

3.11.6. L'azione del vento secondo la *NORMATIVA (D.M. 17/01/2018)*

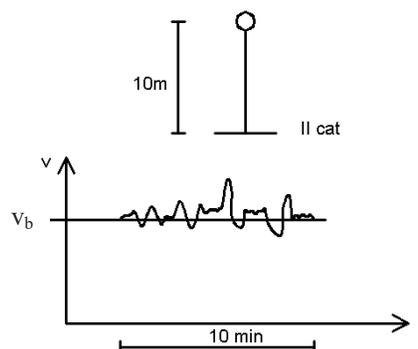
Il vento esercita sulle costruzioni azioni dirette che variano nel tempo e nello spazio provocando in generale effetti dinamici.

Per configurazioni e tipologie strutturali usuali/ordinarie, semplici e di limitata estensione, ovvero poco sensibili all'azione dinamica del vento, è possibile descrivere le azioni indotte dal vento mediante sistemi di forze o di pressioni i cui effetti siano equivalenti a quelli del vento turbolento, considerando di regola la direzione del vento orizzontale (formulazione quasi-statica equivalente). Specifica attenzione va rivolta alle fasi temporanee di costruzione della struttura.

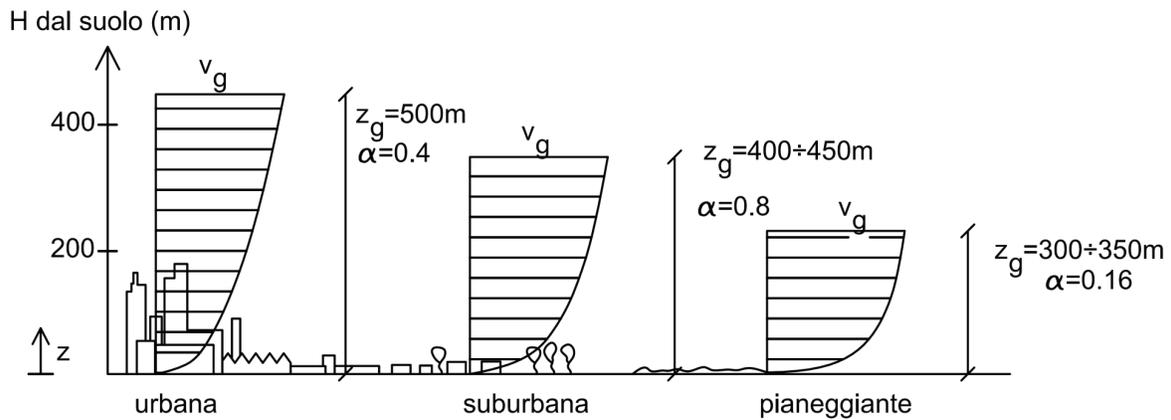
Per costruzioni di forma o tipologia non usuali / non ordinarie, oppure di grande altezza o lunghezza, o di rilevante snellezza e leggerezza, o di notevole flessibilità e ridotte capacità dissipative, il vento può dare luogo a fenomeni di natura dinamica e ad interazione fra la risposta strutturale e le azioni aerodinamiche stesse. Il Progettista deve tener conto anche di possibili effetti trasversali e torsionali dovuti all'asimmetria, effetti di risonanza e fenomeni di fatica.

Per configurazioni strutturali speciali, la cui determinazione e giudizio critico sono di pertinenza e responsabilità del Progettista, può essere necessaria l'effettuazione di adeguate prove sperimentali (in galleria del vento) e/o indagini numeriche, in modo da definire con affidabile accuratezza le caratteristiche del vento, le caratteristiche complessive dell'azione aerodinamica e della risposta aeroelastica.

L'approccio normativo si basa nel determinare una "velocità base di riferimento v_b " del vento, definita come il valore medio della velocità del vento in un intervallo di tempo di 10 minuti, misurata ad una altezza di 10 metri dal suolo su un terreno pianeggiante e omogeneo di categoria di esposizione II (vedi Tab. 3.3.II-NTC2018), riferito ad un periodo di ritorno T_R di 50 anni.



Per ottenere la velocità del vento ad un'altezza diversa, occorre introdurre un coefficiente di profilo α_z che dipende dalla rugosità del terreno e dall'andamento della sua velocità media con l'altezza (profilo logaritmico).



dove z_g viene detta altezza del gradiente e v_g velocità dello strato indisturbato o velocità del gradiente, velocità legata al solo gradiente di pressione in quota.

Accanto a questi fenomeni occorre considerare anche:

la fluttuazione della velocità del vento rispetto al valor medio, la rugosità locale, distanza dal mare, parametri geografici e parametri topografici.

Questi aspetti vengono raggruppati in un unico coefficiente detto “coefficiente di esposizione c_e ”

3.11.6.1. Procedura di calcolo

Lo sviluppo di un modello di carico per il vento viene effettuato generalmente attraverso la definizione di una serie di parametri:

- parametri che caratterizzano il sito dell'opera (macro e microzonazione);
- parametri che caratterizzano la tipologia strutturale;
- parametri che caratterizzano l'opera specifica.

3.11.6.2. Azioni Statiche Equivalenti del vento

L'azione d'insieme esercitata dal vento su una costruzione è data dalla risultante delle azioni sui singoli elementi, considerando di regola, come direzione del vento, quella corrispondente ad uno degli assi principali della pianta della costruzione alla volta. In casi particolari, come ad esempio per le torri, si deve considerare anche l'ipotesi di vento spirante in direzione diagonale.

Le azioni statiche equivalenti del vento sulle strutture possono essere così suddivise

pressione del vento normale alla superficie [kN/m²]

azione tangente per unità di superficie [kN/m²]

azioni statiche globali [kN]

$$p(z) = q_r \cdot c_e(z) \cdot c_p \cdot c_d$$

$$p_f(z) = q_r \cdot c_e(z) \cdot c_{fr}$$

$$F = q_r \cdot c_e(z) \cdot c_f \cdot c_d \cdot A$$

dove:

- q_r è la pressione cinetica di riferimento;
- $c_e(z)$ è il coefficiente di esposizione;
- c_p sono i coefficienti di pressione;
- c_d è il coefficiente dinamico;
- c_{fr} è il coefficiente d'attrito;
- A è la superficie di riferimento.

3.11.6.3. Pressione cinetica di riferimento q_r

La pressione cinetica di riferimento q_r viene associata alla velocità di riferimento v_r :

$$q_r = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2$$

La pressione cinetica $q(z)$ è data dal prodotto della pressione cin. di riferimento per il coefficiente di esposizione $c_e(z)$:

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

Macrozonazione
Microzonazione

dove:

- ρ è la densità dell'aria assunta convenzionalmente pari a 1.25 kg/m³

3.11.6.4. La Velocità di Riferimento del vento v_r (Macrozonazione)

La normativa calcola l'azione del vento sulla costruzione a partire dalla velocità di riferimento v_r (m/s), assunta pari al valore medio della velocità del vento in un intervallo di tempo di 10 minuti, misurata ad una altezza di 10 metri dal suolo su un terreno pianeggiante e omogeneo di categoria di esposizione II (Tab. 3.3.II-NTC2018), riferito ad un **periodo di ritorno T_R espresso in anni**.

$$v_r = v_b \cdot c_r$$

dove:

v_b è la velocità base di riferimento con $T_R=50$ anni;

c_r è il coefficiente di ritorno, funzione del periodo di ritorno di progetto T_R :

$$c_r = 0.75 \sqrt{1 - 0.2 \times \ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T_R} \right) \right)}$$

$$c_r(T_R = 50 \text{anni}) = 1$$

Ove non specificato diversamente, si assumerà $T_R = 50$ anni, cui corrisponde $c_r = 1$.

Per un'opera di nuova realizzazione in fase di costruzione o per le fasi transitorie relative ad interventi sulle costruzioni esistenti, il periodo di ritorno dell'azione potrà essere ridotto:

- **per fasi di costruzione o fasi transitorie con durata prevista in sede di progetto < 3 mesi si assumerà $T_R \geq 5$ anni ($c_r = 0.8551$);**
- **per fasi di costruzione o fasi transitorie con durata prevista in sede di progetto 3 mesi < durata < 1 anno, si assumerà $T_R \geq 10$ anni ($c_r = 0.9031$).**

3.11.6.5. La Velocità base di Riferimento del vento v_b (Macrozonazione)

La normativa calcola l'azione del vento sulla costruzione a partire dalla velocità di riferimento v_r (m/s), assunta pari al valore medio della velocità del vento in un intervallo di tempo di 10 minuti, misurata ad una altezza di 10 metri dal suolo su un terreno pianeggiante e omogeneo di categoria di esposizione II (Tab. 3.3.II-NTC2018), riferito ad un periodo di ritorno **T_R di 50 anni**.

In mancanza di specifiche ed adeguate indagini statistiche, per località poste a quota inferiore di 1500 m sul livello del mare, tale velocità non dovrà essere

$$v_b = v_{b,0} \cdot c_a$$

dove:

$v_{b,0}$ è la velocità base di riferimento con $T_R=50$ anni valutata al livello del mare, in funzione della zona geografica;

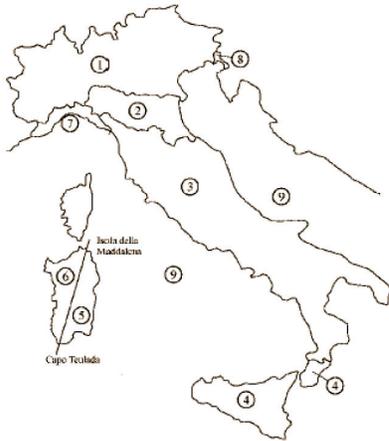
c_a è il coefficiente di altitudine:

$$c_a = 1 \quad \text{per } a_s \leq a_0$$

$$c_a = 1 + k_s \left(\frac{a_s}{a_0} - 1 \right) \quad \text{per } a_0 < a_s \leq 1500 \text{m}$$

a_s è l'altitudine sul livello del mare (in m) del sito in oggetto;

a_0, k_s sono parametri definiti in funzione della zona geografica



Il territorio nazionale è suddiviso in 9 zone, tra cui:

Trieste: zona 8, $v_{b,0} = 30$ m/s
(NTC 2008: 30 m/s)
(D.M.1996: 31 m/s)

Nord Italia: zona 1, $v_{b,0} = 25$ m/s

Centro Sud Italia: zona 3, $v_{b,0} = 27$ m/s

Per altitudini superiori a 1500 m sul livello del mare, i valori della velocità base di riferimento possono essere ricavati da opportuna documentazione o da indagini statistiche adeguatamente comprovate, riferite alle condizioni locali di clima e di esposizione.

Fatte salve tali valutazioni, comunque raccomandate in prossimità di vette e crinali, i valori utilizzati non dovranno essere minori di quelli previsti per 1500 m di altitudine.

Tab. 3.3.I - Valori dei parametri $v_{b,0}$, a_0 , k_s

Zona	Descrizione	$v_{b,0}$ [m/s]	a_0 [m]	k_s
1	Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia (con l'eccezione della provincia di Trieste)	25	1000	0,40
2	Emilia Romagna	25	750	0,45
3	Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Puglia, Campania, Basilicata, Calabria (esclusa la provincia di Reggio Calabria)	27	500	0,37
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria	28	500	0,36
5	Sardegna (zona a oriente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	750	0,40
6	Sardegna (zona a occidente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	500	0,36
7	Liguria	28	1000	0,54
8	Provincia di Trieste	30	1500	0,50
9	Isole (con l'eccezione di Sicilia e Sardegna) e mare aperto	31	500	0,32

Prospetto tratto da D.M. 17.01.2018 - NTC2018

3.11.6.6. Coefficienti di esposizione c_e (Microzonazione)

Il valore della velocità di riferimento del vento, legato a considerazioni di macrozonazione ed al periodo di ritorno, va calibrato per tenere conto degli effetti locali del sito dove è posta la costruzione e dell'altezza dal suolo dei componenti della stessa (micro zonazione), attraverso l'introduzione del coefficiente di esposizione per le pressioni c_e che vale (espressione analoga a quella prevista dalle precedenti norme NTC2008 e D.M. 16/01/1996):

$$\begin{array}{ll} c_e(z) = k_r^2 \cdot c_t \cdot \alpha(z) \cdot [7 + c_t \cdot \alpha(z)] & \text{per } z \geq z_{\min} \\ c_e(z) = c_e(z_{\min}) & \text{per } z < z_{\min} \end{array}$$

dove:

$\alpha(z)$ è il coefficiente di profilo che dipende da z e definisce la variazione di v con la quota (profilo logaritmico):

$$\alpha(z) = \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

k_r, z_0, z_{\min} sono parametri tabellati in funzione della categoria di esposizione
 c_t è il coefficiente di topografia

Per ciascuna delle 9 zone, viene individuata la categoria di esposizione del sito in funzione della posizione geografica, della rugosità del sito e dalla distanza dalla costa.

Nelle fasce entro 40 km dalla costa, la categoria di esposizione è indipendente dall'altitudine del sito.

I parametri k_r, z_0, z_{\min} , definiti per ciascuna categoria secondo le eseguenti tabelle, permettono di definire il coefficiente di esposizione c_e in funzione dell'altezza dell'edificio.

Tab. 3.3.II - Parametri per la definizione del coefficiente di esposizione

Categoria di esposizione del sito	K_r	z_0 [m]	z_{\min} [m]
I	0,17	0,01	2
II	0,19	0,05	4
III	0,20	0,10	5
IV	0,22	0,30	8
V	0,23	0,70	12

Tab. 3.3.III - Classi di rugosità del terreno

Classe di rugosità del terreno	Descrizione
A	<u>Aree urbane</u> in cui almeno il 15% della superficie sia coperto da edifici la cui altezza media superi i 15 m
B	Aree urbane (non di classe A), <u>suburbane, industriali e boschive</u>
C	Aree con <u>ostacoli diffusi</u> (alberi, case, muri, <u>recinzioni,...</u>); aree con rugosità non riconducibile alle classi A, B, D
D	a) <u>Mare e relativa fascia costiera</u> (entro 2 km dalla costa); b) <u>Lago</u> (con larghezza massima pari ad almeno 1 km) e relativa fascia costiera (entro 1 km dalla costa) c) <u>Aree prive di ostacoli o con al più rari ostacoli isolati</u> (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, pascoli, zone paludose o sabbiose, superfici innevate o ghiacciate, ...)

L'assegnazione della classe di rugosità non dipende dalla conformazione orografica e topografica del terreno. Si può assumere che il sito appartenga alla Classe A o B, purché la costruzione si trovi nell'area relativa per non meno di 1 km e comunque per non meno di 20 volte l'altezza della costruzione, per tutti i settori di provenienza del vento ampi almeno 30°. Si deve assumere che il sito appartenga alla Classe D, qualora la costruzione sorga nelle aree indicate con le lettere a) o b), oppure entro un raggio di 1 km da essa vi sia un settore ampio 30°, dove il 90% del terreno sia del tipo indicato con la lettera c). Laddove sussistano dubbi sulla scelta della classe di rugosità, si deve assegnare la classe più sfavorevole (l'azione del vento è in genere minima in Classe A e massima in Classe D).

ZONE 1,2,3,4,5						
	costa		500m		750m	
	mare					
	2 km	10 km	30 km			
A	--	IV	IV	V	V	V
B	--	III	III	IV	IV	IV
C	--	*	III	III	IV	IV
D	I	II	II	II	III	**
* Categoria II in zona 1,2,3,4 Categoria III in zona 5						
** Categoria III in zona 2,3,4,5 Categoria IV in zona 1						

ZONA 6					
	costa		500m		
	mare				
	2 km	10 km	30 km		
A	--	III	IV	V	V
B	--	II	III	IV	IV
C	--	II	III	III	IV
D	I	I	II	II	III

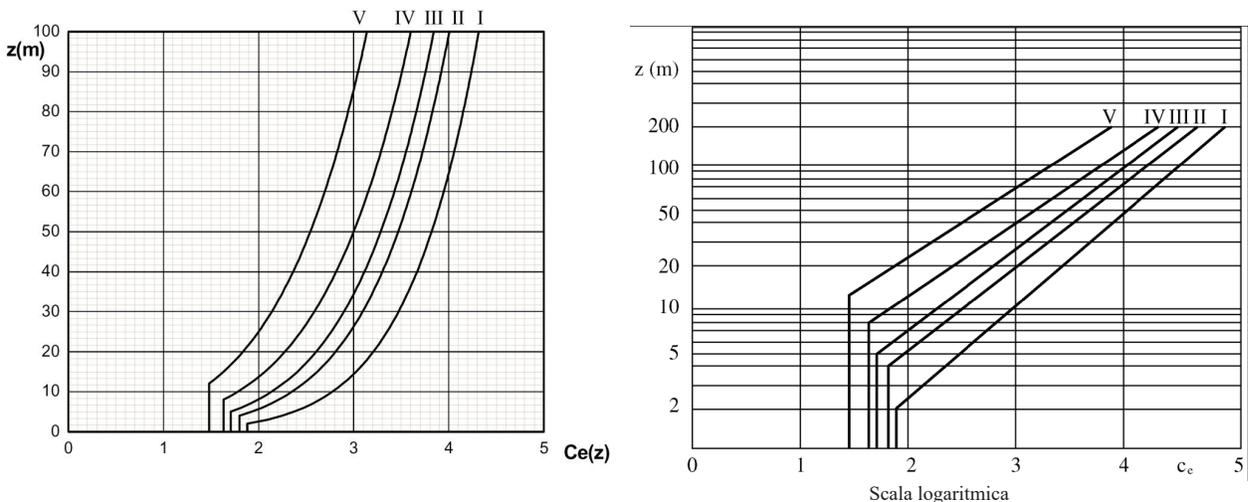
ZONA 7,8		
	costa	
	mare	
	1.5 km	0.5 km
A	--	IV
B	--	IV
C	--	III
D	I	II
* Categoria II in zona 8 Categoria III in zona 7		

ZONA 9	
	costa
	mare
A	I
B	I
C	I
D	I

I valori dei coefficienti di esposizione c_e posso essere desunti anche graficamente:

Osservando la figura, si nota che:

- con l'aumentare della rugosità, aumenta l'altezza in cui c_e rimane costante;
- in una zona priva di ostacoli, il c_e è maggiore di quello calcolato in una zona urbana.

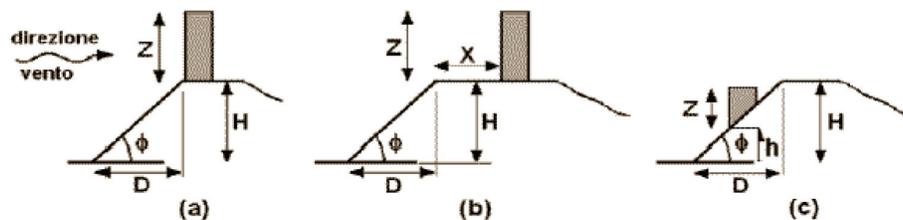


(grafici validi per $c_t=1$)

3.11.6.7. Coefficienti di topografia c_t

Il coefficiente di topografia c_t considera le modifiche locali del profilo di velocità dipendenti dalle caratteristiche topografiche ed orografiche locali del sito.

È posto di regola pari a 1, sia per le zone pianeggianti sia per quelle ondulate, collinose e montane, ad eccezione del caso di costruzioni poste presso la sommità di colline o di pendii isolati (vedere Circolare 02.02.2009 n.617 oppure Eurocodice 1).



3.11.6.8. Coefficienti di pressione interna c_{pi} e esterna c_{pe}

Le azioni statiche del vento si traducono in **pressioni (positive)** e **depressioni (negative)** agenti normalmente alle superfici, sia esterne che interne, degli elementi della costruzione.

L'azione del vento sul singolo elemento è quindi determinata considerando la combinazione più gravosa della pressione agente sulla superficie esterna e della pressione agente sulla superficie interna dell'elemento, ovvero su entrambe le facce di ogni elemento.

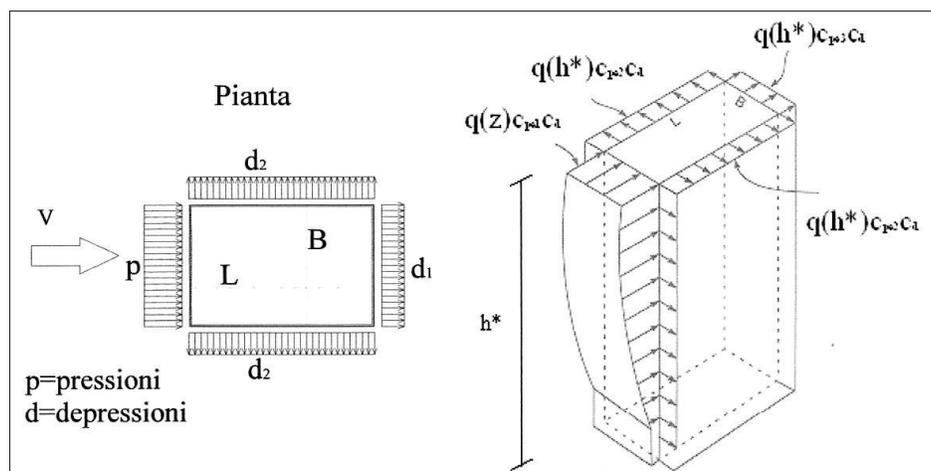
$$p_e(z) = q(z) \cdot c_{pe} \cdot c_d$$

$$p_i(z) = q(z) \cdot c_{pi} \cdot c_d$$

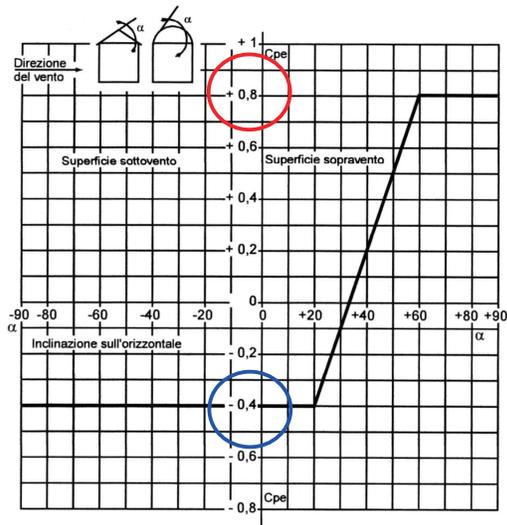
I coefficienti di pressione c_{pe} esterna ed interna c_{pi} dipendono dalla tipologia, dalla geometria della costruzione e dal suo orientamento rispetto alla direzione del vento.

I valori dei coefficienti devono essere ricavati da dati suffragati da opportuna documentazione o da prove sperimentali in galleria del vento. Per edifici di semplice geometria e limitata estensione si possono adottare indicativamente i valori riportati nelle figure seguenti.

Su un generico edificio “stagno” prismatico a base rettangolare il vento genera azioni di pressioni variabili con l'altezza sulla superficie sopravvento, mentre azioni costanti di depressioni calcolate con riferimento alla quota baricentrica della copertura per tutte le altre facce della costruzione.



In generale i valori dei coefficienti c_{pe} dipendono dalle dimensioni geometriche in pianta dell'edificio e dall'inclinazione della parete rispetto alla direzione del vento incidente, secondo i seguenti schemi.

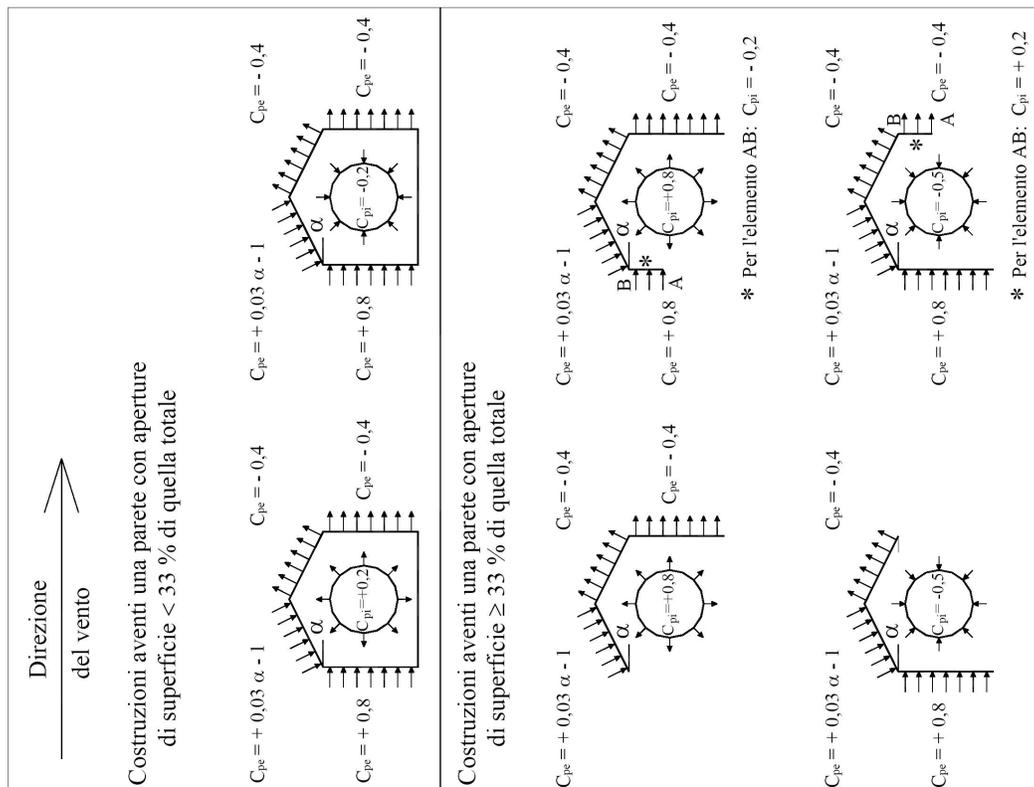


- per elementi sopravvento con inclinazione sull'orizzontale $\alpha > 60^\circ$: $c_{pe} = +0.8$;
- per elementi sopravvento con inclinazione sull'orizzontale: $20^\circ < \alpha < 60^\circ$: $c_{pe} = +0.03\alpha - 1$
- per elementi sopravvento con inclinazione sull'orizzontale $0^\circ < \alpha < 20^\circ$ ed elementi sottovento: $c_{pe} = -0.4$

In generale si assumono i seguenti valori per il coefficiente c_{pi}

$c_{pi} = 0$ per costruzioni stagne,

$c_{pi} = \pm 0.2$ per costruzioni non stagne con aperture distribuite di superficie uniforme.



3.11.6.9. Coefficienti di forma

Nel caso di elementi a sezione circolare o di elementi sferici, le azioni da vento sono valutate in termini di forza globali di direzione parallela a quella del vento, salvo più accurate valutazioni.

Per strutture cilindriche: $f = q(z) \cdot c_f \cdot c_d \cdot B$ [kN/m] (forza per unità di lunghezza)

Per corpi compatti: $F = q(z) \cdot c_f \cdot c_d \cdot A$ [kN] (forza complessiva)

dove:

- $q(z)$ è la pressione cinetica;
- c_f è il coefficiente di forma;
- c_d è il coefficiente dinamico;
- B è la lunghezza di riferimento;
- A è la superficie di riferimento.

Il coefficiente di forma c_f deve essere ricavato da specifica documentazione (EC o report scientifici) o da prove sperimentali in galleria del vento.

3.11.6.10. Coefficienti di attrito

L'azione tangente per unità di superficie parallela alla direzione del vento può essere così calcolata:

$$p_f = q(z) \cdot c_{fr} \quad [\text{kN/m}^2]$$

dove:

- $q(z)$ è la pressione cinetica;
- c_{fr} è il coefficiente di attrito, che in assenza di più precise valutazioni (documentazione specifica o prove in galleria del vento) può essere desunto dalla seguente tabella

Superficie	Coefficiente d'attrito c_f
Liscia (acciaio, cemento a faccia liscia..)	0,01
Scabra (cemento a faccia scabra, catrame..)	0,02
Molto scabra (ondulata, costolata, piegata..)	0,04

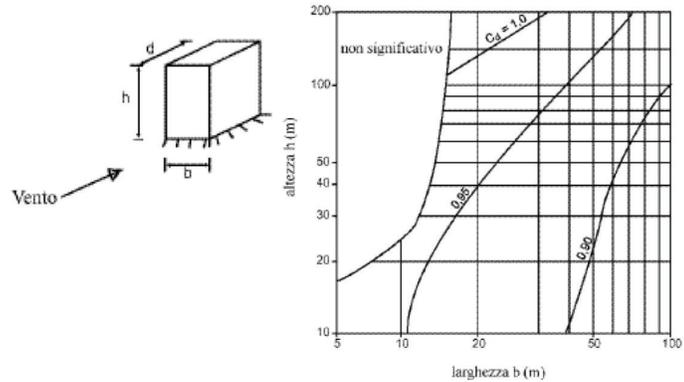
3.11.6.11. Coefficiente dinamico

Il coefficiente dinamico c_d tiene in conto sia della amplificazione dinamica della struttura sia degli effetti riduttivi associati alla non contemporaneità delle massime pressioni locali e gli effetti amplificativi dovuti alle **vibrazioni strutturali**.

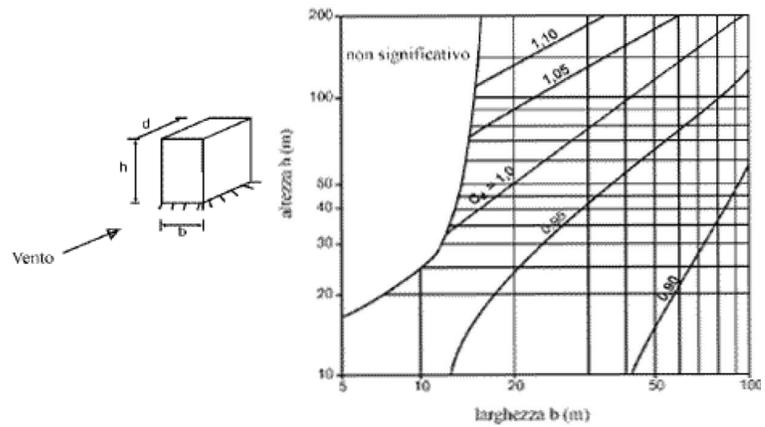
Esso può essere assunto cautelativamente pari ad 1 nelle costruzioni di tipologia ricorrente, quali gli edifici di forma regolare non eccedenti 80 m di altezza ed i capannoni industriali, oppure può essere determinato mediante analisi specifiche e dati di comprovata affidabilità.

In mancanza di queste si può far riferimento alle seguenti figure nel caso di edifici di forma regolare.

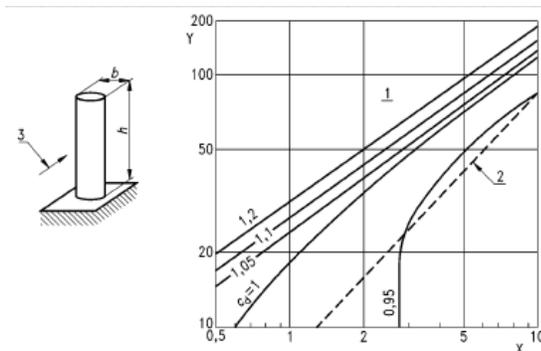
per edifici in muratura o in c.a.



per edifici in acciaio



per ciminiere



3.11.6.12. Verifiche locali

Nell'eseguire verifiche locali è necessario considerare il fatto per cui la massima pressione locale, esercitata dal vento su una superficie di ridotte dimensioni, è maggiore di quella considerata per le verifiche globali.

In particolare nei punti di discontinuità della costruzione si possono generare fenomeni locali, quali il distacco di vortici, che portano a considerevoli aumenti della pressione localizzata.

In assenza di specifiche indicazioni, si può considerare un coefficiente di pressione c_{pe} pari a - 1.8.

3.11.6.13. Fenomeni aeroelastici

Nel caso di strutture particolarmente snelle e flessibili (quali antenne, ciminiere, ponti e strutture strallate o sospese), vanno considerati i fenomeni aeroelastici, l'interazione vento-struttura e fenomeni di interferenza fra struttura adiacenti.

“Avvertenze progettuali” (NTC2018-3.3.10)

Le azioni del vento sui ponti lunghi, sugli edifici alti e più in generale sulle costruzioni di grandi dimensioni o di forma non simmetrica, possono dare luogo a forze trasversali alla direzione del vento e a momenti torcenti di notevoli intensità. Tali azioni possono essere ulteriormente amplificate dalla risposta dinamica della struttura.

Agli ultimi piani degli edifici alti, le azioni del vento possono causare oscillazioni (soprattutto accelerazioni di piano) le cui conseguenze variano, nei riguardi degli occupanti, dalla non percezione sino al fastidio e, in alcuni casi, all'intollerabilità fisiologica.

Per strutture o elementi strutturali snelli di forma cilindrica, quali ciminiere, torri di telecomunicazioni o singoli elementi di carpenteria si deve tenere conto degli effetti dinamici indotti al distacco alternato dei vortici dal corpo investito dal vento. Tali effetti possono essere particolarmente severi quando la frequenza di distacco dei vortici uguaglia una frequenza propria della struttura, dando luogo a un fenomeno di risonanza. In questa situazione le vibrazioni sono tanto maggiori quanto più la struttura è leggera e poco smorzata. L'occorrenza di fenomeni di risonanza in corrispondenza di velocità del vento relativamente piccole e quindi frequenti richiede particolari attenzioni nei riguardi della fatica.

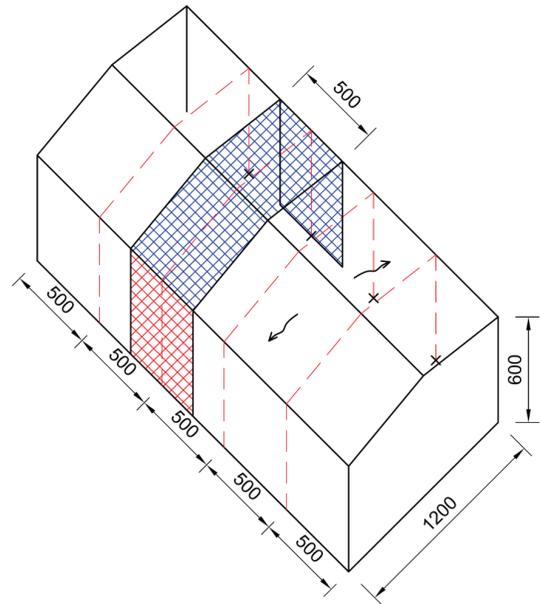
Per strutture particolarmente deformabili, leggere e poco smorzate, l'interazione del vento con la struttura può dare luogo ad azioni aeroelastiche, i cui effetti modificano le frequenze proprie e/o lo smorzamento della struttura sino a causare fenomeni di instabilità, fra i quali il galoppo, la divergenza torsionale ed il flutter. Il galoppo è tipico di cavi ghiacciati o percorsi da rivoli d'acqua, di elementi di carpenteria e più in generale di elementi strutturali di forma non circolare. La divergenza torsionale è tipica in generale di lastre molto sottili. Il flutter è tipico di ponti sospesi o strallati o di profili alari.

Per strutture o elementi strutturali ravvicinati e di analoga forma, ad esempio edifici alti, serbatoi, torri di refrigerazione, ponti, ciminiere, cavi, elementi di carpenteria e tubi, possono manifestarsi fenomeni di interferenza tali da modificare gli effetti che il vento causerebbe se agisse sulle stesse strutture o elementi strutturali isolati. Tali effetti possono incrementare le azioni statiche, dinamiche e aeroelastiche del vento in modo estremamente severo.

In tutti i casi sopra citati si raccomanda di fare ricorso a dati suffragati da opportuna documentazione, o ricavati per mezzo di metodi analitici, numerici e/o sperimentali adeguatamente comprovati.

3.11.7. Esempio 1

Edificio industriale sito a Trieste in zona industriale

Altezza alla gronda $h = 6.00 \text{ m}$ Interasse telai trasversali $i = 5.00 \text{ m}$ Pressione normale del vento $p(z) = q_r \cdot c_e(z) \cdot c_p \cdot c_d$ Azione tangente del vento $p_f(z) = q_r \cdot c_e(z) \cdot c_{fr}$ dove $q_r = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2$ Velocità di riferimento V_r :

Zona Trieste

 \Rightarrow Zona 8 $V_{b,0} = 30 \text{ m/s} - a_0 = 1500 \text{ m} - k_s = 0.50$ $a_s \sim 0 \text{ m s.l.m.m.}$ $\Rightarrow a_s < a_0 \Rightarrow c_a = 1$ $\Rightarrow v_b = v_{b,0} c_a = 30 \times 1 = 30 \text{ m/s}$ $T_R = 50 \text{ anni}$ $\Rightarrow v_r = v_b c_r(TR) \Rightarrow c_r(TR=50) = 1$ $v_r = v_b c_r = 30 \times 1 =$ $v_r = 30 \text{ m/s} = 108 \text{ km/h}$

Zona	Descrizione	$v_{b,0}$ [m/s]	a_0 [m]	k_s
7	Liguria	28	1000	0,54
8	Provincia di Trieste	30	1500	0,50
9	Isole (con l'eccezione di Sicilia e Sardegna) e mare aperto	31	500	0,32

Pressione cinetica di riferimento q_r :

$$q_r = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 = \frac{1}{2} \times 1.25 \times 30^2 =$$

$$q_r = 563 \text{ N/m}^2 = 0.563 \text{ kN/m}^2$$

Coefficiente di esposizione c_e :

$$c_e(z) = K_r^2 \cdot c_t \cdot \alpha(z) \cdot [7 + c_t \cdot \alpha(z)] \quad \text{per } z \geq z_{\min}$$

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

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 15 m
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	a) Mare e relativa fascia costiera (entro 2 km dalla costa); b) Lago (con larghezza massima pari ad almeno 1 km) e relativa fascia costiera (entro 1 km dalla costa) c) Aree prive di ostacoli o con al più rari ostacoli isolati (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, pascoli, zone paludose o sabbiose, superfici innevate o ghiacciate, ...)

ZONE 7,8				Categoria di esposizione del sito	K_r	z_0 [m]	z_{\min} [m]
				I	0,17	0,01	2
				II	0,19	0,05	4
				III	0,20	0,10	5
				IV	0,22	0,30	8
				V	0,23	0,70	12

	mare		costa	
	1.5 km	0.5 km		
A	--	--	IV	IV
B	--	--	IV	IV
C	--	--	III	III
D	I	II	*	*

* Categoria II in zona 8
Categoria III in zona 7

assumendo $c_t = 1$, $z (= 6.00\text{m}) < z_{\min} (= 8.00\text{m})$, $k_r = 0.22$, $z_0 = 0.30 \text{ m}$

si ha:

$$c_e(z_{\min}) = 0.22^2 \times 1 \times \ln\left(\frac{8.00}{0.30}\right) \times \left[7 + 1 \cdot \ln\left(\frac{8.00}{0.30}\right)\right]$$

$$c_e = 1.634$$

Pressioni agenti:

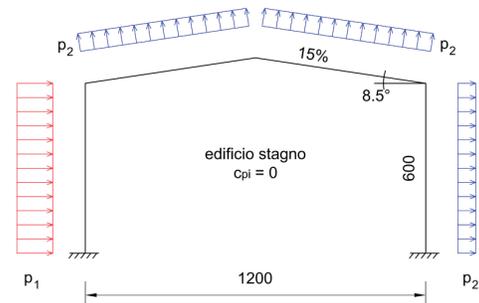
edificio stagno $c_{pi} = 0$

facciata sopravvento $\alpha > 60^\circ$ $c_{pe,1} = 0.8$

facciata sottovento $\alpha > 60^\circ$ $c_{pe,2} = -0.4$

falde copertura $\alpha < 20^\circ$ $c_{pe,2} = -0.4$

a favore sicurezza $c_d = 1$



Si ha: $p(z) = q_r \cdot c_e(z) \cdot c_p \cdot c_d$

$$p_1 = 0.563 \times 1.634 \times 0.8 = 0.736 \text{ kN/m}^2 = 73.6 \text{ kg/m}^2 \text{ (pressione)}$$

$$p_2 = 0.563 \times 1.634 \times 0.4 = 0.368 \text{ kN/m}^2 = 36.8 \text{ kg/m}^2 \text{ (depressione)}$$

Azione di attrito (vento radente):

$$p_f = q_r \cdot c_e(z) \cdot c_{fr} \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Superficie	Coefficiente d'attrito c_f
Liscia (acciaio, cemento a faccia liscia..)	0,01
Scabra (cemento a faccia scabra, catrame..)	0,02
Molto scabra (ondulata, costolata, piegata..)	0,04

Si ha: $p_f = 0.563 \times 1.634 \times 0.04 = 0.0368 \text{ kN/m}^2 = 3.68 \text{ kg/m}^2 \text{ (per unità di superficie)}$

3.11.8. Esempio 2

Edificio multipiano in c.a. sito a Trieste.

Altezza alla gronda $h = 21.00 \text{ m} > z_{\min}$

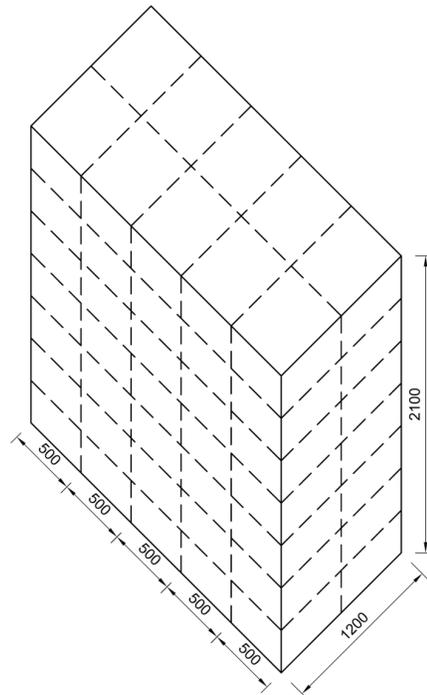
Pressione normale del vento

facciata sopravvento $p(z) = q_r \cdot c_e(z) \cdot c_p \cdot c_d$

facciata sottovento $p(h) = q_r \cdot c_e(z) \cdot c_p \cdot c_d$

facciate laterali $p(h) = q_r \cdot c_e(z) \cdot c_p \cdot c_d$

Azione tangente del vento $p_f(h) = q_r \cdot c_e(z) \cdot c_{fr}$



assumendo area urbana (classe di rugosità A), categoria di esposizione IV

$$c_t = 1, \quad z_{\min} = 8.00 \text{ m}, \quad k_r = 0.22, \quad z_0 = 0.30 \text{ m}$$

si ha: $z < z_{\min}$ $c_e(z_{\min}) = 0.22^2 \times 1 \times \ln\left(\frac{8.00}{0.30}\right) \times \left[7 + 1 \cdot \ln\left(\frac{8.00}{0.30}\right)\right]$

$$c_e = 1.634$$

$$z_{\min} < z < h \quad c_e(z) = 0.22^2 \times 1 \times \ln\left(\frac{z}{0.30}\right) \times \left[7 + 1 \cdot \ln\left(\frac{z}{0.30}\right)\right]$$

Pressione cinetica di riferimento q_r :

$$q_r = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 = \frac{1}{2} \times 1.25 \times 30^2 =$$

$$q_r = 563 \text{ N/m}^2 = 0.563 \text{ kN/m}^2$$

Pressioni agenti:

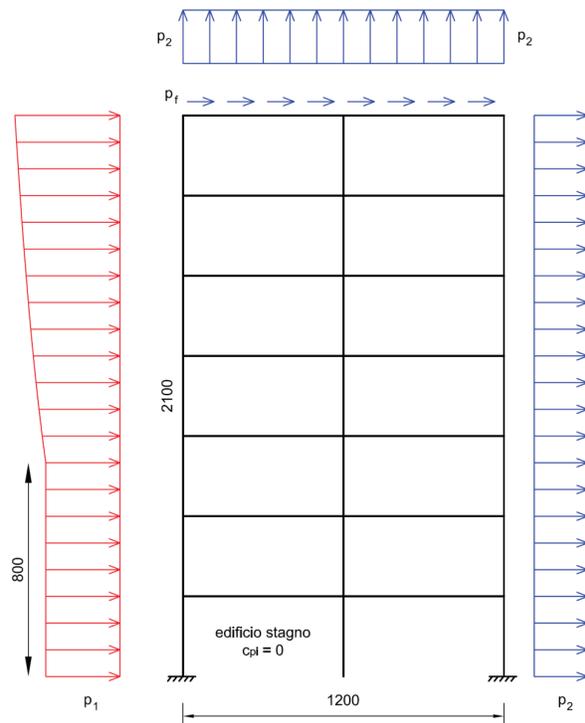
edificio stagno $c_{pi} = 0$ a favore sicurezza $c_d = 1$

facciata sopravvento $\alpha > 60^\circ$ $c_{pe,1} = 0.8$

facciata sottovento $\alpha > 60^\circ$ $c_{pe,2} = -0.4$

falde copertura $\alpha < 20^\circ$ $c_{pe,2} = -0.4$

z	C_e	$q_{B-C_e}(z)$	$v(z)$	$v(z)$	$C_{pa,1}(z)$	$C_{pa,2}(z)$	press. tot.
[m]	$[kN/m^2]$	$[m/s]$	$[km/h]$	$[kN/m^2]$	$[kN/m^2]$	$[kN/m^2]$	$[kN/m^2]$
0	1.634	0.92	38.4	138.06	0.74	0.37	1.10
2	1.634	0.92	38.4	138.06	0.74	0.37	1.10
4	1.634	0.92	38.4	138.06	0.74	0.37	1.10
8	1.634	0.92	38.4	138.06	0.74	0.37	1.10
9	1.712	0.96	39.3	141.32	0.77	0.39	1.16
10	1.783	1.00	40.1	144.22	0.80	0.40	1.20
11	1.848	1.04	40.8	146.83	0.83	0.42	1.25
12	1.908	1.07	41.4	149.20	0.86	0.43	1.29
13	1.964	1.10	42.0	151.37	0.88	0.44	1.33
14	2.017	1.13	42.6	153.38	0.91	0.45	1.36
15	2.066	1.16	43.1	155.24	0.93	0.46	1.39
16	2.113	1.19	43.6	156.98	0.95	0.48	1.43
17	2.157	1.21	44.1	158.60	0.97	0.49	1.46
18	2.199	1.24	44.5	160.14	0.99	0.49	1.48
19	2.238	1.26	44.9	161.58	1.01	0.50	1.51
20	2.277	1.28	45.3	162.95	1.02	0.51	1.54
21	2.313	1.30	45.6	164.25	1.04	0.52	1.56



3.12. Riferimenti bibliografici essenziali

- D.M. 14/01/2008 “Norme tecniche per le costruzioni”
- Circolare 2 febbraio 2009 - Istruzioni per l’applicazione delle “Nuove norme tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 14 gennaio 2008
- D.M. 17/01/2018 “Norme tecniche per le costruzioni”
- CNR-DT 206/2008 – “Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni”
- D.M. 16/01/1996 Norme tecniche relative ai “Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi”
- Eurocode 1 “Basis of design and actions on structures”
- “Ingegneria del vento – Introduzione alla progettazione strutturale alla luce della nuova normativa” a cura G. Augusti, L. Materazzi e V. Sepe. – Edizioni CISM Udine
- “Manuale di ingegneria civile – vol 2” (3a edizione) – AA.VV. – Zanichelli / Esac