 % di quella totale

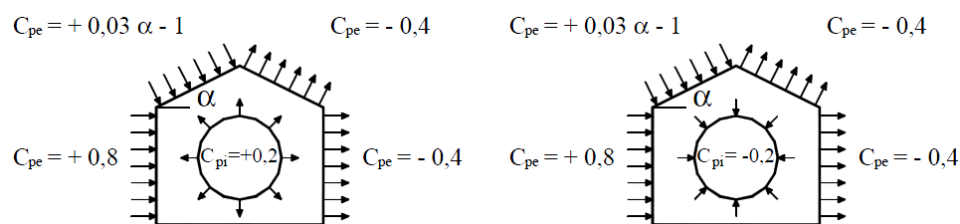


Figura 19. Estratto da figura C3.3.3 Circolare n.617, 2.2.2009

5 CALCOLO DEL FATTORE DI STRUTTURA

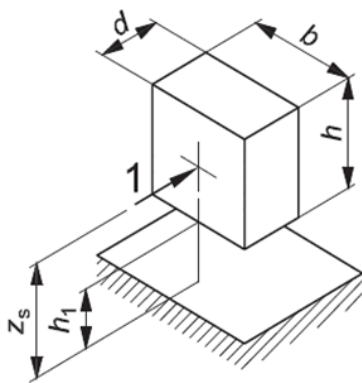
La normativa italiana stabilisce che la pressione del vento dipenda anche dal *coefficiente dinamico* c_d che tiene conto degli effetti riduttivi associati alla non contemporaneità delle massime pressioni locali e degli effetti amplificativi dovuti alle vibrazioni strutturali.

Il §3.3.8 delle NTC-08 dispone che $c_d = 1$ oppure sia stimato mediante analisi specifiche o facendo riferimento a dati di comprovata validità. Per il caso in esame si ricorre alla formulazione del fattore di struttura contenuta nell'appendice B della UNI EN 1991-1-4, assimilando la struttura ad una struttura puntuale, dove la superficie esposta, nel caso in esame la "sala operativa", è sollevata da terra. Alla configurazione con $b = d = 10\text{m}$ corrisponde un fattore di struttura superiore rispetto alla configurazione con $b = d = 30\text{m}$, considerando cioè come superficie esposta la copertura.

SEZIONE 4 - VELOCITA' DEL VENTO E PRESSIONE DINAMICA

CARATTERISTICHE DELL'EDIFICIO

Geometria



$b = 10\text{ m}$
 $d = 10\text{ m}$
 $h = 4\text{ m}$

dimensione in direzione ortogonale alla direzione del vento
dimensione in direzione parallela alla direzione del vento
altezza dell'elemento esposto al vento

$h_1 = 60\text{ m}$
 $Z_s = 62\text{ m}$

quota intradosso elemento esposto
quota di applicazione della risultante

$H = 64\text{ m}$

altezza dell'edificio

Caratteristiche di massa e rigidezza

$M = 212800\text{ kg}$

massa dell'edificio

$\eta_1 = 0.5543\text{ Hz}$

frequenza principale

$k = 70.27\%$

coefficiente di partecipazione modale

$M_1 = 149535\text{ kg}$

massa coinvolta nella vibrazione

$\delta_s = 0.08$

decremento logaritmico dello smorzamento strutturale (prospetto F.2)

SEZIONE 6 - FATTORE DI STRUTTURA $C_s C_d$

$c_s =$	0.93	fattore di dimensione
$c_d =$	1.11	fattore dinamico

$C_s C_d =$	1.03	fattore di struttura
-------------------------------	-------------	-----------------------------

4.4 Turbolenza del vento

$I_v(z) =$	0.100	intensità di turbolenza
$k_I =$	1	fattore di turbolenza
$\sigma_v =$	4.9	scarto tipo della turbolenza

APPENDICE B - PROCEDURA 1 PER LA DETERMINAZIONE DEL FATTORE DI STRUTTURA $C_s C_d$

B.1 Turbolenza del vento

$L(64) =$	194.7 m	lunghezza di scala della turbolenza
$L_t =$	300 m	lunghezza di scala di riferimento (1)
$z_t =$	200 m	altezza di riferimento
$\alpha =$	0.38	
$S_L(z, \eta) =$	0.078	funzione di densità di potenza spettrale (B.2)
$f_L(z, \eta) =$	2.2 Hz	

B.2 Fattore di struttura

$B^2 =$	0.671	fattore di fondo
$R^2 =$	0.892	fattore di risposta risonante
$k_p =$	3.000	fattore di picco
$\nu =$	0.419 Hz	frequenza di attraversamento
$T =$	600 s	intervallo di tempo su cui è calcolata la velocità media del vento
$R_h =$	0.255	funzione di ammettenza aerodinamica (B.7)
$R_b =$	0.727	funzione di ammettenza aerodinamica (B.8)
$\eta_h =$	3.331	
$\eta_b =$	0.520	

Il valore di decremento logaritmico δ_s è quello fornito dal prospetto F.2 per “*strutture miste acciaio – calcestruzzo*”, frequenza principale e coefficiente di partecipazione modale sono ricavati dal modello ad elementi finiti.

prospetto F.2 Valori approssimativi del decremento logaritmico dello smorzamento strutturale del modo fondamentale δ_s

Tipologia strutturale		Smorzamento strutturale, δ_s
Edifici di cemento armato		0,10
Edifici di acciaio		0,05
Strutture miste acciaio-calcestruzzo		0,08
Torri e camini di cemento armato		0,03
Caminii di acciaio saldato senza rivestimento e senza isolamento termico esterno		0,012
Caminii di acciaio saldato senza rivestimento e con isolamento termico esterno		0,020
Caminii di acciaio con rivestimento e con isolamento termico esterno ¹⁾	$h/b < 18$	0,020
	$20 \leq h/b < 24$	0,040
	$h/b \geq 26$	0,014
Caminii di acciaio con due o più rivestimenti con isolamento termico esterno ¹⁾	$h/b < 18$	0,020
	$20 \leq h/b < 24$	0,040
	$h/b \geq 26$	0,025

6 VERIFICA DI INSTABILITA' AEROELASTICA

La torre strallata è una struttura deformabile che la normativa italiana stabilisce sia verificata rispetto a fenomeni di interazione vento-struttura, con particolare attenzione al distacco dei vortici. Questo fenomeno può indurre vibrazioni alla struttura quando la frequenza di distacco è vicina ad una frequenza fondamentale (autoeccitazione).


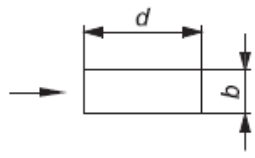
A tal proposito è necessario verificare con le formule contenute in UNI EN 1991-1-4, Appendice E, se nelle condizioni di esercizio della struttura la velocità critica del vento è sufficientemente diversa dalle velocità di riferimento su tutta l'altezza. In caso contrario l'effetto delle vibrazioni indotte del distacco dei vortici determina forze ortogonali alla direzione del vento.

La torre è simmetrica lungo le direzioni ortogonali: non è necessario analizzare la condizione lungo più direttrici. Si ha:

Geometria			
H =	64 m	altezza dell'edificio	
b =	0.324 m	larghezza di riferimento della sezione trasversale	
a =	3.6 m	distanza asse tubi	
$f_1 =$	0.507 Hz	frequenza naturale del primo modo flessione	--> $V_{cr,1} = 0.91$ m/s
$f_2 =$	0.509 Hz	frequenza naturale del secondo modo flessione	--> $V_{cr,2} = 0.92$ m/s
$f_3 =$	2.150 Hz	frequenza naturale del terzo modo flessione	--> $V_{cr,3} = 3.87$ m/s
$\%_1 =$	78.4 %	fattore di partecipazione modale - primo modo	
$\%_2 =$	78.1 %	fattore di partecipazione modale - secondo modo	
$\%_3 =$	4.2 %	fattore di partecipazione modale - terzo modo	
St =	0.18	Numero di Strouhal	

Dove il numero di Strouhal, indipendente dal numero di Reynolds nel caso di sezioni circolari, è ricavato dal prospetto E.1, mentre i dati su frequenze e fattori di partecipazione modale sono il risultato dell'analisi in frequenza del modello ad elementi finiti.

prospetto E.1 Numeri di Strouhal St per differenti sezioni trasversali

Sezione trasversale	St
 Per tutti i numeri di Reynolds Re	0,18
 $0,5 \leq d/b \leq 10$	Dalla figura E.1

APPENDICE E - DISTACCO DI VORTICI E INSTABILITA' AEROELASTICA
(informativa)

E.1.2 Criteri per il distacco dei vortici

$v_b =$	31.5 m/s	valore caratteristico della velocità del vento
$c_o(z) =$	1	fattore di orografia
$c_r(z_{min}) =$	0.91	fattore di rugosità per $z = z_{min}$

z [m]	$c_r(z)$ []	$v_m(z)$ [m/s]	$1.25 \cdot v_m(z)$ [m/s]	Considerare distacco vortici		
				f_1	f_2	f_3
0.0	0.91	28.55	35.7	SI	SI	SI
3.2	1.09	34.27	42.8	SI	SI	SI
6.4	1.20	37.68	47.1	SI	SI	SI
9.6	1.26	39.67	49.6	SI	SI	SI
12.8	1.30	41.08	51.4	SI	SI	SI
16.0	1.34	42.18	52.7	SI	SI	SI
19.2	1.37	43.08	53.8	SI	SI	SI
22.4	1.39	43.83	54.8	SI	SI	SI
25.6	1.41	44.49	55.6	SI	SI	SI
28.8	1.43	45.07	56.3	SI	SI	SI
32.0	1.45	45.59	57.0	SI	SI	SI
35.2	1.46	46.06	57.6	SI	SI	SI
38.4	1.48	46.48	58.1	SI	SI	SI
41.6	1.49	46.88	58.6	SI	SI	SI
44.8	1.50	47.24	59.1	SI	SI	SI
48.0	1.51	47.58	59.5	SI	SI	SI
51.2	1.52	47.90	59.9	SI	SI	SI
54.4	1.53	48.20	60.2	SI	SI	SI
57.6	1.54	48.48	60.6	SI	SI	SI
60.8	1.55	48.74	60.9	SI	SI	SI
64.0	1.56	48.99	61.2	SI	SI	SI

E.1.3.3 Numero di Scrouton

$m_{1,e} =$	33850 kg/m	massa equivalente per unità di lunghezza - primo modo
$m_{2,e} =$	33850 kg/m	massa equivalente per unità di lunghezza - secondo modo
$m_{3,e} =$	33850 kg/m	massa equivalente per unità di lunghezza - terzo modo
$\delta_s =$	0.08	smorzamento strutturale espresso attraverso il decremento logaritmico
$\rho =$	1.25 kg/m ³	densità dell'aria
$SC_1 =$	41300	Numero di Scrouton - primo modo
$SC_2 =$	41300	Numero di Scrouton - secondo modo
$SC_3 =$	41300	Numero di Scrouton - terzo modo

Per il calcolo della massa equivalente si è considerato il peso proprio della struttura, diviso per l'altezza dei cilindri cui sommare il peso della cabina e della copertura. Il risultato è stato poi diviso per il numero delle colonne, considerando il carico equamente ripartito fra gli elementi resistenti.

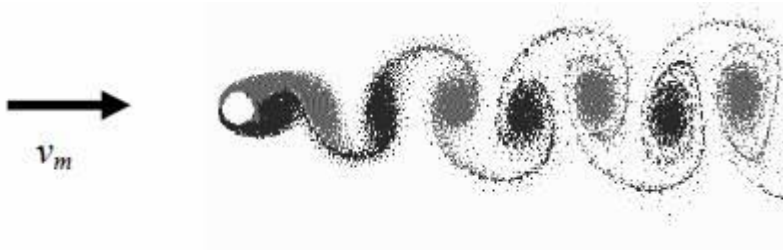
E.1.3.4 Numero di Reynolds

$Re(v_{crit,1}) =$	1.97.E+04	Numero di Reynolds - primo modo
$Re(v_{crit,2}) =$	1.98.E+04	Numero di Reynolds - secondo modo
$Re(v_{crit,3}) =$	8.35.E+04	Numero di Reynolds - terzo modo
$\nu =$	1.50E-05 m ² /s	viscosità cinematica dell'aria

E.1.4 Azione di distacco dei vortici

$F_w(s) =$	17.8 N/m	effetto delle vibrazioni (punto di massimo spostamento) - primo modo
$F_w(s) =$	17.8 N/m	effetto delle vibrazioni (punto di massimo spostamento) - secondo modo
$F_w(s) =$	17.1 N/m	effetto delle vibrazioni (punto di massimo spostamento) - terzo modo
$F_w(s) =$	0.053 kN/m	effetto delle vibrazioni in corrispondenza del punto di massimo spostamento
$Y_{F,max,1} =$	6.60657E-05 m	spostamento massimo - primo modo
$Y_{F,max,2} =$	6.60657E-05 m	spostamento massimo - secondo modo
$Y_{F,max,3} =$	6.60657E-05 m	spostamento massimo - terzo modo
$K =$	0.13	fattore di forma modale (prospetto E.5)
$K_w =$	1.000	fattore di lunghezza di correlazione effettiva
	$L_j =$	60 m
	$\lambda =$	198
$C_{lat} =$	2.1	
$v_{crit,i}/v_m =$	0.019	
$C_{lat,0} =$	0.7	in funzione di Re
$C_{lat,single} =$	0.7	
$k_{TV} =$	3	prospetto E.8

La geometria strutturale induce il distacco alternato di vortici che originano autoeccitazione con sollecitazione trasversale alla direzione del vento (scia di Van Karman).



La frequenza di distacco è sensibilmente diversa da quella propria di vibrazione della struttura per cui l'effetto è irrilevante. Va detto inoltre che la scala è un ottimo elemento di distruzione dei vortici, quindi efficiente nell'eliminazione dei fenomeni di autoeccitazione.

Tale affermazione è suffragata dal calcolo del numero di Strouhal e da quanto riportato all'appendice O.3 della CNR-DT 207/2008, ovvero che per numeri di Strouhal > 30 *“il rischio di sincronizzazione è molto ridotto e il fenomeno del distacco dei vortici non rappresenta, in generale, una condizione di carico particolarmente gravosa”*. Nel nostro caso il numero di Strouhal è 41300.

7 VERIFICA DEL COMFORT

L'accelerazione della torre collocata a 60m di altezza è determinata sulla scorta di quanto all'appendice B.4 – "Accelerazioni e spostamenti per la stima delle condizioni di esercizio di una struttura verticale" della UNI EN 1991-1-4.

B.4 Accelerazioni e spostamenti per la stima delle condizioni di esercizio di una struttura verticale

$\sigma_{a,x}(z) =$	0.093 m/s ² 9.504 mg	scarto dall'accelerazione caratteristica
$c_f =$	2	coefficiente di forza come da Sezione 7 - 7.11 (4)
$\rho =$	1.25 kg/m ³	densità dell'aria
$K_x =$	1.751	(B.12)
$\zeta =$	2.5	(F.3 - forma modale fondamentale)
$z =$	60 m	quota di interesse
$\Phi_{1,x} =$	0.851	forma modale fondamentale nella direzione del vento

Dove:

- La velocità di riferimento è $v_m = 58.41$ m/s (secondo DM 14.1.2008)
- $c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda = 2 \cdot 1 = 2$, considerando sia per $c_{f,0}$ che per ψ_λ il valore che massimizza c_f

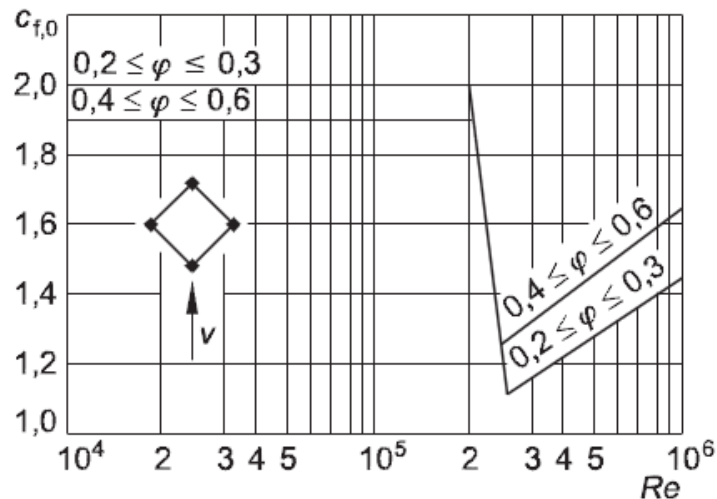


Figura 20. Estratto da figura 7.35 "Coefficiente di forza $c_{f,0}$ per struttura reticolare piana e spaziale realizzata mediante tubolari"

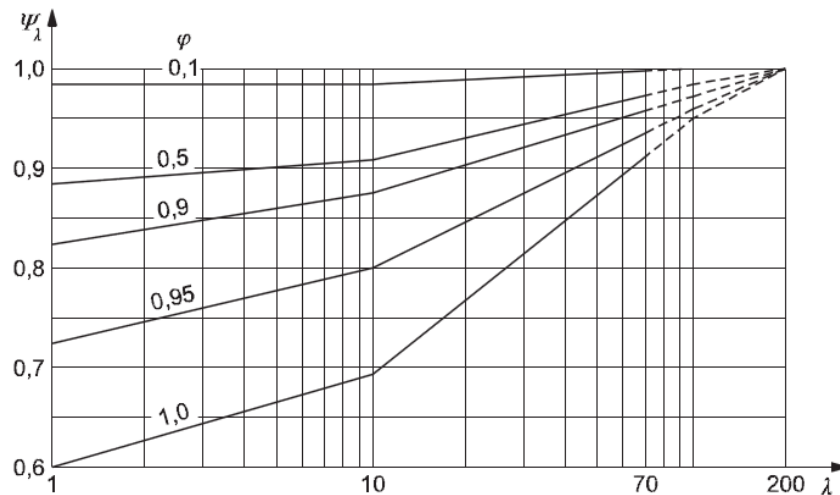


Figura 21. Estratto da figura 7.36 “Valori indicativi del fattore che tiene conto degli effetti di estremità in ψ_λ in funzione della snellezza λ per diversi valori del rapporto di solidità φ ”

- ζ è ricavato dal prospetto F.3 per “torri reticolari in acciaio”
 - $\zeta = 0,6$ per strutture intelaiate snelle prive di pareti o elementi di chiusura che lavorano a taglio;
 - $\zeta = 1,0$ per edifici con un nucleo centrale più pilastri periferici o grandi pilastri più controventi a taglio;
 - $\zeta = 1,5$ per edifici snelli a sbalzo e edifici supportati da un nucleo centrale di cemento armato;
 - $\zeta = 2,0$ per torri e camini;
 - $\zeta = 2,5$ per torri reticolari di acciaio.

Il limite di accettabilità dell’accelerazione orizzontale è determinato nel prospetto V dell’appendice A.3 “Misura e valutazione delle vibrazioni impulsive” della UNI 9614 “Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo”

	asse z m/s ²	assi x e y m/s ²
aree critiche	5,0 10 ⁻³	3,6 10 ⁻³
abitazioni (notte)	7,0 10 ⁻³	5,0 10 ⁻³
abitazioni (giorno)	0,30	0,22
uffici e fabbriche	0,64	0,46

Da ridurre di un fattore $F = 1.7 N^{-0.5} = 1.7 \cdot 10^{-0.5} = 0.54$, ammettendo che si possano registrare fino a 10 raffiche di vento al giorno.

In definitiva l’accelerazione limite è $a_{lim} = 0.46 \cdot 0.54 = 0.25 \text{ m/s}^2 > a_{max} = 0.093 \text{ m/s}^2$.

La letteratura indica in 0.1 m/s² il primo livello di percezione del movimento da parte delle persone.