



ORDINE DEGLI INGEGNERI

DELLA PROVINCIA DI MACERATA

Introduzione a CNR-DT 207 R1/2018

LEZIONE 2

Pressioni del vento e azioni aerodinamiche

Stefano Brusco

DICCA – University of Genoa

stefano.brusco@edu.unige.it



**Università
di Genova**



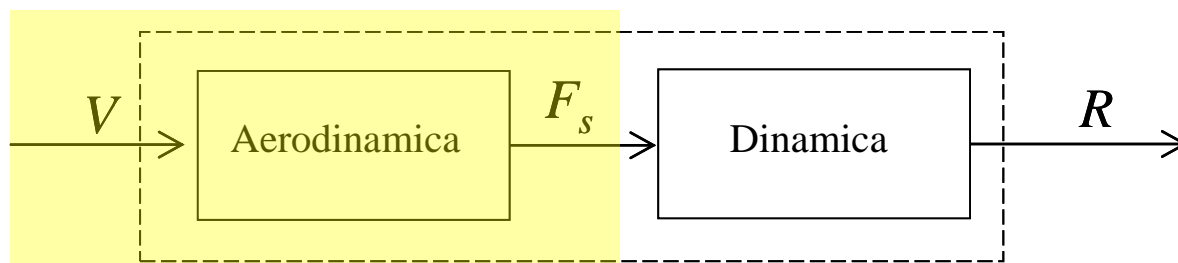
Pressioni del vento e azioni aerodinamiche:

- Introduzione;
- Dal campo di velocità al campo di pressione;
- Pressione locale;
- Azioni aerodinamiche su superfici e corpi snelli;
- Applicazione;
- Dal campo di pressione al campo di forze risultanti.



La valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni procede secondo tre passi:

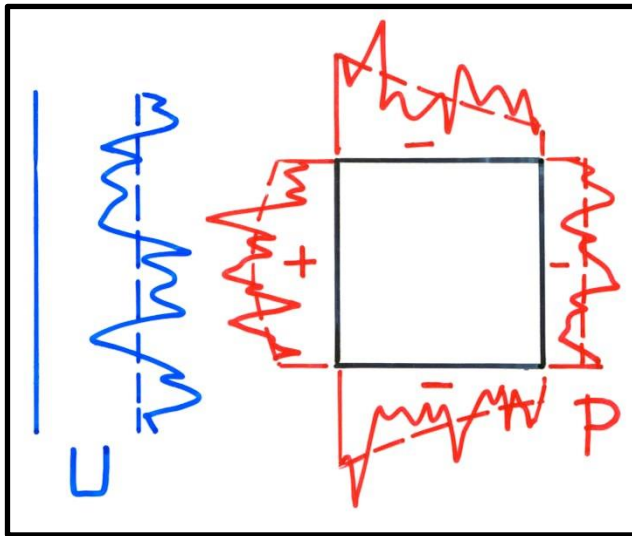
- 1) definite delle caratteristiche del sito ove sorge la costruzione e valutazione della pressione cinetica di picco;
- 2) **definite la forma, le dimensioni e l'orientamento della costruzione, si valutano le azioni aerodinamiche di picco sulla costruzione e sui suoi elementi;**
- 3) definite le proprietà meccaniche della costruzione si valutano le azioni statiche equivalenti, la risposta dinamica, le azioni e gli effetti dinamici e aeroelastici dovuti al distacco dei vortici, l'insorgere di altri fenomeni aeroelastici ...



Velocità del vento



Campo di pressioni
intorno alla struttura
e calcolo di azioni
aerodinamiche



*Il passaggio da un campo all'altro è fortemente dipendente dalla **forma**, dalla **dimensione** e dall'**orientamento** della costruzione e dei suoi elementi rispetto alla direzione del vento. Inoltre vi è possibile dipendenza dal **numero di Reynolds** e **scabrezza** per elementi dotati di **superfici arrotondate**.*

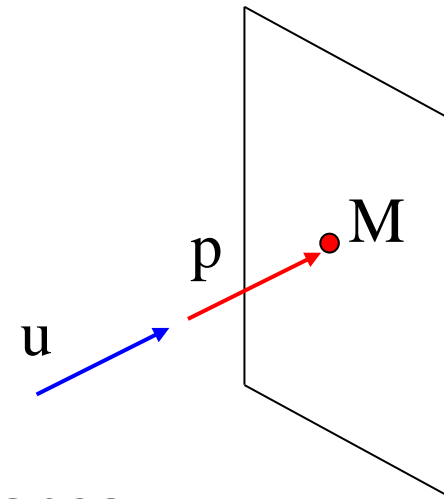


Pressione media

$$\bar{p} = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^2 \bar{c}_p$$

$$\bar{c}_p > 0$$

ρ Densità del fluido $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$



Teoria “quasi-stazionaria”: Pressione istantanea

fluttuazioni di pressione seguono le fluttuazioni di velocità

$$p(t) = \frac{1}{2} \rho u^2(t) \bar{c}_p = \frac{1}{2} \rho [\bar{u} + u'(t)]^2 \bar{c}_p = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^2 \left[1 + \frac{2u'(t)}{\bar{u}} + \frac{u'^2(t)}{\bar{u}^2} \right] \bar{c}_p$$

IPOTESI MOLTO IMPORTANTE E SEMPLIFICATIVA

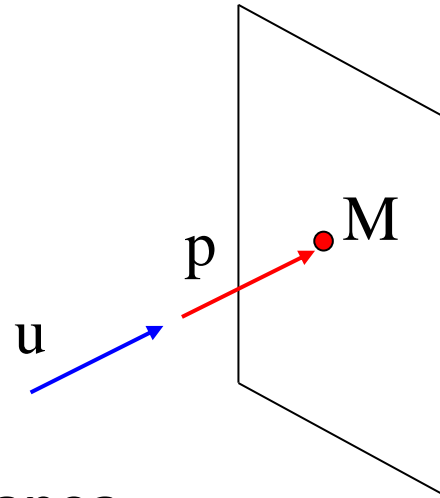


Pressione media

$$\bar{p} = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^2 \bar{c}_p$$

$$\bar{c}_p > 0$$

ρ Densità del fluido $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$



Teoria “quasi-stazionaria”: Pressione istantanea

fluttuazioni di pressione seguono le fluttuazioni di velocità

$$p(t) = \frac{1}{2} \rho u^2(t) \bar{c}_p = \frac{1}{2} \rho [\bar{u} + u'(t)]^2 \bar{c}_p = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^2 \left[1 + \frac{2u'(t)}{\bar{u}} + \frac{u'^2(t)}{\bar{u}^2} \right] \bar{c}_p \Rightarrow \approx 0$$

$$\bar{p} = \frac{1}{2} \rho \bar{c}_p \bar{u}^2$$

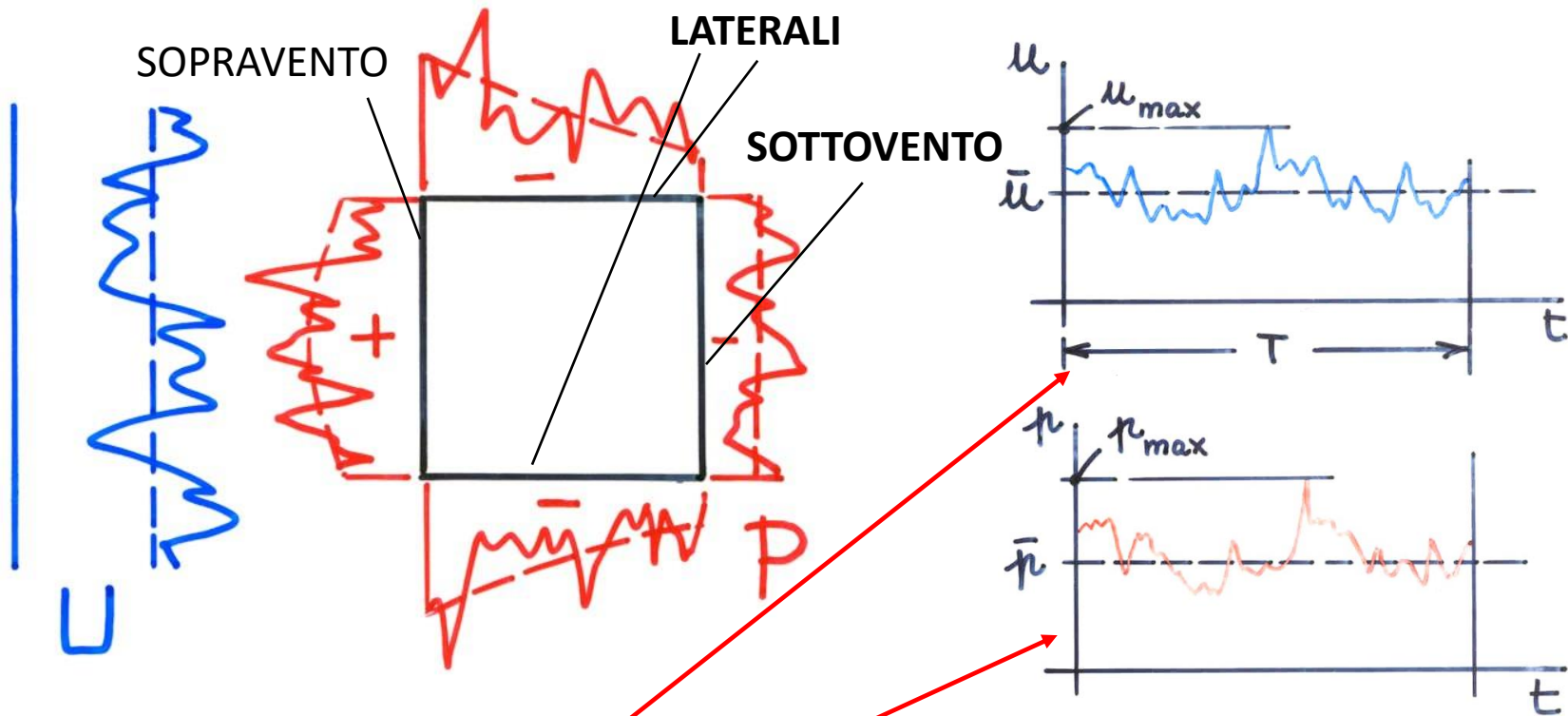
$$p(t) = \bar{p} + p'(t)$$

$$p'(t) = \rho \bar{c}_p \bar{u} u'(t)$$

$$\sigma_p = \rho \bar{c}_p \bar{u} \sigma_u$$



Dal campo di velocità al campo di pressione



$$p(t) = \frac{1}{2} \rho \bar{c}_p u^2(t) = \frac{1}{2} \rho \bar{c}_p [\bar{u} + u'(t)]^2$$

OK

Faccia sopravvento

NO

Faccia sottovento/facce laterali



Il fenomeno del distacco dei vortici

Quando un **fluido** (non necessariamente aria) incontra un **corpo 'tozzo'**, un **campo di vortici** si stacca dal corpo. Questo genera il fenomeno del **distacco dei vortici**. I vortici che si staccano dal corpo generano delle **azioni** che **dominano** il **progetto** delle porzioni interessate e della struttura nel suo insieme. Corpi **affusolati** che sono ottimizzati per evitare il distacco dei vortici sono detti **'aerodinamici'**.

Esempi di corpi aerodinamici



Ala di aereo



Delfino



Il fenomeno del distacco dei vortici

Quando un **fluido** (non necessariamente aria) incontra un **corpo 'tozzo'**, un **campo di vortici** si stacca dal corpo. Questo genera il fenomeno del **distacco dei vortici**. I vortici che si staccano dal corpo generano delle **azioni** che **dominano il progetto** delle porzioni interessate e della struttura nel suo insieme. Corpi **affusolati** che sono ottimizzati per evitare il distacco dei vortici sono detti **'aerodinamici'**.

Esempi di corpi aerodinamici



Ala di aereo



Campo di vorticità intorno a un'ala



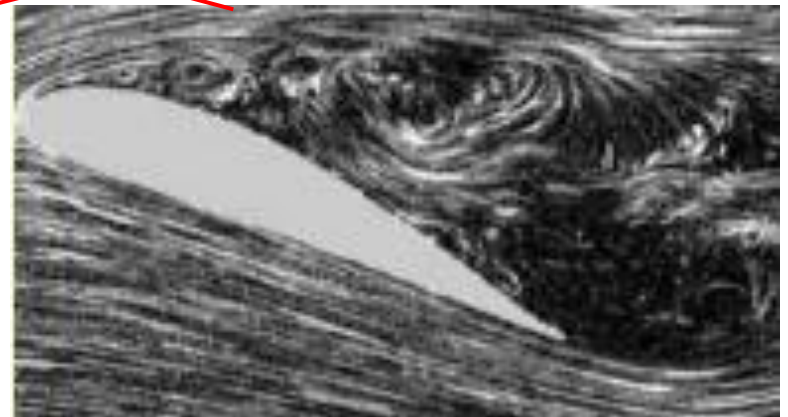
Il fenomeno del distacco dei vortici

Quando un **fluido** (non necessariamente aria) incontra un **corpo 'tozzo'**, un **campo di vortici** si stacca dal corpo. Questo genera il fenomeno del **distacco dei vortici**. I vortici che si staccano dal corpo generano delle **azioni** che **dominano** il **progetto** delle porzioni interessate e della struttura nel suo insieme. Corpi **affusolati** che sono ottimizzati per evitare il distacco dei vortici sono detti '**aerodinamici**'.

~~Esempi di corpi aerodinamici tozzi~~



Ala di aereo



Campo di vorticità intorno a un'ala non a incidenza



Il fenomeno del distacco dei vortici

Qualsiasi corpo di interesse per l'ingegneria civile è 'tozzo'



Burj Khalifa
(Dubai)



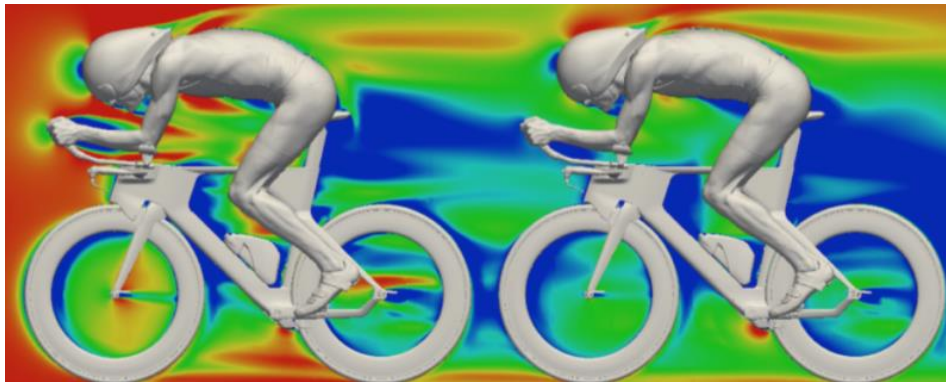
The Millennium Bridge (Londra)



Il fenomeno del distacco dei vortici

... ma il fenomeno è di grande interesse anche per altre discipline !

Ciclismo



Simulazioni numeriche, Fonte: www.aerospacecue.it



Prove in gallerie del vento, Fonte: www.tech-cycling.com

Ingegneria Meccanica

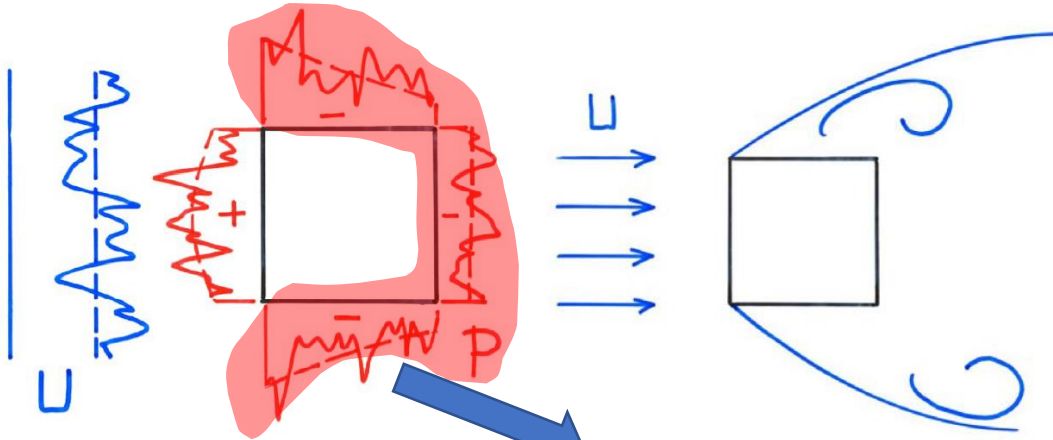


Ferrari 296 GTB

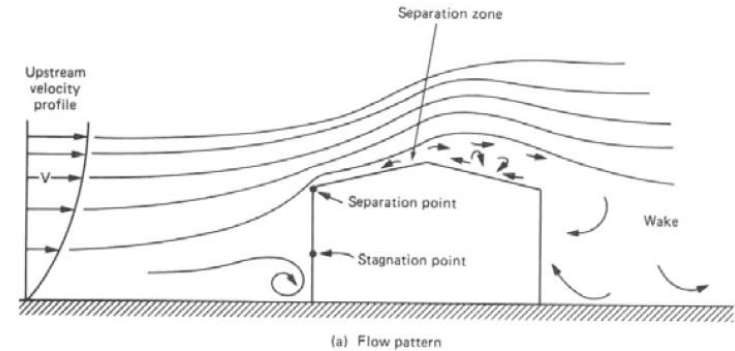


Il fenomeno del distacco dei vortici

Qualsiasi corpo di interesse per l'ingegneria civile è 'tozzo'



Suzioni importanti dovute al distacco dei vortici che possono portare ad azioni locali importanti, particolarmente vicino agli spigoli.

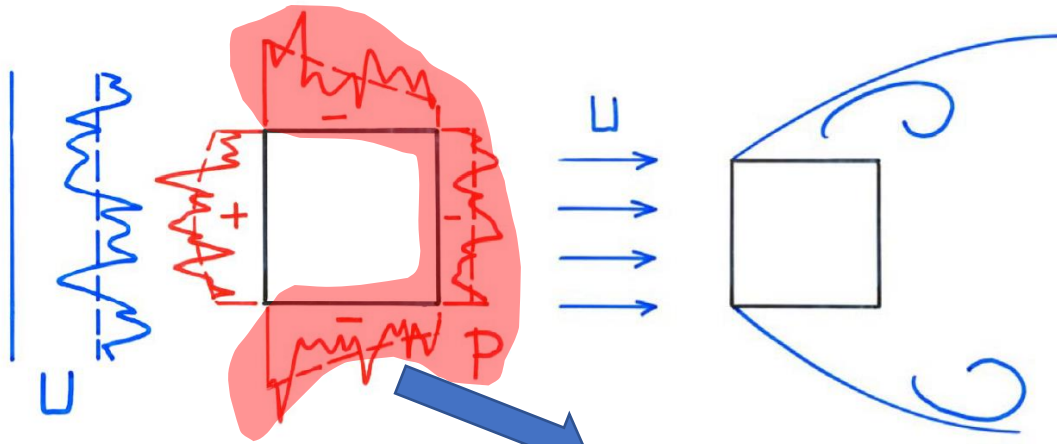


Campo di vorticità nelle vicinanze di un edificio basso

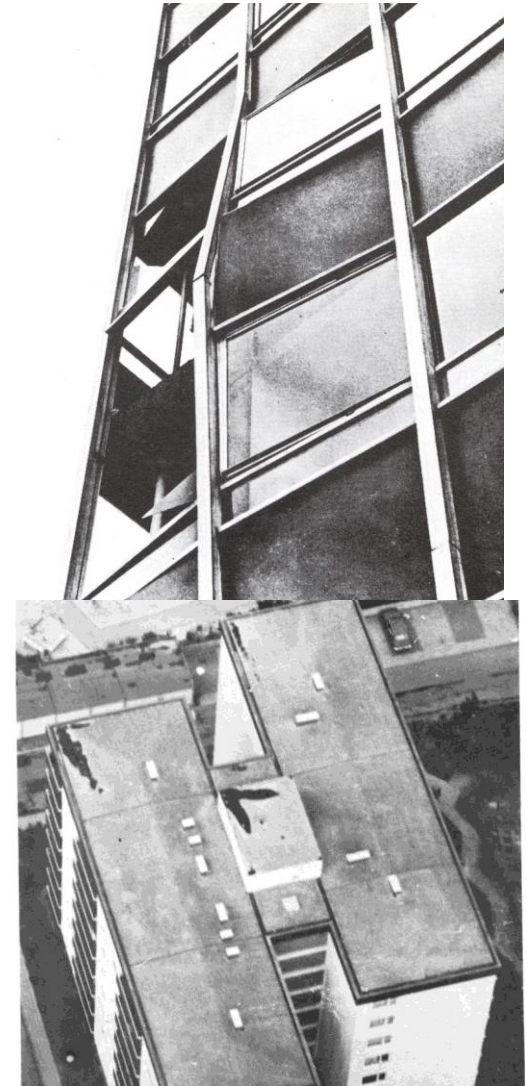


Il fenomeno del distacco dei vortici

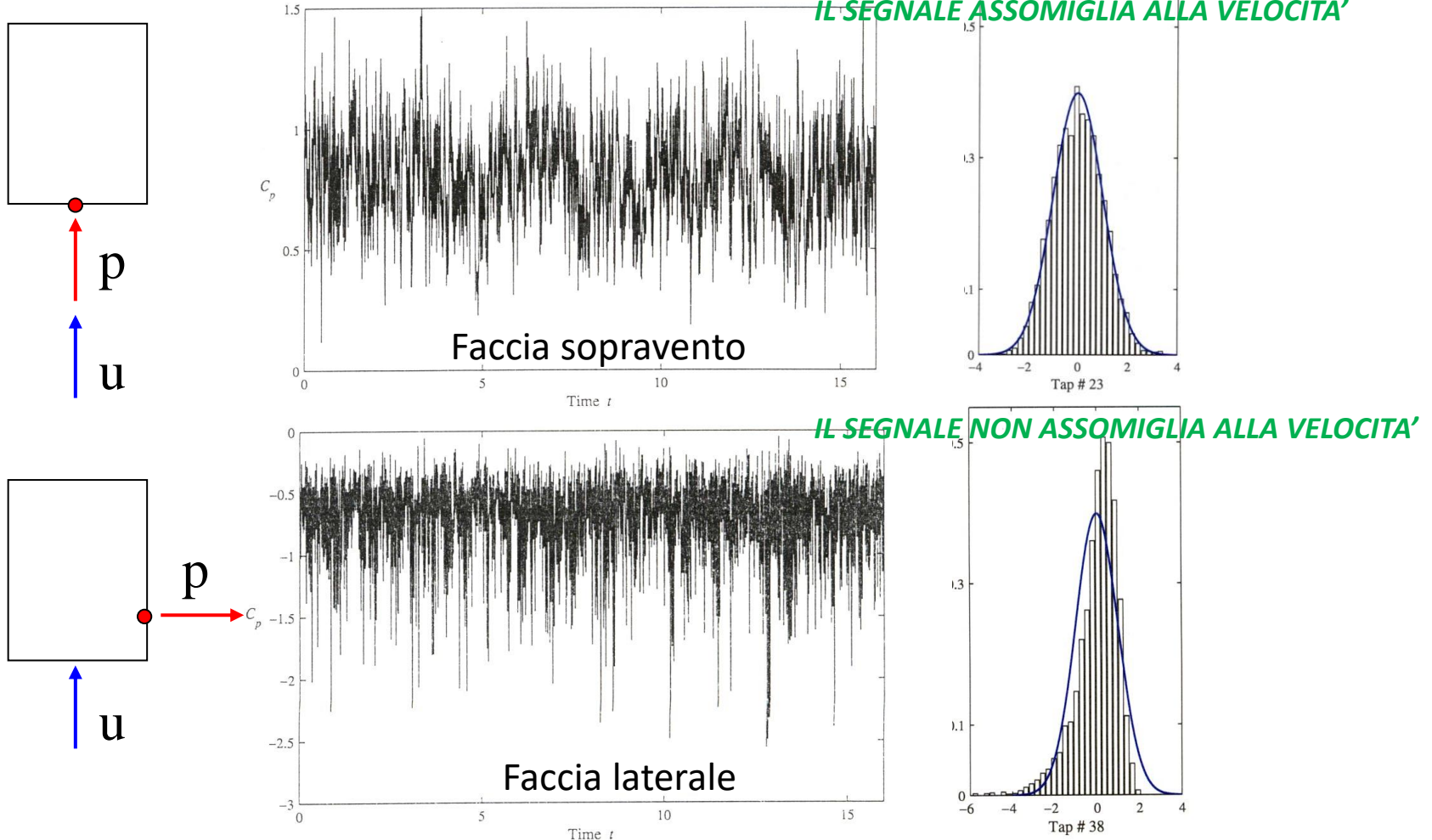
Qualsiasi corpo di interesse per l'ingegneria civile è 'tozzo'



Suzioni importanti dovute al distacco dei vortici che possono portare ad azioni locali importanti, particolarmente vicino agli spigoli.



Influenza del distacco dei vortici sul campo di pressioni



Il legame diretto tra velocità e pressione funziona per la faccia sopravvento, non altrove: cambia il fenomeno fisico e la legge può condurre a valutazioni a sfavore di sicurezza



$$p(t) = \frac{1}{2} \rho \bar{c}_p u^2(t) = \frac{1}{2} \rho \bar{c}_p [\bar{u} + u'(t)]^2 = \bar{p} + p'(t)$$

Pressione locale massima

$$\bar{p}_{\max} = \bar{p} + g_p \sigma_p = \bar{p} \left(1 + g_p \frac{\sigma_p}{\bar{p}} \right)$$

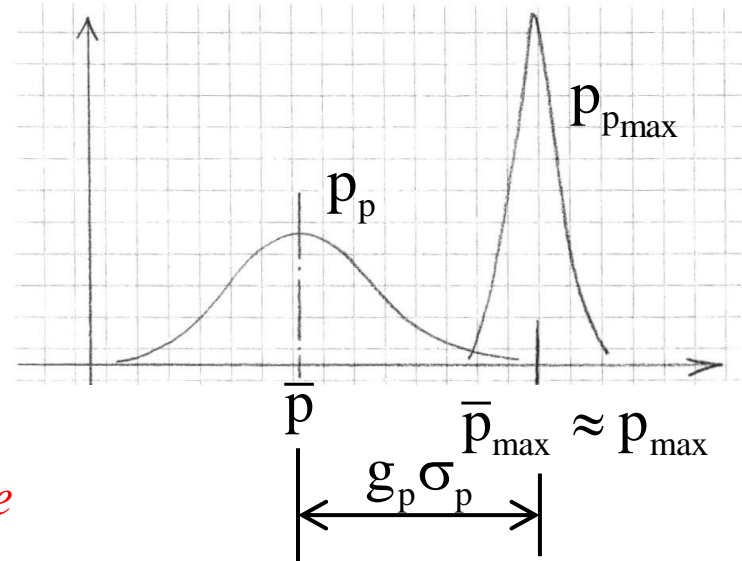
Fattore di raffica della pressione locale

$$\boxed{G_p = 1 + g_p \frac{\sigma_p}{\bar{p}}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\bar{p}_{\max} = \bar{p} G_p}$$

$$p'(t) \propto u'(t) \Rightarrow g_p = g_u$$

$$\sigma_p / \bar{p} = 2\sigma_u / \bar{u} = 2I_u \Rightarrow$$

$$\boxed{G_p = 1 + 2g_u I_u}$$



Velocità massima del vento

$$u(t) = \bar{u} + u'(t)$$

$$\bar{u}_{\max} = \bar{u} G_u$$

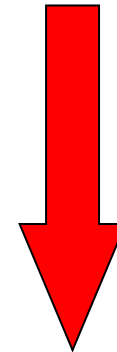
$$G_u = 1 + g_u I_u$$

Pressione massima locale

$$p(t) = \bar{p} + p'(t)$$

$$\bar{p}_{\max} = \bar{p} G_p$$

$$G_p = 1 + 2g_u I_u$$

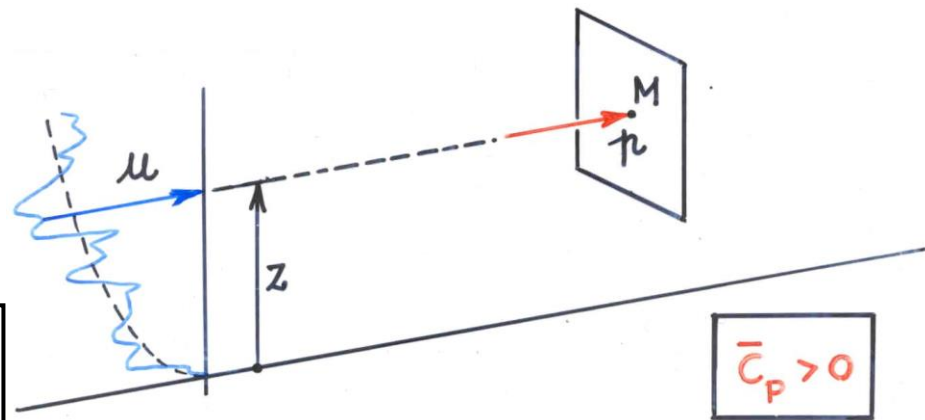


$$p(t) = \bar{p} + p'(t)$$

Pressione locale massima

$$\bar{p}_{\max} = \bar{p} G_p$$

$$G_p = 1 + 2g_u I_u$$



Esempio

$$z_0 = 0.05 \text{ m}; z = 10 \text{ m}; \bar{u}(z) = 25 \text{ m/s}; \rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$$

$$I_u = 1 / \ln(z / z_0) = 1 / \ln(10 / 0.05) = 0.19; g_u = 2.79$$

$$G_u = 1 + g_u I_u = 1 + 2.79 \times 0.19 = 1.53$$

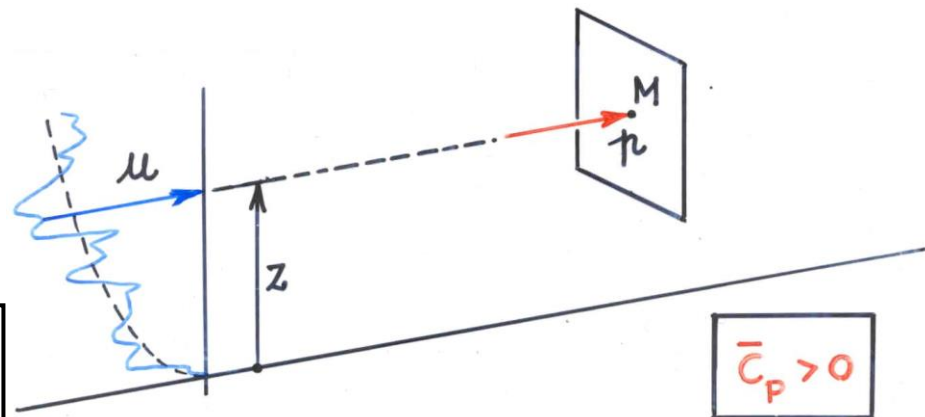


$$p(t) = \bar{p} + p'(t)$$

Pressione locale massima

$$\bar{p}_{\max} = \bar{p} G_p$$

$$G_p = 1 + 2g_u I_u$$



Esempio

$$\bar{c}_p = 1$$

Pressione locale
media

Pressione locale di
picco

$$\bar{p} = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^2 \bar{c}_p = \frac{1}{2} \times 1.25 \times 25^2 \times 1 = 390.625 \text{ N/m}^2$$

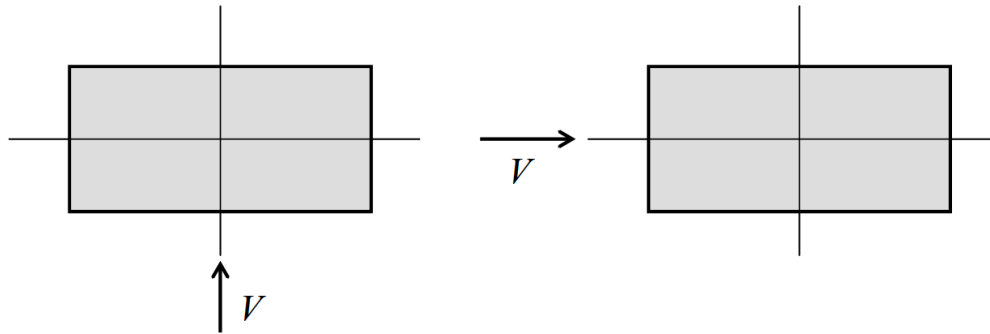
$$G_p = 1 + 2g_u I_u = 1 + 2 \times 2.79 \times 0.19 = 2.06$$

$$\bar{p}_{\max} = \bar{p} G_p = 390.625 \times 2.06 = 804.8 \text{ N/m}^2$$

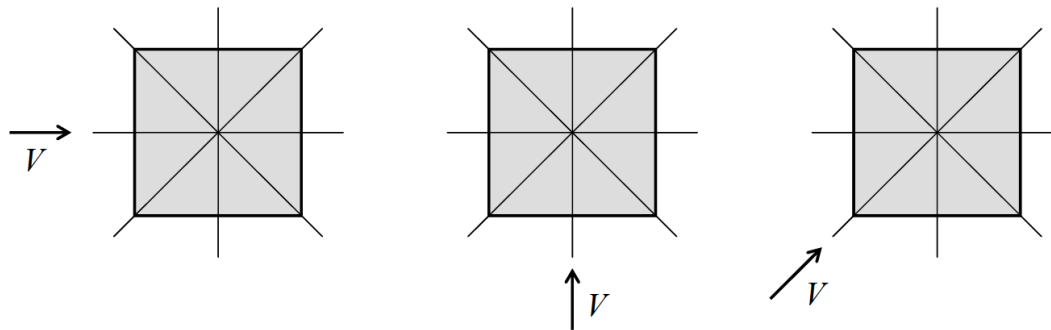


Azioni aerodinamiche su superfici e corpi snelli

EFFETTI DIREZIONALI: *Le direzioni di provenienza del vento sono di regola quelle corrispondenti a ciascuno degli assi principali della sezione della costruzione, considerati singolarmente.*



In casi particolari, è necessario considerare anche **altri casi**, come l'ipotesi di vento spirante in **direzione diagonale (sezione quadrata)**.



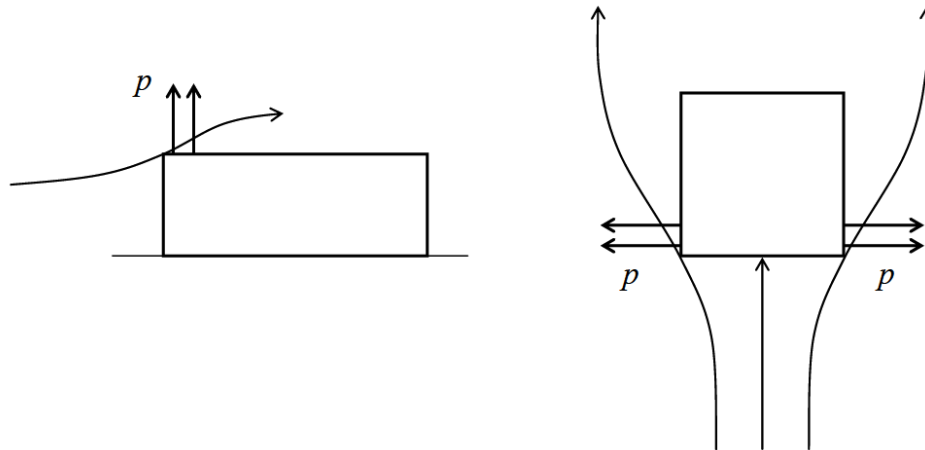
In generale, **costruzioni non dotate di due assi di simmetria** possono richiedere **ulteriori analisi** per verificare la possibilità di effetti strutturali più severi.



Azioni aerodinamiche su superfici e corpi snelli

Il vento esercita **azioni aerodinamiche di picco d'insieme** sulla costruzione e **azioni aerodinamiche di picco locali** sui singoli elementi. In generale, le **azioni locali sui singoli elementi** sono molto **maggiori** rispetto a quelle indotte sugli **stessi elementi per valutare l'azione d'insieme del vento** sulla costruzione.

 *Questo è particolarmente amplificato in prossimità dei **bordi e degli spigoli della costruzione.***



Mai viene richiesta la somma delle due azioni per la verifica del singolo elemento.



Azioni aerodinamiche di picco sulle costruzioni sono i **valori massimi attesi delle azioni aerodinamiche del vento**, valutate **trascurando gli effetti riduttivi dovuti alla non contemporaneità delle massime pressioni locali e gli effetti amplificativi prodotti dalle vibrazioni strutturali**.

Esse sono proporzionali alla pressione cinetica di picco del vento q_p a seconda del caso studiato:

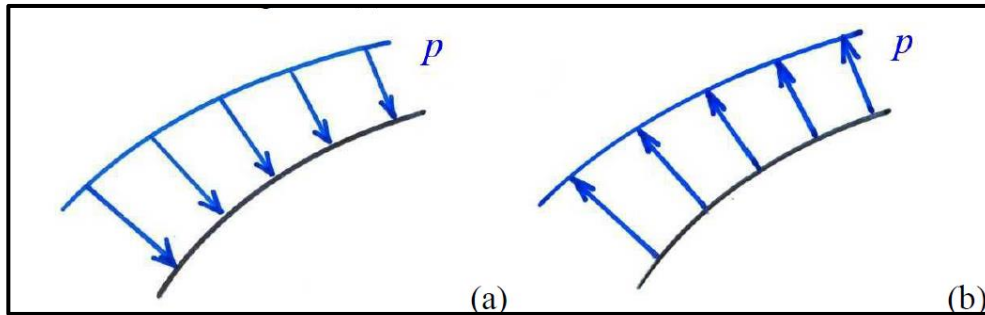
- 1) Pressione su ciascuna faccia di una superficie (costruzioni che racchiudono un volume interno, come serbatoi, edifici, ...);
- 2) Pressione complessiva su una superficie (costruzioni che non racchiudono un volume interno, come muri, parapetti, ...);
- 3) Forze e momenti risultanti (costruzioni o elementi compatti, come tettoie, insegne, tabelloni, ...);
- 4) Forze e momenti per unità di lunghezza (elementi snelli, come ciminiere, torri, ponti, ...).



Azioni aerodinamiche su superfici e corpi snelli

AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO D'INSIEME SULLA COSTRUZIONE

1) Pressione su ciascuna faccia di una superficie (costruzioni che racchiudono un volume interno, come serbatoi, edifici, ...)



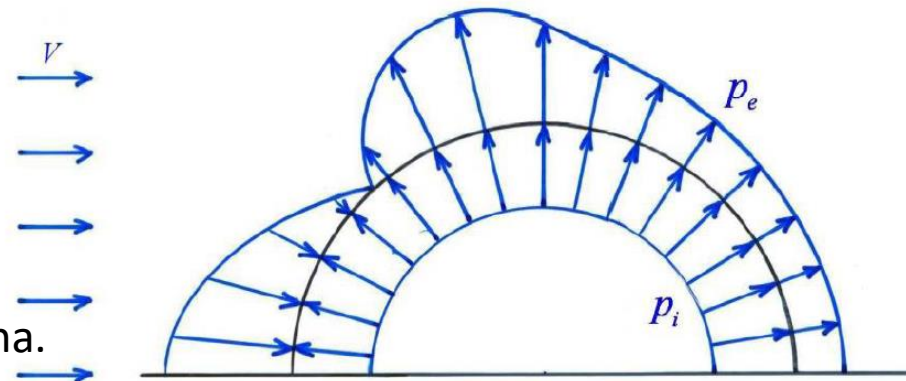
- (a) sovrappressioni sono convenzionalmente definite positive;
- (b) depressioni sono convenzionalmente definite negative;

$$p_e(z) = q_p(\bar{z}_e) \cdot c_{pe} \quad (3.11a)$$

$$p_i(z) = q_p(\bar{z}_i) \cdot c_{pi} \quad (3.11b)$$

- q_p pressione cinetica di picco del vento.
- c_{pe} , c_{pi} coefficienti di pressione esterna e interna.
- \bar{z}_i , \bar{z}_e altezze di riferimento associate ai coefficienti.

- p_e pressione sulle facce esterne della costruzione;
- p_i pressione sulle facce interne della costruzione;



AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO D'INSIEME SULLA COSTRUZIONE

1) Pressione su ciascuna faccia di una superficie (costruzioni che racchiudono un volume interno, come serbatoi, edifici, ...)

Appendice G

G.2 Edifici a pianta rettangolare; (purchè $h/d < 5$, altrimenti strutture mono-dimensionali, G.10)

G.3 Costruzioni a pianta circolare;



AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO D'INSIEME SULLA COSTRUZIONE

1) Pressione su ciascuna faccia di una superficie (costruzioni che racchiudono un volume interno, come serbatoi, edifici, ...)

Appendice G

G.2 Edifici a pianta rettangolare; (purchè $h/d < 5$, altrimenti strutture mono-dimensionali, G.10)

G.2.2 PARETI LATERALI

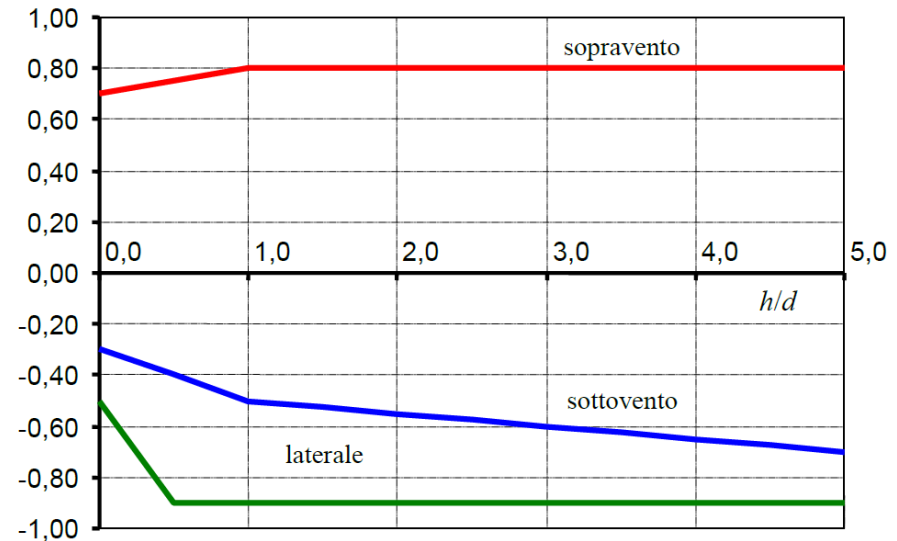
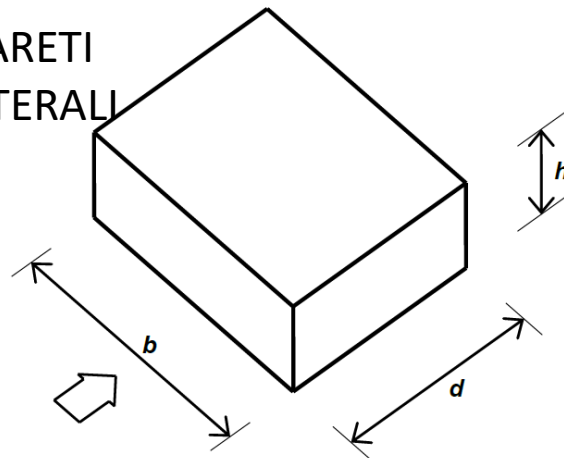


Tabella G.I – Edifici a pianta rettangolare: c_{pe} per facce sopravvento, sottovento e laterali.

Faccia sopravvento	Facce laterali	Faccia sottovento
$h/d \leq 1: c_{pe} = 0,7 + 0,1 \cdot h/d$	$h/d \leq 0,5: c_{pe} = -0,5 - 0,8 \cdot h/d$	$h/d \leq 1: c_{pe} = -0,3 - 0,2 \cdot h/d$
$h/d > 1: c_{pe} = 0,8$	$h/d > 0,5: c_{pe} = -0,9$	$1 < h/d \leq 5: c_{pe} = -0,5 - 0,05 \cdot (h/d - 1)$

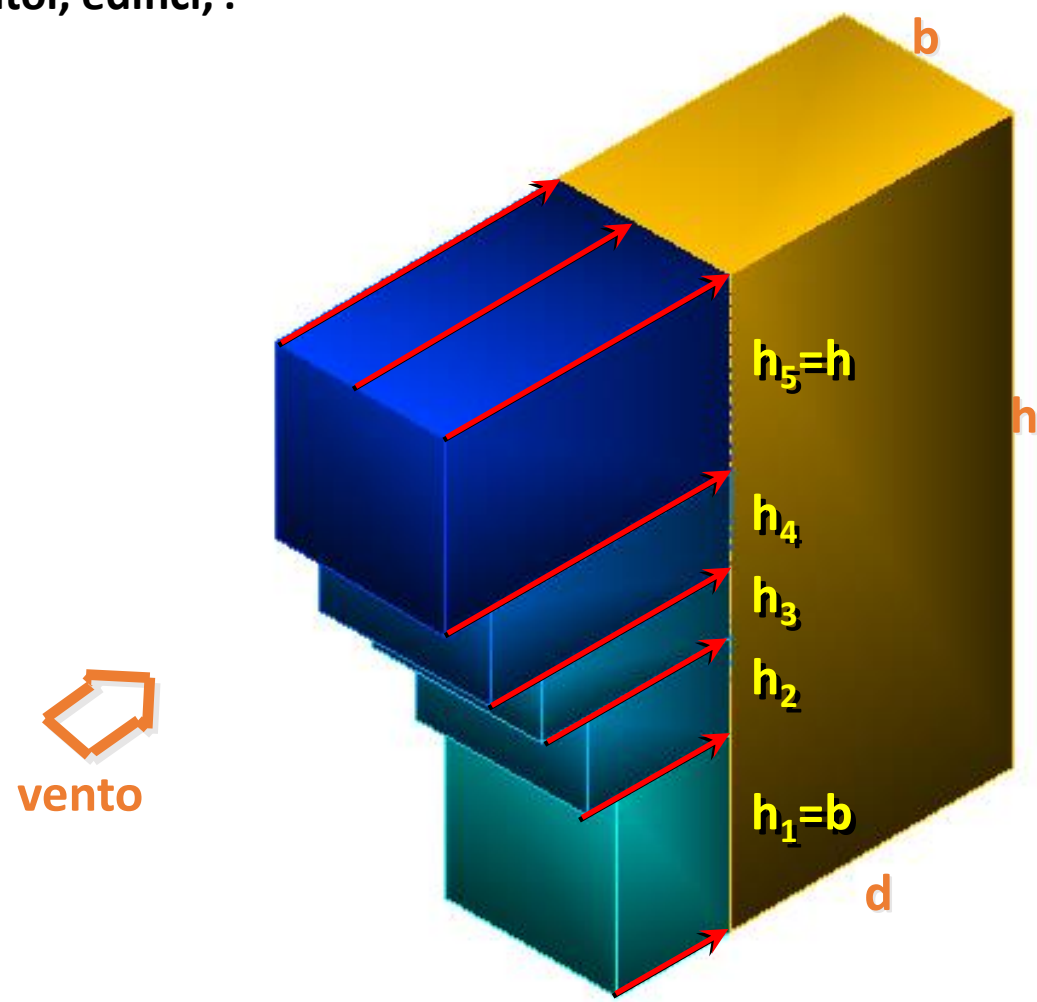
Definizione della altezza di riferimento \bar{z}_e a seconda delle quantità h, d, b .



AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO D'INSIEME SULLA COSTRUZIONE

1) Pressione su ciascuna faccia di una superficie (costruzioni che racchiudono un volume interno, come serbatoi, edifici, .

Appendice G

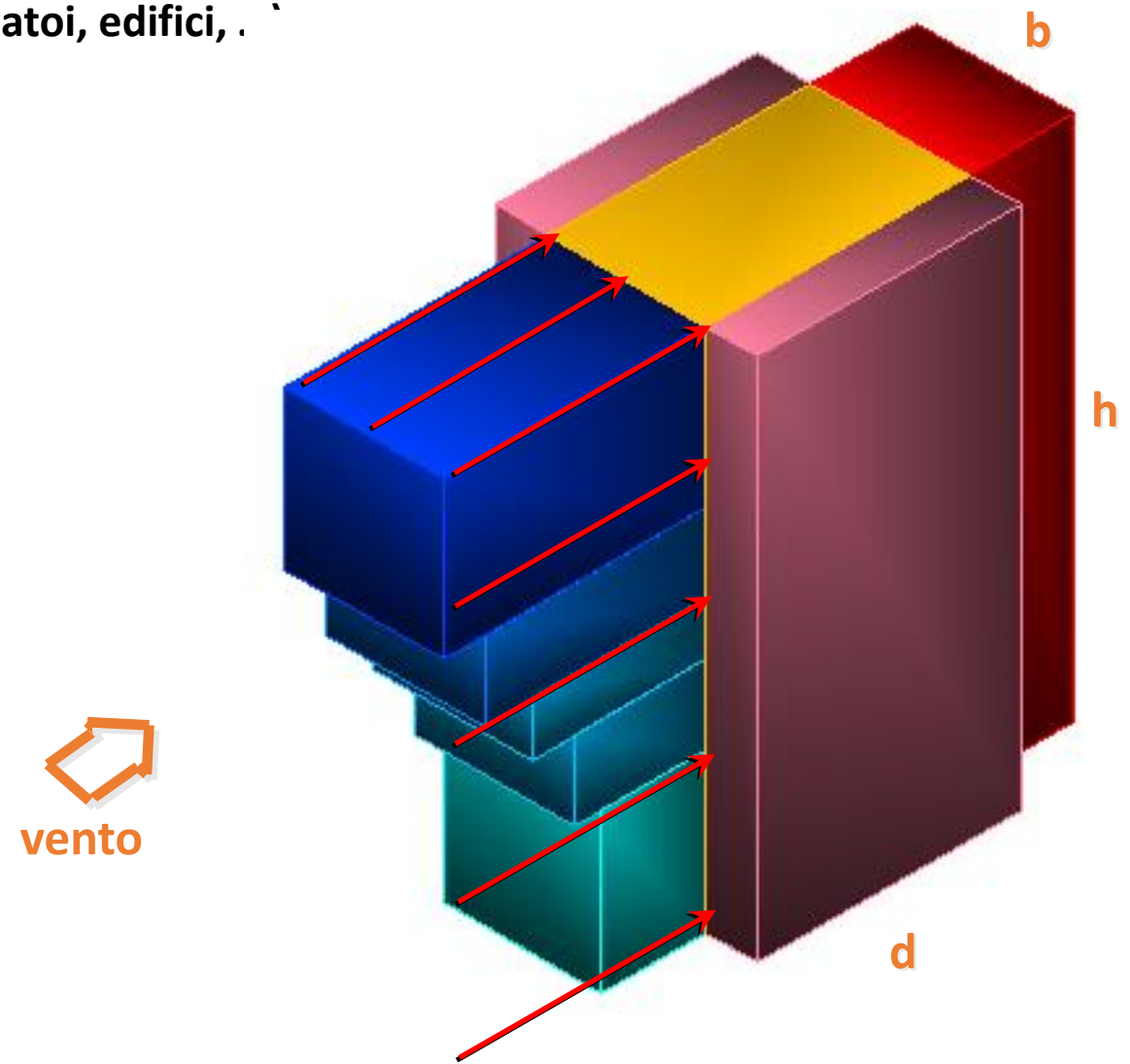


Azioni aerodinamiche su superfici e corpi snelli

AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO D'INSIEME SULLA COSTRUZIONE

1) Pressione su ciascuna faccia di una superficie (costruzioni che racchiudono un volume interno, come serbatoi, edifici, . . .)

Appendice G



AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO D'INSIEME SULLA COSTRUZIONE

1) Pressione su ciascuna faccia di una superficie (costruzioni che racchiudono un volume interno, come serbatoi, edifici, ...)

Appendice G

G.2 Edifici a pianta rettangolare; (purchè $h/d < 5$, altrimenti strutture mono-dimensionali, G.10)

G.2.3 COPERTURE / G.2.3.1 COPERTURE PIANE

G.2.3.1 Coperture piane

Si considerano piane le coperture la cui inclinazione sull'orizzontale sia compresa tra -5° e $+5^\circ$.

L'altezza di riferimento \bar{z}_e per le coperture piane è pari alla quota massima della copertura stessa, inclusa la presenza dei parapetti e di altri analoghi elementi. I coefficienti di pressione sono riportati nella Tabella G.II, secondo la suddivisione in zone di Figura G.5.

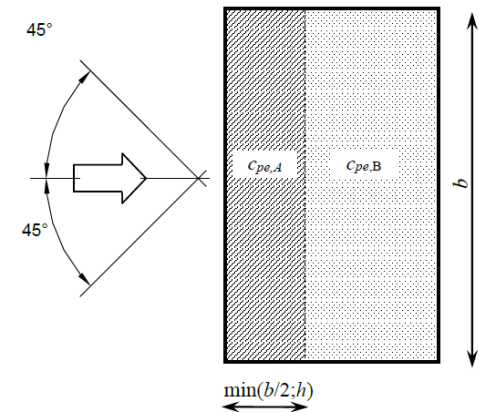
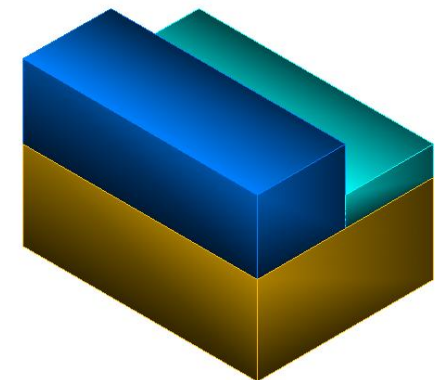


Figura G.5 – Schema di riferimento per coperture piane.

Tabella G.II – Edifici rettangolari: c_{pe} per coperture piane.

Fascia sopravvento di profondità pari al minimo tra $b/2$ ed h :	$c_{pe,A} = -0,80$
Restanti zone	$c_{pe,B} = \pm 0,20$

Suzione dovuta al distacco dei vortici



AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO D'INSIEME SULLA COSTRUZIONE

1) Pressione su ciascuna faccia di una superficie (costruzioni che racchiudono un volume interno, come serbatoi, edifici, ...)

Appendice G

G.2 Edifici a pianta rettangolare; (purchè $h/d < 5$, altrimenti strutture mono-dimensionali, G.10)

G.2.3 COPERTURE

G.2.3.2 COPERTURA A SEMPLICE FALDA

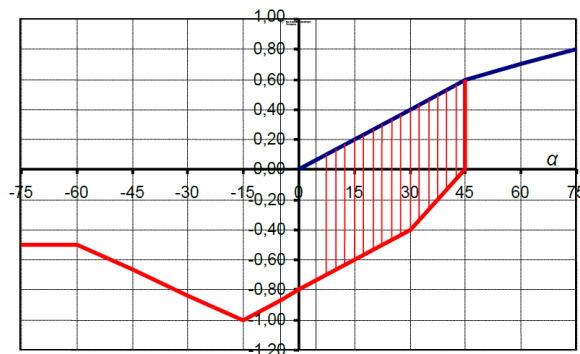
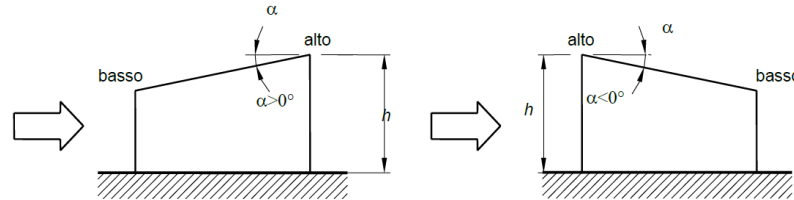


Figura G.7 – Coperture a semplice falda: valori del coefficiente c_{pe} : vento perpendicolare alla direzione del colmo.

G.2.3.3 COPERTURA A DOPPIA FALDA

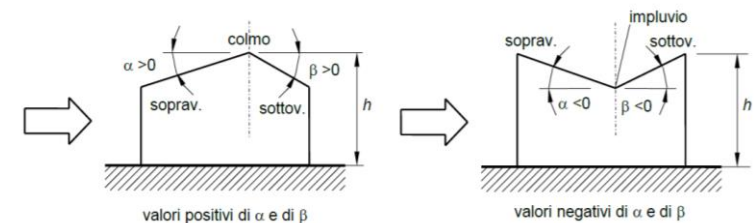


Figura G.9 – Schema di riferimento per coperture a doppia falda.



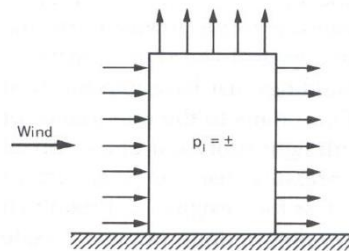
Azioni aerodinamiche su superfici e corpi snelli

AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO D'INSIEME SULLA COSTRUZIONE

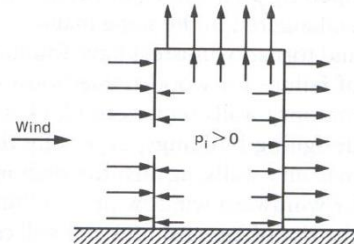
1) Pressione su ciascuna faccia di una superficie (costruzioni che racchiudono un volume interno, come serbatoi, edifici, ...)

Appendice G

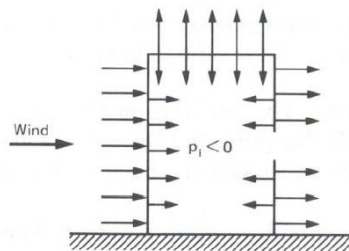
G.4 Pressione interna (tendenzialmente uniforme all'interno di un ambiente)



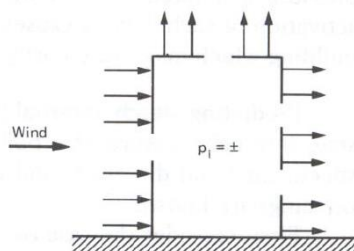
(a) Hermetic building



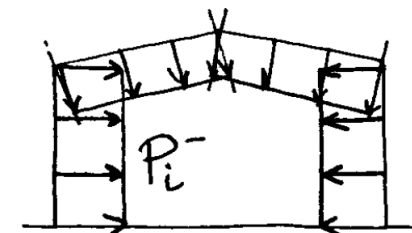
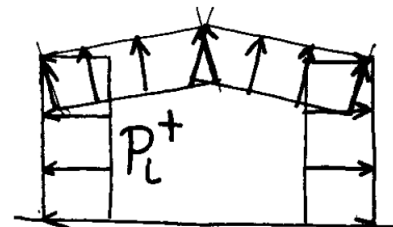
(b) Windward opening



(c) Suction opening



(d) Openings on more than one side

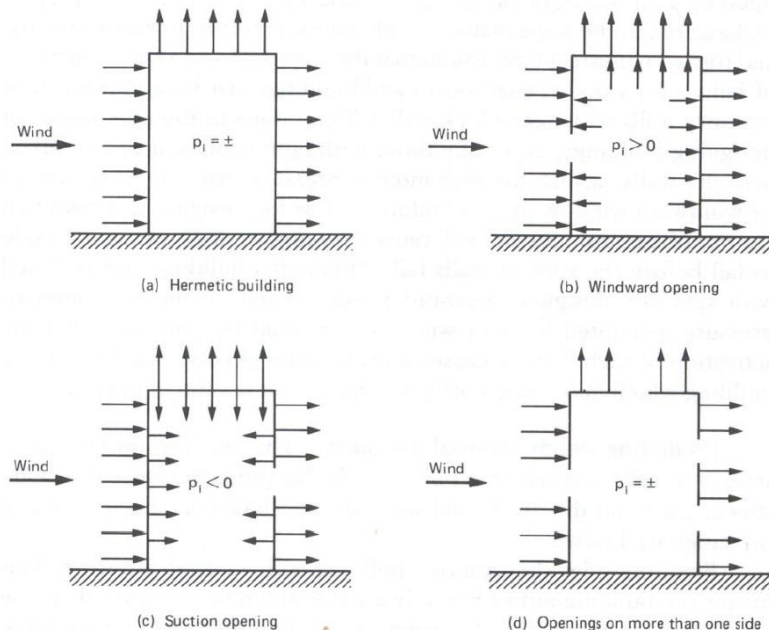


AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO D'INSIEME SULLA COSTRUZIONE

1) Pressione su ciascuna faccia di una superficie (costruzioni che racchiudono un volume interno, come serbatoi, edifici, ...)

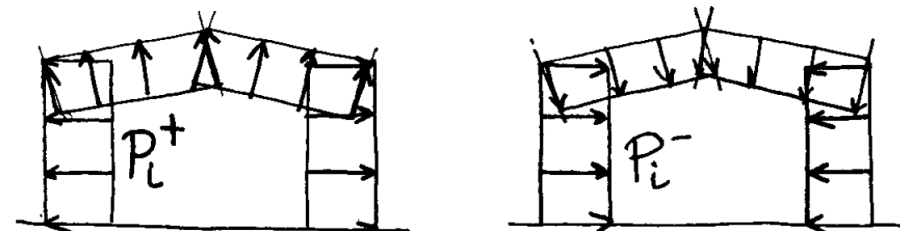
Appendice G

G.4 Pressione interna (tendenzialmente uniforme all'interno di un ambiente)



Risulta necessario distinguere due casi principali:

- Edifici con una **superficie dominante**;
- Edifici con una **distribuzione uniforme di aperture**.

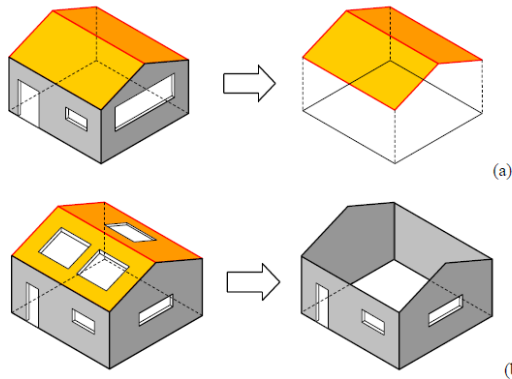


AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO D'INSIEME SULLA COSTRUZIONE

1) Pressione su ciascuna faccia di una superficie (costruzioni che racchiudono un volume interno, come serbatoi, edifici, ...)

Appendice G

G.4 Pressione interna (tendenzialmente uniforme all'interno di un ambiente)



G.4.1 Edifici con percentuale di aperture maggiore del 30% su facciate (a) e copertura (b), riconducibili a tettoie e muri e parapetti.

G.4.2 Edifici con una superficie dominante

- Superficie dotata di un'area totale di aperture pari ad almeno il doppio della somma delle aree delle aperture presenti sulle rimanenti superfici.

Tabella G.IX – Coefficienti di pressione interna per edifici con una superficie dominante (per valori intermedi della superficie dominante è consentita l'interpolazione lineare)

Area delle aperture sulla superficie dominante pari ad almeno il doppio dell'area delle aperture sulle altre superfici	$c_{pi} = 0,75 \cdot c_{pe}$
Area delle aperture sulla superficie dominante pari ad almeno il triplo dell'area delle aperture sulle altre superfici	$c_{pi} = 0,90 \cdot c_{pe}$

G.4.3 Edifici con distribuzione uniforme di aperture

$$c_{pi} = \frac{A_p^2 \cdot c_{pe,p} + A_n^2 \cdot c_{pe,n}}{A_p^2 + A_n^2} \quad (G.4)$$

dove:

- A_p è l'area totale delle aperture cui compete un coefficiente di pressione esterna positivo;
- A_n è l'area totale delle aperture cui compete un coefficiente di pressione esterna negativo;
- $c_{pe,p}$ è il coefficiente di pressione esterna medio per le aperture soggette a pressione esterna positiva;
- $c_{pe,n}$ è il coefficiente di pressione esterna medio per le aperture soggette a pressione esterna negativa.

Quando non possano essere effettuate valutazioni accurate del coefficiente di pressione interna, ad esempio poiché non sono disponibili i dati necessari ad applicare le Eqq. (G.4) e (G.5), si possono assumere i valori $c_{pi} = +0,2$ e $c_{pi} = -0,3$, considerando il caso che di volta in volta conduce alla situazione maggiormente gravosa.

G.4.4 Silos aperti, camini e serbatoi

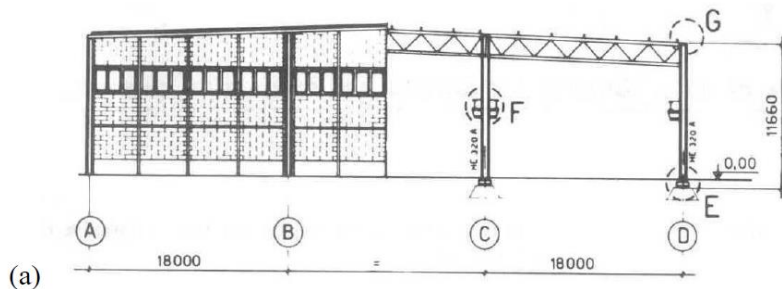


AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO D'INSIEME SULLA COSTRUZIONE

1) Pressione su ciascuna faccia di una superficie (costruzioni che racchiudono un volume interno, come serbatoi, edifici, ...)

ESEMPIO 4.3 – FABBRICATO INDUSTRIALE

Pianta rettangolare di 54 x 91 m, copertura a doppia falda con inclinazione di 4°. Linea di colmo è posta alla quota di 13.54 m. Le linee di gronda laterali sono poste alla quota di 11.66 m.



$$T_R = 50 \text{ anni} \left\{ \begin{array}{l} q_p(z) = 778,21 \text{ N/m}^2 \quad \text{per } z \leq 5 \text{ m} \\ q_p(z) = 18,22 \ln\left(\frac{z}{0,1}\right) \left[\ln\left(\frac{z}{0,1}\right) + 7 \right] \\ \quad \text{per } z > 5 \text{ m} \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned} \text{Sia } b &= 91 \text{ m;} \\ d &= 54 \text{ m, } h = 13.54 \text{ m} \\ h/d &= 0.251 \end{aligned}$$

$$q_p(\bar{z}_e) = ?$$

AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO D'INSIEME SULLA COSTRUZIONE

1) Pressione su ciascuna faccia di una superficie (costruzioni che racchiudono un volume interno, come serbatoi, edifici, ...)

ESEMPIO 4.3 – FABBRICATO INDUSTRIALE

G.2.2.1 Altezza di riferimento per la faccia sopravento

Il flusso che si instaura intorno agli edifici è molto complesso, specialmente nella parte di base e sommitale della faccia sopravento. Ciò produce una distribuzione verticale della pressione in generale diversa dal profilo della pressione cinetica di picco del vento indisturbato (paragrafo 3.3.7). Il presente paragrafo fornisce un criterio di valutazione dell'altezza di riferimento per la faccia sopravento, ossia della quota a cui si deve calcolare la pressione cinetica di picco, tale da condurre a stime approssimate, generalmente a favore di sicurezza, della risultante di tali pressioni.

Per gli edifici bassi, ossia con altezza minore o uguale della dimensione in pianta ortogonale al flusso del vento ($h \leq b$), l'altezza di riferimento è costante e pari alla quota di sommità dell'edificio ($\bar{z}_e = h$); la pressione del vento è pertanto uniforme.

$$\bar{z}_e = h = 13.54 \text{ m}$$

Per gli edifici alti, ossia con altezza compresa fra la dimensione in pianta ortogonale al flusso del vento e 5 volte la profondità dell'edificio ($b < h \leq 5 \cdot d$), si definiscono due zone distinte. Nella prima parte dell'edificio, sino alla quota $z = b$, l'altezza di riferimento è costante e pari a $\bar{z}_e = b$; la pressione del vento è pertanto uniforme. Nella parte superiore dell'edificio, per z compreso fra b e h , la quota di riferimento \bar{z}_e può essere scelta seguendo uno dei due seguenti criteri (Figura G.3):

G.2.2.2 Altezza di riferimento per le facce sottovento e laterali

La pressione sulle facce sottovento e sulle facce laterali degli edifici è legata alle caratteristiche del flusso separato (in scia) e può essere considerata, con buona approssimazione, costante con la quota. Di ciò si tiene conto assumendo che l'altezza di riferimento sia costante e pari alla quota di sommità dell'edificio ($\bar{z}_e = h$).

$$\bar{z}_e = h = 13.54 \text{ m}$$

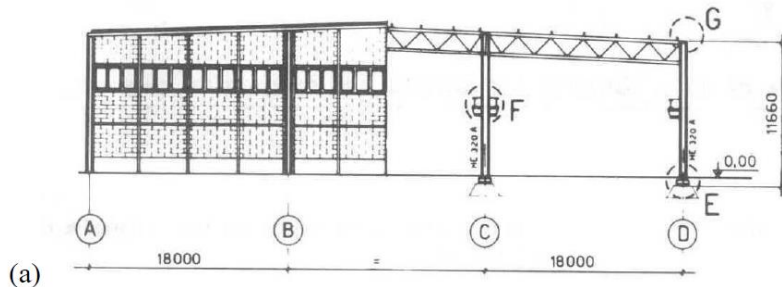


AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO D'INSIEME SULLA COSTRUZIONE

1) Pressione su ciascuna faccia di una superficie (costruzioni che racchiudono un volume interno, come serbatoi, edifici, ...)

ESEMPIO 4.3 – FABBRICATO INDUSTRIALE

Pianta rettangolare di 54 x 91 m, copertura a doppia falda con inclinazione di 4°. Linea di colmo è posta alla quota di 13.54 m. Le linee di gronda laterali sono poste alla quota di 11.66 m.



$$T_R = 50 \text{ anni} \left\{ \begin{array}{l} q_p(z) = 778,21 \text{ N/m}^2 \quad \text{per } z \leq 5 \text{ m} \\ q_p(z) = 18,22 \ln\left(\frac{z}{0,1}\right) \left[\ln\left(\frac{z}{0,1}\right) + 7 \right] \\ \quad \text{per } z > 5 \text{ m} \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned} \text{Sia } b &= 91 \text{ m;} \\ d &= 54 \text{ m, } h = 13.54 \text{ m} \\ h/d &= 0.251 \end{aligned}$$

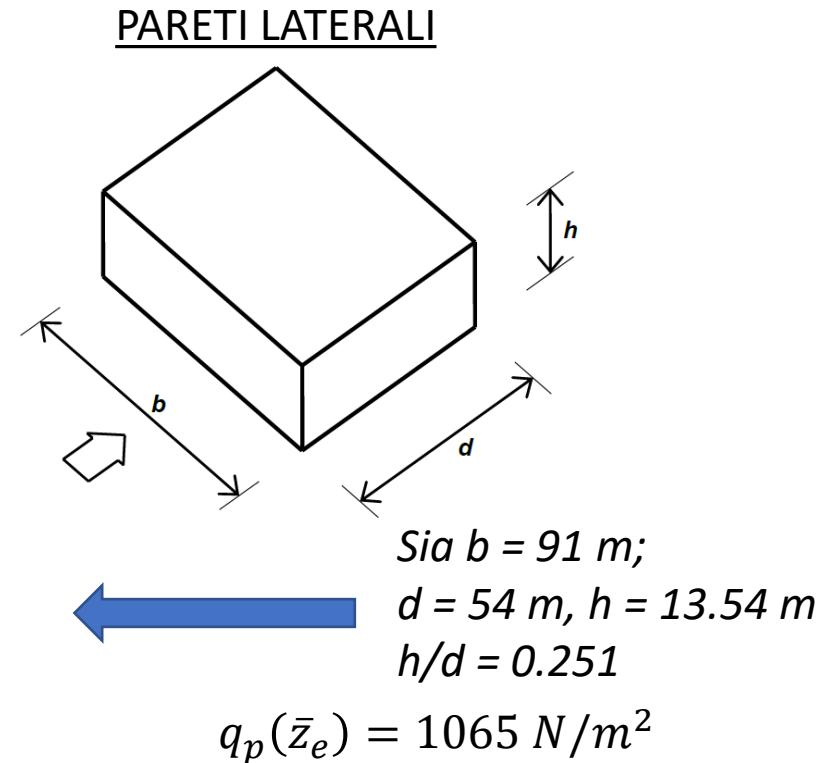
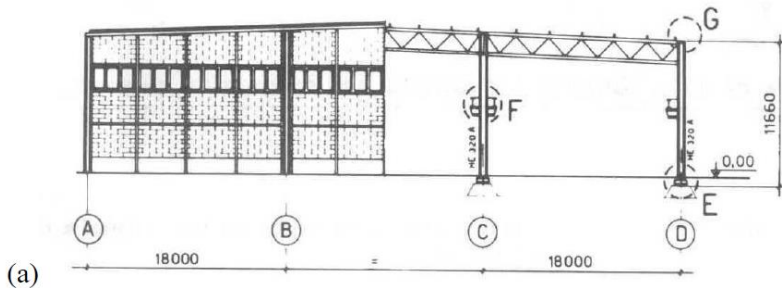
$$q_p(T_R = 50, z = 13.54 \text{ m}) = 1065 \text{ N/m}^2$$

AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO D'INSIEME SULLA COSTRUZIONE

1) Pressione su ciascuna faccia di una superficie (costruzioni che racchiudono un volume interno, come serbatoi, edifici, ...)

ESEMPIO 4.3 – FABBRICATO INDUSTRIALE

Pianta rettangolare di 54 x 91 m, copertura a doppia falda con inclinazione di 4°. Linea di colmo è posta alla quota di 13.54 m. Le linee di gronda laterali sono poste alla quota di 11.66 m.



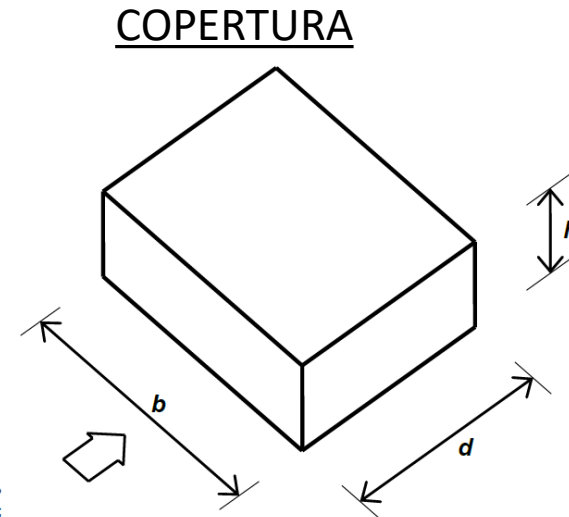
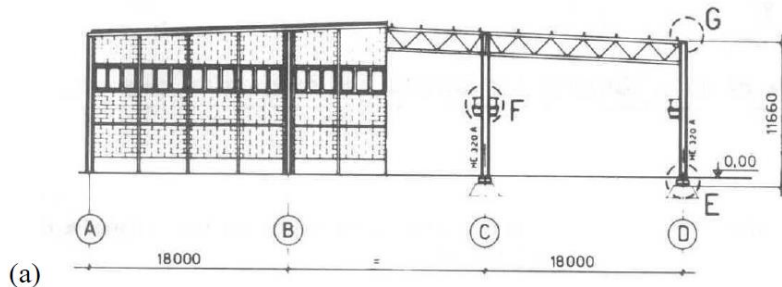
Faccia	C_{pe}	$p_e \text{ (N/m}^2\text{)}$
Sopravento	0.725	772
Laterale	-0.70	-745
Sottovento	-0.35	-373

AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO D'INSIEME SULLA COSTRUZIONE

1) Pressione su ciascuna faccia di una superficie (costruzioni che racchiudono un volume interno, come serbatoi, edifici, ...)

ESEMPIO 4.3 – FABBRICATO INDUSTRIALE

Pianta rettangolare di 54 x 91 m, copertura a doppia falda con inclinazione di 4°. Linea di colmo è posta alla quota di 13.54 m. Le linee di gronda laterali sono poste alla quota di 11.66 m.



G.2.3.1 Coperture piane

Si considerano piane le coperture la cui inclinazione sull'orizzontale sia compresa tra -5° e $+5^\circ$.

L'altezza di riferimento \bar{z}_e per le coperture piane è pari alla quota massima della copertura stessa, inclusa la presenza dei parapetti e di altri analoghi elementi. I coefficienti di pressione sono riportati nella Tabella G.II, secondo la suddivisione in zone di Figura G.5.

Tabella G.II – Edifici rettangolari: c_{pe} per coperture piane.

Fascia sopravento di profondità pari al minimo tra $b/2$ ed h :	$c_{pe,A} = -0,80$
Restanti zone	$c_{pe,B} = \pm 0,20$

$$\min \left\{ \frac{b}{2}, h \right\} = \min \left\{ \frac{91}{2}, 13.54 \right\} = 13.54 \text{ m}$$



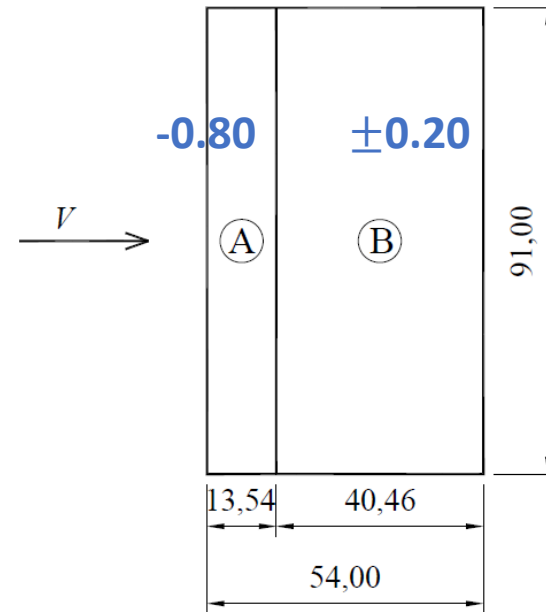
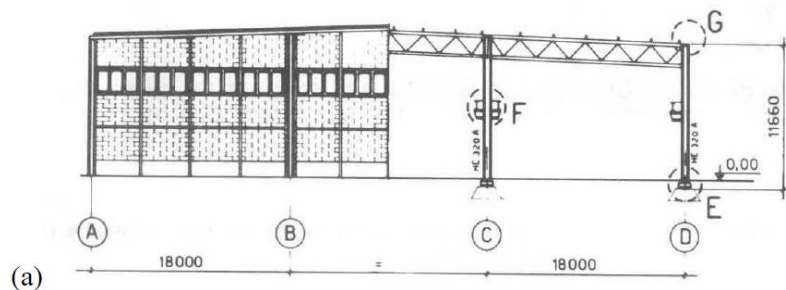
Azioni aerodinamiche su superfici e corpi snelli - Esempio

AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO D'INSIEME SULLA COSTRUZIONE

1) Pressione su ciascuna faccia di una superficie (costruzioni che racchiudono un volume interno, come serbatoi, edifici, ...)

ESEMPIO 4.3 – FABBRICATO INDUSTRIALE

Pianta rettangolare di 54 x 91 m, copertura a doppia falda con inclinazione di 4°. Linea di colmo è posta alla quota di 13.54 m. Le linee di gronda laterali sono poste alla quota di 11.66 m.



Zona	c_{pe}	p_e (N/m ²)
A	-0.80	-852
B	±0.20	±213

$$q_p(\bar{z}_e) = 1065 \text{ N/m}^2$$



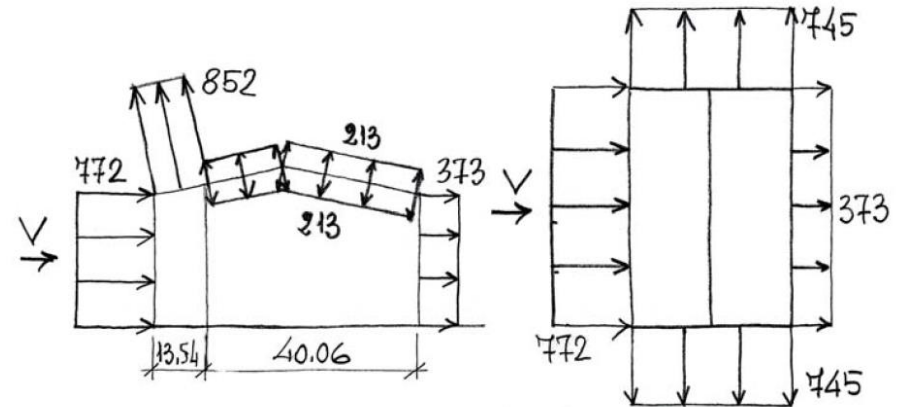
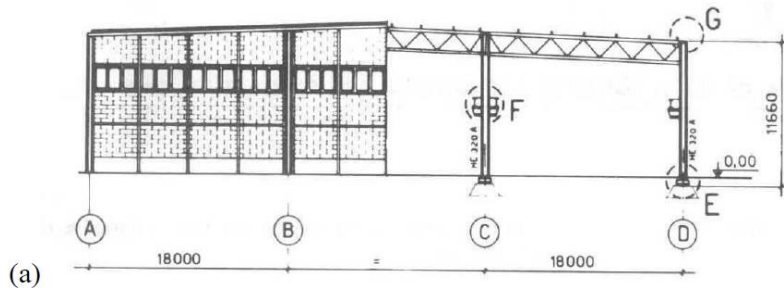
Azioni aerodinamiche su superfici e corpi snelli - Esempio

AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO D'INSIEME SULLA COSTRUZIONE

1) Pressione su ciascuna faccia di una superficie (costruzioni che racchiudono un volume interno, come serbatoi, edifici, ...)

ESEMPIO 4.3 – FABBRICATO INDUSTRIALE

Pianta rettangolare di 54 x 91 m, copertura a doppia falda con inclinazione di 4°. Linea di colmo è posta alla quota di 13.54 m. Le linee di gronda laterali sono poste alla quota di 11.66 m.



Zona	c_{pe}	p_e (N/m ²)
A	-0.80	-852
B	± 0.20	± 213

Faccia	c_{pe}	p_e (N/m ²)
Sopravento	0.725	772
Laterale	-0.70	-745
Sottovento	-0.35	-373

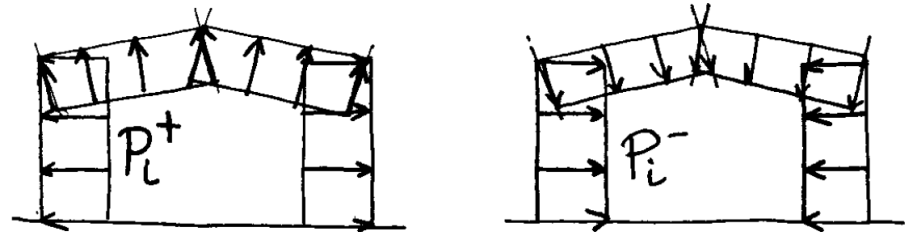
AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO D'INSIEME SULLA COSTRUZIONE

1) Pressione su ciascuna faccia di una superficie (costruzioni che racchiudono un volume interno, come serbatoi, edifici, ...)

ESEMPIO 4.3 – FABBRICATO INDUSTRIALE

Pianta rettangolare di 54 x 91 m, copertura a doppia falda con inclinazione di 4°. Linea di colmo è posta alla quota di 13.54 m. Le linee di gronda laterali sono poste alla quota di 11.66 m.

PRESSIONE INTERNA



2 scenari considerati:

-1) La distribuzione e la dimensione delle aperture non è conosciuta, ma si ammette che la costruzione non possieda superfici dominanti;

$$c_{pi} = +0.2, -0.3$$

$$p_i = +213 \text{ N/m}^2, -319 \text{ N/m}^2$$

-2) Si ammette che la costruzione abbia una superficie dominante e che l'area delle aperture sulla faccia dominante sia doppia dell'area delle aperture delle altre facce. Se la superficie dominante coincide con la faccia sopravvento,

$$c_{pi} = +0.75 \cdot c_{pe} = 0.75 \cdot 0.725 = 0.544 \quad p_i = +579 \text{ N/m}^2$$

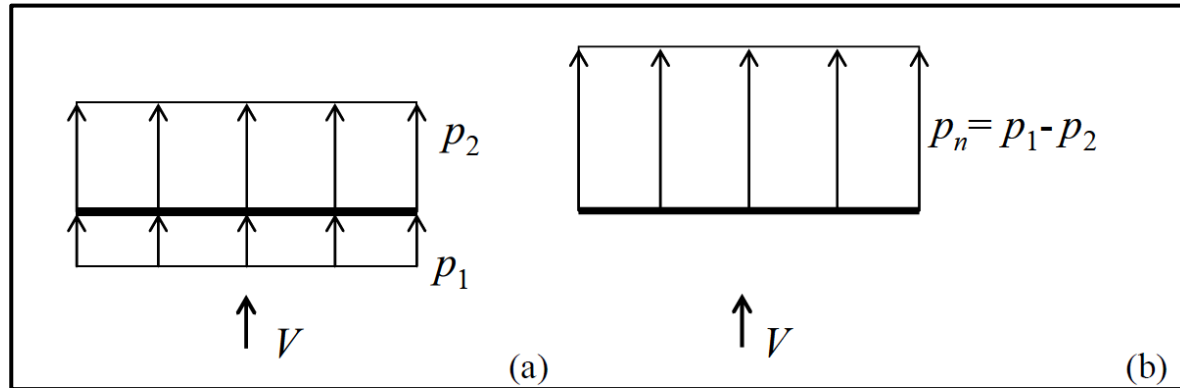
Se la superficie dominante coincide con la faccia sottovento,

$$c_{pi} = +0.75 \cdot c_{pe} = 0.75 \cdot (-0.35) = -0.262 \quad p_i = -279.6 \text{ N/m}^2$$



AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO D'INSIEME SULLA COSTRUZIONE

2) Pressione complessiva su una superficie (costruzioni che non racchiudono un volume interno, come muri, parapetti, ...);



$$p_n(z) = q_p(\bar{z}) \cdot c_{pn} \quad (3.12)$$

- q_p pressione cinetica di picco del vento.
- c_{pn} coefficiente di pressione complessiva.
- \bar{z} altezza di riferimento associata al coefficiente.

G.5 Muri e parapetti

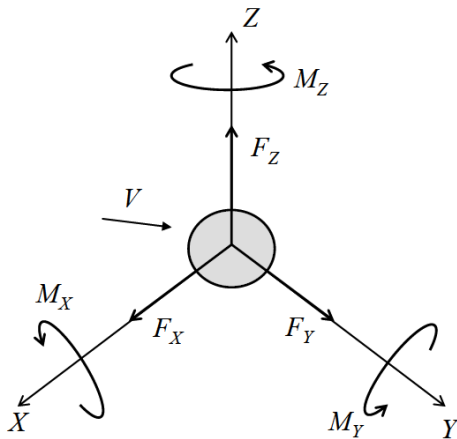
G.6 Tettoie

G.7 Insegne e tabelloni



AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO D'INSIEME SULLA COSTRUZIONE

3) Forze e momenti risultanti (costruzioni o elementi compatti, come tettoie, insegne, tabelloni, ...);



$$F_X = q_p(\bar{z}) \cdot L^2 \cdot c_{FX} \quad (3.13a)$$

$$F_Y = q_p(\bar{z}) \cdot L^2 \cdot c_{FY} \quad (3.13b)$$

$$F_Z = q_p(\bar{z}) \cdot L^2 \cdot c_{FZ} \quad (3.13c)$$

$$M_X = q_p(\bar{z}) \cdot L^3 \cdot c_{MX} \quad (3.13d)$$

$$M_Y = q_p(\bar{z}) \cdot L^3 \cdot c_{MY} \quad (3.13e)$$

$$M_Z = q_p(\bar{z}) \cdot L^3 \cdot c_{MZ} \quad (3.13f)$$

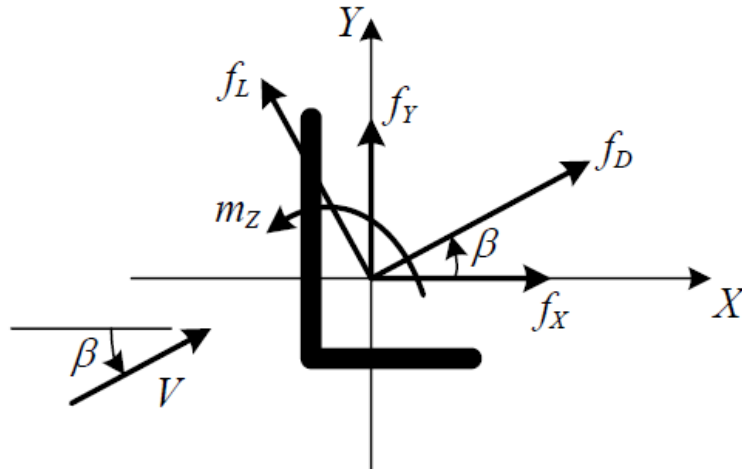
- q_p pressione cinetica di picco del vento.
- c_{FX} , c_{FY} , c_{FZ} coefficienti di forza secondo le tre direzioni ortogonali X , Y , Z .
- c_{MX} , c_{MY} , c_{MZ} coefficienti di momento intorno le tre direzioni ortogonali X , Y , Z .
- \bar{z} e L altezza e lunghezza di riferimento associate ai coefficienti.

G.6 Corpi compatti



AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO D'INSIEME SULLA COSTRUZIONE

4) Forze e momenti per unità di lunghezza (elementi snelli, come ciminiere, torri, ponti, ...).



$$f_X(z) = q_p(z) \cdot l \cdot c_{fX} \quad (3.14a)$$

$$f_Y(z) = q_p(z) \cdot l \cdot c_{fY} \quad (3.14b)$$

$$m_Z(z) = q_p(z) \cdot l^2 \cdot c_{mZ} \quad (3.14c)$$

- q_p pressione cinetica di picco del vento.
- c_{fX} , c_{fY} , c_{mZ} coefficienti di forza (secondo le due direzioni ortogonali X e Y) e coefficiente di momento (intorno all'asse Z).
- z quota sul suolo.
- l dimensione di riferimento associata ai coefficienti.

G.10 Strutture mono-dimensionali ed elementi strutturali allungati



AZIONI AERODINAMICHE DI PICCO LOCALI E/O DETTAGLIATE

Progetto di **elementi strutturali e non strutturali di limitata estensione**, ad esempio per la **valutazione delle azioni del vento su singole membrature, su elementi di rivestimento o su loro fissaggi.**

APPENDICE H

H.2 EDIFICI A PIANTA RETTANGOLARE REGOLARI IN ELEVAZIONE

H.3 EDIFICI A PIANTA CIRCOLARE ED ELLITTICA REGOLARI IN ELEVAZIONE

H.4 EDIFICI IRREGOLARI IN PIANTA O IN ELEVAZIONE

H.5 TETTOIE



APPENDICE H

H.2 EDIFICI A PIANTA RETTANGOLARE REGOLARI IN ELEVAZIONE

H.2.2 Pareti

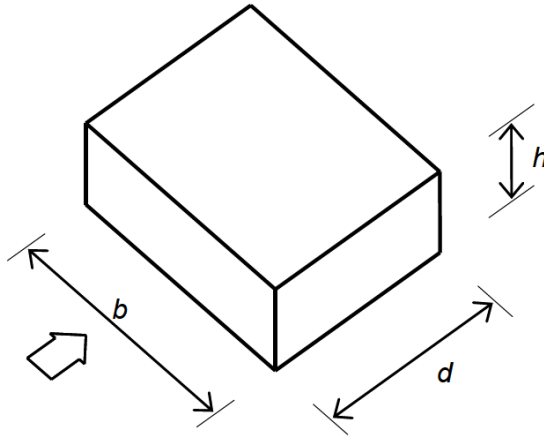


Figura H.2 – Parametri caratteristici di edifici a pianta rettangolare.

$$e = \min \left\{ \begin{array}{l} b \\ 2h \end{array} \right. \quad (H.1)$$

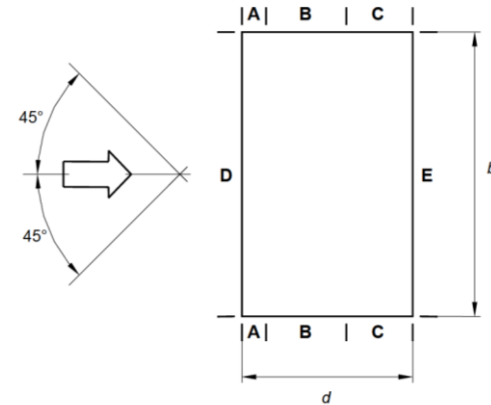


Figura H.3 – Suddivisione delle pareti verticali di edifici a pianta rettangolare in zone di uguale pressione (pianta).

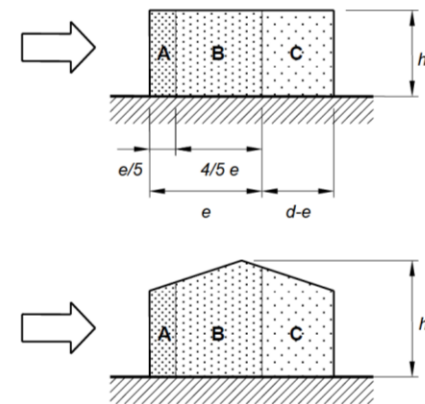


Figura H.4 – Suddivisione delle pareti verticali di edifici a pianta rettangolare in zone di uguale pressione (prospetto).

APPENDICE H

H.2 EDIFICI A PIANTA RETTANGOLARE REGOLARI IN ELEVAZIONE

H.2.2 Pareti

I **coefficienti di pressione esterna** dipendono non solo dalla aerodinamica del corpo e l'incidenza del vento, ma anche dall'**estensione dell'area** alla quale si riferiscono. I **paragrafi successivi** riportano i coefficienti di pressione per **aree di riferimento rispettivamente pari a 1 m² e 10 m².**

Tabella H.I – Coefficienti di pressione in funzione dell'estensione dell'area investita A .

Area	Coefficiente di pressione esterna
$A \leq 1 \text{ m}^2$	$c_{pe} = c_{pe,1}$
$1 \text{ m}^2 < A < 10 \text{ m}^2$	$c_{pe} = c_{pe,1} - (c_{pe,1} - c_{pe,10}) \cdot \log_{10}(A)$
$A \geq 10 \text{ m}^2$	$c_{pe} = c_{pe,10}$

Tabella H.II – Coefficienti di pressione per le pareti verticali di edifici a pianta rettangolare.

Zona	A		B		C		D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0		-0,7
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0		-0,5
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0		-0,3

Per valori intermedi del rapporto h/d , si può adottare un'interpolazione lineare.



APPENDICE H

H.2 EDIFICI A PIANTA RETTANGOLARE REGOLARI IN ELEVAZIONE

H.2.3 Coperture, H.2.3.1 Coperture piane

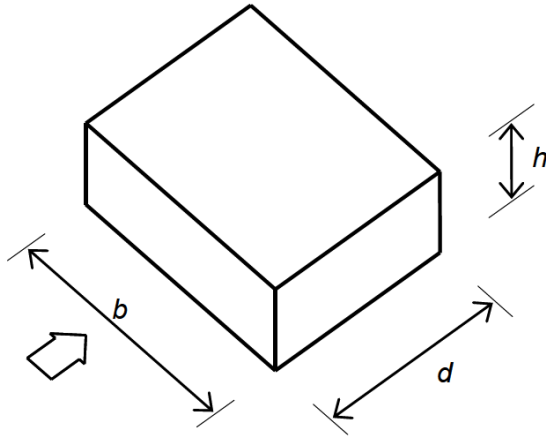


Figura H.2 – Parametri caratteristici di edifici a pianta rettangolare.

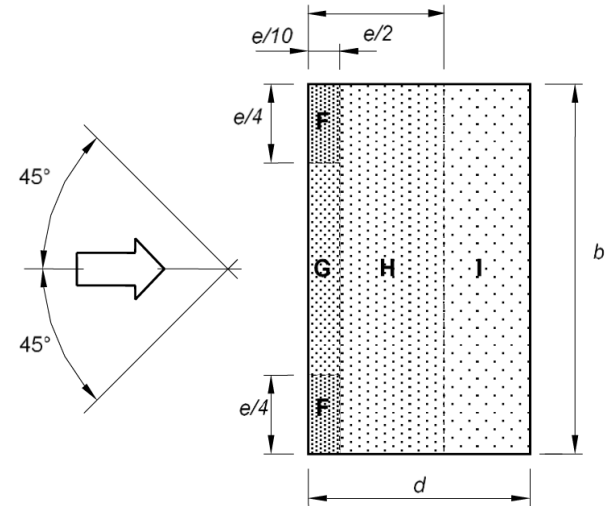


Figura H.5 – Suddivisione delle coperture piane in zone di uguale pressione.

$$e = \min \left\{ \begin{matrix} b \\ 2h \end{matrix} \right.$$

(H.3)

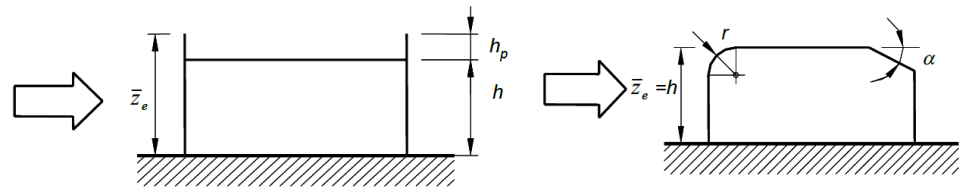


Figura H.6 – Altezza di riferimento per coperture piane con parapetti o raccordi (curvi e piani).



APPENDICE H

H.2 EDIFICI A PIANTA RETTANGOLARE REGOLARI IN ELEVAZIONE

H.2.3 Coperture, H.2.3.1 Coperture piane

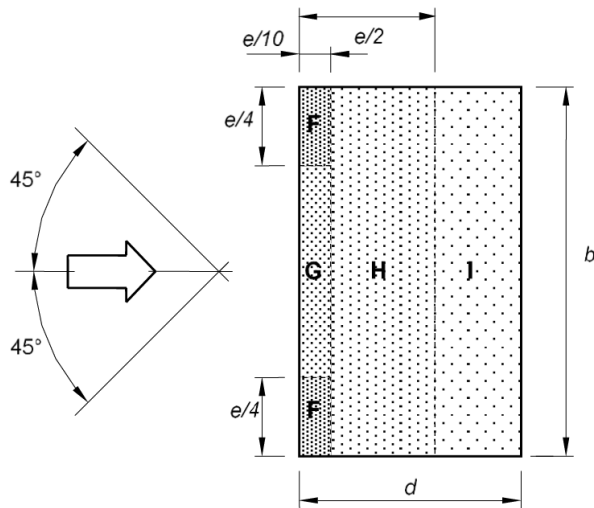


Figura H.5 – Suddivisione delle coperture piane in zone di uguale pressione.

Tabella H.III – Coefficienti di pressione per coperture piane.

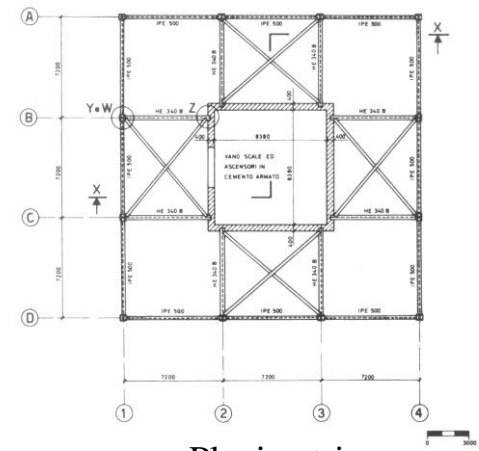
	Zona							
	F		G		H		I	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
Spigoli vivi	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	$\pm 0,2$	
Con parapetti	$h_p/h = 0,025$	-1,6	-2,2	-1,1	-1,8	-0,7	-1,2	$\pm 0,2$
	$h_p/h = 0,05$	-1,4	-2,0	-0,9	-1,6	-0,7	-1,2	
	$h_p/h = 0,10$	-1,2	-1,8	-0,8	-1,4	-0,7	-1,2	
Raccordi curvi	$r/h = 0,05$	-1,0	-1,5	-1,2	-1,8	-0,4	$\pm 0,2$	
	$r/h = 0,10$	-0,7	-1,2	-0,8	-1,4	-0,3		
	$r/h = 0,20$	-0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,3		
Raccordi piani	$\alpha = 30^\circ$	-1,0	-1,5	-1,0	-1,5	-0,3	$\pm 0,2$	
	$\alpha = 45^\circ$	-1,2	-1,8	-1,3	-1,9	-0,4		
	$\alpha = 60^\circ$	-1,3	-1,9	-1,3	-1,9	-0,5		

$$h = 67.44 \text{ m}, b = d = 21.6 \text{ m}; h/d = 3.122$$

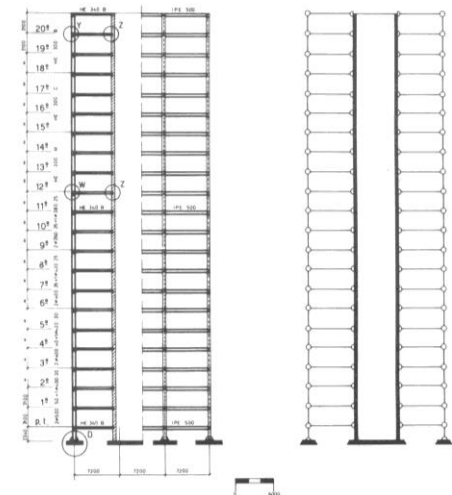
ESEMPIO 4.6 EDIFICIO MULTIPIANO PER UFFICI

$$T_R = 50 \text{ anni} \left\{ \begin{array}{l} q_p(z) = 778,21 \text{ N/m}^2 \quad \text{per } z \leq 5 \text{ m} \\ q_p(z) = 18,22 \ln \left(\frac{z}{0,1} \right) \left[\ln \left(\frac{z}{0,1} \right) + 7 \right] \\ \hspace{15em} \text{per } z > 5 \text{ m} \end{array} \right.$$

$$q_p(T_R = 50, z = 67.44 \text{ m}) = 1604 \text{ N/m}^2$$



Planimetria



Sezione X-X



Nella prima fase sono valutate le azioni aerodinamiche di picco sulla costruzione considerata indeformabile.



1) Pressione su ciascuna faccia di una superficie (costruzioni che racchiudono un volume interno, come serbatoi, edifici, ...)

Appendice G

$h = 67.44 \text{ m}$, $b = d = 21.6 \text{ m}$; $h/d = 3.122$

G.2 Edifici a pianta rettangolare; (purchè $h/d < 5$, altrimenti strutture mono-dimensionali, G.10)

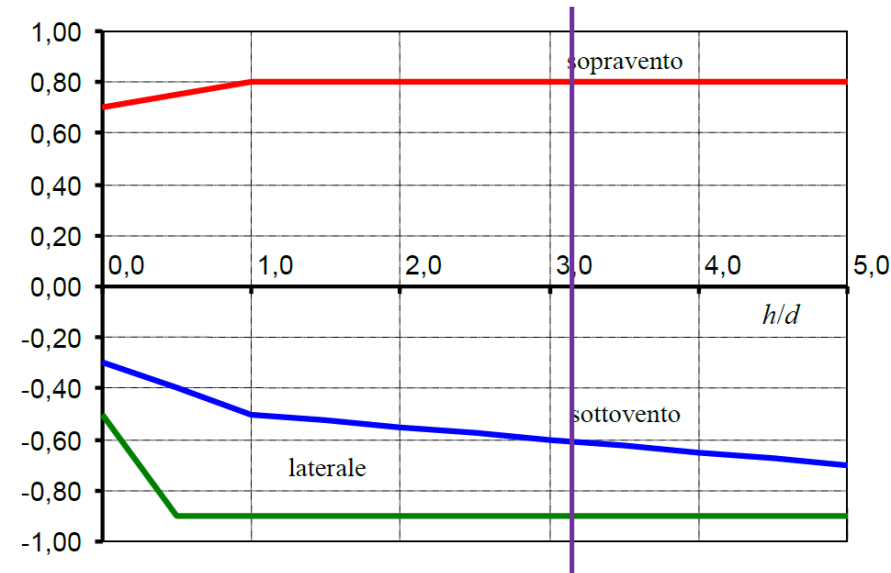
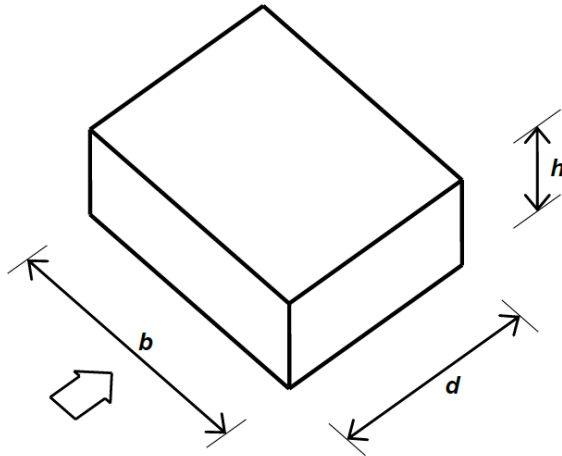


Tabella G.I – Edifici a pianta rettangolare: c_{pe} per facce sopravento, sottovento e laterali.

Faccia sopravento	Facce laterali	Faccia sottovento
$h/d \leq 1$: $c_{pe} = 0,7 + 0,1 \cdot h/d$	$h/d \leq 0,5$: $c_{pe} = -0,5 - 0,8 \cdot h/d$	$h/d \leq 1$: $c_{pe} = -0,3 - 0,2 \cdot h/d$
$h/d > 1$: $c_{pe} = 0,8$	$h/d > 0,5$: $c_{pe} = -0,9$	$1 < h/d \leq 5$: $c_{pe} = -0,5 - 0,05 \cdot (h/d - 1)$

$c_{pe} = 0.800$

$c_{pe} = -0.900$

$c_{pe} = -0.606$

$$p_e(z) = q_p(\bar{z}_e) \cdot c_{pe}$$

(3.11a)



Azioni aerodinamiche di picco - Faccia sopravvento (G.2.2.1)

G.2.2.1 Altezza di riferimento per la faccia sopravvento

Il flusso che si instaura intorno agli edifici è molto complesso, specialmente nella parte di base e sommitale della faccia sopravvento. Ciò produce una distribuzione verticale della pressione in generale diversa dal profilo della pressione cinetica di picco del vento indisturbato (paragrafo 3.3.7). Il presente paragrafo fornisce un criterio di valutazione dell'altezza di riferimento per la faccia sopravvento, ossia della quota a cui si deve calcolare la pressione cinetica di picco, tale da condurre a stime approssimate, generalmente a favore di sicurezza, della risultante di tali pressioni. **EDIFICI BASSI**

Per gli edifici bassi, ossia con altezza minore o uguale della dimensione in pianta ortogonale al flusso del vento ($h \leq b$), l'altezza di riferimento è costante e pari alla quota di sommità dell'edificio ($\bar{z}_e = h$); la pressione del vento è pertanto uniforme.

Per gli edifici alti, ossia con altezza compresa fra la dimensione in pianta ortogonale al flusso del vento e 5 volte la profondità dell'edificio ($b < h \leq 5 \cdot d$), si definiscono due zone distinte. Nella prima parte dell'edificio, sino alla quota $z = b$, l'altezza di riferimento è costante e pari a $\bar{z}_e = b$; la pressione del vento è pertanto uniforme. Nella parte superiore dell'edificio, per z compreso fra b e h , la quota di riferimento \bar{z}_e può essere scelta seguendo uno dei due seguenti criteri (Figura G.3):

1. L'altezza di riferimento è costante e pari alla sommità dell'edificio ($\bar{z}_e = h$); la pressione del vento è pertanto uniforme fra le quote $z = b$ e $z = h$. In questo modo il calcolo delle forze aerodinamiche è semplificato, ma la forza totale che ne risulta è maggiore di quella reale.
2. L'edificio è suddiviso in tronchi di altezza arbitraria, a ciascuno dei quali corrisponde un'altezza di riferimento costante pari alla sommità del tronco; se l'altezza di ciascun tronco coincide con l'interpiano dell'edificio, ed ogni singolo tronco risulta centrato sulla posizione degli elementi orizzontali (solai), è lecito ammettere che l'altezza di riferimento sia pari alla quota del solaio relativo; in entrambi i casi la pressione del vento è uniforme su ogni tronco. In questo modo il calcolo delle forze è più oneroso, ma i valori che si ottengono sono più aderenti alla realtà e non maggiori di quelli che si ottengono applicando la procedura di cui al punto precedente.

EDIFICI ALTI

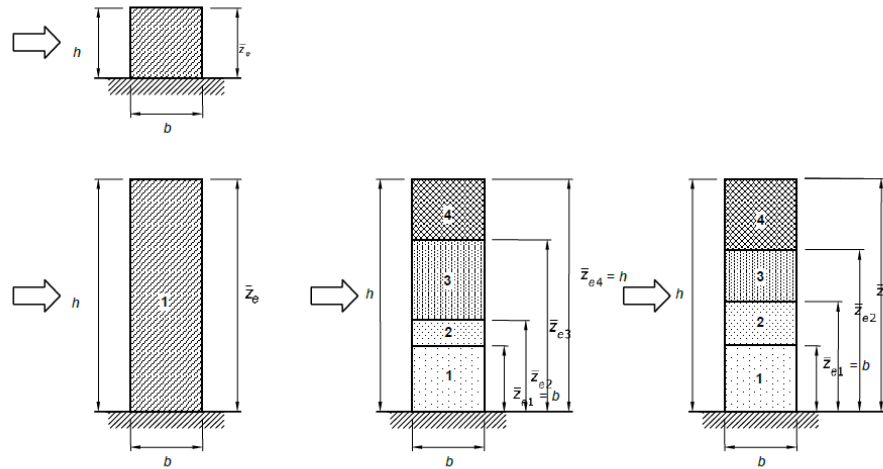


Figura G.3 – Quote di riferimento negli edifici bassi e alti.

$$z \leq b, \bar{z}_e = b = 21.6 \text{ m}$$

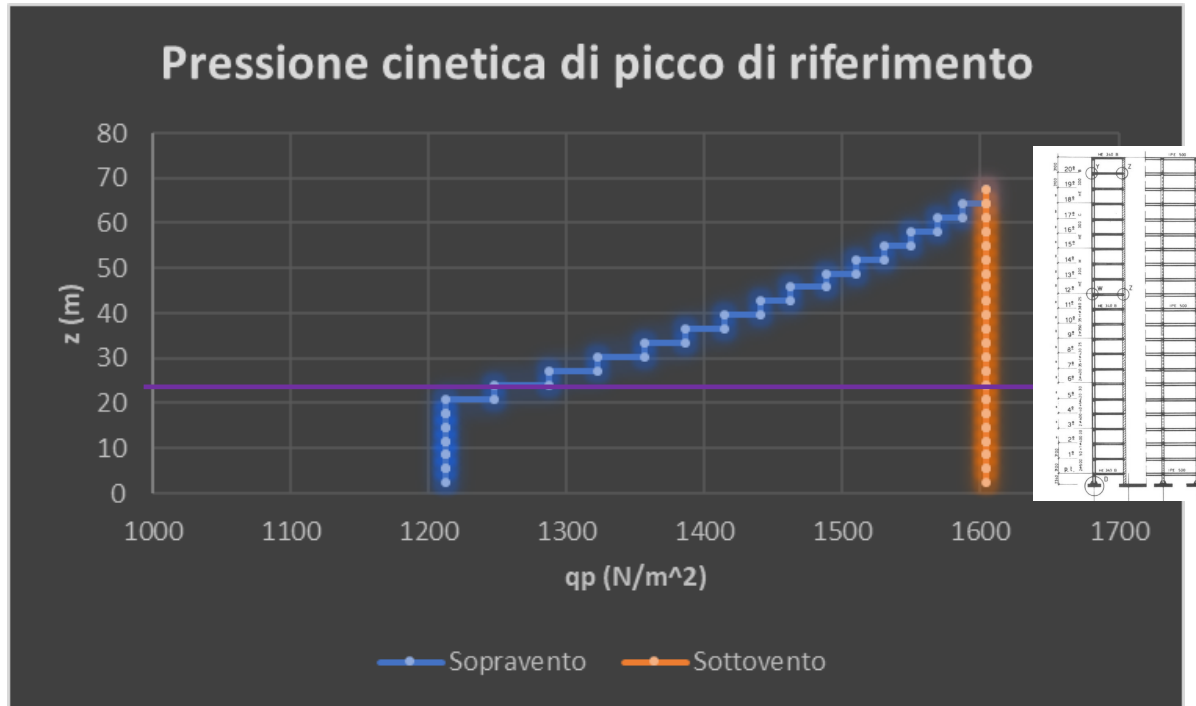
$$q_p(\bar{z}_e) = 1212 \text{ N/m}^2$$

$z > b$ Faccia sopravvento dell'edificio è divisa in tronchi di altezza Δ pari all'interpiano, l'altezza di riferimento \bar{z}_e di ogni tronco è uguale alla quota di piano.



Azioni aerodinamiche di picco - Faccia sopravvento (G.2.2.1)

$$h = 67.44 \text{ m}, b = d = 21.6 \text{ m}; h/d = 3.122$$



$$\bar{z}_e = b = 21.6 \text{ m}$$

$$z \leq b, \bar{z}_e = b = 21.6 \text{ m}$$

$$q_p(\bar{z}_e) = 1212 \text{ N/m}^2$$

$z > b$ Faccia sopravvento dell'edificio è divisa in tronchi di altezza Δ pari all'interpiano, l'altezza di riferimento \bar{z}_e di ogni tronco è uguale alla quota di piano.

Faccia sopravvento/facce laterali (G.2.2.2)

$$\bar{z}_e = h = 67.44 \text{ m}$$

$$q_p(\bar{z}_e) = 1604 \text{ N/m}^2$$



Applicazione

Azioni aerodinamiche di picco

$$h = 67.44 \text{ m}, b = d = 21.6 \text{ m}; h/d = 3.122$$

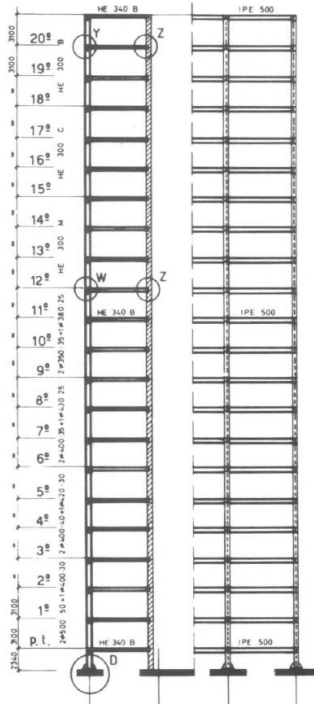


Tabella 4.6.II - Parametri di calcolo delle forze risultanti di piano.

Piano	z_e (m)	Δ (m)	q'_p (N/m ²)	q''_p (N/m ²)	F_D (kN)
Terra	2,34	2,72	1.212	1.604	114
1	5,44	3,10	1.212	1.604	130
2	8,54	3,10	1.212	1.604	130
3	11,64	3,10	1.212	1.604	130
4	14,74	3,10	1.212	1.604	130
5	17,84	3,10	1.212	1.604	130
6	20,94	3,10	1.212	1.604	130
7	24,04	3,10	1.247	1.604	132
8	27,14	3,10	1.287	1.604	134
9	30,24	3,10	1.323	1.604	136
10	33,34	3,10	1.356	1.604	138
11	36,44	3,10	1.386	1.604	139
12	39,54	3,10	1.414	1.604	141
13	42,64	3,10	1.440	1.604	142
14	45,74	3,10	1.462	1.604	144
15	48,84	3,10	1.488	1.604	145
16	51,94	3,10	1.510	1.604	146
17	55,04	3,10	1.530	1.604	147
18	58,14	3,10	1.550	1.604	148
19	61,24	3,10	1.569	1.604	149
20	64,34	3,10	1.587	1.604	150
tezzo	67,44	2,55	1.604	1.604	124

$$70.7 \text{ kN} + 53.5 \text{ kN} = 124.2 \text{ kN}$$

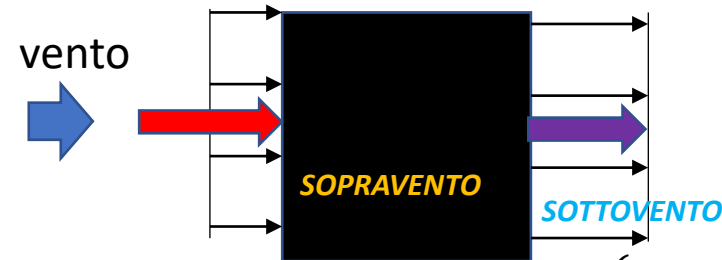
SOPRAVENTO SOTTOVENTO

$$(c_{pe} q'_p) b \Delta = 0.8 \cdot 1604 \cdot 21.6 \cdot 2.55 = 70.7 \text{ kN}$$

FORZA AERODINAMICA DI PICCO DI PIANO

$$F_D = (c_{pe,sopravento} q'_p - c_{pe,sottovento} q''_p) b \Delta$$

$$(c_{pe} q''_p) b \Delta = 0.606 \cdot 1604 \cdot 21.6 \cdot 2.55 = 53.5 \text{ kN}$$



Azioni aerodinamiche di picco - Copertura piana (G.2.3.1)

$$h = 67.44 \text{ m}, b = d = 21.6 \text{ m}; h/d = 3.122$$

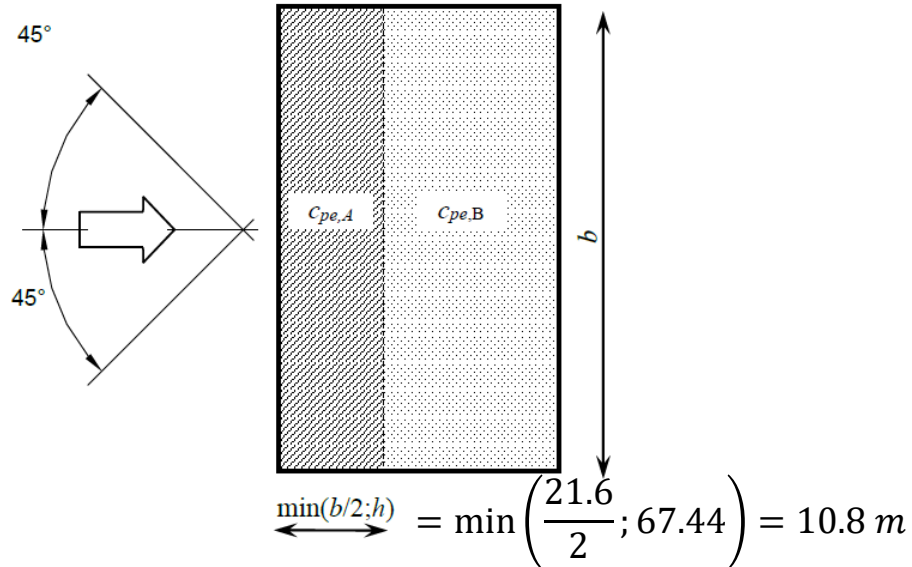


Figura G.5 – Schema di riferimento per coperture piane.

Tabella G.II – Edifici rettangolari: c_{pe} per coperture piane.

Fascia sopravvento di profondità pari al minimo tra $b/2$ ed h :	$c_{pe,A} = -0,80$
Restanti zone	$c_{pe,B} = \pm 0,20$



Azioni aerodinamiche di picco - Copertura piana (G.2.3.1)

$h = 67.44 \text{ m}$, $b = d = 21.6 \text{ m}$; $h/d = 3.122$

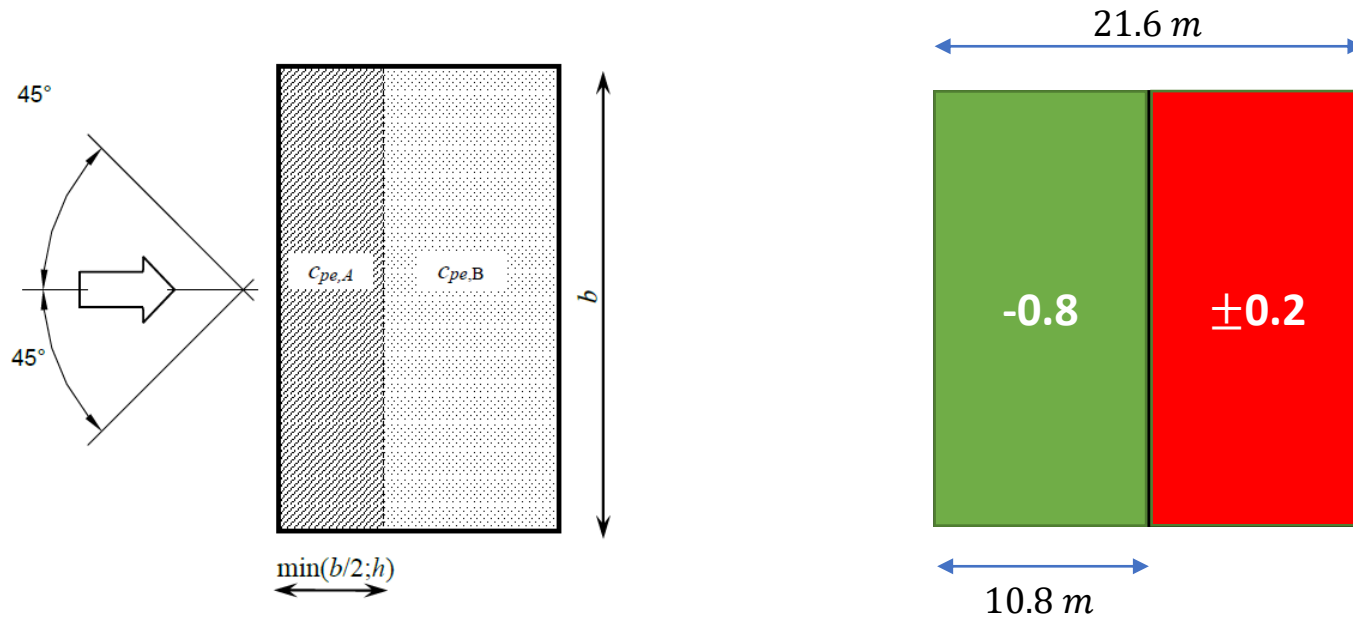
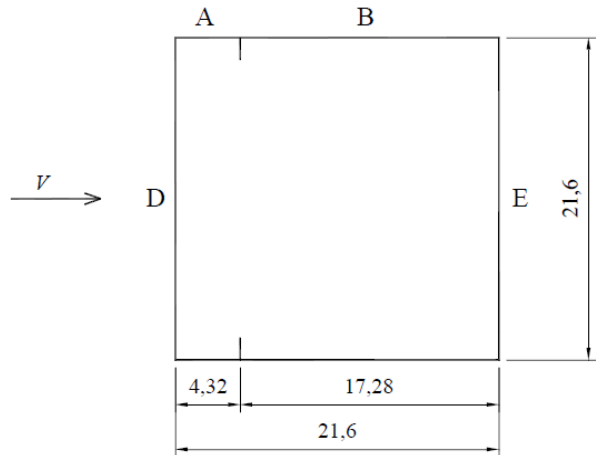


Figura G.5 – Schema di riferimento per coperture piane.

Tabella G.II – Edifici rettangolari: c_{pe} per coperture piane.

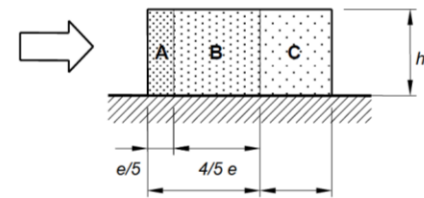
Fascia sopravvento di profondità pari al minimo tra $b/2$ ed h :	$c_{pe,A} = -0,80$
Restanti zone	$c_{pe,B} = \pm 0,20$

Pressione esterna locale sugli elementi – PARETI LATERALI



$$h = 67.44 \text{ m}, b = d = 21.6 \text{ m}; h/d = 3.122$$

$$e = \min \left\{ \begin{array}{l} b = 21.6 \text{ m} \\ 2h = 134.88 \text{ m} \end{array} \right. = 21.6 \text{ m} \quad (H.1)$$



$$e/5 = 4.32 \text{ m}; 4/5 e = 17.28 \text{ m}; d-e = 0.$$

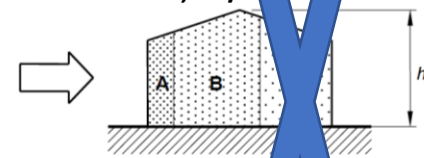


Figura H.4 – Suddivisione delle pareti verticali di edifici a pianta rettangolare in zone di uguale pressione (prossimo)

No zona C

Figura 4.6.3 - Zone della superficie esterna delle pareti con pressione uniforme.

Tabella H.II – Coefficienti di pressione per le pareti verticali di edifici a pianta rettangolare.

Zona	A		B		C		D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5	+0,8	+1,0	-0,7	-0,7	-0,7
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5	+0,8	+1,0	-0,5	-0,5	-0,5
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5	+0,7	+1,0	-0,3	-0,3	-0,3

Tabella 4.6.III - Coefficienti di pressione esterna sulle pareti.

Zona	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
A	-1,2	-1,4
B	-0,8	-1,1
D	+0,8	+1,0
E	-0,606	-0,606



Pressione esterna locale sugli elementi – PARETI LATERALI

$h = 67.44 \text{ m}$, $b = d = 21.6 \text{ m}$; $h/d = 3.122$

Tabella 4.6.IV - Pressione locale sulla faccia sopravento.

Piano	z_e (m)	Δ (m)	q'_p (N/m ²)	$p_{e,10}$ (N/m ²)	$p_{e,1}$ (N/m ²)
terra	2,34	2,72	1.212	970	1.212
1	5,44	3,10	1.212	970	1.212
2	8,54	3,10	1.212	970	1.212
3	11,64	3,10	1.212	970	1.212
4	14,74	3,10	1.212	970	1.212
5	17,84	3,10	1.212	970	1.212
6	20,94	3,10	1.212	970	1.212
7	24,04	3,10	1.247	997	1.247
8	27,14	3,10	1.287	1.029	1.287
9	30,24	3,10	1.323	1.058	1.323
10	33,34	3,10	1.356	1.085	1.356
11	36,44	3,10	1.386	1.109	1.386
12	39,54	3,10	1.414	1.131	1.414
13	42,64	3,10	1.440	1.152	1.440
14	45,74	3,10	1.462	1.172	1.462
15	48,84	3,10	1.488	1.190	1.488
16	51,94	3,10	1.510	1.208	1.510
17	55,04	3,10	1.530	1.224	1.530
18	58,14	3,10	1.550	1.240	1.550
19	61,24	3,10	1.569	1.255	1.569
20	64,34	3,10	1.587	1.269	1.587
tetto	67,44	2,55	1.604	1.283	1.604

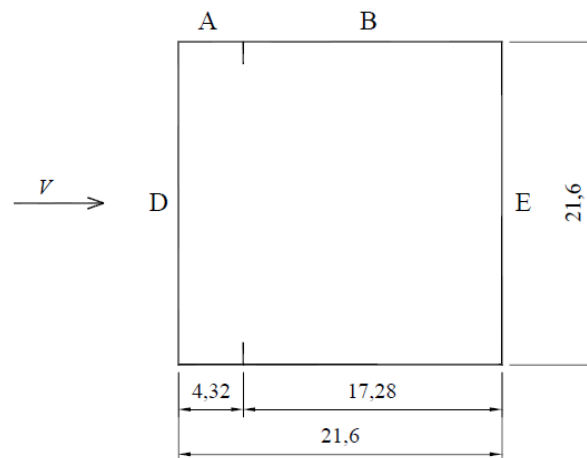


Figura 4.6.3 - Zone della superficie esterna delle pareti con pressione uniforme.

Tabella 4.6.III - Coefficienti di pressione esterna sulle pareti.

Zona	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
A	-1,2	-1,4
B	-0,8	-1,1
D	+0,8	+1,0
E	-0,606	-0,606

Tabella 4.6.V - Pressione locale sulle pareti.

Zona	$p_{e,10}$ (N/m ²)	$p_{e,1}$ (N/m ²)
A	-1.925	-2.246
B	-1.283	-1.764
D	vedere Tabella 4.6.IV	
E	-972	-972

Pressione esterna locale sugli elementi – COPERTURA

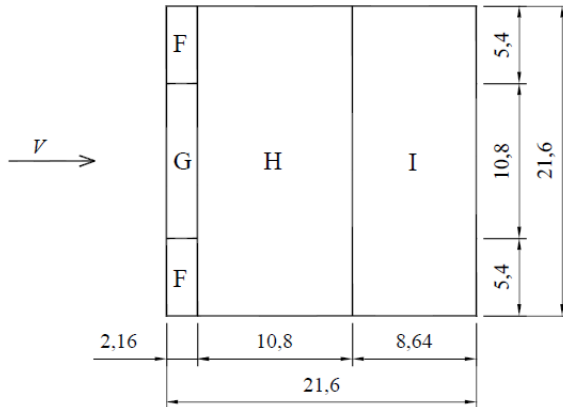


Figura 4.6.4 - Zone della superficie esterna della copertura con pressione uniforme.

$$h = 67.44 \text{ m}, b = d = 21.6 \text{ m}; h/d = 3.122$$

$$e = \min \begin{cases} b = 21.6 \text{ m} \\ 2h = 134.88 \text{ m} \end{cases} = 21.6 \text{ m} \quad (H.3)$$

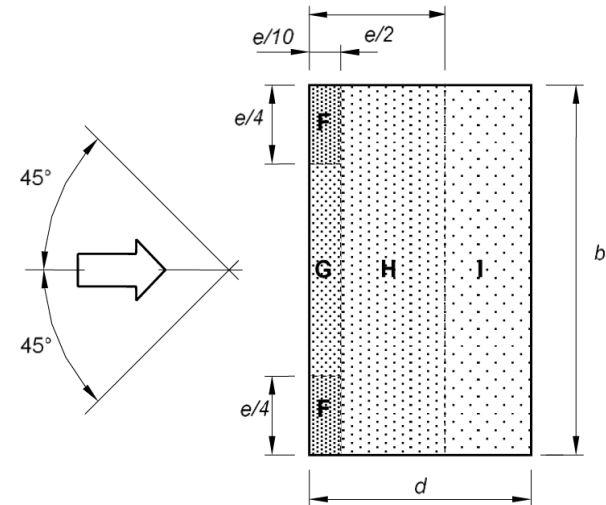


Figura H.5 – Suddivisione delle coperture piane in zone di uguale pressione.

Tabella H.III – Coefficienti di pressione per coperture piane.

		Zona							
		F		G		H		I	
		$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
Spigoli vivi		-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	$\pm 0,2$	
Con parapetti	$h_p/h = 0,025$	-1,6	-2,2	-1,1	-1,8	-0,7	-1,2	$\pm 0,2$	
	$h_p/h = 0,05$	-1,4	-2,0	-0,9	-1,6	-0,7	-1,2		
	$h_p/h = 0,10$	-1,2	-1,8	-0,8	-1,4	-0,7	-1,2		
Raccordi curvi	$r/h = 0,05$	-1,0	-1,5	-1,2	-1,8	-0,4		$\pm 0,2$	
	$r/h = 0,10$	-0,7	-1,2	-0,8	-1,4	-0,3			
	$r/h = 0,20$	-0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,3			
Raccordi piani	$\alpha = 30^\circ$	-1,0	-1,5	-1,0	-1,5	-0,3		$\pm 0,2$	
	$\alpha = 45^\circ$	-1,2	-1,8	-1,3	-1,9	-0,4			
	$\alpha = 60^\circ$	-1,3	-1,9	-1,3	-1,9	-0,5			

Pressione esterna locale sugli elementi – COPERTURA

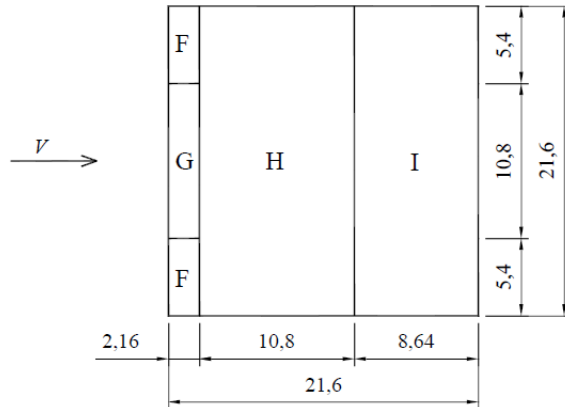


Figura 4.6.4 - Zone della superficie esterna della copertura con pressione uniforme.

$$h = 67.44 \text{ m}, b = d = 21.6 \text{ m}; h/d = 3.122$$

$$e = \min \begin{cases} b = 21.6 \text{ m} \\ 2h = 134.88 \text{ m} \end{cases} = 21.6 \text{ m} \quad (H.3)$$

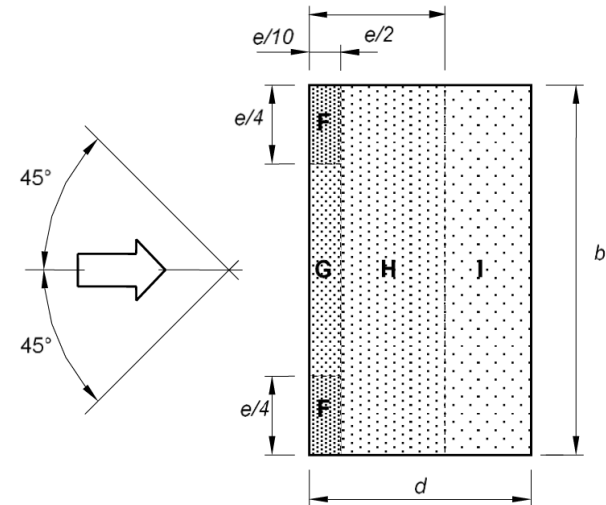


Figura H.5 – Suddivisione delle coperture piane in zone di uguale pressione.

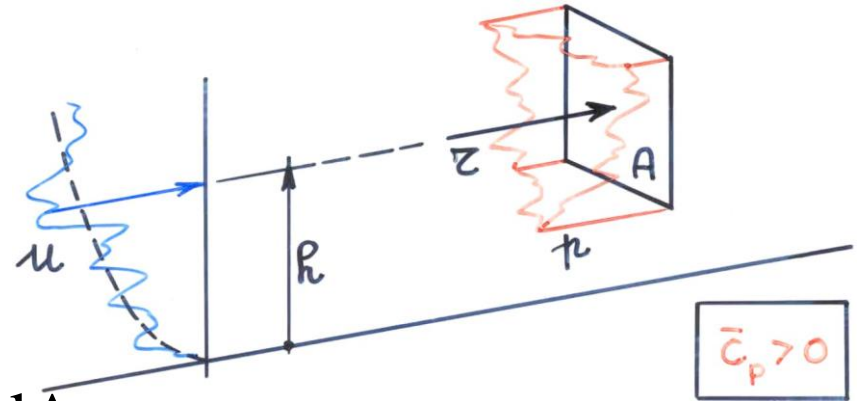
Tabella 4.6.VI - Coefficienti di pressione esterna e pressione esterna sulla copertura.

Zona	$c_{pe,10}$	$p_{e,10}$ (N/m ²)	$c_{pe,1}$	$p_{e,1}$ (N/m ²)
F	-1.6	-2.574	-2.2	-3.540
G	-1.1	-1.770	-1.8	-2.896
H	-0.7	-1.126	-1.2	-1.931
I	±0.2	-322	±0.2	-322

Dal campo di pressione al campo di forze risultanti

$$\mathbf{r}(t) = \int_A \mathbf{p}(M, t) dA$$

$$\mathbf{p}(M, t) = \bar{\mathbf{p}}(M) + \mathbf{p}'(M, t) \Rightarrow$$



$$\mathbf{r}(t) = \bar{\mathbf{r}} + \mathbf{r}'(t)$$

$$\bar{\mathbf{r}} = \int_A \bar{\mathbf{p}}(M) dA$$

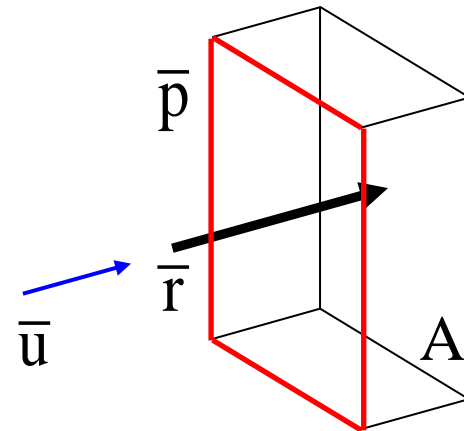
$$\mathbf{r}'(t) = \int_A \mathbf{p}'(M, t) dA$$

Forza risultante media

ipotesi semplificativa

$$\bar{c}_p(M) = \bar{c}_p; \quad \bar{u}(z) = \bar{u}(h) = \bar{u}$$

$$\bar{\mathbf{r}} = \underbrace{\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2 \bar{c}_p}_{\bar{\mathbf{p}}} A$$



Dal campo di pressione al campo di forze risultanti

A causa della non-contemporaneità dei massimi delle pressioni, la forza massima non è direttamente legata alla pressione massima.

$$\mathbf{r}(t) = \bar{\mathbf{r}} + \mathbf{r}'(t)$$

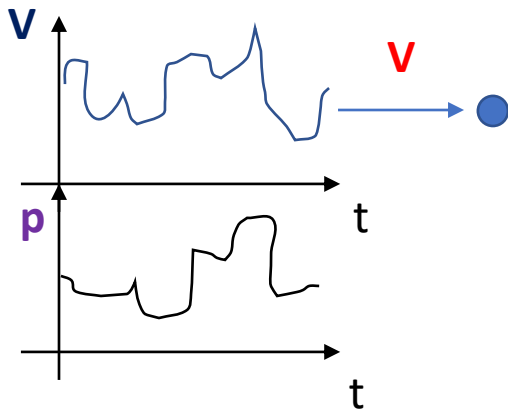
$$p'(M, t) = \rho \bar{u} u'(M, t) \bar{c}_p$$

$$\bar{\mathbf{r}} = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^2 \bar{c}_p A$$

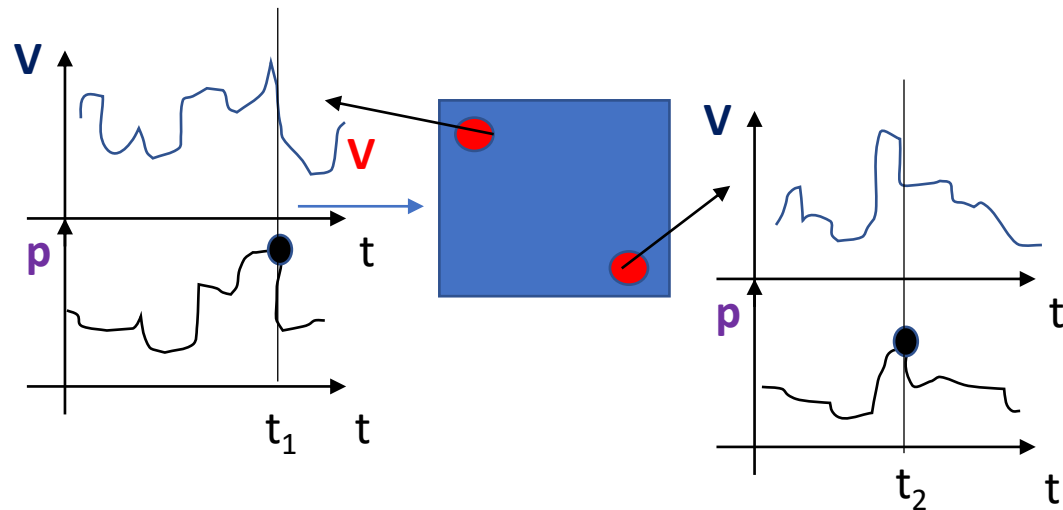
$$\mathbf{r}'(t) = \rho \bar{u} \bar{c}_p \int_A u'(M, t) dA$$



Superficie puntuale



Superficie finita



Dal campo di pressione al campo di forze risultanti

A causa della non-contemporaneità dei massimi delle pressioni, la forza massima non è direttamente legata alla pressione massima.

$$\mathbf{r}(t) = \bar{\mathbf{r}} + \mathbf{r}'(t)$$

$$p'(M, t) = \rho \bar{u} u'(M, t) \bar{c}_p$$

$$\bar{\mathbf{r}} = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^2 \bar{c}_p A$$

$$\mathbf{r}'(t) = \rho \bar{u} \bar{c}_p \int_A u'(M, t) dA$$

$$S_r(\mathbf{n}) = (\rho \bar{u} \bar{c}_p A)^2 S_{u'}(\mathbf{n}) \chi(\mathbf{n})$$

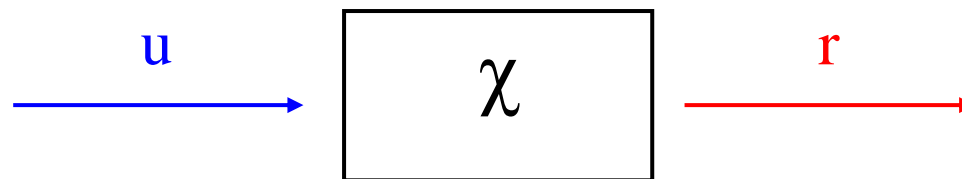
ipotesi semplificativa

$$S_{u'}(z; \mathbf{n}) = S_{u'}(h; \mathbf{n}) = S_{u'}(\mathbf{n})$$

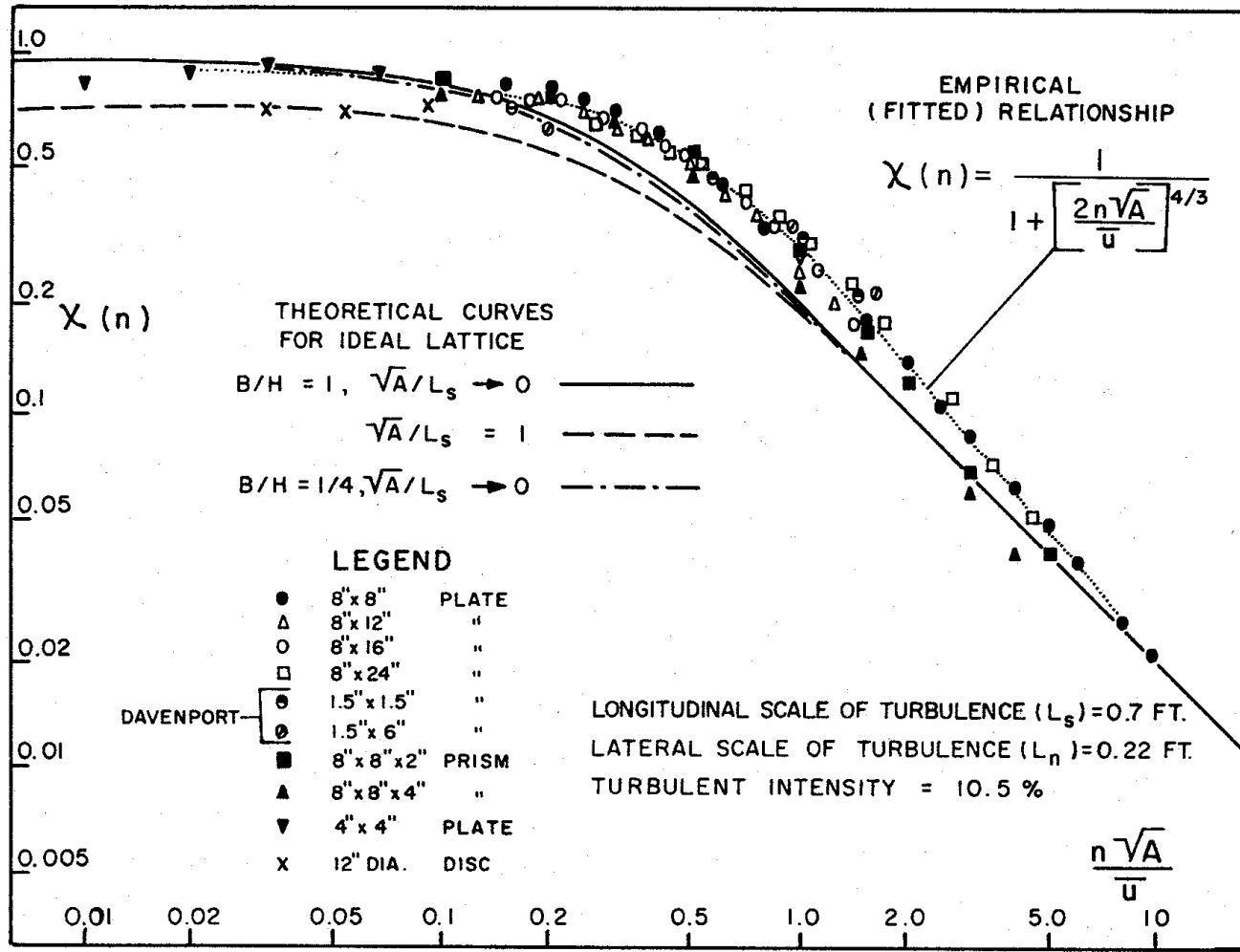
Funzione di ammettenza aerodinamica

$$\chi(\mathbf{n}) = \frac{1}{A^2} \int_A \int_A \text{Coh}_{uu}(M, M'; \mathbf{n}) dA dA'$$

filtra la velocità del vento e
la trasforma in forza



Funzione ammettenza aerodinamica Analisi sperimentali (Vickery 1966)



La funzione di ammettenza aerodinamica diminuisce se la dimensione caratteristica della struttura cresce.



Questo riflette la riduzione della correlazione delle azioni del vento.

DIMENSIONE DELLA STRUTTURA



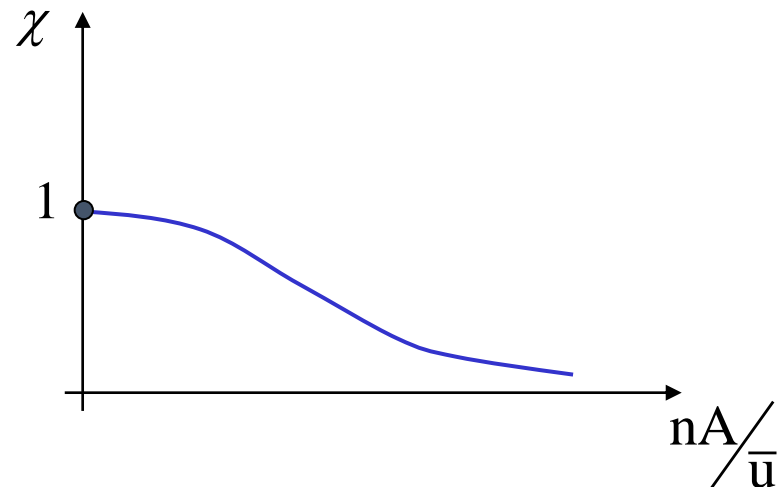
Funzione di ammettenza aerodinamica Soluzione in forma chiusa (Solari 1993)

$$\chi(n) = \frac{1}{A^2} \int_A \int_A \text{Coh}_{uu} (M, M'; n) dA dA'$$

$$\text{Coh}_{uu} (M, M'; n) = \exp \left\{ - \frac{2n \sqrt{c_{uy}^2 |y - y'|^2 + c_{uz}^2 |z - z'|^2}}{\bar{u}} \right\}$$

$$\chi(n) \cong C \left\{ 0.4 \frac{nc_{uy} b}{\bar{u}} \right\} C \left\{ 0.4 \frac{nc_{uz} h}{\bar{u}} \right\}$$

$$C\{\eta\} = \frac{1}{\eta} - \frac{1}{2\eta^2} (1 - e^{-2\eta}) \text{ for } \eta > 0; \quad C\{0\} = 1$$

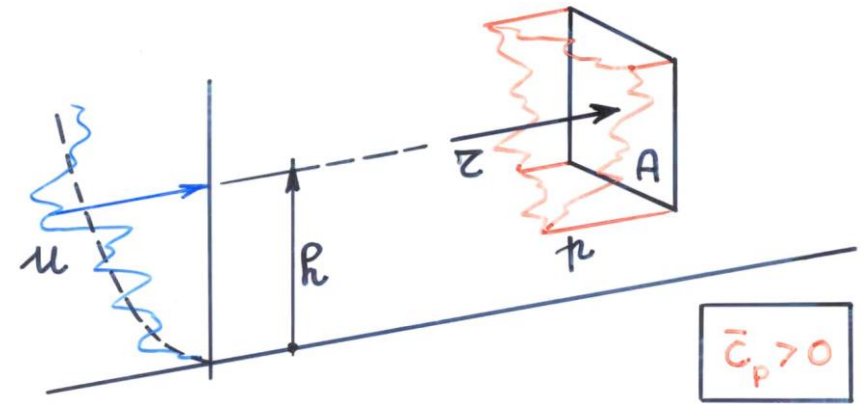


Superficie puntuale

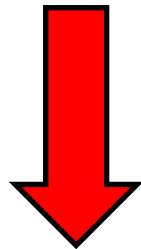
$$p'(M, t) = \rho \bar{u} u'(M, t) \bar{c}_p \Rightarrow$$

$$p'(t) = \rho \bar{u} u'(t) \bar{c}_p \Rightarrow$$

$$r'(t) = \rho \bar{u} u'(t) \bar{c}_p A \Rightarrow$$



$$S_r(n) = (\rho \bar{u} \bar{c}_p A)^2 S_{u'}(n) \quad \chi(n) = 1$$



Non contemporaneità delle pressioni massime

$$S_r(n) = (\rho \bar{u} \bar{c}_p A)^2 S_{u'}(n) \chi(n)$$

Superficie finita

$$\chi(n) = \frac{1}{A^2} \int_A \int_A \text{Coh}_{uu}(M, M'; n) dA dA'$$



$$\mathbf{r}(t) = \bar{\mathbf{r}} + \mathbf{r}'(t)$$

Forza risultante massima

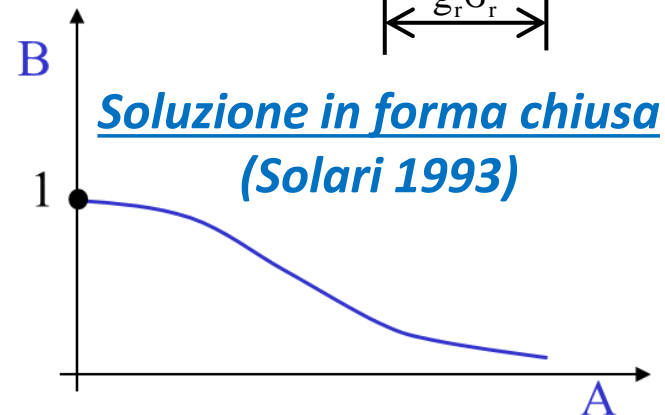
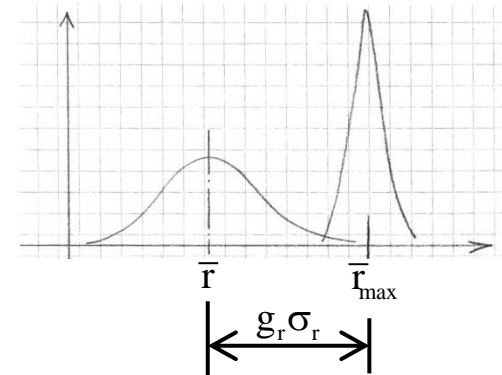
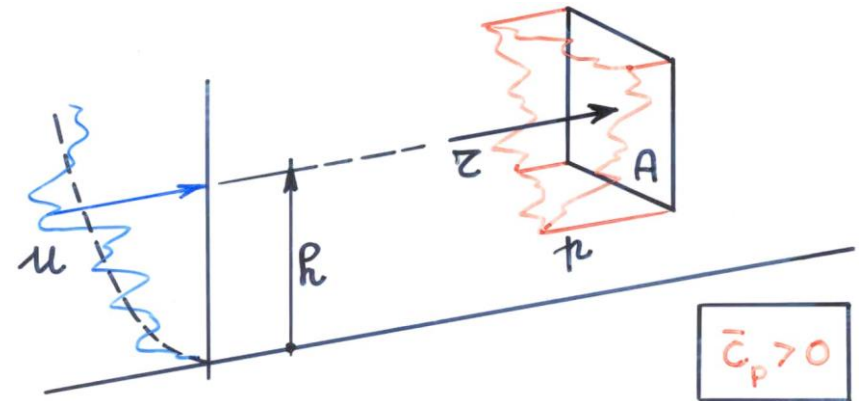
$$\bar{\mathbf{r}}_{\max} = \bar{\mathbf{r}} + g_r \sigma_r = \bar{\mathbf{r}} \left(1 + g_r \frac{\sigma_r}{\bar{\mathbf{r}}} \right)$$

Fattore di raffica della forza risultante

$$G_r = 1 + g_r \frac{\sigma_r}{\bar{\mathbf{r}}} \Rightarrow \bar{\mathbf{r}}_{\max} = \bar{\mathbf{r}} G_r$$

$$G_r = 1 + 2g_r I_u B$$

$$B = \frac{1}{2I_u} \frac{\sigma_r}{\bar{\mathbf{r}}} = \frac{1}{\sigma_u} \sqrt{\int_0^\infty S_u(n) \chi(n) dn}$$



Velocità massima del vento

$$u(t) = \bar{u} + u'(t)$$

$$\bar{u}_{\max} = \bar{u} G_u$$

$$G_u = 1 + g_u I_u$$

Pressione massima locale

$$p(t) = \bar{p} + p'(t)$$

$$\bar{p}_{\max} = \bar{p} G_p$$

$$G_p = 1 + 2g_u I_u$$

Forza risultante massima

$$r(t) = \bar{r} + r'(t)$$

$$\bar{r}_{\max} = \bar{r} G_r$$

$$G_r = 1 + 2g_r I_u \mathbf{B}$$



Pressione massima locale

$$\bar{p}_{\max} = \bar{p} G_p$$

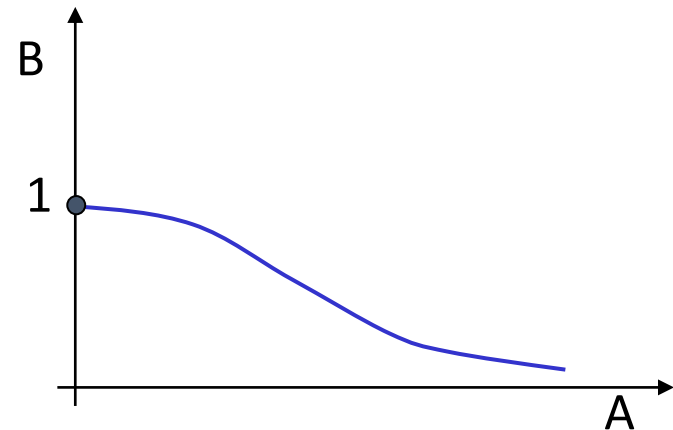
$$G_p = 1 + 2g_u I_u$$

Pressione equivalente

$$p_{\text{eq}} = \frac{\bar{r}_{\max}}{A} = \frac{G_r \bar{r}}{A} \Rightarrow$$

$$p_{\text{eq}} = \bar{p} G_r$$

$$G_r = 1 + 2g_r I_u B$$



$$A \rightarrow 0 \Rightarrow B \rightarrow 1 \Rightarrow G_r = 1 + 2g_r I_u = G_p \Rightarrow p_{\text{eq}} \rightarrow \bar{p}_{\max}$$

$$A \rightarrow \infty \Rightarrow B \rightarrow 0 \Rightarrow G_r = 1 \Rightarrow p_{\text{eq}} \rightarrow \bar{p}$$

$$\bar{p} \leq p_{\text{eq}} \leq \bar{p}_{\max}$$



Pressione equivalente

$$p_{eq} = \bar{p} G_r$$

$$G_r = 1 + 2g_r I_u B$$

Esempio

$$b = h = 4 \text{ m}; h_0 = 10 \text{ m}; \bar{u}(z) = 25 \text{ m/s}; \rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$$

$$I_u = 0.19; L_u = 63 \text{ m}; c_{uy} = c_{uz} = 10; \tau = 1 \text{ s}; T = 600 \text{ s}$$

Soluzione in forma chiusa (Solari 1993)

$$B^2 = 0.66; v_r = 0.13 \text{ Hz}$$

$$g_r = 3.15; G_r = 1 + 2g_r I_u B = 1 + 2 \times 3.15 \times 0.19 \times 0.812 = 1.97$$

$$p_{eq} = \bar{p} G_r = 390.625 \times 1.97 = 770.5 \text{ N/m}^2$$

$$\bar{p} = 390.625 \text{ N/m}^2 < p_{eq} = 770.5 \text{ N/m}^2 < \bar{p}_{max} = 804.8 \text{ N/m}^2$$





ORDINE DEGLI INGEGNERI

DELLA PROVINCIA DI MACERATA

Grazie per l'attenzione !

**Ringraziamenti per le idee e il materiale mostrato
durante la lezione vanno a:**

Prof. Giovanni Solari

Prof. Gianni Bartoli

Prof. Guido Buresti

Prof. ssa Luisa Carlotta Pagnini

Prof. Giuseppe Piccardo

Prof. Francesco Ricciardelli



**Università
di Genova**

