Lezione

Progetto di Strutture

Carico da vento

Carico da vento

Fondamenti

I fenomeni meteorologici che si attuano nell'atmosfera terrestre sono prodotti dalle radiazioni del Sole. Esse danno luogo a regimi termici e a campi di pressione responsabili di movimenti delle masse d'aria, generalmente classificati in funzione della loro scala spaziale e temporale.

L'analisi delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni è fondata sulla valutazione della velocità del vento V nel sito della costruzione…..

Assumendo inizialmente la costruzione fissa e indeformabile,
il vento V applica sulla costruzione nel suo complesso, e sui suoi singoli elementi componenti, un sistema di azioni aerodinamiche F_s, funzioni della forma, dell'orientamento e delle dimensioni del corpo investito.

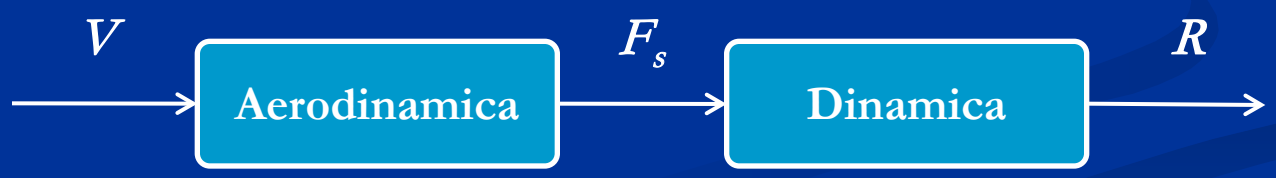
Azioni sulle costruzioni

Fondamenti

Ammettendo che la struttura sia sottoposta a spostamenti causati dal vento, ma che tali spostamenti siano tanto piccoli che lo stato del sistema si possa identificare con la configurazione iniziale, la risposta *R* può essere determinata con i metodi classici dell'analisi strutturale.

Tale risposta è di tipo :

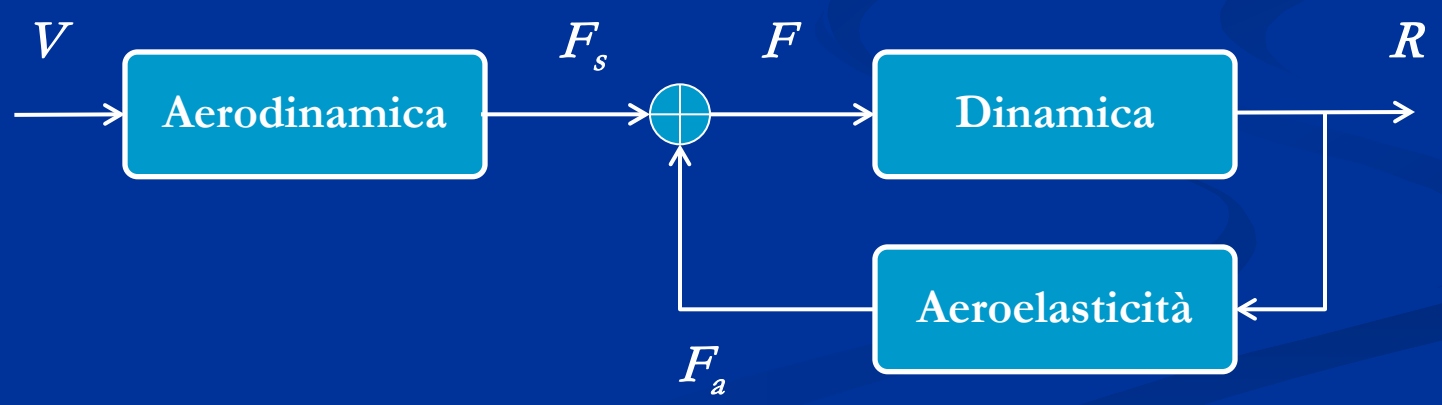
- statico, per le strutture di grandi dimensioni, rigide e smorzate
- dinamico per le strutture piccole o snelle, flessibili e/o poco smorzate.



Azioni sulle costruzioni

Fondamenti

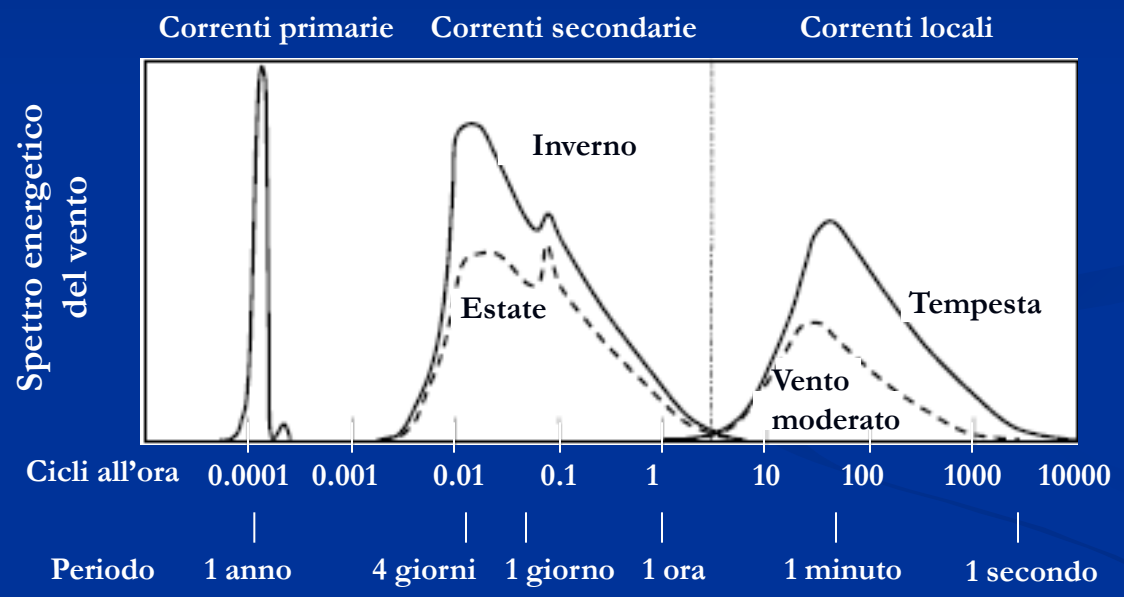
In realtà, soprattutto nel caso delle strutture leggere, flessibili e/o poco smorzate, caratterizzate da una forma aerodinamica suscettibile alle azioni del vento, gli spostamenti e le velocità strutturali sono talvolta così grandi da provocare fenomeni d'interazione vento-struttura, detti aeroelastici, che modificano il vento incidente, le azioni aerodinamiche e la risposta.



Azioni sulle costruzioni

Classificazione dei venti

SPETTRO ENERGETICO DEL VENTO



Azioni sulle costruzioni

Classificazione dei venti

CORRENTI PRIMARIE	Alisei	
	Venti occidentali	
	Venti orientali	
CORRENTI SECONDARIE	Cicloni	Extra-tropicali
		Tropicali
CORRENTI LOCALI	Legate a particolari condizioni geografiche	Brezze
		Föhn
		Venti catabatici
	Legate a particolari condizioni atmosferiche	Venti frontali
		Downburst
		Tromba d`aria

Azioni sulle costruzioni

Suddivisione dell`atmosfera

La velocità del vento e la sua direzione sono condizionati dal gradiente di pressione, dalla forza di Coriolis e dagli sforzi tangenziali con il terreno

L'altezza del gradiente dipende dalla scabrezza del suolo espressa dal parametro z_0 detto LUNGHEZZA DI RUGOSITÀ

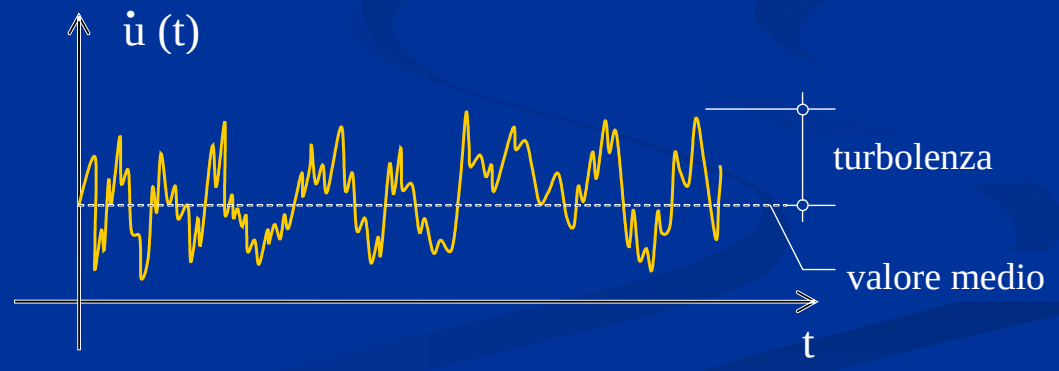
Azioni sulle costruzioni

Misurazione della velocita' del vento

La velocità del vento si può calcolare con:

- ANEMOMETRO A COPPE
- ANEMOMETRO A FILO CALDO

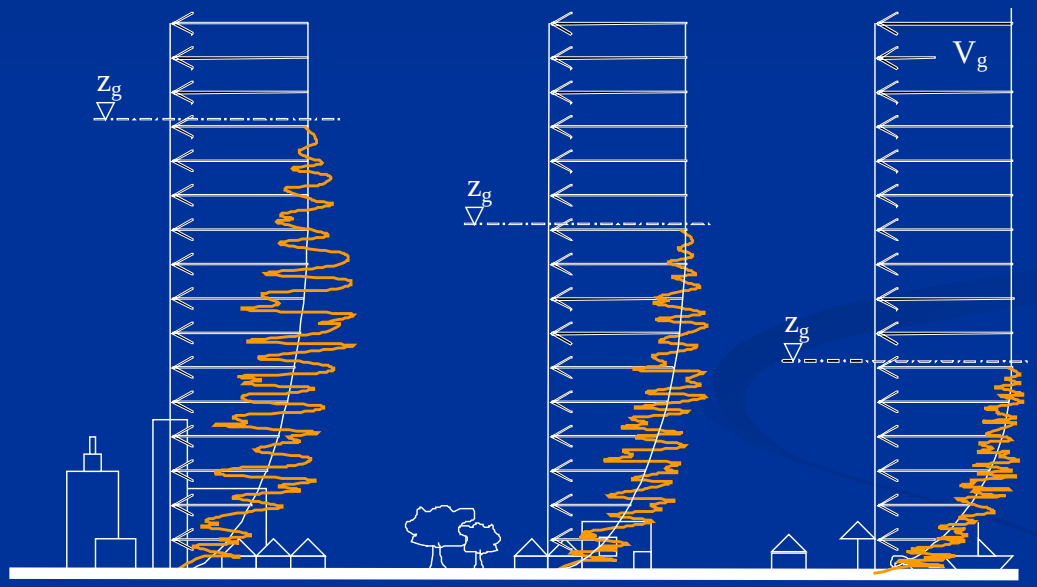
Registrazione della velocita` del vento



Azioni sulle costruzioni

Rappresentazione del vento

PROFILO VERTICALE DELLA VELOCITA' DEL VENTO



Velocità geostrofica

Rugosità

Azioni sulle costruzioni

Rappresentazione del vento

$$v(P;t)=v_m(z)+v'(P;t)$$

La velocità media di riferimento è la velocità media del vento su un intervallo di tempo pari a 10 minuti, a 10 m d'altezza sul suolo, su un terreno pianeggiante e omogeneo, con lunghezza di rugosità z_0 = 0.05 m. La probabilità di superamento di tale valore è assegnata mediante un periodo di ritorno di progetto T_R, funzione delle proprietà della costruzione e delle verifiche svolte.

Azioni sulle costruzioni

Valore di picco della velocità del vento

Si definisce valore di picco della velocità del vento v_p
il valore medio di v_{max} associato al periodo di ritorno di progetto.

$$v_p(P;t)=v_m(z)+g_v(z)\sigma_v(P;t)=v_m(z)G_v(z)$$

con

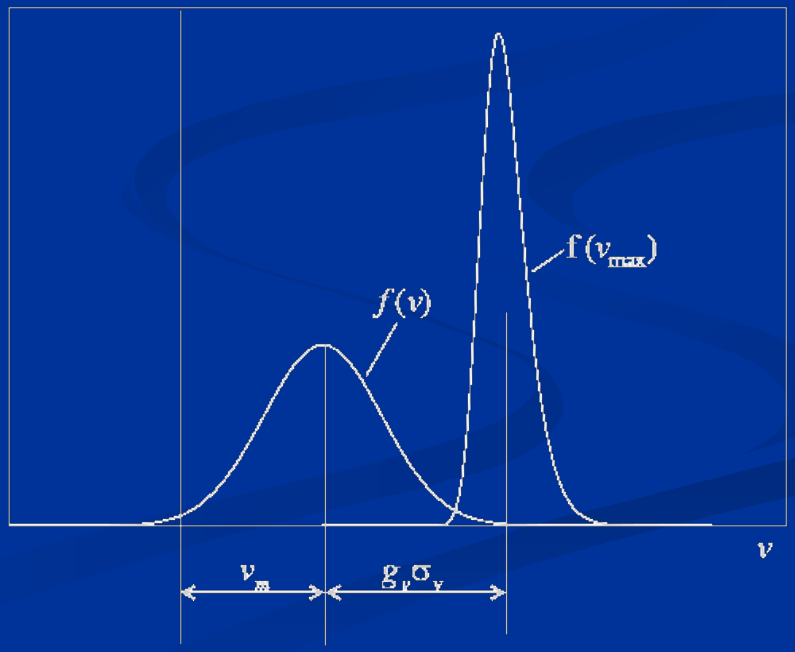
$$G_v(z)=1+g_v(z)I_v(z)$$

dove

I_v è l'intensità della turbolenza,

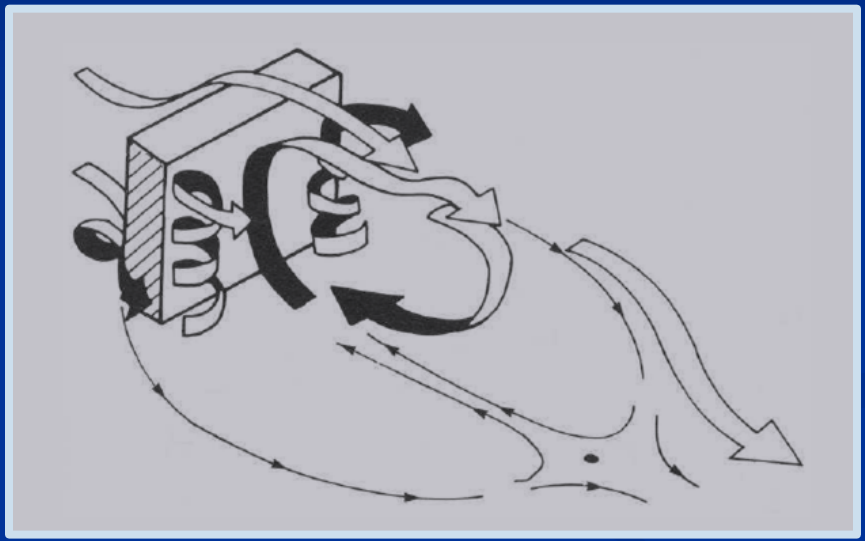
g_v è il coefficiente di picco di v

G_v è il fattore di raffica della velocità



Azioni sulle costruzioni

Aerodinamica delle costruzioni



Azioni sulle costruzioni

Aerodinamica del cilindro

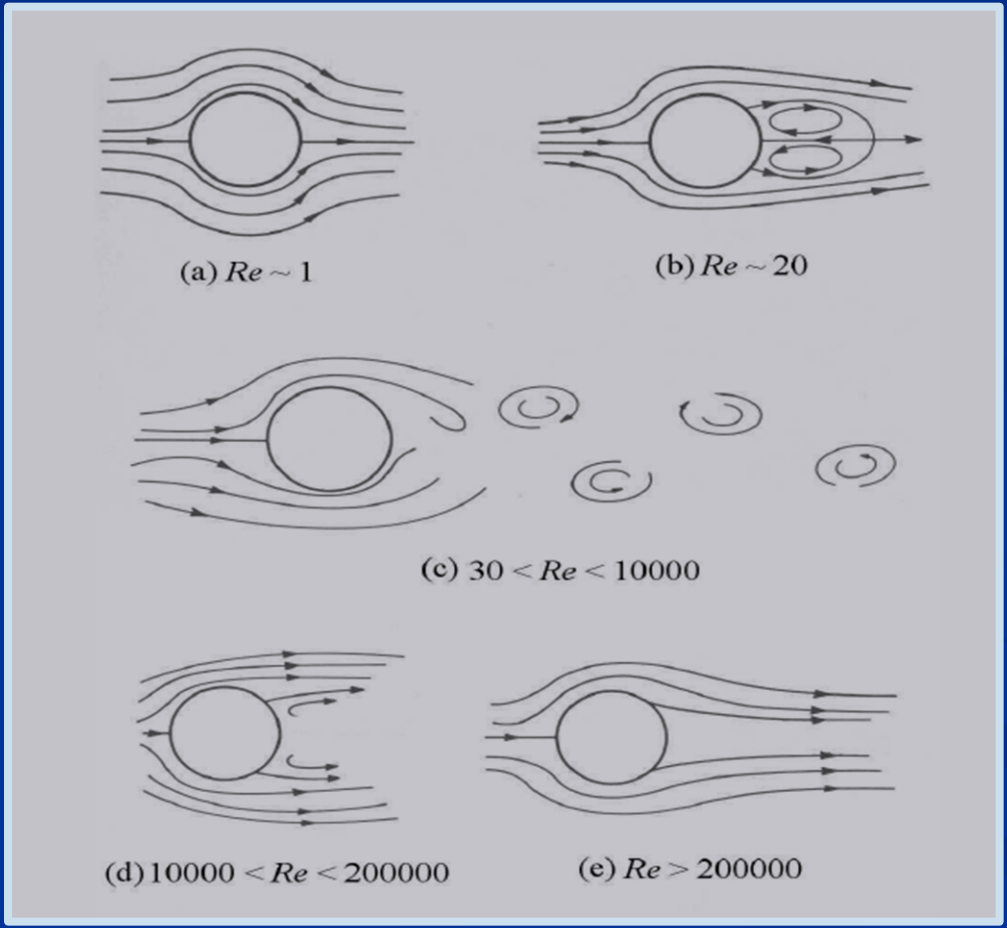
Nel caso dei corpi con superfici arrotondate, il fenomeno fisico dipende, oltre dalla forma del corpo, dal numero di Reynolds e dalla scabrezza della superficie. Nel caso caso classico di un cilindro liscio di lunghezza infinita e sezione circolare, immerso in un campo di vento laminare, cioè privo di turbolenza.

- Per $Re < 1$, lo strato limite è laminare e si mantiene attaccato al cilindro lungo tutto il perimetro. Per $1 < Re < 30$, lo strato limite resta laminare, ma si separa dal cilindro dando luogo a due vortici stazionari simmetrici a struttura laminare.
- Per $30 < Re < 10000$, lo strato limite è ancora laminare ma i vortici, pur conservando struttura laminare, si staccano alternativamente dal cilindro realizzando una scia di Von Karman, cioè due treni di vortici dotati di velocità di traslazione nei riguardi del cilindro.
- Per $10000 < Re < 200000$, lo strato limite permane laminare, ma i vortici presentano struttura in prevalenza turbolenta con strati vorticosi di difficile individuazione.
- Per $Re > 200000$, *lo strato limite è* turbolento, i punti di separazione si spostano a valle e la scia, tuttora turbolenta, diventa più stretta.

L'incremento della rugosità superficiale fa sì che il regime di transizione si realizzi per numeri di Reynolds minori.

Azioni sulle costruzioni

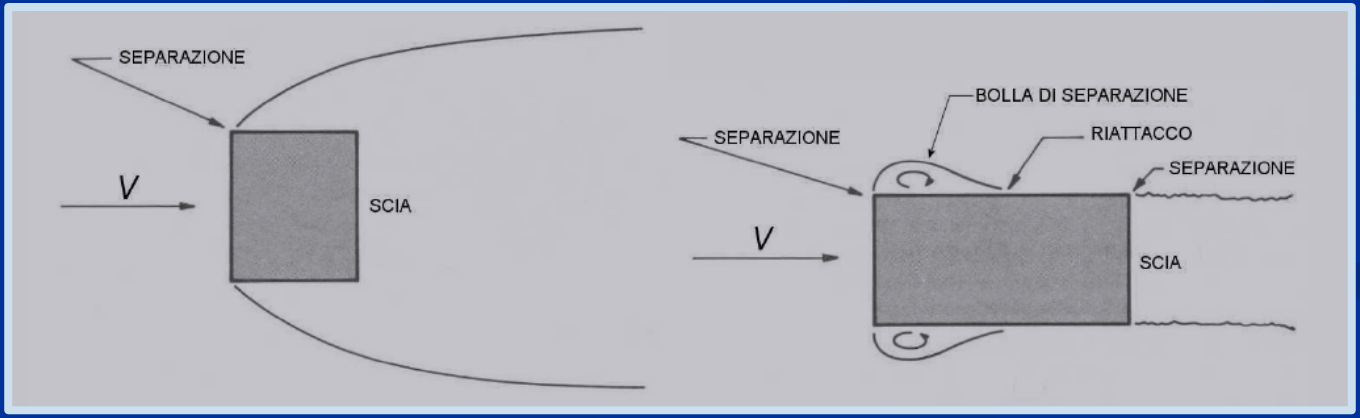
Aerodinamica del cilindro



Azioni sulle costruzioni

Aerodinamica delle costruzioni

La situazione cambia profondamente nei corpi con spigoli vivi. Essi danno luogo alla separazione dello strato limite poiché, se il flusso riuscisse a contornare lo spigolo, la velocità esterna allo strato limite sarebbe molto alta e la pressione molto piccola. Subito dopo lo spigolo si avrebbe quindi un gradiente avverso di pressione tanto elevato da essere insostenibile senza separazione. La configurazione del flusso è quindi indipendente dal numero di Reynolds e dalla scabrezza della superficie.



Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

GENERALITA'

Il vento, la cui direzione si considera generalmente orizzontale, esercita sulle costruzioni azioni che variano nel tempo e nello spazio provocando, in generale, effetti dinamici.
Per le costruzioni usuali tali azioni sono convenzionalmente ricondotte alle azioni statiche equivalenti. Peraltro, per le costruzioni di forma o tipologia inusuale, 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 ad effetti la cui valutazione richiede l'uso di metodologie di calcolo e sperimentali adeguate allo stato dell'arte e che tengano conto della dinamica del sistema.

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

GENERALITA'

Il vento è uno spostamento di masse d'aria, caratterizzato da un campo di velocità che varia casualmente nel tempo e nello spazio. Esso esercita sulle costruzioni e sui loro elementi azioni aerodinamiche, dovute al flusso incidente e alla scia vorticosa prodotta dai corpi investiti, che variano casualmente nel tempo e nello spazio provocando, in generale, effetti dinamici.
L'oscillazione delle costruzioni e degli elementi dotati di particolare deformabilità modifica inoltre il flusso incidente e le azioni aerodinamiche, dando luogo a fenomeni d'interazione vento-struttura chiamati aeroelastici.
La presenza di costruzioni contigue a quella studiata determina infine fenomeni d'interferenza, tali da ridurre o amplificare le azioni e gli effetti che il vento causerebbe sulla costruzione isolata; gli stessi fenomeni possono manifestarsi sui singoli elementi delle costruzioni.

Peraltro, limitatamente alle costruzioni e agli elementi caratterizzati da forma regolare e dimensioni ordinarie, dotati di rigidezza e smorzamento sufficientemente grandi da limitare gli effetti dinamici, da escludere l'occorrenza di fenomeni aeroelastici pericolosi ed effetti d'interferenza tali da amplificare la risposta dinamica, è possibile valutare gli effetti indotti dal vento mediante azioni equivalenti che, applicate staticamente sulle costruzioni e/o sui loro elementi, diano origine agli effetti massimi indotti dall'applicazione dinamica delle azioni effettive del vento.

Azioni sulle costruzioni

Velocità e pressione cinetica del vento

La velocità istantanea del vento varia casualmente nel tempo e nello spazio. Essa è costituita da una parte media, variabile lentamente nel tempo e nello spazio, e da una fluttuazione turbolenta a media nulla, variabile rapidamente nel tempo e nello spazio. Si definisce pressione cinetica di picco il valore atteso della pressione cinetica massima.

I valori di progetto della velocità media e della fluttuazione turbolenta del vento dipendono dalla posizione geografica e dall'altitudine sul livello del mare del sito ove sorge la costruzione, dalle caratteristiche locali del terreno, in particolare dalla rugosità e dalla topografia, dall'altezza sul suolo, dalla probabilità di superamento in un anno o dal periodo di ritorno. I valori di progetto della pressione cinetica di picco del vento dipendono dalle stesse grandezze e, inoltre, dalla densità dell'aria.

Azioni sulle costruzioni

Velocità e pressione cinetica del vento

La valutazione della velocità di progetto e della pressione cinetica di picco del vento procede secondo i passi seguenti:

(a) definita la posizione geografica e l'altitudine sul livello del mare della costruzione, si valuta la velocità base di riferimento v_b

(b) definito il periodo di ritorno di progetto T_R, si valuta la velocità di riferimento di progetto v_r

(c) definita la rugosità locale del terreno nel sito ove sorge la costruzione, si determina la categoria di esposizione;

(d) definita la topografia locale del sito ove sorge la costruzione, si valuta il coefficiente di topografia c_t

(e) ove necessario (per la determinazione delle azioni aerodinamiche sui corpi con superfici arrotondate o per l'analisi dei fenomeni dinamici e aeroelastici), si valuta la velocità media del vento v_m

(f) ove necessario (per l'analisi dei fenomeni dinamici e aeroelastici), si valuta l'intensità della turbolenza I_v e la scala integrale della turbolenza L_v

(g) si valuta la pressione cinetica di picco del vento q_p.

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

VELOCITA' DI RIFERIMENTO

La velocità di riferimento v_b è il valore caratteristico della velocità del vento a 10 m dal suolo su un terreno di categoria di esposizione II, mediata su 10 minuti e riferita ad un periodo di ritorno di 50 anni.
In mancanza di specifiche ed adeguate indagini statistiche v_b è data dall'espressione:

$$v_b = v_{b,0} \qquad \text{per } a_s \leq a_0$$

$$v_b = v_{b,0} + k_a\,(a_s - a_0) \qquad \text{per } a_0 < a_s \leq 1500 \text{ m}$$

dove:

$v_{b,0}$ a_0 k_a sono parametri forniti in tabella e legati alla regione in cui sorge la costruzione in esame, in funzione delle zone;

a_s è l'altitudine sul livello del mare (in m) del sito ove sorge la costruzione.

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

Zona	Descrizione	$v_{b,0}$ [m/s]	a_0 [m]	k_a [1/s]
1	Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia (con eccezione provincia di Trieste)	25	1000	0.010
2	Emilia Romagna	25	750	0.015
3	Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Puglia, Campania, Basilicata, Calabria (esclusa la provincia di Reggio Calabria)	27	500	0.020
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria	28	500	0.020
5	Sardegna (zona a oriente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	750	0.015
6	Sardegna (zona a occidente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	500	0.020
7	Liguria	28	1000	0.015
8	Provincia di Trieste	30	1500	0.010
9	Isole (con l'esclusione di Sicila e Sardegna) e mare aperto	31	500	0.020

Azioni sulle costruzioni

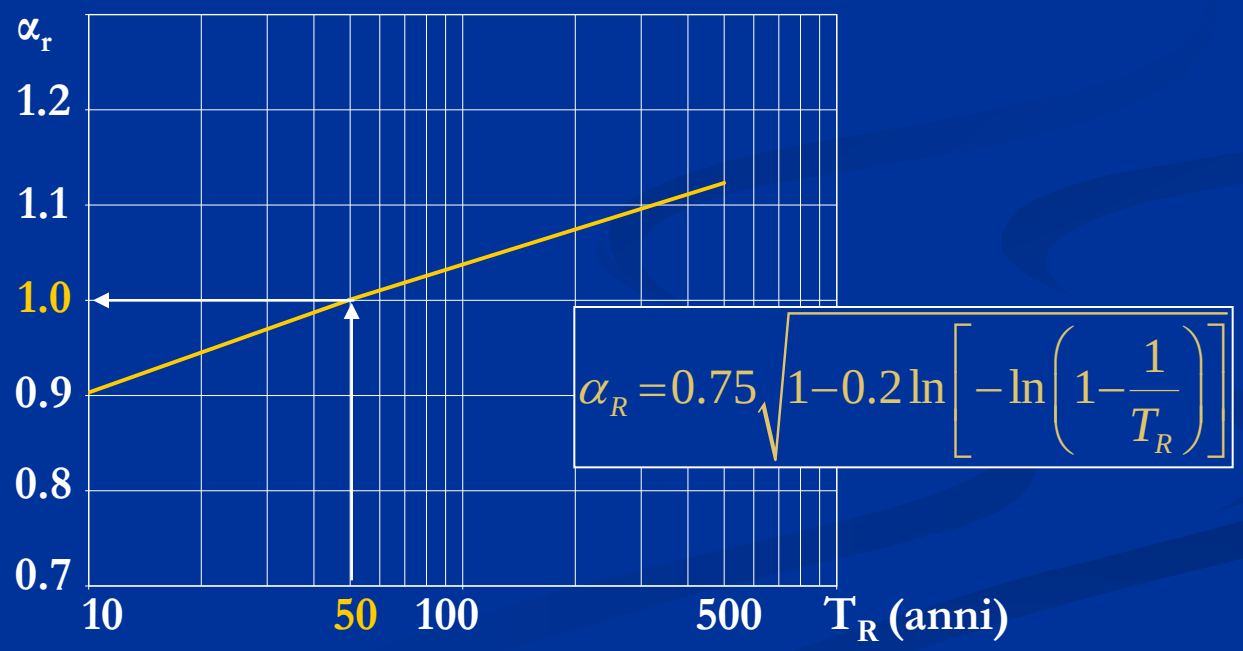
Carichi da vento

Azioni sulle costruzioni

Velocità di riferimento

Per periodi di ritorno diversi da 50 anni ($10 \leq T_r \leq 500$ anni)

$$v_b(T_R) = \alpha_R \, v_b$$



Azioni sulle costruzioni

Velocità di riferimento di progetto

Per periodi di ritorno differenti da T_R=50 anni la velocità base di riferimento può essere ricavata mediante le relazioni:

$$v_r = v_b \, c_r$$

dove:

$c_r = 0.75$ — T_R=1 anno

$c_r = 0.75 + 0.0652 \ln(T_R)$ — 1 anno$\leq T_R <$5 anni

$c_r = 0.75\sqrt{1 - 0.2 \ln\left[-\ln\left(1 - 1/T_R\right)\right]}$ — 5 anno$\leq T_R <$50 anni

$c_r = 0.65\left\{1 - 0.138 \ln\left[-\ln\left(1 - 1/T_R\right)\right]\right\}$ — $T_R \geq$50 anni

Azioni sulle costruzioni

Velocità media

In mancanza di analisi specifiche che tengano in conto la direzione di provenienza del vento e l'effettiva rugosità e topografia del terreno che circonda la costruzione, per altezze sul suolo non maggiori di $z = 200$ m, la velocità media del vento è fornita dalla relazione:

$$v_m(z) = v_r\, c_m(z)$$

dove:

v_r è la velocità di riferimento di progetto;

c_m è il coefficiente di profilo medio del vento fornito dalla relazione:

$$c_m(z) = k_r \ln(z_{\min}/z_o)\, c_t(z_{\min}) \qquad \text{per } z \le z_{\min}$$

$$c_m(z) = k_r \ln(z/z_o)\, c_t(z) \qquad \text{per } z > z_{\min}$$

dove:

k_r, z_0, z_{min} sono, rispettivamente, il fattore di terreno, la lunghezza di rugosità e l'altezza minima, in funzione della categoria di esposizione del sito;

c_t è il coefficiente di topografia, in funzione delle caratteristiche topografiche e orografiche del sito.

Azioni sulle costruzioni

Turbolenza atmosferica

La turbolenza atmosferica è la fluttuazione a media nulla della velocità istantanea del vento (intorno al valore medio v_m). Essa è caratterizzata in primo luogo da due parametri: l'intensità della turbolenza I_v, e la scala integrale della turbolenza L_v. L'intensità della turbolenza è il rapporto fra la deviazione standard della componente longitudinale della turbolenza e la velocità media del vento. In mancanza di analisi specifiche, per altezze sul suolo non maggiori di $z = 200$ m, essa è fornita dalla relazione:

$$I_v(z) = \frac{1}{\ln(z_{\min}/z_o)\, c_t(z_{\min})} \qquad \text{per } z \le z_{\min}$$

$$I_v(z) = \frac{1}{\ln(z/z_o)\, c_t(z)} \qquad \text{per } z > z_{\min}$$

dove:

z_0, z_{min} sono, rispettivamente, la lunghezza di rugosità e l'altezza minima, funzione della categoria di esposizione del sito ove sorge la costruzione;

c_t è il coefficiente di topografia, funzione delle caratteristiche topografiche e orografiche del sito ove sorge la costruzione.

Azioni sulle costruzioni

Pressione cinetica di picco

Il valore della velocità di picco del vento è:

$$v_p(P;t)=v_m(z)+g_v(z)\sigma_v(P;t)=v_m(z)\left[1+g_v(z)I_v(z)\right]$$

Conseguentemente, osservando che l'intensità della turbolenza è generalmente molto minore di 1, il valore di picco della pressione cinetica del vento può essere espresso mediante la relazione:

$$q_p(z)=\frac{1}{2}\rho v_p^2(z)\cong\frac{1}{2}\rho v_m^2(z)\left[1+2g_v(z)I_v(z)\right]$$

dove ρ è la densità dell'aria.

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

AZIONI STATICHE EQUIVALENTI

- Le azioni statiche del vento sono costituite da pressioni e depressioni agenti normalmente alle superfici, sia esterne che interne, degli elementi che compongono la costruzione.
- L'azione del vento sul singolo elemento viene determinata considerando la combinazione più gravosa della pressione agente sulla superficie esterna e della pressione agente sulla superficie interna dell'elemento.
- Nel caso di costruzioni o elementi di grande estensione, si deve inoltre tenere conto delle azioni tangenti esercitate dal vento.
- L'azione d'insieme esercitata dal vento su una costruzione è data dalla risultante delle azioni sui singoli elementi, considerando, come direzione del vento, quella corrispondente ad uno degli assi principali della pianta della costruzione; in casi particolari, come ad esempio per le torri a base quadrata o rettangolare, si deve considerare anche l'ipotesi di vento spirante secondo la direzione di una delle diagonali.

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

PRESSIONE (DI PICCO) DEL VENTO

La pressione del vento è data dall'espressione:

$$p = q_b \, c_e \, c_p \, c_d$$

dove

q_b è la pressione cinetica di riferimento;

c_e è il coefficiente di esposizione;

c_p è il coefficiente di forma (o coefficiente aerodinamico), funzione della tipologia e della geometria della costruzione e del suo orientamento rispetto alla direzione del vento. Il suo valore può essere ricavato da dati suffragati da opportuna documentazione o da prove sperimentali in galleria del vento;

c_d è il coefficiente dinamico con cui si tiene conto degli effetti riduttivi associati alla non contemporaneità delle massime pressioni locali e degli effetti amplificativi dovuti alle vibrazioni strutturali.

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

AZIONE TANGENZIALE DEL VENTO

L'azione tangente per unità di superficie parallela alla direzione del vento è data dall'espressione:

$$p_f = q_b \, c_e \, c_f$$

dove

q_b c_e sono la pressione cinetica di riferimento e il coefficiente di esposizione;

c_f è il coefficiente d'attrito, funzione della scabrezza della superficie sulla quale il vento esercita l'azione tangente. Il suo valore può essere ricavato da dati suffragati da opportuna documentazione o da prove sperimentali in galleria del vento.

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

PRESSIONE CINETICA DI RIFERIMENTO

La pressione cinetica di riferimento q_b (in N/m²) è data dall'espressione:

$$q_b = \frac{1}{2}\rho v_b^2$$

EQUAZIONE DI BERNOULLI

dove

v_b è la velocità di riferimento del vento (in m/s);

ρ è la densità dell'aria assunta convenzionalmente costante e pari a 1.25 kg/m³.

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

COEFFICIENTE DI ESPOSIZIONE

Il coefficiente di esposizione ce dipende dall'altezza z sul suolo del punto considerato, dalla topografia del terreno, e dalla categoria di esposizione del sito ove sorge la costruzione. In assenza di analisi specifiche che tengano in conto la direzione di provenienza del vento e l'effettiva scabrezza e topografia del terreno che circonda la costruzione, per altezze sul suolo non maggiori di z = 200 m, esso è dato dalla formula:

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

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

dove

k_r , z_0 , z_{min} (fattore di terreno, lunghezza di rugosità e altezza minima)sono assegnati in funzione della **categoria di esposizione** del sito ove sorge la costruzione;

c_t è il coefficiente di topografia.

(segue)

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

CLASSE DI RUGOSITA'

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, 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.

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

CLASSE DI RUGOSITA'

A Aree urbane in cui almeno il 15% della superficie sia coperto da edifici la cui altezza media superi i 15m

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

CLASSE DI RUGOSITA'

B Aree urbane (non di classe A), suburbane, industriali e boschive

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

CLASSE DI RUGOSITA'

C Aree con ostacoli diffusi (alberi, case, muri, recinzioni,....); aree con rugosità non riconducibile alle classi A, B, D

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

CLASSE DI RUGOSITA'

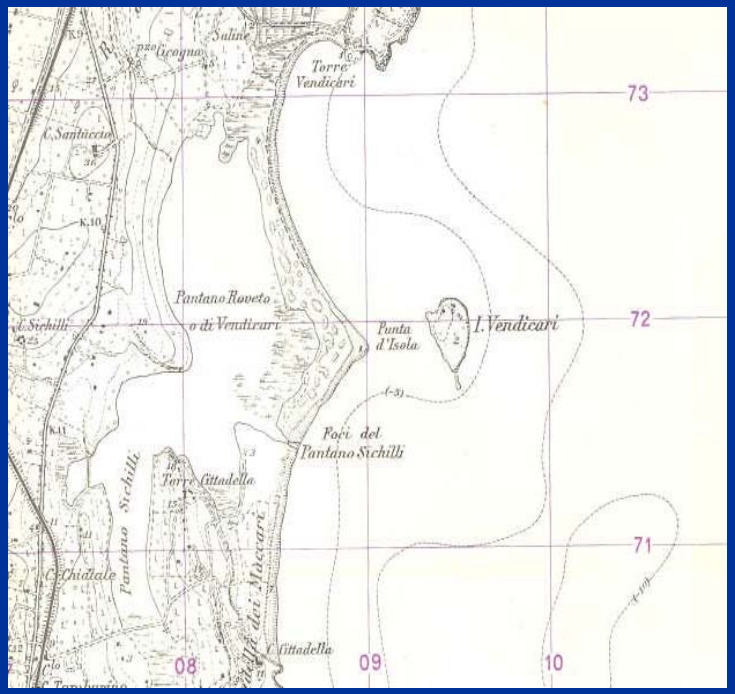
D Aree prive di ostacoli (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, pascoli, paludose o sabbiose, superfici innevate o ghiacciate, mare, laghi,....)

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

CLASSE DI RUGOSITA'

D Aree prive di ostacoli (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, pascoli, paludose o sabbiose, superfici innevate o ghiacciate, mare, laghi,....)

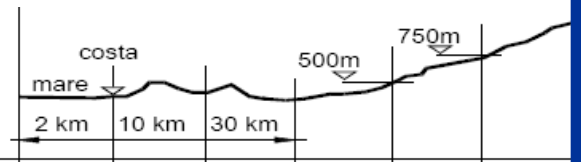


Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

CATEGORIA DI ESPOSIZIONE

ZONE 1, 2, 3, 4, 5

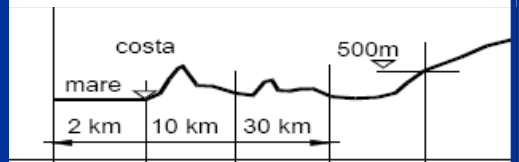


A	- -	IV	IV	V	V	V
B	- -	III	III	IV	IV	IV
C	- -	*	III	III	IV	IV
D	I	II	II	II	III	**

* Categoria II in zona 1,2,3,4
Categoria III in zona 5

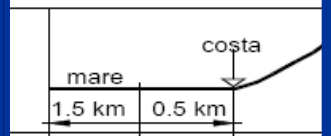
** Categoria III in zona 2,3,4,5
Categoria IV in zona 1

ZONA 6



A	- -	III	IV	V	V
B	- -	II	III	IV	IV
C	- -	II	III	III	IV
D	I	I	II	II	III

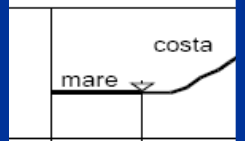
ZONE 7, 8



A	- -	- -	IV
B	- -	- -	IV
C	- -	- -	III
D	I	II	*

* Categoria II in zona 8
Categoria III in zona 7

ZONA 9



A	- -	I
B	- -	I
C	- -	I
D	I	I

Categoria di esposizione	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

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

COEFFICIENTE DI TOPOGRAFIA

Il coefficiente di topografia c_t è posto di regola pari a 1, sia per le zone pianeggianti sia per quelle ondulate, collinose e montane.

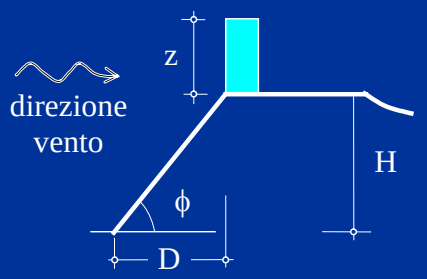
Nel caso di costruzioni ubicate presso la sommità di colline o pendii isolati il coefficiente di topografia può essere valutato dal progettista con analisi più approfondite.

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

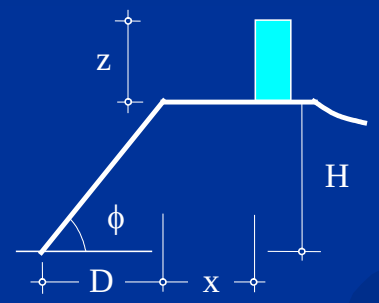
COEFFICIENTE DI TOPOGRAFIA

Costruzioni ubicate sulla cresta di una collina



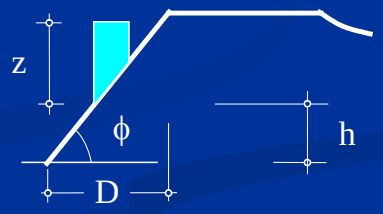
$$c_t = 1 + \beta\gamma$$

Costruzioni sul livello superiore di un dislivello



$$c_t = 1 + \beta\gamma\left(1 - 0.1\,x/H\right) \geq 1$$

Costruzioni su un pendio



$$c_t = 1 + \beta\gamma\, h/H$$

$\beta = 0.5$	$z/H \leq 0.75$	$\gamma = 0.0$	$z/H \leq 0.75$
$\beta = 0.8 - 0.4\,z/H$	$0.75 < z/H \leq 2$	$\gamma = 5\left(H/D - 0.10\right)$	$0.10 < H/D \leq 0.30$
$\beta = 0.0$	$z/H > 2$	$\gamma = 1.0$	$H/D > 0.30$

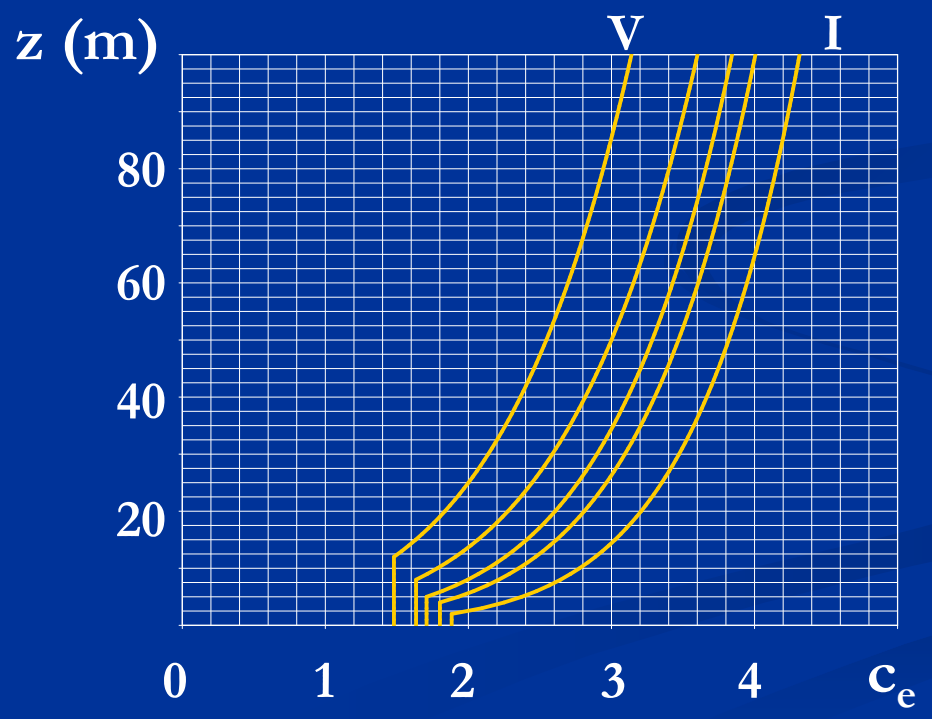
Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

COEFFICIENTE DI ESPOSIZIONE

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

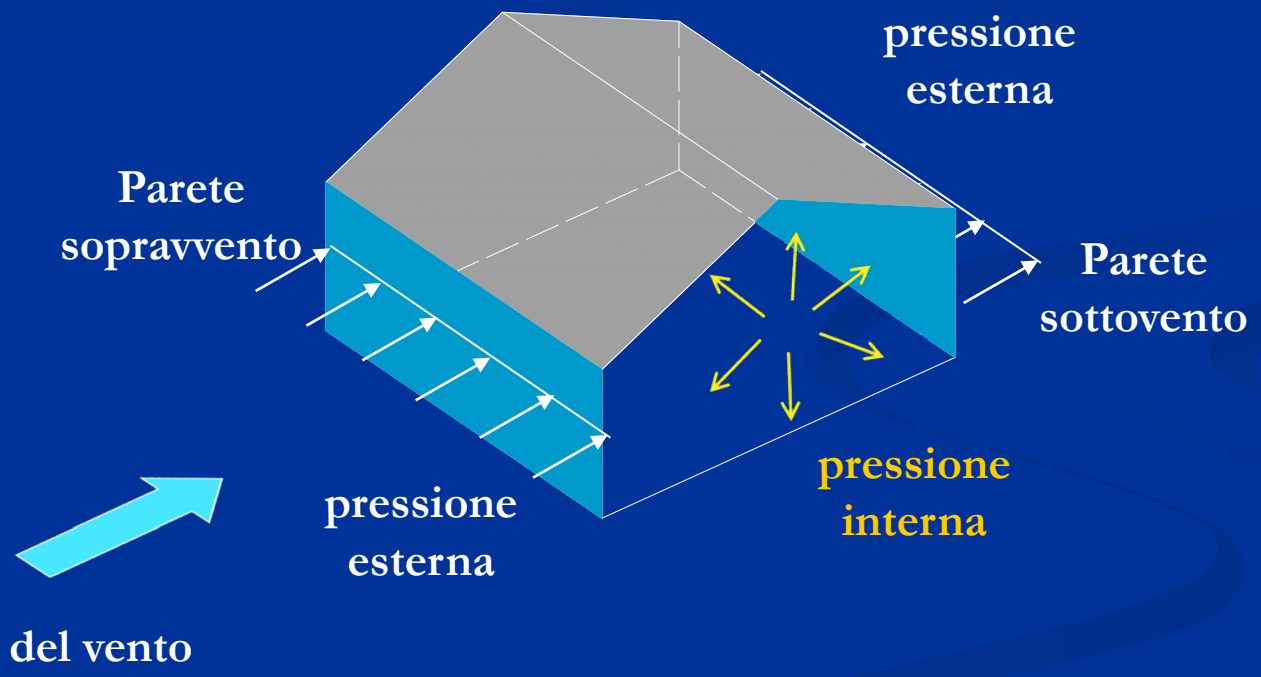
$$c_e(z) = c_e(z_{min}) \qquad \text{per } z < z_{min}$$



Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

COEFFICIENTE DI FORMA



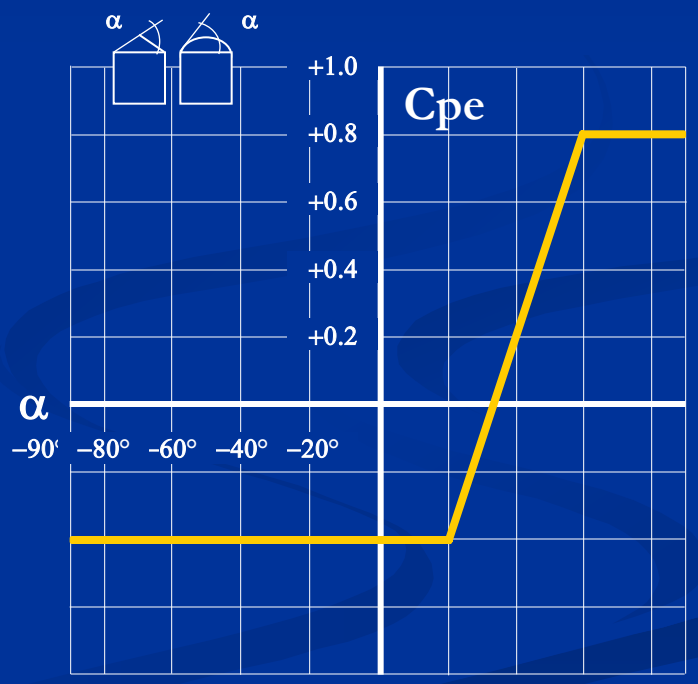
Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

COEFFICIENTE DI FORMA (esterno)

Edifici a pianta rettangolare con coperture piane, a falde inclinate o curve

- per elementi sopravvento con inclinazione sull'orizzontale $\alpha \geq 60°$:
  $\mathbf{c_{pe} = + 0,8}$
- per elementi sopravvento, con inclinazione sull'orizzontale $20° < \alpha < 60°$:
  $\mathbf{c_{pe} = + 0,03\ \alpha - 1}$ (α in gradi)
- per elementi sopravvento, con inclinazione sull'orizzontale $0° \leq \alpha \leq 20°$ e per elementi sottovento (intendendo come tali quelli non direttamente investiti dal vento o quelli investiti da vento radente):
  $\mathbf{c_{pe} = - 0,4}$



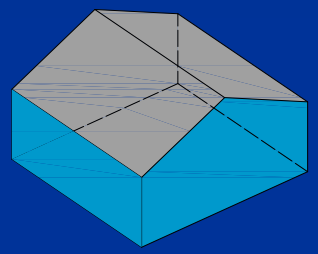
Azioni sulle costruzioni

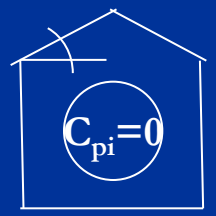
Coefficiente di forma per edifici (coeff. interno)

Edifici a pianta rettangolare con coperture piane, a falde inclinate o curve

- costruzioni completamente stagne:

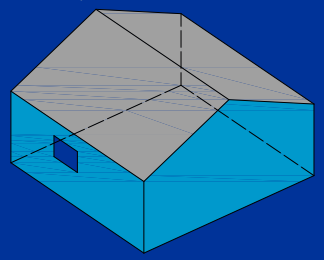
  $c_{pi} = 0$

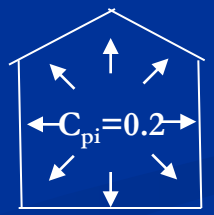


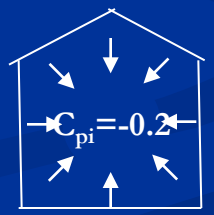


- costruzioni che hanno (o possono avere) una parete con aperture di superficie minore di 1/3 di quella totale:

  $c_{pi} = \pm 0{,}2$





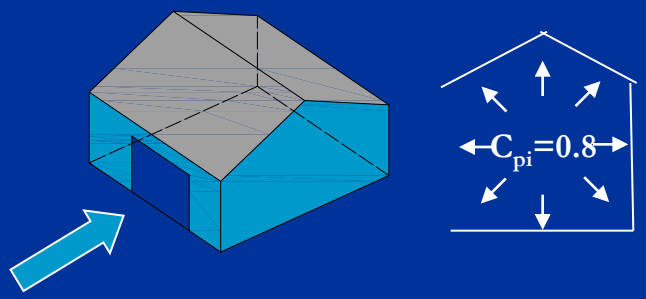


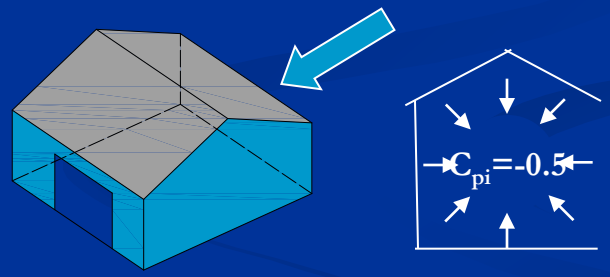
Azioni sulle costruzioni

Coefficiente di forma per edifici (coeff. interno)

Edifici a pianta rettangolare con coperture piane, a falde inclinate o curve

- costruzioni che hanno una parete
  con aperture di superficie non minore di 1/3 di quella totale:
  c_{pi} **= + 0,8** parete aperta sopravento;
  c_{pi} **= - 0,5** parete aperta sottovento o parallela al vento;

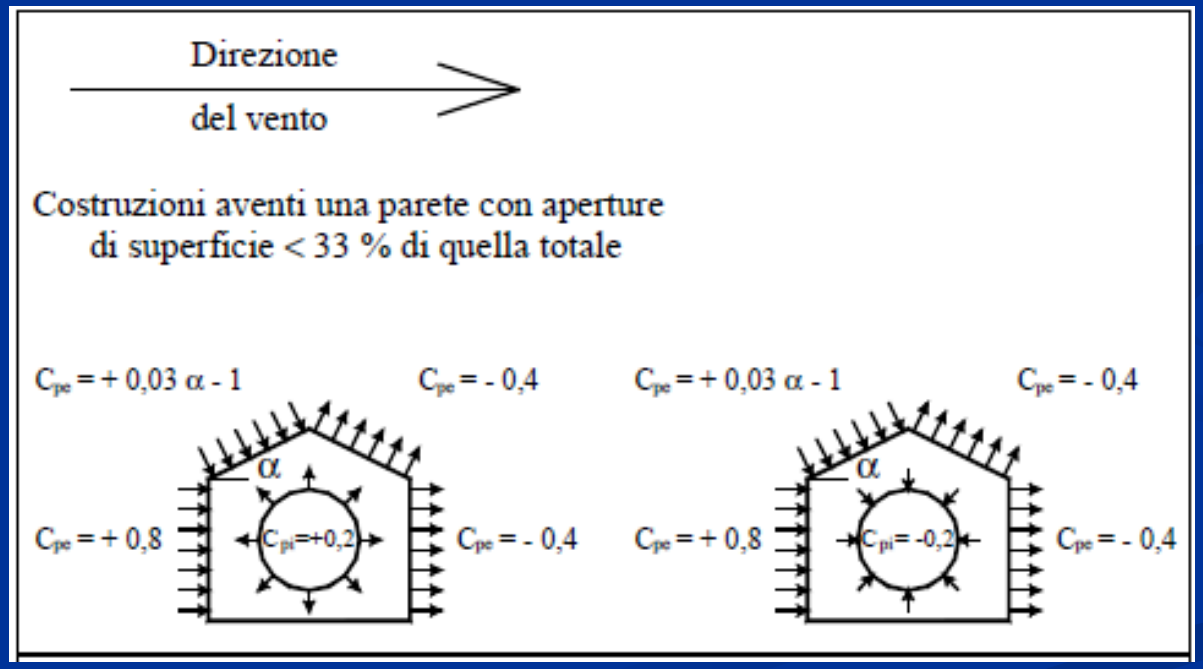




- costruzioni che presentano su due pareti opposte, normali alla direzione del vento, aperture di superficie non minore di 1/3 di quella totale:
  $c_{pe} + c_{pi}$ **= ± 1,2** elementi normali al vento;
  c_{pi} **= ± 0,2** per rimanenti elementi

Azioni sulle costruzioni

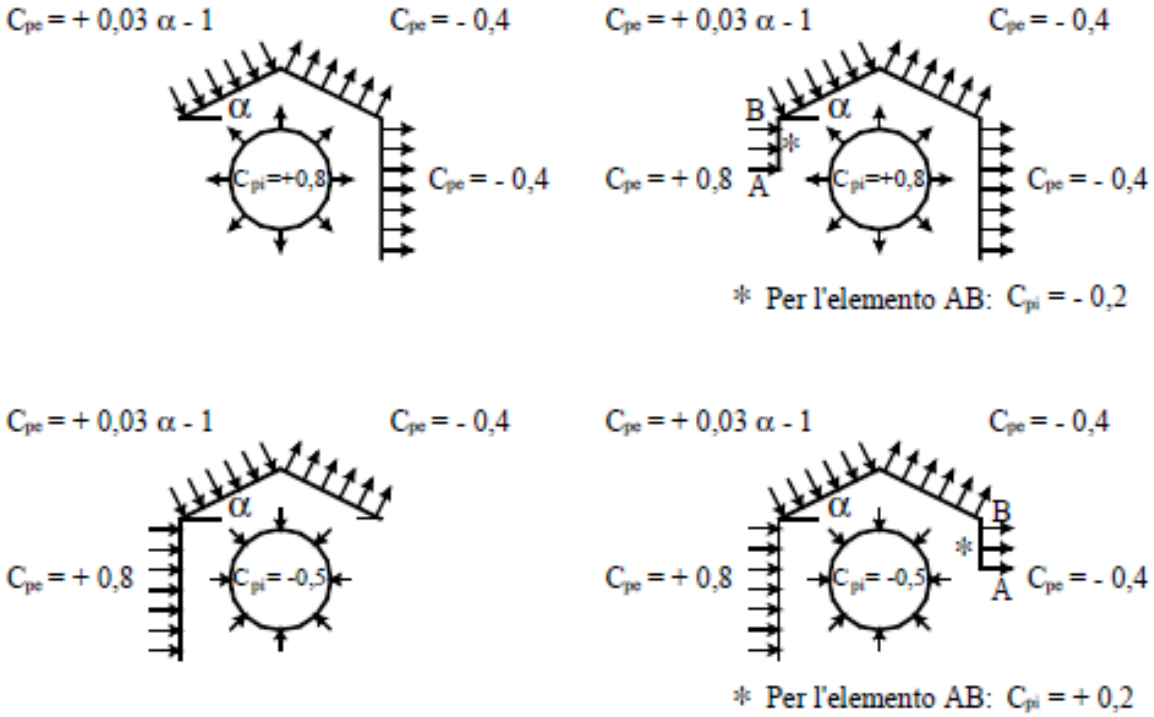
Coefficienti di forma per edifici



Azioni sulle costruzioni

Coefficienti di forma per edifici

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

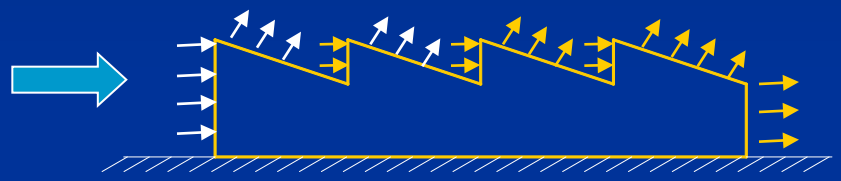


Azioni sulle costruzioni

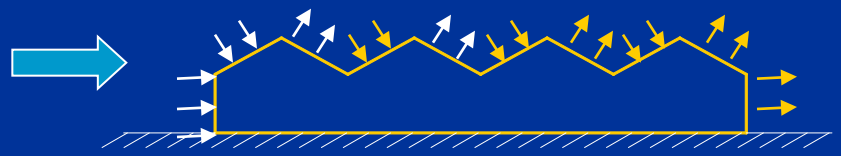
Coefficiente di forma per coperture

Edifici con coperture multiple (in direzione ortogonale alle linee di colmo)

Azioni sui singoli elementi:

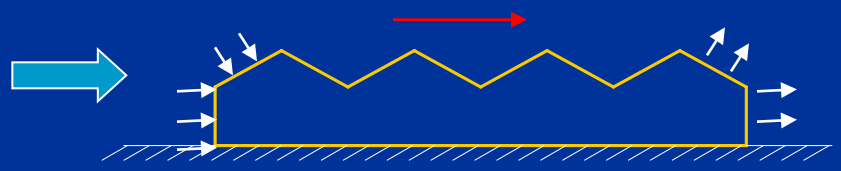


Riduzione del 25% del c_{pe} del secondo spiovente sopravvento



Riduzione del 25% del c_{pe} di entrambi gli spioventi delle coperture successive

Azioni d'insieme:



Si applicano al primo e all'ultimo spiovente le pressioni valutate per edifici singoli

Azione tangenziale sulla superficie proiettata in piano $0.10\ q_{ref}\ c_e$

Azioni sulle costruzioni

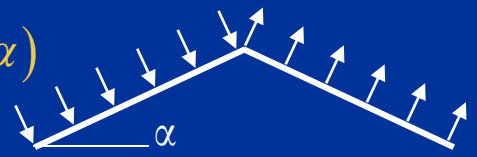
Coefficiente di forma per tettoie e pensiline

Tettoie e pensiline isolate (con $h/L_{max} < 1$)

Tettoie a due spioventi piani

direzione vento

$c_p = \pm 0.8(1+\sin\alpha)$

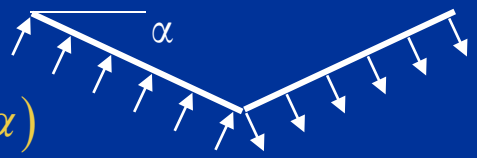


$c_p = -0.6$

Tettoie a due spioventi con impluvio

direzione vento

$c_p = \pm 0.8(1+\sin\alpha)$

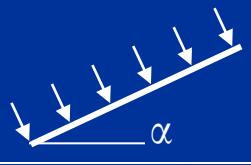


$c_p = 0.6$

Tettoie ad uno spiovente piano

direzione vento

$c_p = \pm 1.2\ (1+\sin\alpha)$



Azioni sulle costruzioni

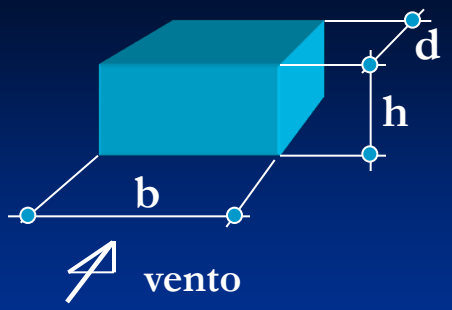
Carichi da vento

COEFFICIENTE DINAMICO

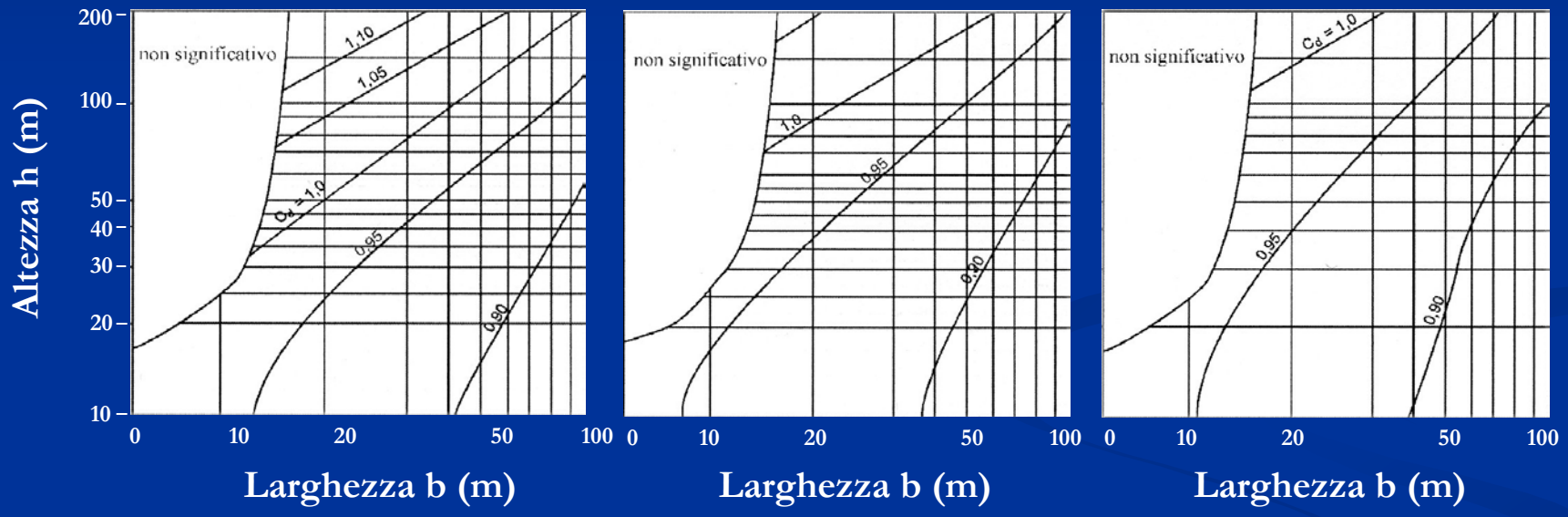
Il coefficiente dinamico tiene in conto degli effetti riduttivi associati alla non contemporaneità delle massime pressioni locali e degli effetti amplificativi dovuti alla risposta dinamica della struttura.
Esso può essere assunto cautelativamente pari ad 1 nelle costruzioni di tipologia ricorrente, quali gli edifici di forma regolare non eccedenti 80 m di altezza ed i capannoni industriali, oppure può essere determinato mediante analisi specifiche o facendo riferimento a dati di comprovata affidabilità.

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento



COEFFICIENTE DINAMICO



Strutture in acciaio

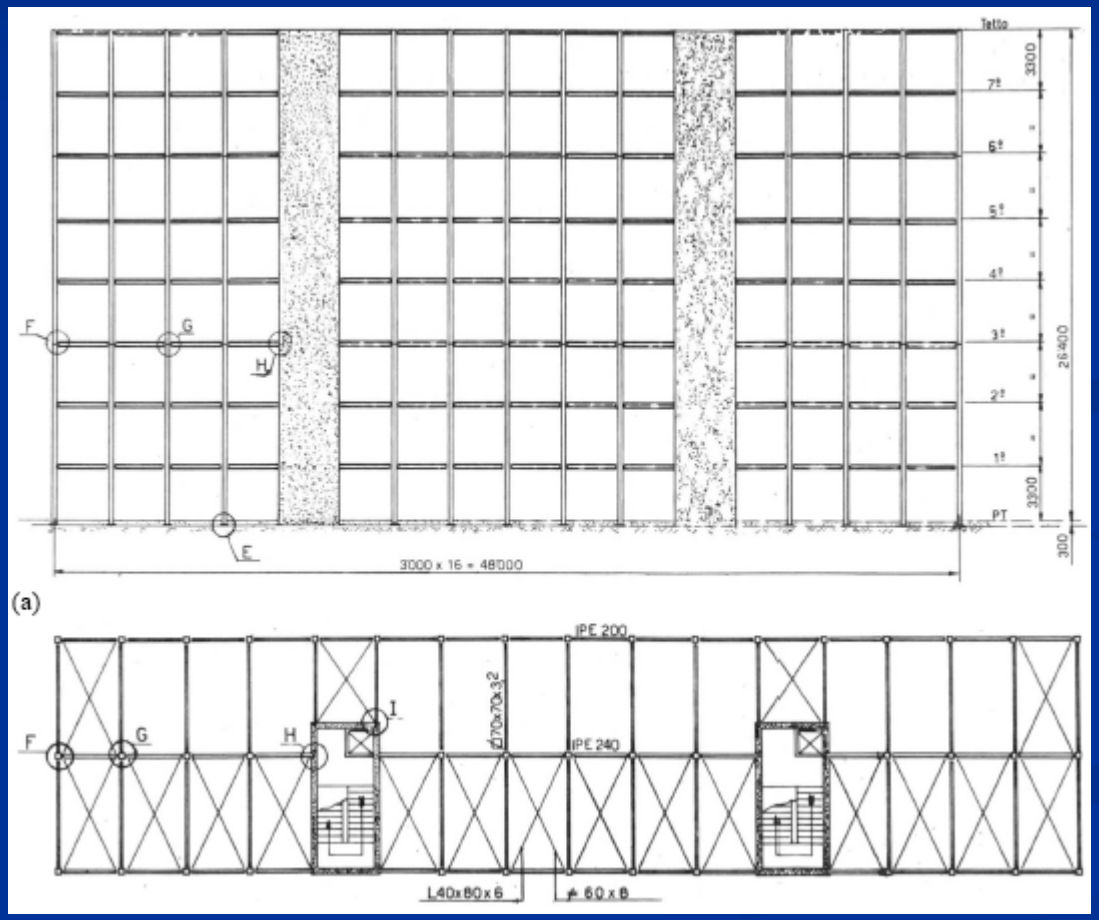
Strutture composte acciaio-calcestruzzo

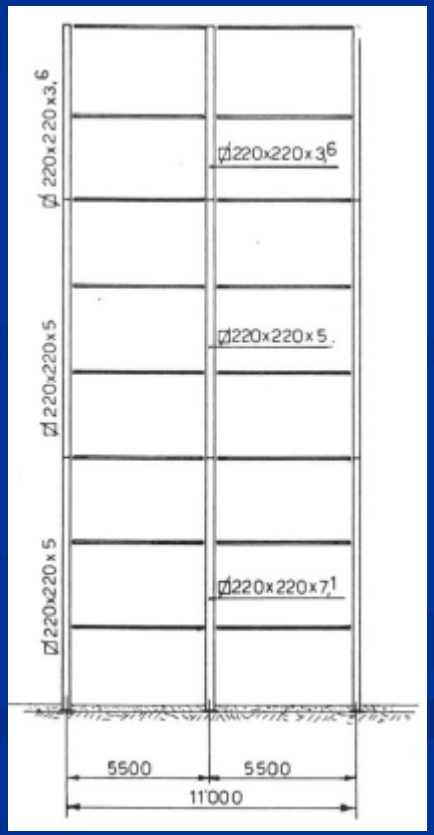
Strutture in c.a. oppure muratura

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

Esempio n. 1 – Edificio per Civile Abitazione (sito a 600 m s.l.m.)





Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

Esempio n. 1 – Edificio per Civile Abitazione

Zona	Descrizione	$v_{b,0}$ [m/s]	a_0 [m]	k_a [1/s]
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria	28	500	0.020

Velocità di riferimento

$v_b = v_{b,0} = 28$ m/s $\qquad a_s \leq a_0 = 500$ m

$v_b = v_{b,0} + k_a(a_s - a_0) = 28 + 0.02\,(600 - 500) = 30$ m/s $\qquad a_s > 500$ m

Pressione cinetica di riferimento

$$q_b = \frac{1}{2}\rho \cdot v_b^2 = 0.5 \cdot 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 30^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 562.5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

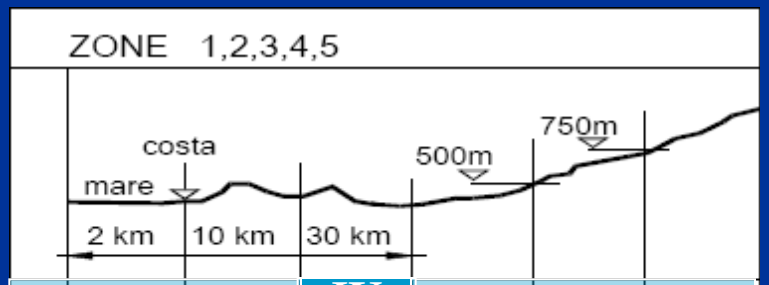
Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

Esempio n. 1 – Edificio per Civile Abitazione

Categoria di Esposizione

Classe di Rugosità A (Aree urbane in cui almeno il 15% della superficie sia coperto da edifici la cui altezza media superi i 15m)



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

$$c_e(z) = k_r^2 c_t \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot \left[7 + c_t \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\right] \qquad z \geq z_{min}$$

$$c_e(z) = c_e(z_{min}) \qquad z < z_{min}$$

Categoria di esposizione	k_r	z_0 [m]	z_{min} [m]
IV	0.22	0.30	8

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

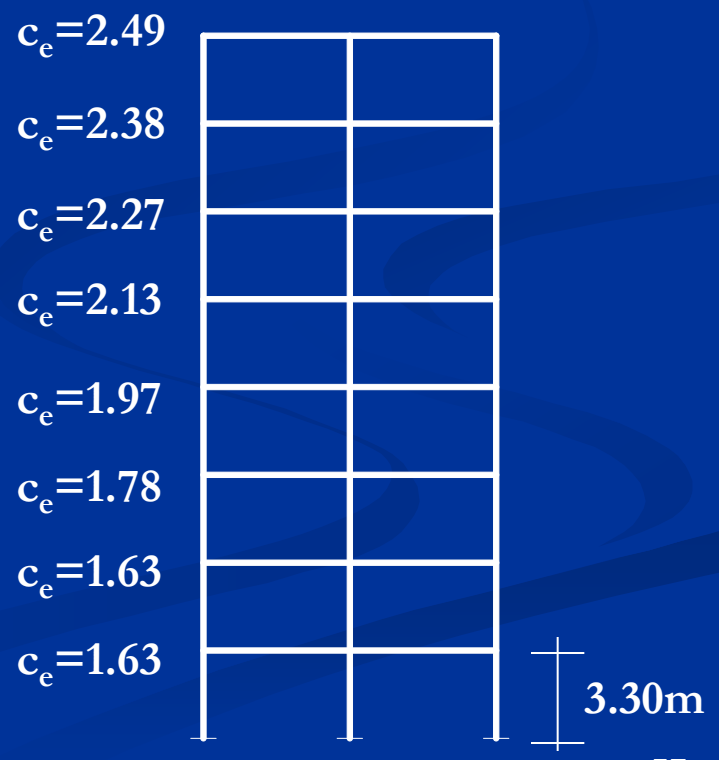
Esempio n. 1 – Edificio per Civile Abitazione

k_r	z_0 [m]	z_{min} [m]
0.22	0.30	8

Coefficiente di Esposizione

$$c_e(z) = k_r^2 c_t \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot \left[7 + c_t \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\right] \qquad z \geq z_{min}$$

$$c_e(z) = c_e(z_{min}) \qquad z < z_{min}$$

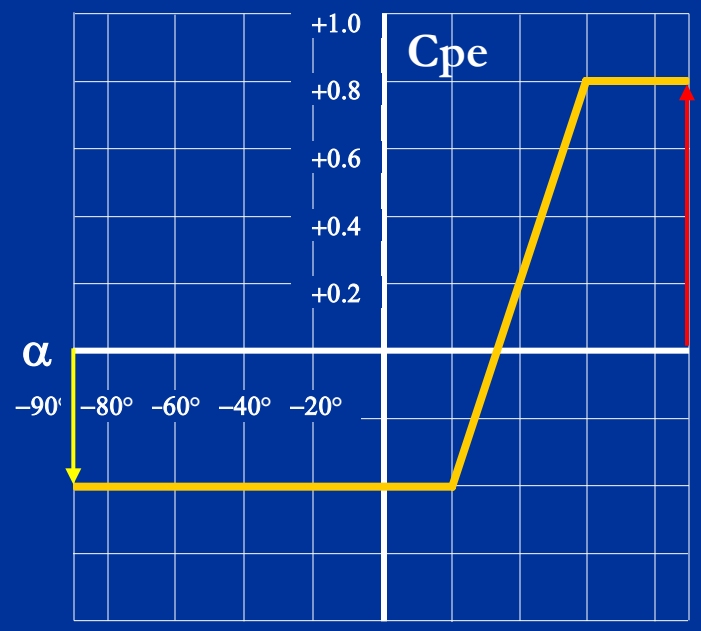


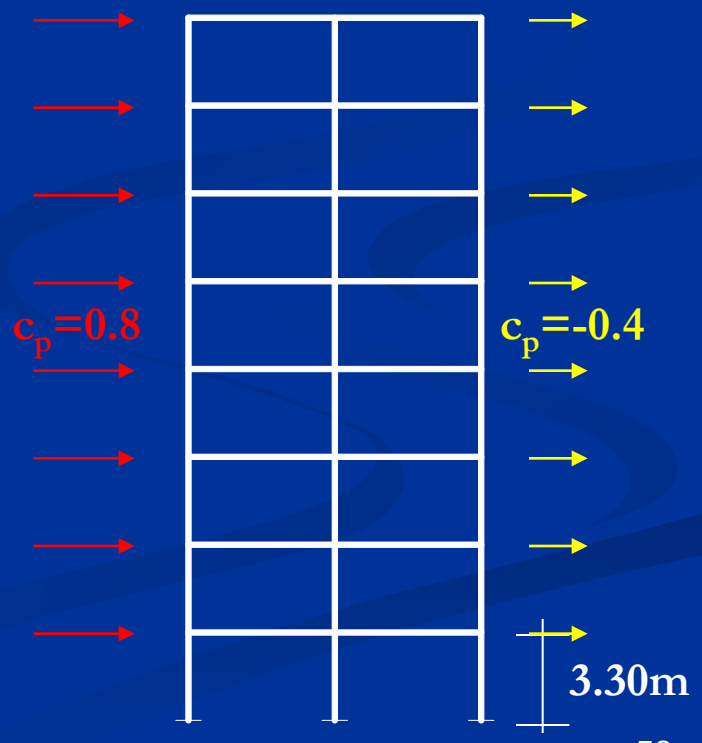
Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

Esempio n. 1 – Edificio per Civile Abitazione

Coefficiente di Forma





Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

Esempio n. 1 – Edificio per Civile Abitazione

<u>Pressioni del vento</u> $p = q_b\, c_e\, c_p\, c_d$

$$p = 562.5 \cdot 2.49 \cdot (0.8+0.4) \cdot 1 = 1.68 \ \text{kN/m}^2$$

$$p = 562.5 \cdot 2.38 \cdot (0.8+0.4) \cdot 1 = 1.61 \ \text{kN/m}^2$$

$$p = 562.5 \cdot 2.27 \cdot (0.8+0.4) \cdot 1 = 1.53 \ \text{kN/m}^2$$

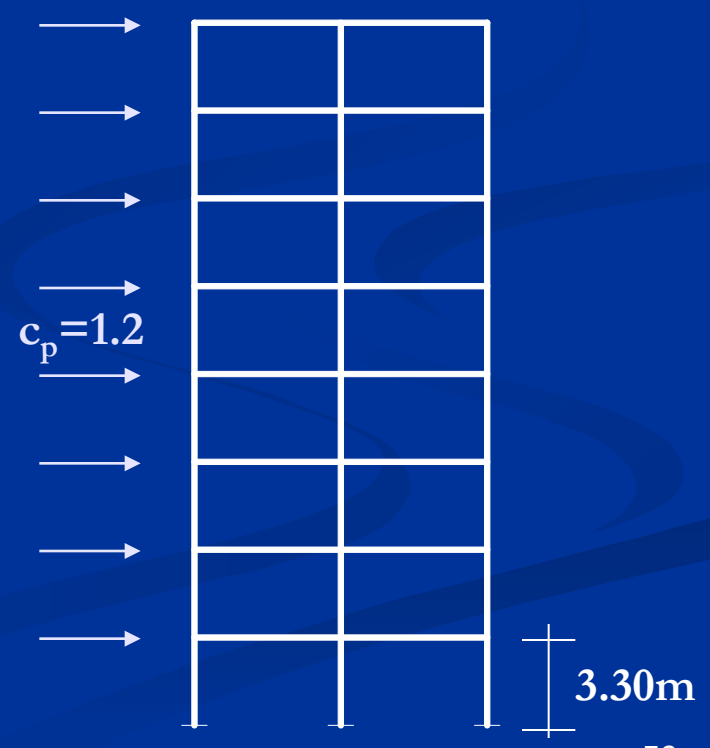
$$p = 562.5 \cdot 2.13 \cdot (0.8+0.4) \cdot 1 = 1.44 \ \text{kN/m}^2$$

$$p = 562.5 \cdot 1.97 \cdot (0.8+0.4) \cdot 1 = 1.33 \ \text{kN/m}^2$$

$$p = 562.5 \cdot 1.78 \cdot (0.8+0.4) \cdot 1 = 1.20 \ \text{kN/m}^2$$

$$p = 562.5 \cdot 1.63 \cdot (0.8+0.4) \cdot 1 = 1.10 \ \text{kN/m}^2$$

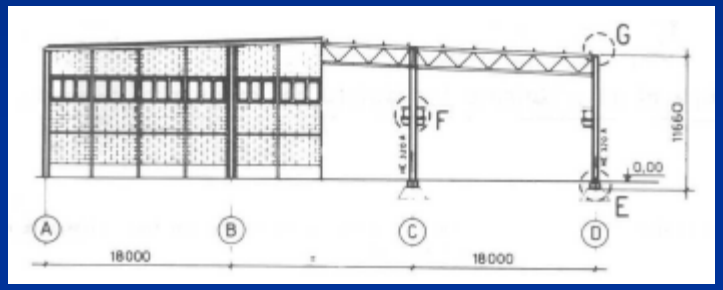
$$p = 562.5 \cdot 1.63 \cdot (0.8+0.4) \cdot 1 = 1.10 \ \text{kN/m}^2$$

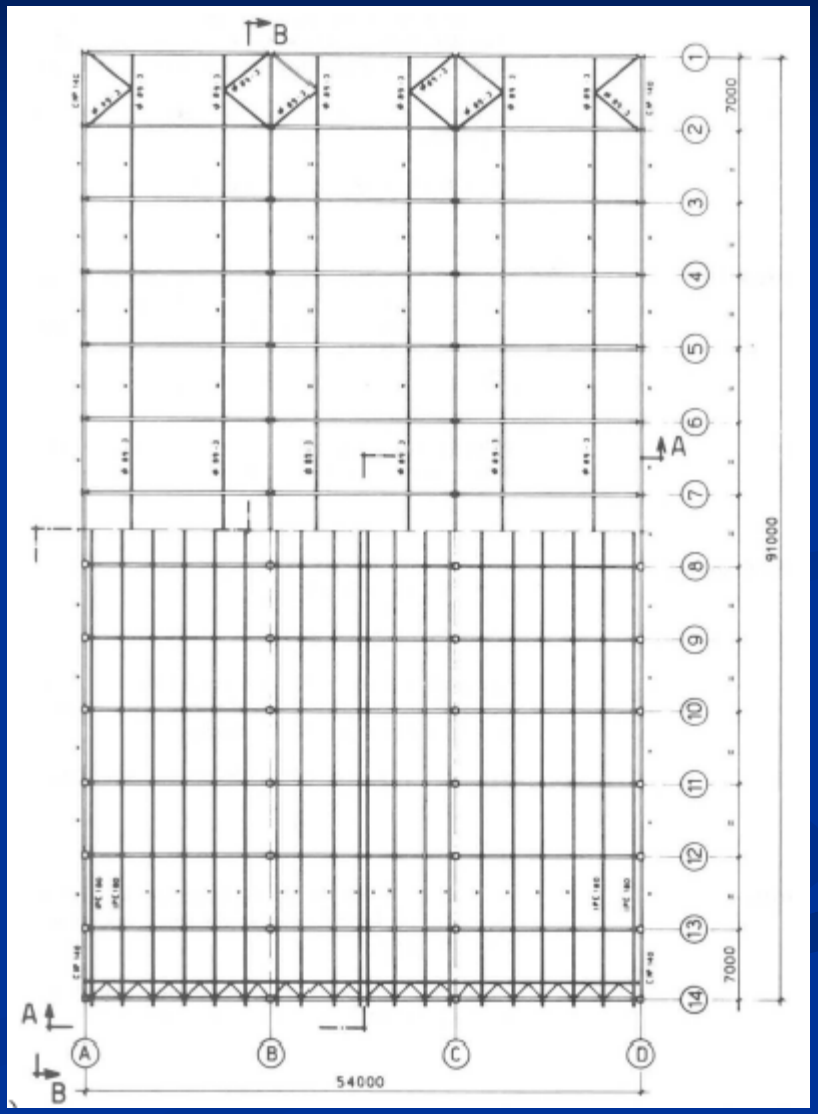


Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

Esempio n. 2 – Fabbricato Industriale





Copertura a doppia falda con inclinazione di 4°

Copertura a doppia falda con Linea di colmo posta a 13.54m

Costruzione con V_N=50 anni
Sita nella zona industriale di Catania

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

Esempio n. 2 – Fabbricato Industriale

Zona	Descrizione	$v_{b,0}$ [m/s]	a_0 [m]	k_a [1/s]
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria	28	500	0.020

Velocità di riferimento

$v_b = v_{b,0} = 28$ m/s per $a_s \leq a_0 = 500$ m

$v_b = v_{b,0} + k_a (a_s - a_0) = 28 + 0.02 (a_s - 500)$ per $500\text{m} < a_s \leq 1500$ m

Pressione cinetica di riferimento

$$q_b = \frac{1}{2}\rho \cdot v_b^2 = 0.5 \cdot 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 28^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 490 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

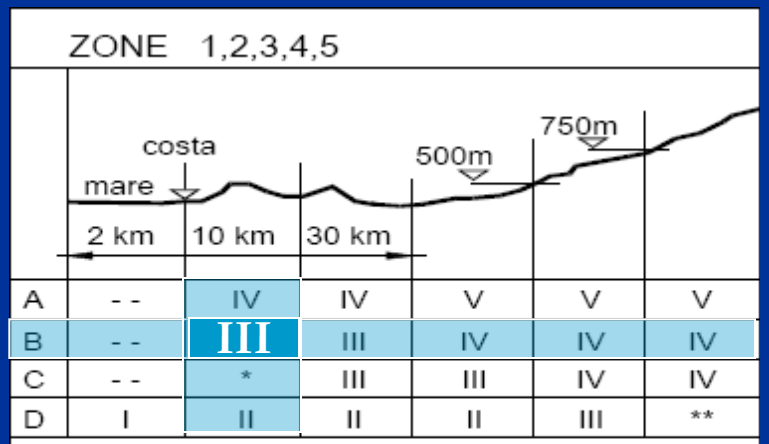
Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

Esempio n. 2 – Fabbricato Industriale

Categoria di Esposizione

Classe di Rugosità B (Aree urbane non di classe A, suburbane, industriali e boschive)



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

$$c_e(z) = k_r^2 c_t \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot \left[7 + c_t \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\right] \qquad z \geq z_{min}$$

$$c_e(z) = c_e(z_{min}) \qquad z < z_{min}$$

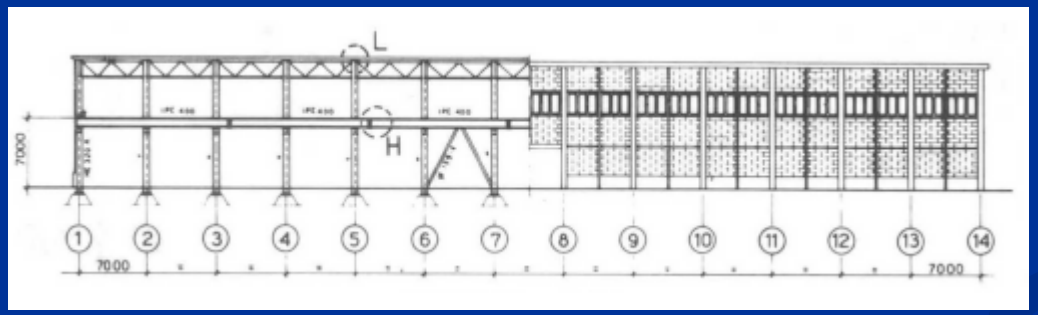
Categoria di esposizione	k_r	z_0 [m]	z_{min} [m]
III	0.20	0.10	5

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

Esempio n. 2 – Fabbricato Industriale

Coefficiente di Esposizione



k_r	z_0 [m]	z_{min} [m]
0.20	0.10	5

$$c_e(z) = k_r^2 c_t \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot \left[7 + c_t \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\right] \qquad z \geq z_{min}$$

$$c_e(z) = c_e(z_{min}) \qquad z < z_{min}$$

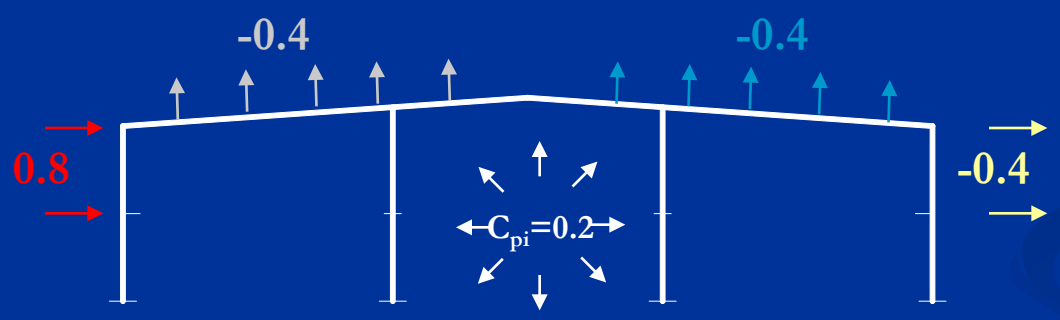
z [m]	C_e
<5.00	1.71
7.00	1.91
11.66	2.24
13.54	2.34

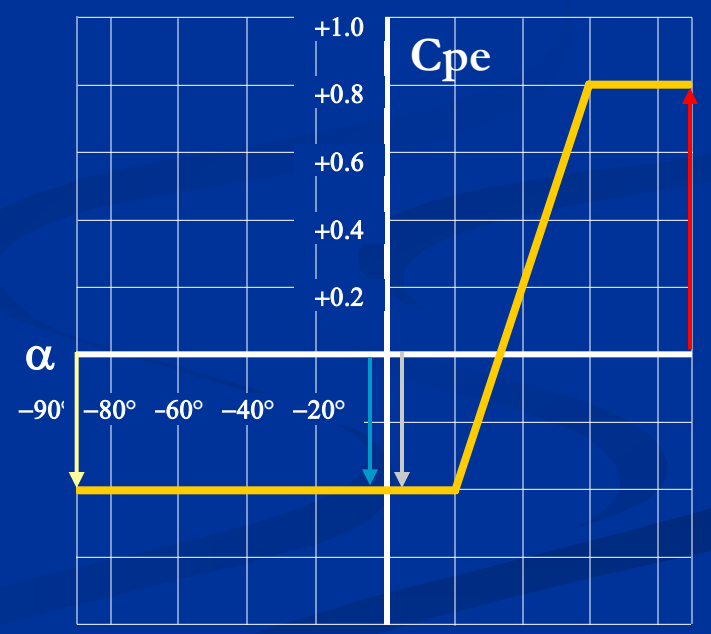
Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

Esempio n. 2 – Fabbricato Industriale

<u>Coefficienti di forma</u>





costruzioni che ha una parete con aperture di superficie minore di 1/3 di quella totale:

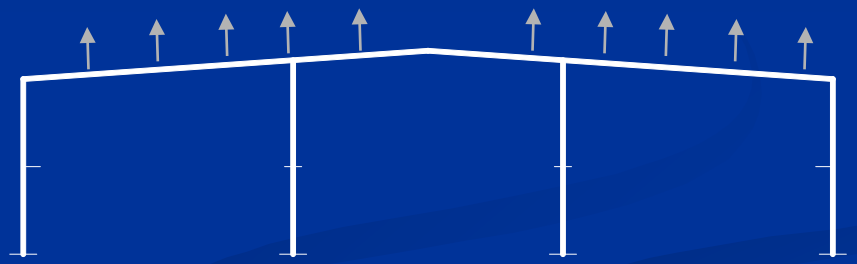
$c_{pi} = \pm 0{,}2$

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

Esempio n. 2 – Fabbricato Industriale

<u>Pressione del vento</u> $p = q_b \, c_e \, c_p \, c_d$



$$\left.\begin{aligned} q_b &= 490 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2} \\ c_e(12.9\ \mathrm{m}) &= 2.31 \\ c_{p,e} &= -0.4 \\ c_{p,i} &= -0.2 \\ c_d &= 1 \end{aligned}\right\} \quad p = -679.14 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2}$$

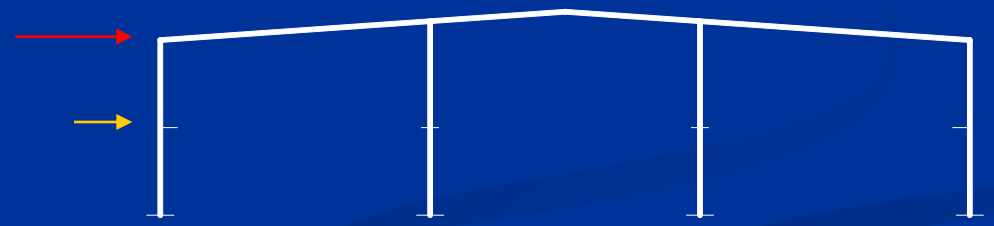
Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

Esempio n. 2 – Fabbricato Industriale

<u>Pressione del vento</u> $p = q_b \, c_e \, c_p \, c_d$

$$\left.\begin{aligned} q_b &= 490 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2} \\ c_e(11.66\ \mathrm{m}) &= 2.24 \\ c_{p,e} &= 0.8 \\ c_{p,i} &= 0.2 \\ c_d &= 1 \end{aligned}\right\} \quad p = 1097.6 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2}$$



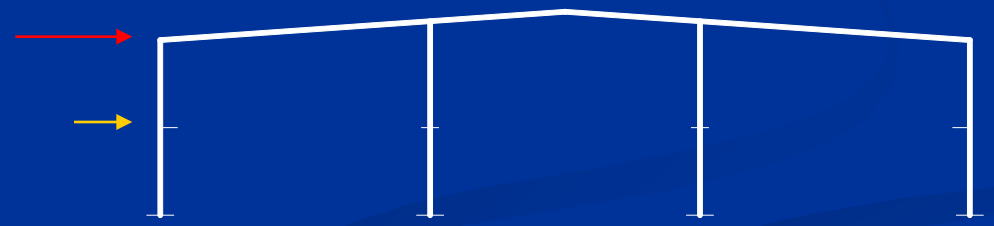
Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

Esempio n. 2 – Fabbricato Industriale

<u>Pressione del vento</u> $p = q_b \, c_e \, c_p \, c_d$

$$\left.\begin{aligned} q_b &= 490 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2} \\ c_e(7.00\ \mathrm{m}) &= 1.91 \\ c_{p,e} &= 0.8 \\ c_{p,i} &= 0.2 \\ c_d &= 1 \end{aligned}\right\} \quad p = 935.9 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2}$$



Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

PARTICOLARI PRECAUZIONI PROGETTUALI

Strutture particolarmente deformabili quali antenne, ciminiere, ponti o strutture sorretti da cavi devono essere verificate anche rispetto ai fenomeni di interazione vento-struttura, i quali possono indurre vibrazioni strutturali, degrado delle caratteristiche di rigidezza della struttura, o fatica nei collegamenti. Le verifiche di non superamento di stati limite ultimi e di esercizio saranno condotte mediante procedimenti analitici, sperimentali o numerici che tengano conto delle conoscenze attuali in materia.

L'azione del vento può assumere, inoltre, particolare rilievo per la presenza in uno stesso sito di più corpi strutturali. Nel progetto di strutture non usuali per forma, tipologia, dimensione e collocazione urbanistica, si dovrà procedere ad una valutazione accurata della risposta al vento, mediante comprovati metodi sperimentali o numerici.

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

Effetti torsionali

Nel caso di costruzioni di grandi dimensioni o di forma non simmetrica quali gli edifici alti, gli impalcati da ponte e le strutture di sostegno per insegne pubblicitarie di grandi dimensioni le azioni del vento inducono effetti torsionali che possono essere incrementati dalla risposta dinamica della struttura investita.
Tali effetti possono essere valutati, quando rilevanti, mediante analisi specifiche o facendo riferimento a dati di comprovata affidabilità.

Azioni sulle costruzioni

Carichi da vento

Distacco di vortici

Per strutture o elementi strutturali snelli di forma cilindrica quali ciminiere, torri per l'illuminazione, elementi di travi reticolari, ponti ed edifici alti, si deve tener conto dell'effetto dinamico dovuto al distacco alternato dei vortici da un lato e dall'altro del corpo investito dal vento. Esso produce una forza ciclica ortogonale alla direzione del vento e all'asse del corpo cilindrico, la cui frequenza fs è data dalla formula di Strouhal:

$$f_s = S_t v / b$$

dove:

b è la dimensione della sezione trasversale perpendicolare alla direzione del vento;

v è la velocità media del vento;

S_t è il numero di Strouhal, funzione della forma della sezione e del suo orientamento rispetto alla direzione del vento. Il suo valore può essere ricavato da dati suffragati da opportuna documentazione o da prove sperimentali in galleria del vento.
A titolo indicativo, St = 0,2 nel caso di sezioni circolari.

…

Azioni sulle costruzioni

Interferenza

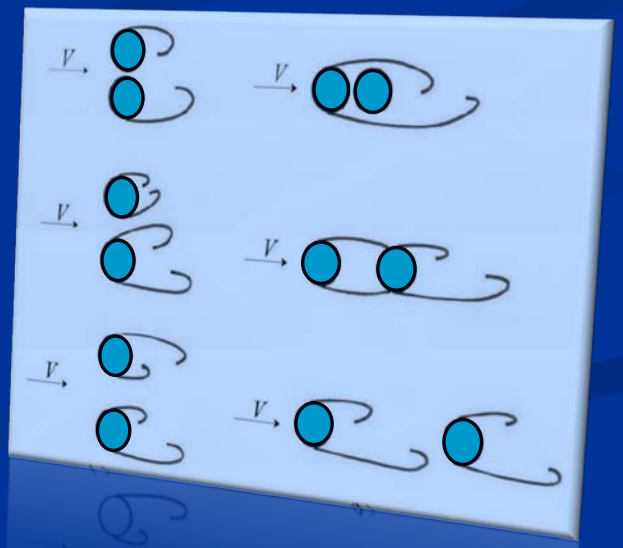
Si definiscono d'interferenza, i fenomeni tali da modificare il comportamento alle azioni del vento che una costruzione o un suo elemento avrebbe se fosse isolato. Secondo le diverse circostanze, tali fenomeni possono dare luogo ad effetti incrementali o riduttivi della velocità del vento, delle azioni aerodinamiche, della risposta dinamica e dei fenomeni aeroelastici.

A livello di velocità del vento, l'interferenza nasce principalmente quando una costruzione possiede altezza comparabile con quella degli ostacoli che danno luogo, complessivamente, alla rugosità del terreno che la circonda. Essa pone particolari problemi soprattutto quando una costruzione bassa si trova in un bosco o in un centro cittadino. L'impiego del profilo logaritmico della velocità media del vento è corretto sopra lo strato limite superficiale. Le presenti Istruzioni adottano una forma parziale di cautela, imponendo che il campo di vento si conservi uniforme sotto una quota convenzionale di riferimento chiamata altezza minima, z_{min}. In nessun caso ciò tiene conto della riduzione o dell'aumento locale della velocità, in concomitanza di particolari distribuzioni degli ostacoli e di specifiche direzioni del flusso incidente.

Azioni sulle costruzioni

Interferenza aerodinamica

Il fenomeno dell'interferenza aerodinamica si manifesta quando due corpi ravvicinati danno luogo, indipendentemente dal loro spostamento, a variazioni rilevanti del campo di flusso locale e delle azioni aerodinamiche che competono ai corpi isolati. Questo fenomeno assume particolare rilevanza nel caso di costruzioni di analoga forma e tipologia, ad esempio gli edifici alti che emergono dal tessuto urbano, le tettoie di gradinate contrapposte negli stadi, i serbatoi, le torri di refrigerazione e i ponti affiancati, le ciminiere in gruppo, i cavi ravvicinati ecc.



Interferenza aerodinamica fra cilindri in gruppo

Azioni sulle costruzioni

Interferenza aeroelastica

L'interferenza aeroelastica è uno dei fenomeni più complessi e potenzialmente catastrofici. Essa si manifesta quando corpi ravvicinati leggeri, deformabili e poco smorzati si scambiano azioni dovute ai reciproci moti attraverso il fluido nel quale sono immersi. Rientrano in tale famiglia i fenomeni di sincronizzazione, galoppo e flutter che coinvolgono congiuntamente corpi vicini. Sono soprattutto noti e temuti i fenomeni di interazione struttura-vento-struttura inerenti gruppi di ciminiere, elementi snelli ravvicinati, cavi paralleli, impalcati di ponti affiancati sorretti da cavi.

FINE