



ORDINE DEGLI INGEGNERI

DELLA PROVINCIA DI MACERATA

Introduzione a CNR-DT 207 R1/2018

LEZIONE 1

Velocità del vento

Luca Roncallo

DICCA – University of Genoa

luca.roncallo@edu.unige.it



**Università
di Genova**

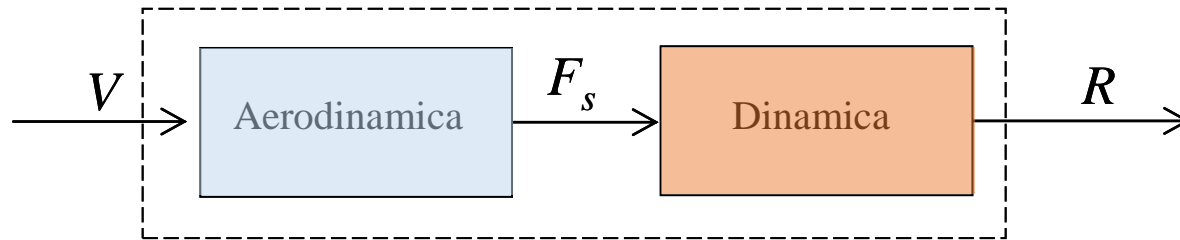


Velocità del vento:

- Introduzione;
- Velocità di progetto e periodo di ritorno;
- Categoria di esposizione;
- Coefficiente di topografia;
- Velocità media e turbolenza atmosferica;
- Pressione cinetica di picco;
- Applicazione



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 vorticoso prodotta dai corpi investiti, che variano casualmente nel tempo e nello spazio provocando, in generale, **effetti dinamici**.



Le istruzioni del CNR ci forniscono gli strumenti per trattare la catena dei passaggi che trasformano la velocità del vento V nella risposta R della struttura



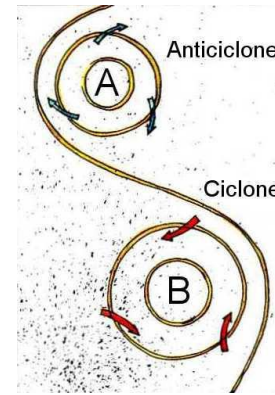
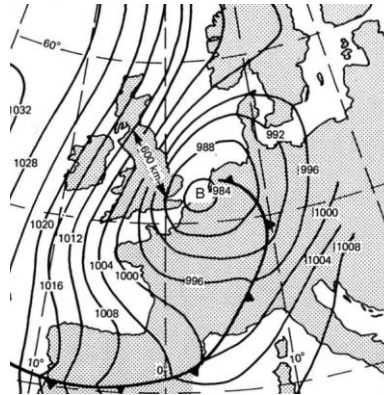
Introduzione

Circolazione primaria

Alisei, venti occidentali e orientali. Si sviluppano su scala planetaria su periodi mensili o stagionali e determinano il clima terrestre. Hanno velocità moderate (<4-5 m/s), poco influenti sulle costruzioni.

Circolazione secondaria

- Cicloni
 - Anti-cicloni
 - Monsoni
- Extra-tropicali
Tropicali



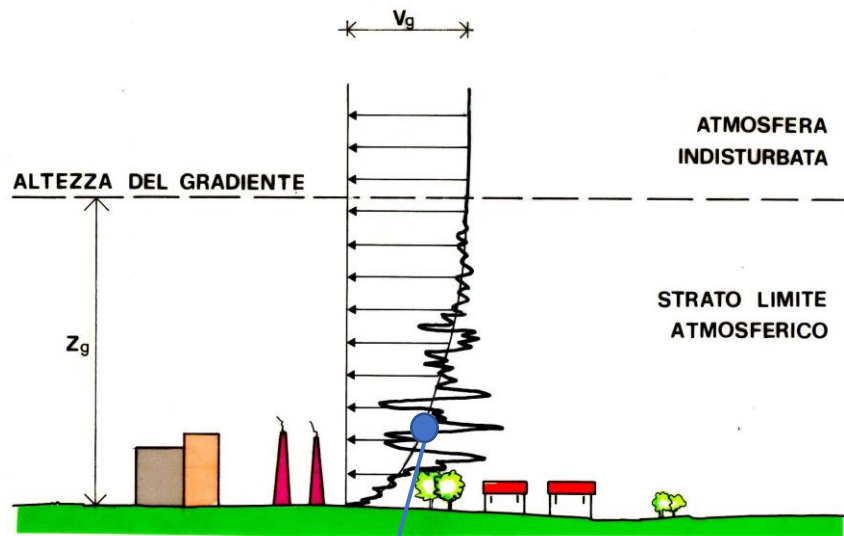
Venti locali

Sono legati a particolari condizioni geografiche (Brezze, Föhn, Venti catabatici) o atmosferiche (Venti frontali, Downburst, Tornado o tromba d'aria)

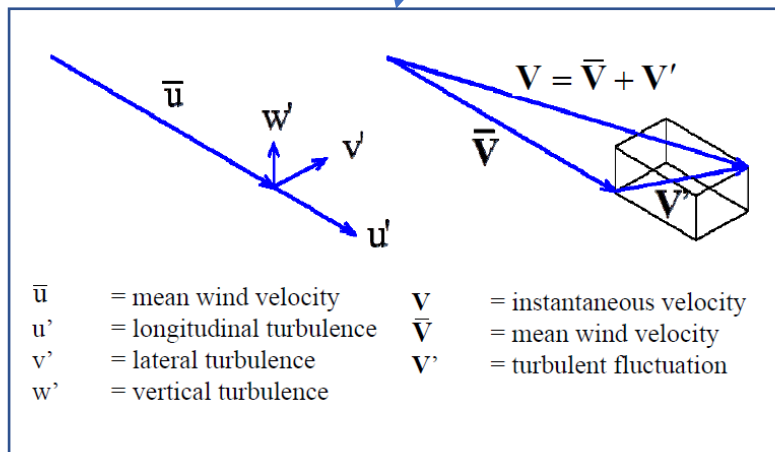
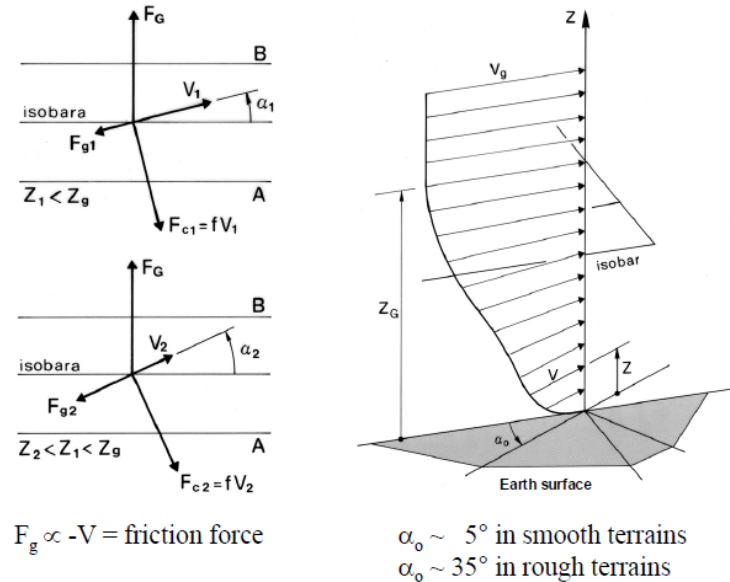


La rappresentazione del vento adottata nelle presenti Istruzioni riguarda i cicloni extra-tropicali; normalmente essi costituiscono gli eventi eolici più severi, per intensità e probabilità di occorrenza, ai quali sono sottoposte le costruzioni dei paesi temperati e, in particolare, italiane.





Ekman spiral



$$V(M; t) = \bar{V}(M; t) + V'(M; t)$$

$$\bar{V}(M; t) = \text{Velocità media}$$

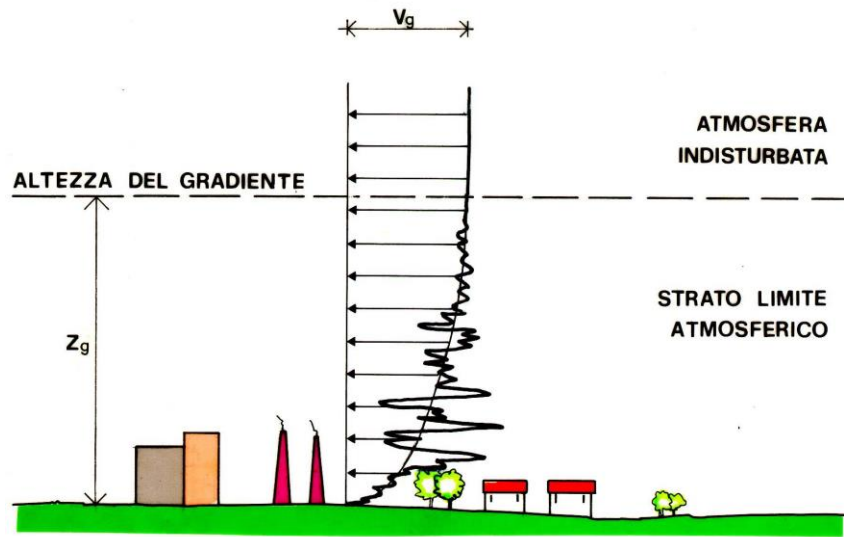
Funzione deterministica dello spazio M
 Funzione aleatoria del tempo t
 (lentamente variante, assunta costante su 10 minuti)

$$V'(M; t) = \text{Turbolenza}$$

Funzione aleatoria di spazio M e tempo t



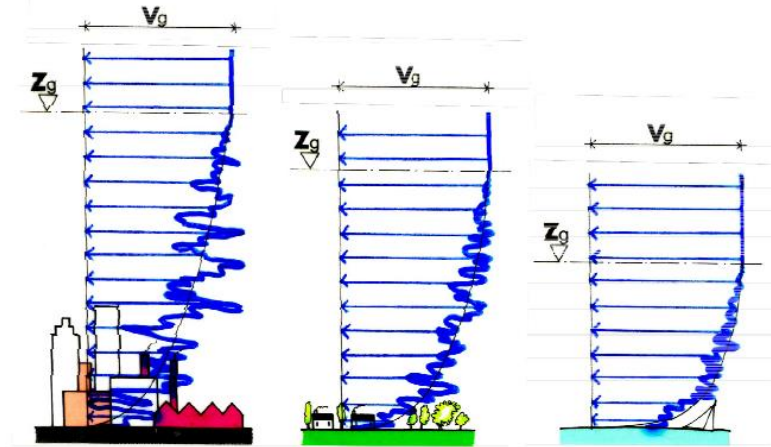
Introduzione



Fascia costiera

Area con ostacoli diffusi

Profilo di velocità in siti con diversa
rugosità del terreno z_0



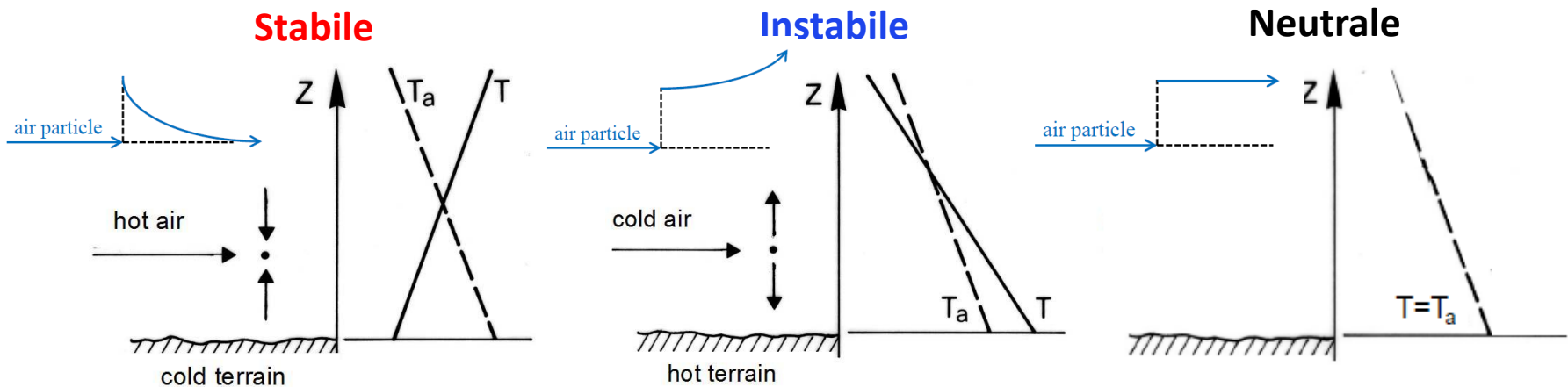
Zona suburbana

Area urbana



Introduzione

Il profilo di velocità del vento è inoltre influenzato dal gradiente di temperatura. In particolare si parla di equilibrio stabile, instabile o neutrale a seconda che il gradiente verticale della temperatura sia maggiore, minore o uguale del gradiente verticale della temperatura in condizioni adiabatiche.



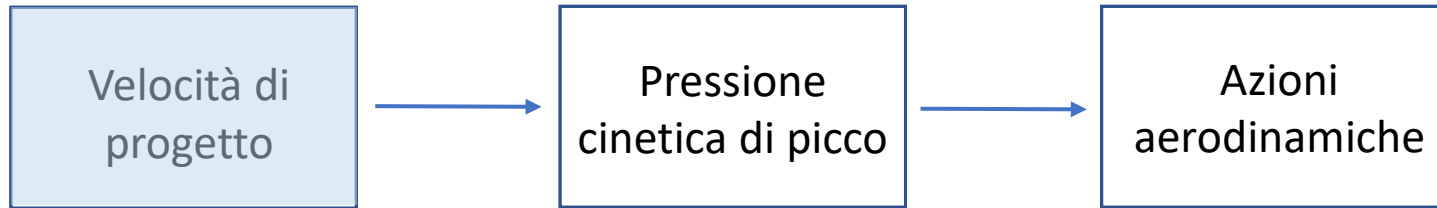
Al crescere della velocità del vento, il gradiente termico tende al valore adiabatico, l'atmosfera tende al regime neutrale e la velocità del vento diviene indipendente dalla temperatura.

Le presenti Istruzioni sono generalmente interessate agli effetti dei venti più intensi e quindi usano l'ipotesi di neutralità (valida per velocità > 10 m/s a 10 m dal suolo).

Questa ipotesi ha i suoi limiti maggiori nei riguardi del distacco dei vortici e dei fenomeni aeroelastici, normalmente esaltati dalla mancanza di turbolenza, e della fatica, determinata da velocità moderate e frequenti del vento.



Velocità di riferimento di progetto



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**.

Appendice A

$$T_R = T_{R,0}$$

$$T_{R,0} = \max\{T_0, V_N\}$$


V_N vita nominale della costruzione


Proprietà della costruzione	T_0 (anni)
Costruzione provvisoria, in fase di realizzazione o di demolizione, purché il periodo T in cui sussiste tale stato sia: $T \leq 3$ mesi $T \leq 1$ anno Per le costruzioni provvisorie, è necessario che sia minore di T la somma di tutti i successivi periodi nei quali la costruzione è riutilizzata.	5 10
Costruzione ordinaria	50
Costruzione di rilevante importanza	100
Costruzione di importanza strategica	200



Appendice A


Le presenti Istruzioni raccomandano di utilizzare valori del periodo di ritorno di progetto T_R diversi dal periodo di ritorno di riferimento $T_{R,0}$ in due casi distinti:

 per analisi inerenti l'abitabilità degli edifici, l'Appendice N suggerisce di valutare i valori di picco dell'accelerazione in corrispondenza di un periodo di ritorno di progetto $T_R = 1$ anno;

 per analisi inerenti il comportamento delle costruzioni e dei loro elementi nei riguardi del distacco dei vortici e di altri fenomeni aeroelastici, le Appendici Q e R raccomandano di valutare la velocità media del vento in corrispondenza di un periodo di ritorno di progetto $T_R = 10T_{R,0}$;

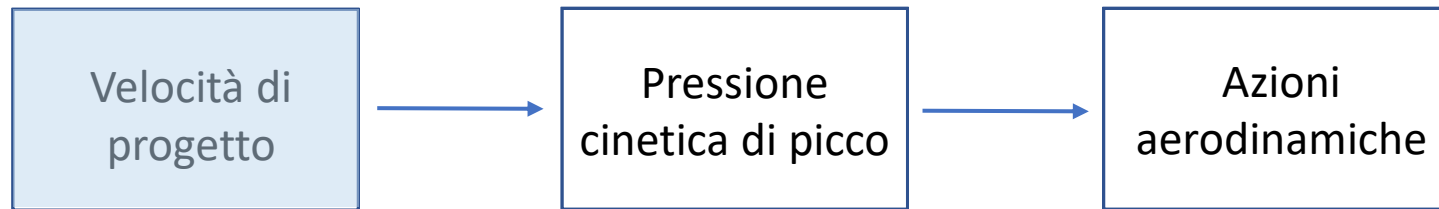
Inoltre:

 E' compito del Progettista e/o del Committente individuare le situazioni per le quali sia opportuno applicare periodi di ritorno di progetto maggiori di quelli sopra indicati.

 Limitatamente agli elementi non strutturali, è lecito adottare valori del periodo di ritorno di progetto minori di quelli sopra indicati, purché tale scelta non sia in contrasto con altre norme specifiche, purché questa decisione sia adeguatamente motivata ed esplicitamente dichiarata in sede di progetto e/o di verifica, e purché la crisi degli elementi considerati non sia pregiudizievole per la sicurezza della costruzione e/o per l'incolumità delle persone.



Velocità di riferimento di progetto



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**.

METODO DETTAGLIATO (Appendice B.1)

Una valutazione accurata della velocità di riferimento comporta, in linea di principio, l'applicazione di un metodo articolato in tre fasi sequenziali:

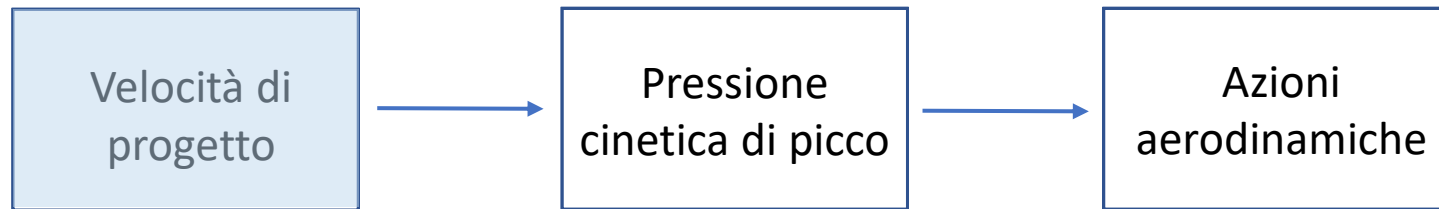
- (a) acquisizione, controllo e correzione di misure della velocità media e della direzione del vento, rappresentative del sito ove sorge la costruzione (paragrafo B.1.1);
- (b) trasformazione dei dati misurati in valori coerenti con la definizione di velocità di riferimento del vento (paragrafo B.1.2);
- (c) analisi probabilistica dei dati trasformati.

L'applicazione di tale procedimento richiede, in ogni caso, la collaborazione di esperti della materia (paragrafo B.1.3).

METODO SEMPLIFICATO (Par. 3.2.1-3.2.2, Appendice B.2)



Velocità di riferimento di progetto



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**.

METODO SEMPLIFICATO Par. 3.2.1-3.2.2, Appendici A-C

Le velocità di riferimento riportate nel paragrafo 3.2.1 sono ricavate applicando il procedimento illustrato nel paragrafo B.1 a 69 stazioni meteorologiche distribuite sul territorio nazionale in maniera sufficientemente omogenea.

$$v_r = v_b c_r$$

v_b Velocità base di riferimento

c_r Coefficiente di ritorno

La legge fornita nel paragrafo 3.2.2 per trasformare la velocità di riferimento del vento (paragrafo 3.2.1) nella velocità di riferimento di progetto, anch'essa basata su analisi svolte presso numerose stazioni meteorologiche nazionali, conduce a valutazioni mediamente a favore di sicurezza.



Velocità base di riferimento

La velocità base di riferimento v_b caratterizza la ventosità della zona ove sorge la costruzione. Essa è definita come il valore della **velocità media del vento su un intervallo di tempo $T = 10$ minuti, a 10 m di altezza sul suolo, su un terreno pianeggiante e omogeneo con lunghezza di rugosità $z_0 = 0,05$ m** (II categoria di esposizione, paragrafo 3.2.3), riferito a un **periodo di ritorno $T_R = 50$ anni**.

Par. 3.2.1, Appendice B

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

$v_{b,0}$ è la velocità base di riferimento al livello del mare, assegnata in funzione della zona ove sorge la costruzione;

c_a è il coefficiente di altitudine fornito dalla relazione.



Par. 3.2.1, Appendice B

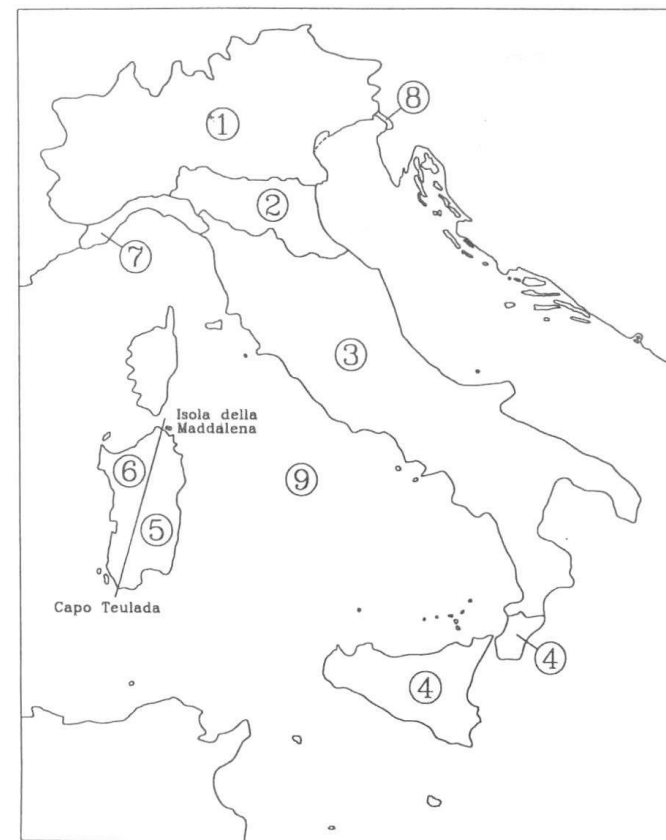
$v_{b,0}$ è la velocità base di riferimento al livello del mare, assegnata in funzione della zona ove sorge la costruzione;

$$v_b = v_{b,0} C_a$$

C_a è il coefficiente di altitudine.

Tabella 3.I – Valori dei parametri $v_{b,0}$, a_0 e k_a per le diverse zone italiane.

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



Par. 3.2.1, Appendice B

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

$v_{b,0}$ è la velocità base di riferimento al livello del mare, assegnata in funzione della zona ove sorge la costruzione;

c_a è il coefficiente di altitudine.

Coefficiente di altitudine

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

$$c_a = 1 + k_a \cdot \left(\frac{a_s}{a_0} - 1 \right) \quad \text{per } a_s > a_0$$

dove:

a_0, k_a sono parametri assegnati dalla Tabella 3.I in funzione della zona (Figura 3.1) ove sorge la costruzione;

a_s è l'altitudine sul livello del mare del sito ove sorge la costruzione.



Periodo di ritorno

Il coefficiente di ritorno c_r è fornito dalle seguenti relazioni in funzione del periodo di ritorno T_0

Appendice A

$$T_R = T_{R,0}$$

$$T_{R,0} = \max\{T_0, V_N\}$$

V_N vita nominale della costruzione

Proprietà della costruzione	T_0 (anni)
Costruzione provvisoria, in fase di realizzazione o di demolizione, purché il periodo T in cui sussiste tale stato sia: $T \leq 3$ mesi $T \leq 1$ anno Per le costruzioni provvisorie, è necessario che sia minore di T la somma di tutti i successivi periodi nei quali la costruzione è riutilizzata.	5 10
Costruzione ordinaria	50
Costruzione di rilevante importanza	100
Costruzione di importanza strategica	200

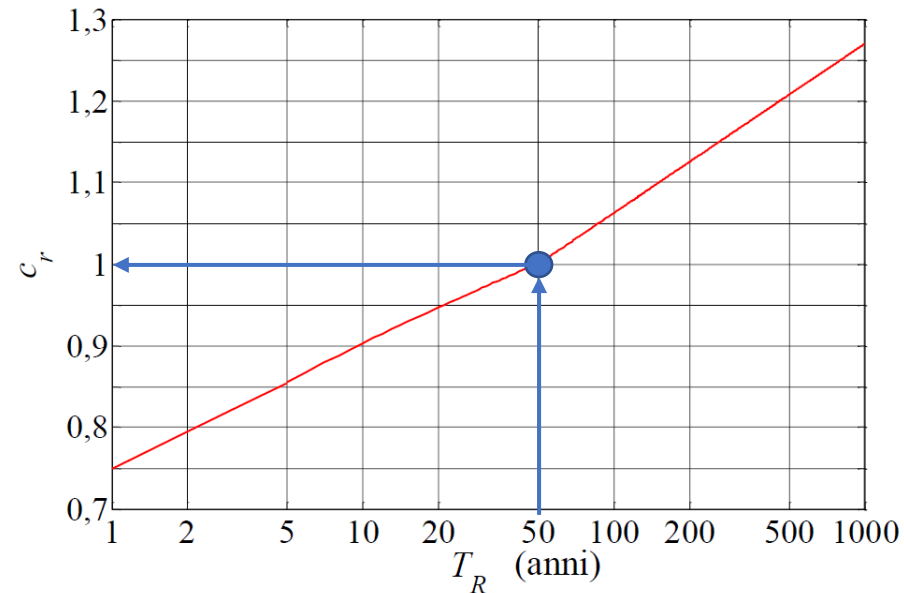
Par. 3.2.2

$$c_r = 0,75 \quad \text{per } T_R = 1 \text{ anno}$$

$$c_r = 0,75 + 0,0652 \ln(T_R) \quad \text{per } 1 \text{ anno} \leq T_R < 5 \text{ anni}$$

$$c_r = 0,75 \sqrt{1 - 0,2 \cdot \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T_R} \right) \right]} \quad \text{per } 5 \text{ anni} \leq T_R < 50 \text{ anni}$$

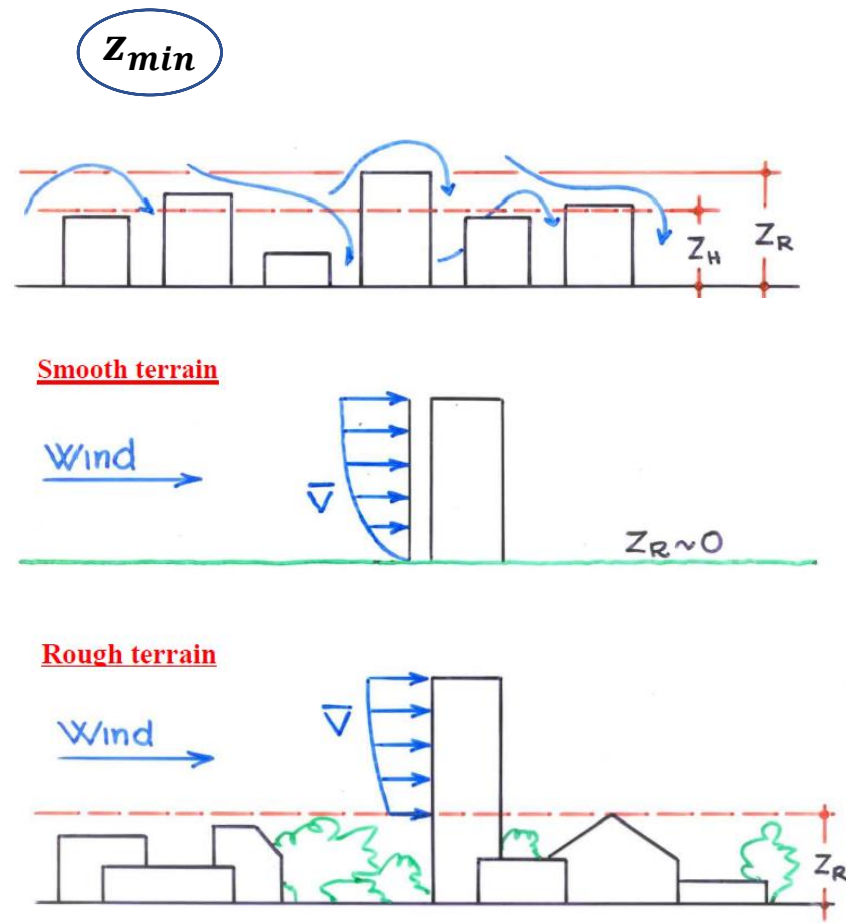
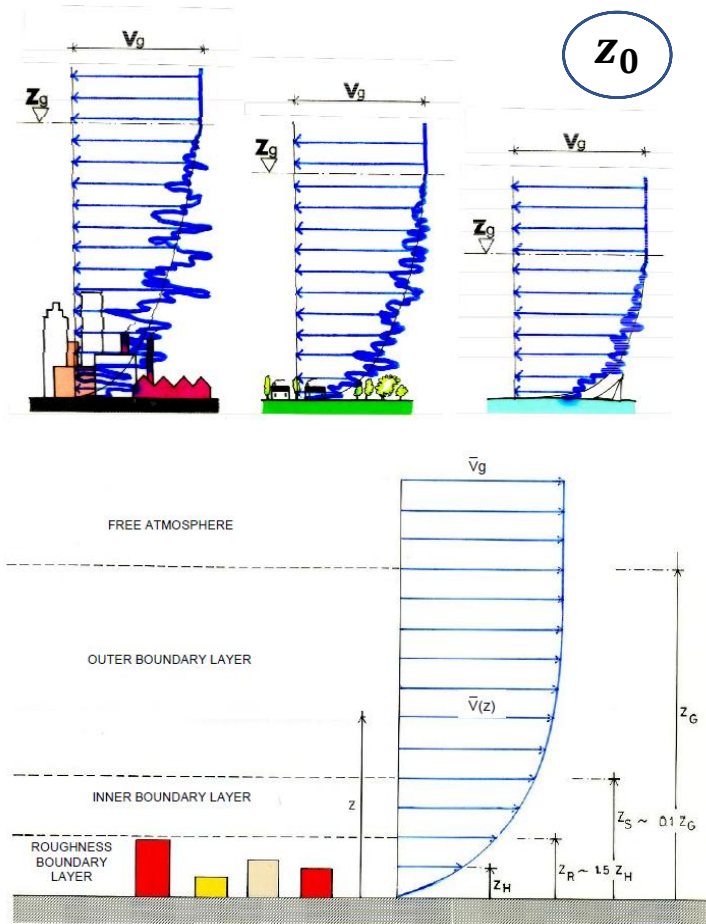
$$c_r = 0,65 \left\{ 1 - 0,138 \cdot \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T_R} \right) \right] \right\} \quad \text{per } T_R \geq 50 \text{ anni}$$



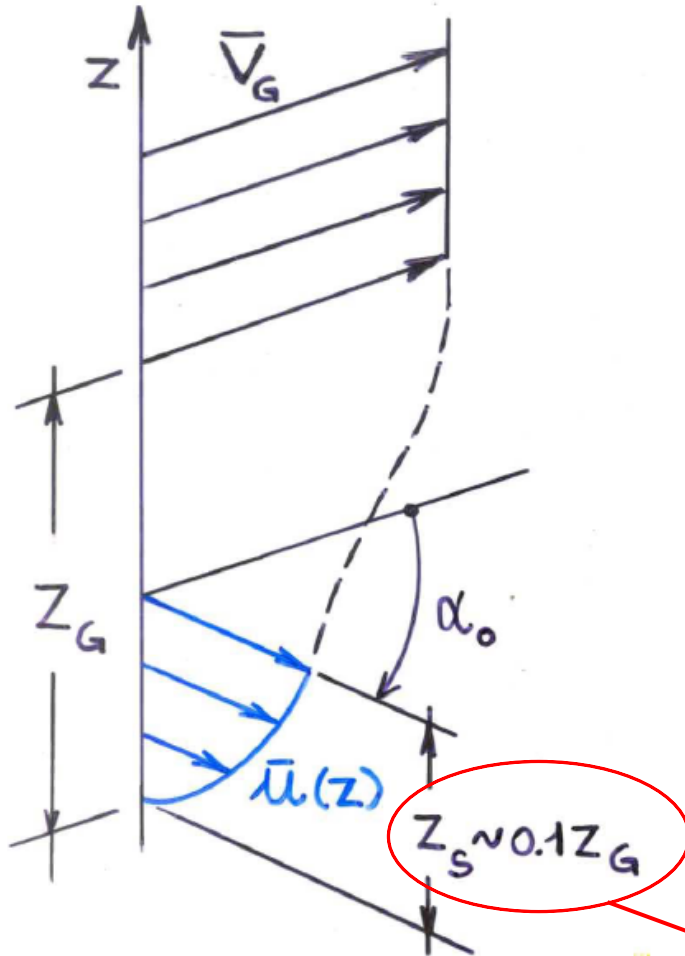
Categoria di esposizione

Per passare dalla velocità base di riferimento di progetto alle condizioni nel sito di interesse è necessario valutare la relativa **categoria di esposizione** (Par. 3.2.3, Appendice C).

Il criterio di assegnazione delle categorie di esposizione è strettamente legato alla morfologia del territorio nazionale e considera esplicitamente la **rugosità del terreno**, la **zona geografica**, la **distanza dalla costa** e l'**altitudine sul livello del mare**. Inoltre tiene in conto implicitamente della **direzione dei venti più intensi**.



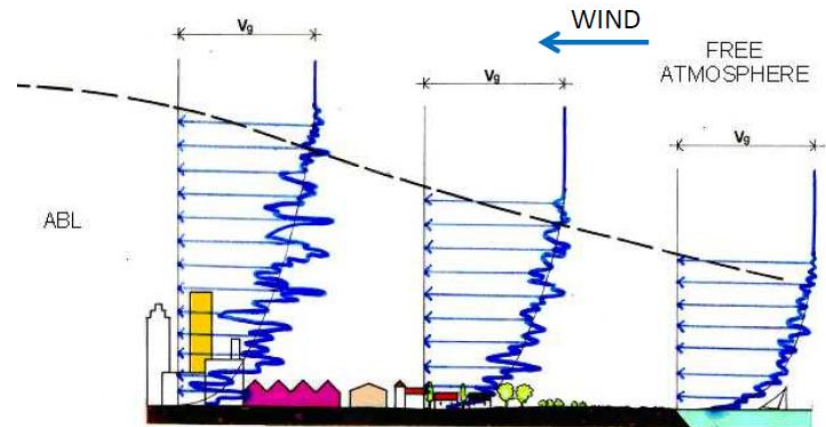
Inner Boundary Layer



Logarithmic profile

$$\bar{u}(z) = \frac{1}{\kappa} u_* \ln \left(\frac{z}{Z_0} \right)$$

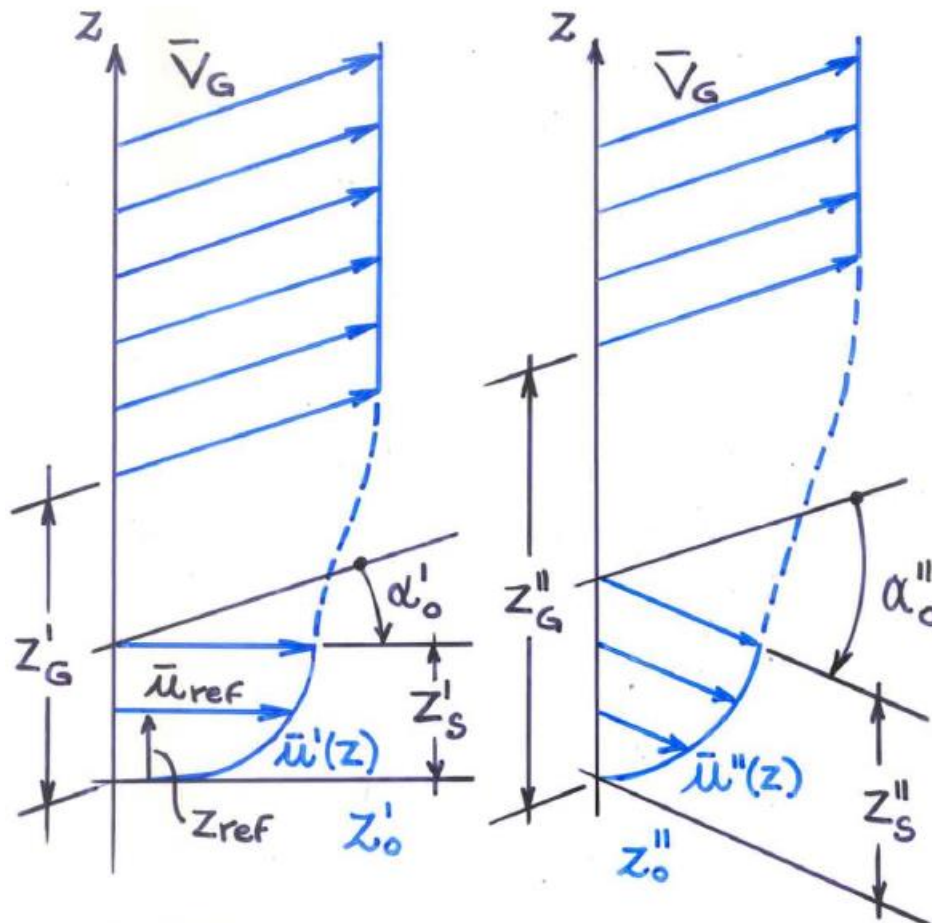
- κ Karman's constant ($\kappa \sim 0.4$)
- u_* shear velocity ($u_*^2 = -\overline{u'w'}$)
- Z_0 roughness length



max 200 m



Categoria di esposizione



$$\bar{u}_{\text{ref}} = \bar{u}'(z_{\text{ref}}), z'_0, z''_0 \text{ known}$$

$$\bar{u}_{\text{ref}} = \bar{u}'(z_{\text{ref}}) = \frac{1}{\kappa} u'_* \ln \left(\frac{z_{\text{ref}}}{z'_0} \right)$$

$$\bar{u}''(z) = \frac{1}{\kappa} u''_* \ln \left(\frac{z}{z''_0} \right)$$

$$u'_* / u''_* \approx (z'_0 / z''_0)^{0,07}$$

$$\bar{u}''(z) = \bar{u}_{\text{ref}} c_r(z)$$

\bar{u}_{ref} reference velocity

c_r roughness coefficient

$$c_r(z) = \frac{(z''_0 / z'_0)^{0,07} \ln(z / z''_0)}{\ln(z_{\text{ref}} / z'_0)}$$

$$z'_0 < z''_0$$

\Rightarrow

$$\bar{u}'(z) > \bar{u}''(z)$$



Categoria di esposizione

In mancanza di specifiche analisi, nota la **classe di rugosità** e la **zona**, si determina la categoria di esposizione in base alla distanza del sito dalla costa e alla sua quota sul livello del mare.

Tabella 3.III - Classi di rugosità del terreno.

Classi di rugosità	Descrizione
A	Area urbana, in cui almeno il 15% della superficie del terreno sia coperto da edifici la cui altezza media supera i 15 m
B	Area urbana (non di classe A), suburbana, industriale o boschiva
C	Area con ostacoli diffusi (quali alberi, case, muri, recinzioni,); aree con rugosità non riconducibile alle Classi A, B, D.
D	a) Mare e relativa fascia costiera (entro 2 km dalla riva) b) Lago (con larghezza pari ad almeno 1 km) e relativa fascia costiera (entro 1 km dalla riva) c) Area priva di ostacoli o con al più rari ostacoli isolati (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, pascoli, zone paludose o sabbiose, superfici innevate o ghiacciate, ...)

Par. 3.2.3

In mancanza di più approfondite valutazioni si assegna la classe di rugosità applicando il criterio seguente:

- Qualunque sito appartiene alla classe C salvo diverse indicazioni fornite ai punti successivi;
- Si assume classe D qualora la costruzione sorga nelle aree in Tabella 3.III con le lettere a) o b) oppure qualora vi sia, entro un raggio di 1 km dalla costruzione, un settore ampio almeno 30° dove almeno il 90% del terreno sia del tipo indicato con la lettera c);
- Si possono assumere le classi A o B purché la costruzione si trovi nell'area indicata nella Tabella 3.III, entro un raggio di almeno 1 km e comunque non inferiore a 20 volte la sua altezza, per tutti i settori di provenienza del vento ampi almeno 30°;
- Laddove sussistano dubbi si deve assumere la classe più sfavorevole.



Categoria di esposizione

Nota la **classe di rugosità** e la **zona** si determina la categoria di esposizione in base alla distanza del sito dalla costa e alla sua quota sul livello del mare.

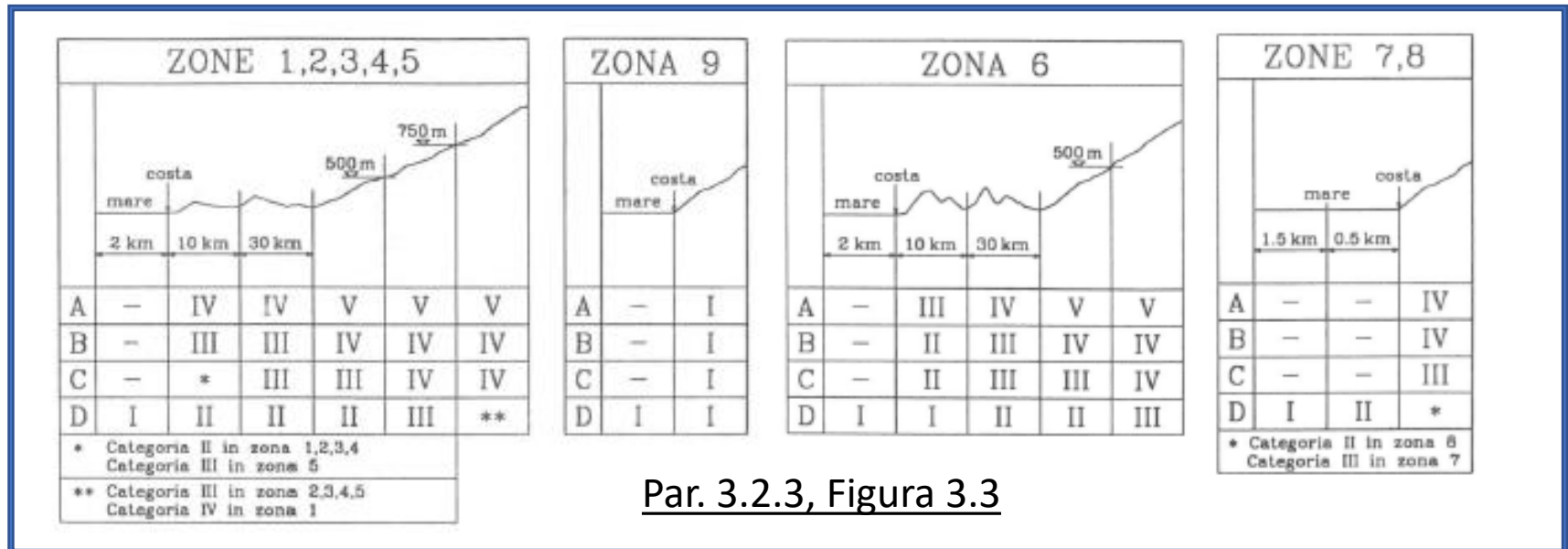


Tabella 3.II - Valori dei parametri k_r , z_0 , e z_{min} per le diverse categorie di esposizione.

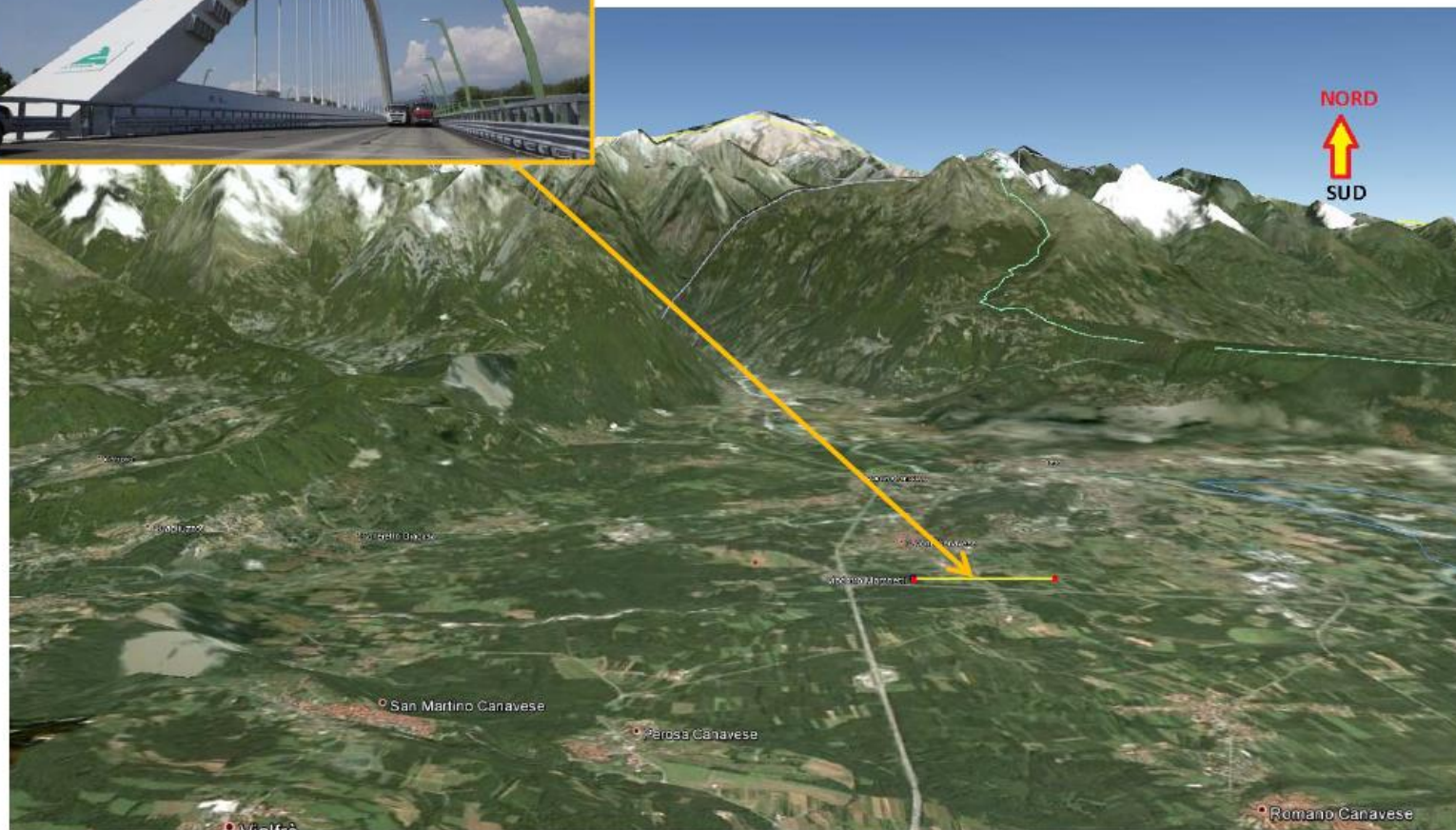
Categorie di esposizione del sito	k_r	z_0 (m)	z_{min} (m)
I	0,17	0,01	2
II	0,19	0,05	4
III	0,20	0,10	5
IV	0,22	0,30	8
V	0,23	0,70	12

$$c_r(z) = \frac{(z''/z_0')^{0,07} \ln(z/z_0'')}{\ln(z_{ref}/z_0')}$$

$$c_r(z) = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0''}\right)$$



Categoria di esposizione

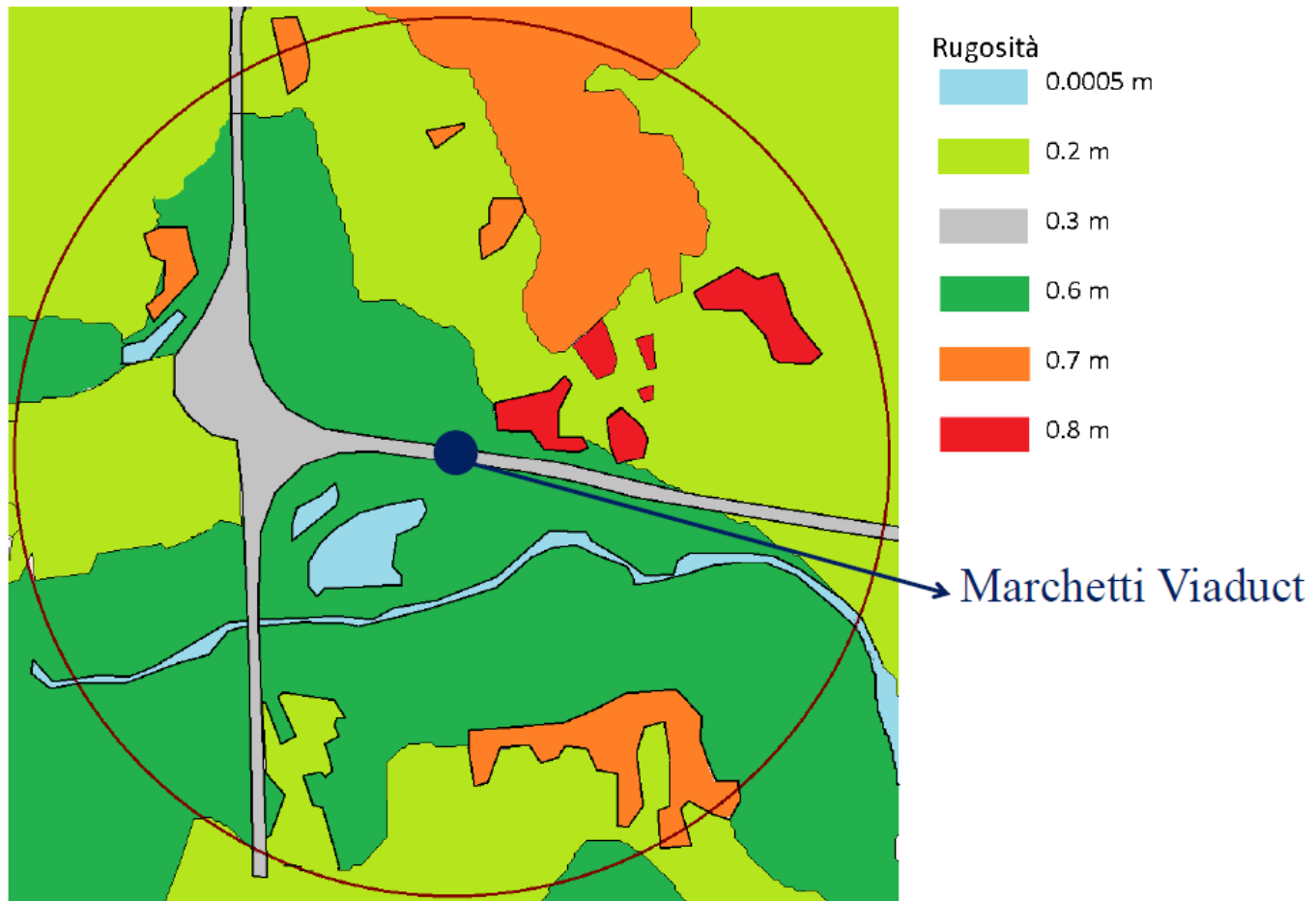


Marchetti Viaduct



Marchetti Viaduct

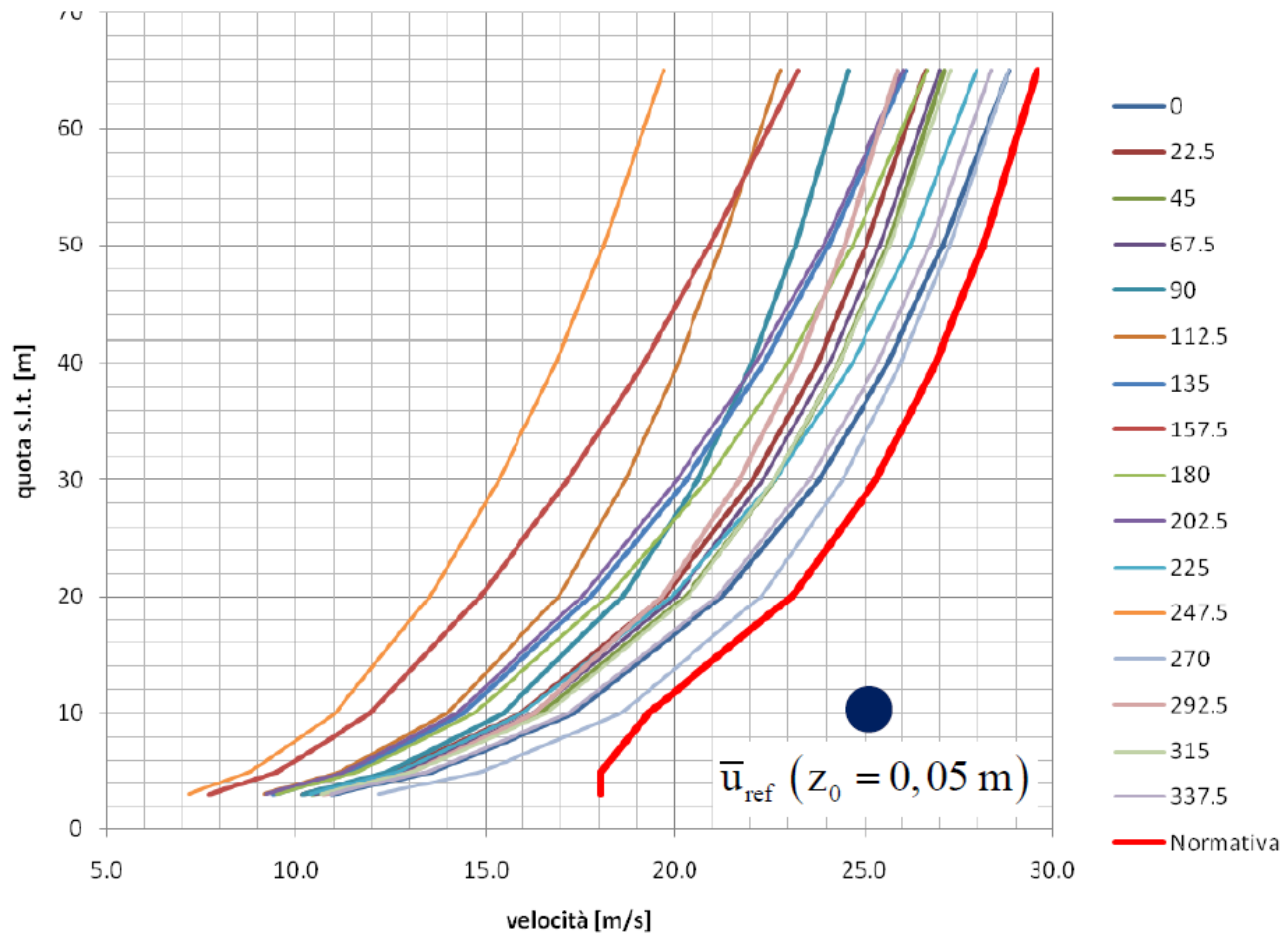




Marchetti Viaduct – Roughness map – 1 km radius



Categoria di esposizione



Marchetti Viaduct – Mean velocity profiles – ESDU Code



Coefficiente di topografia

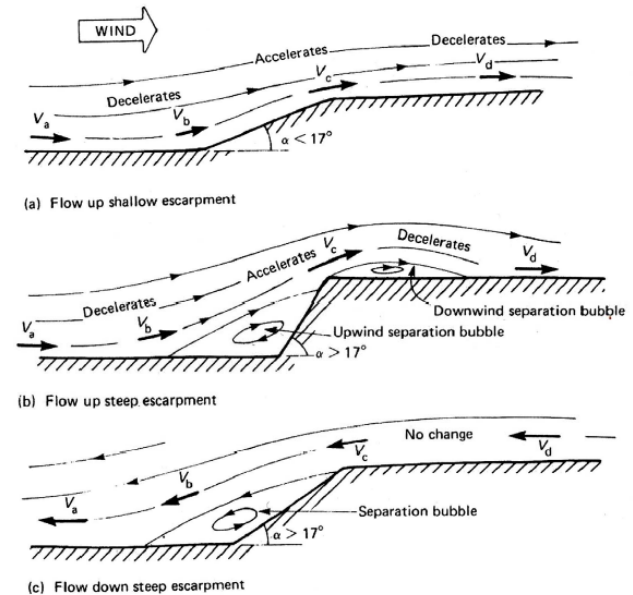
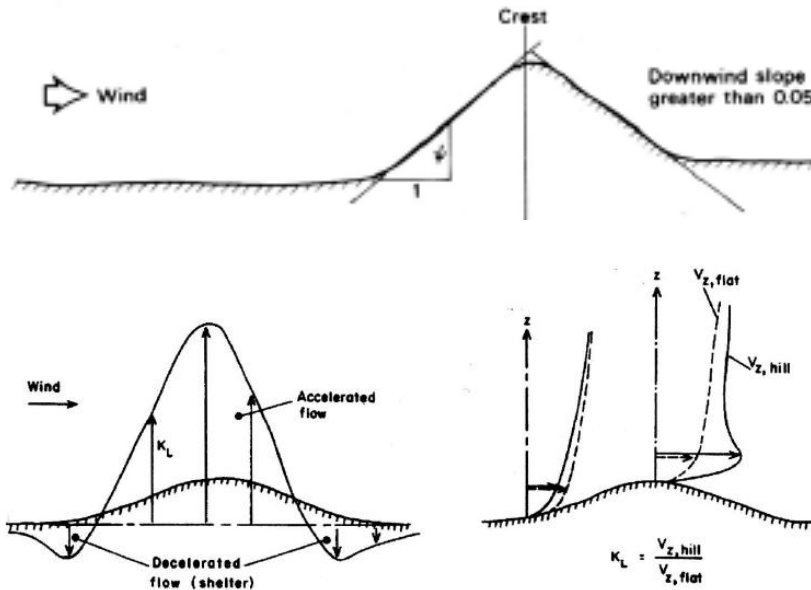
Il coefficiente di topografia c_t tiene conto delle **caratteristiche topografiche e orografiche** del sito dove sorge la costruzione (Par. 3.2.4, Appendice D).



In mancanza di più approfondite valutazioni il coefficiente di topografia è posto di regola pari a 1;



Per costruzioni ubicate presso la sommità di colline o pendii isolati il coefficiente di topografia deve essere ricavato da dati suffragati da opportuna documentazione. Alcuni criteri di calcolo sono forniti in Appendice D;



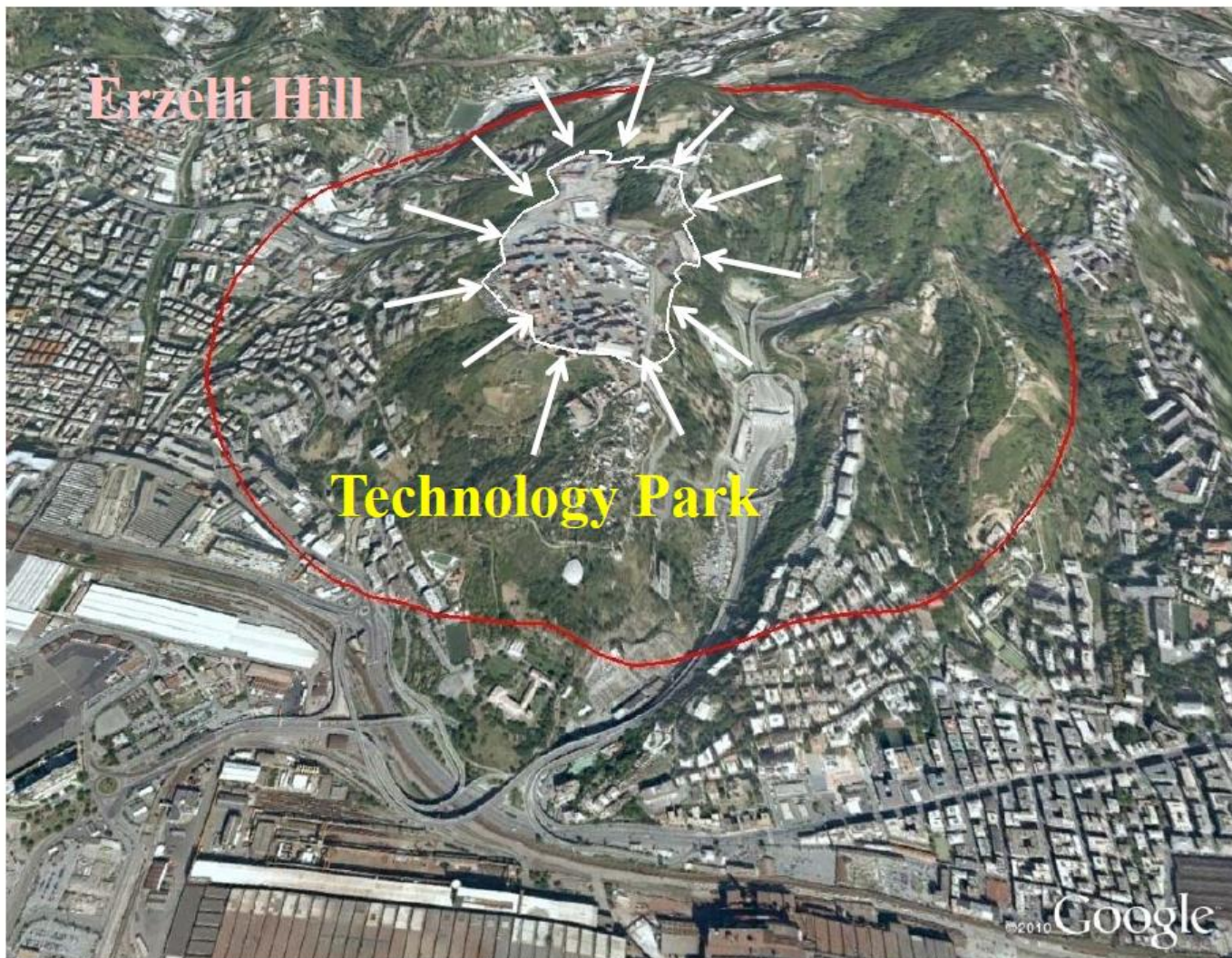
Per costruzioni ubicate entro valli tali da favorire l'incanalamento del vento si raccomanda di svolgere approfondite valutazioni.



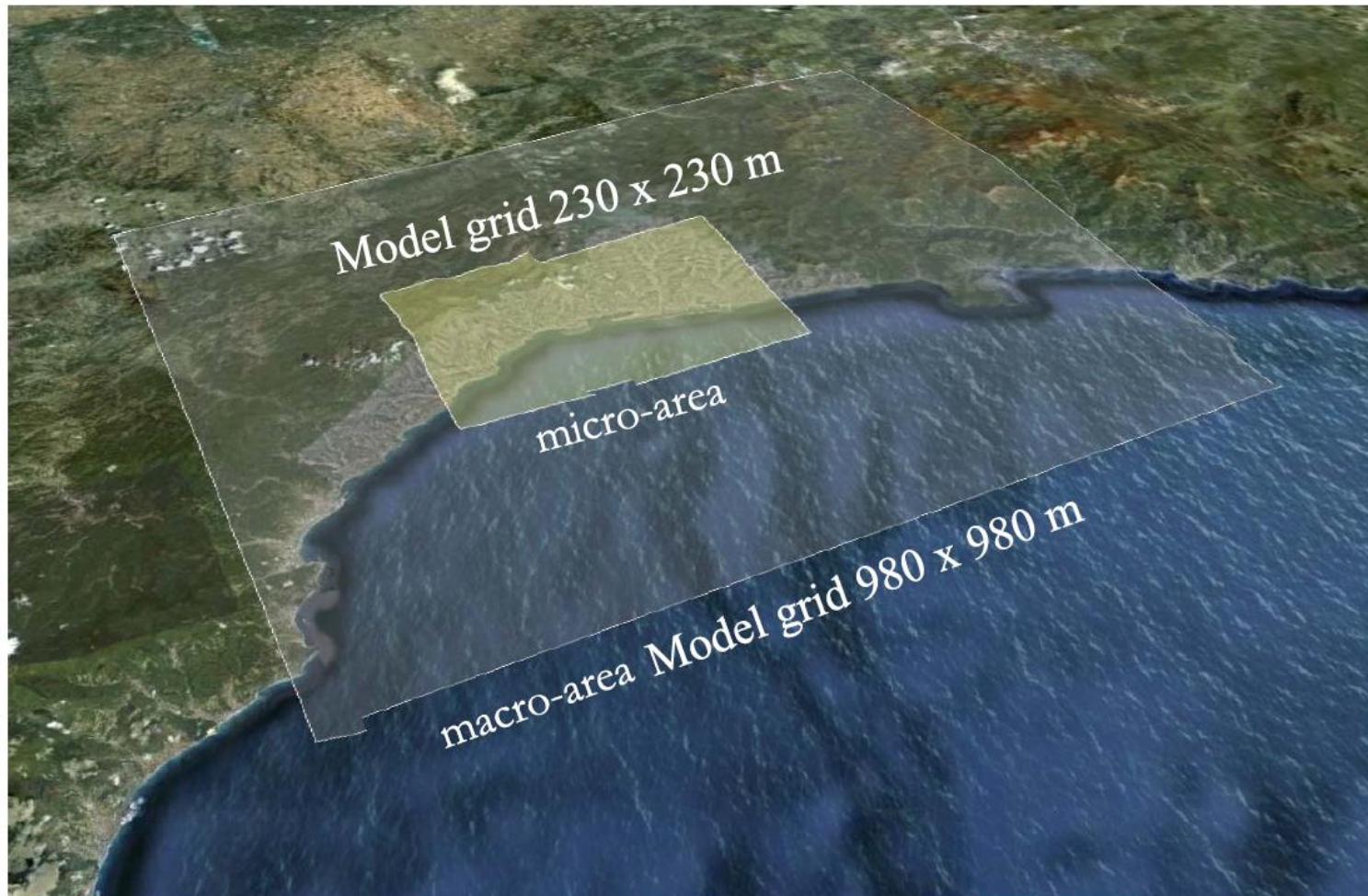


Messina Strait – Wind tunnel topographic model





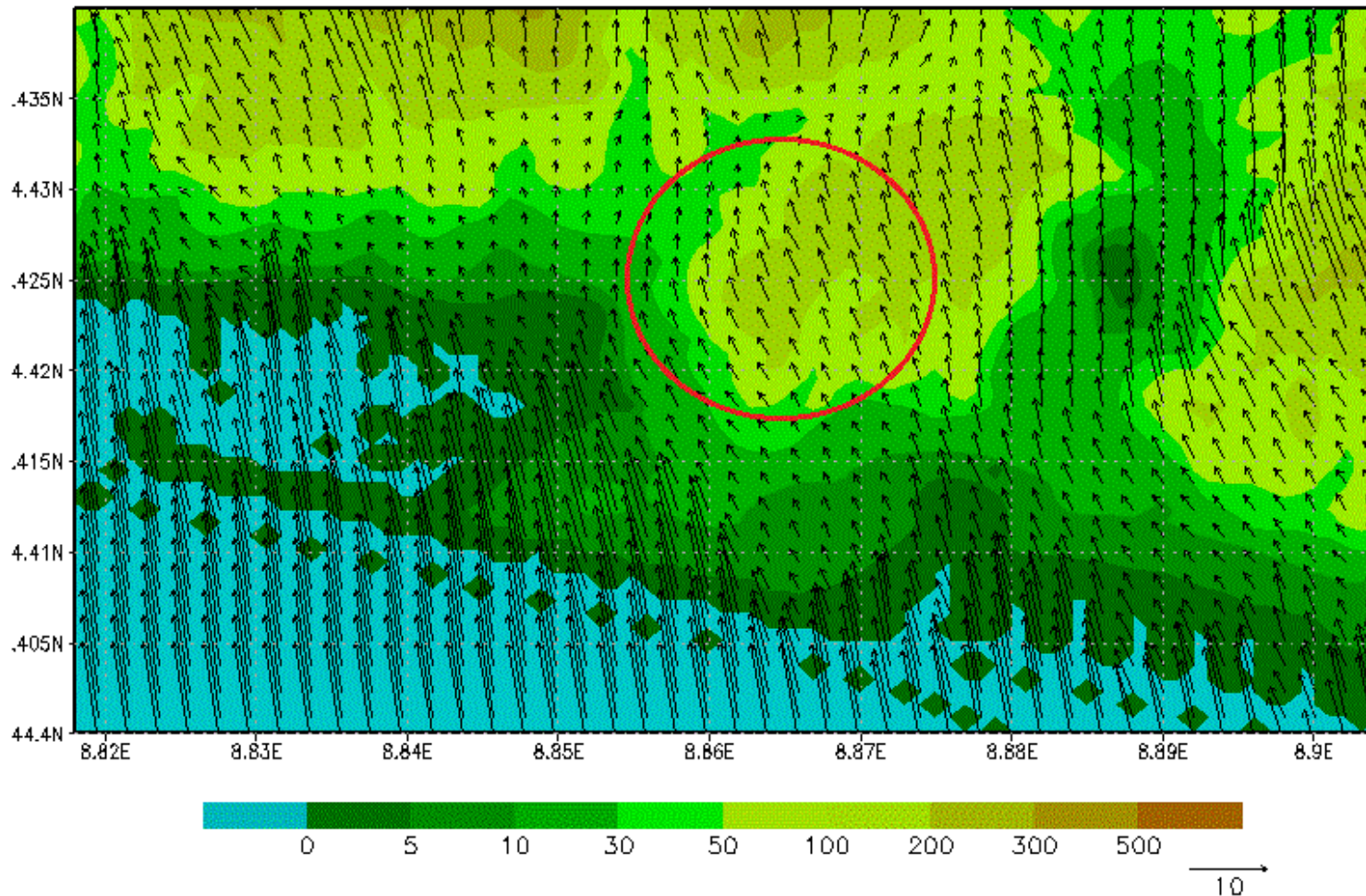
Erzelli Hill, Genova



Erzelli Hill, Macro- and micro-area

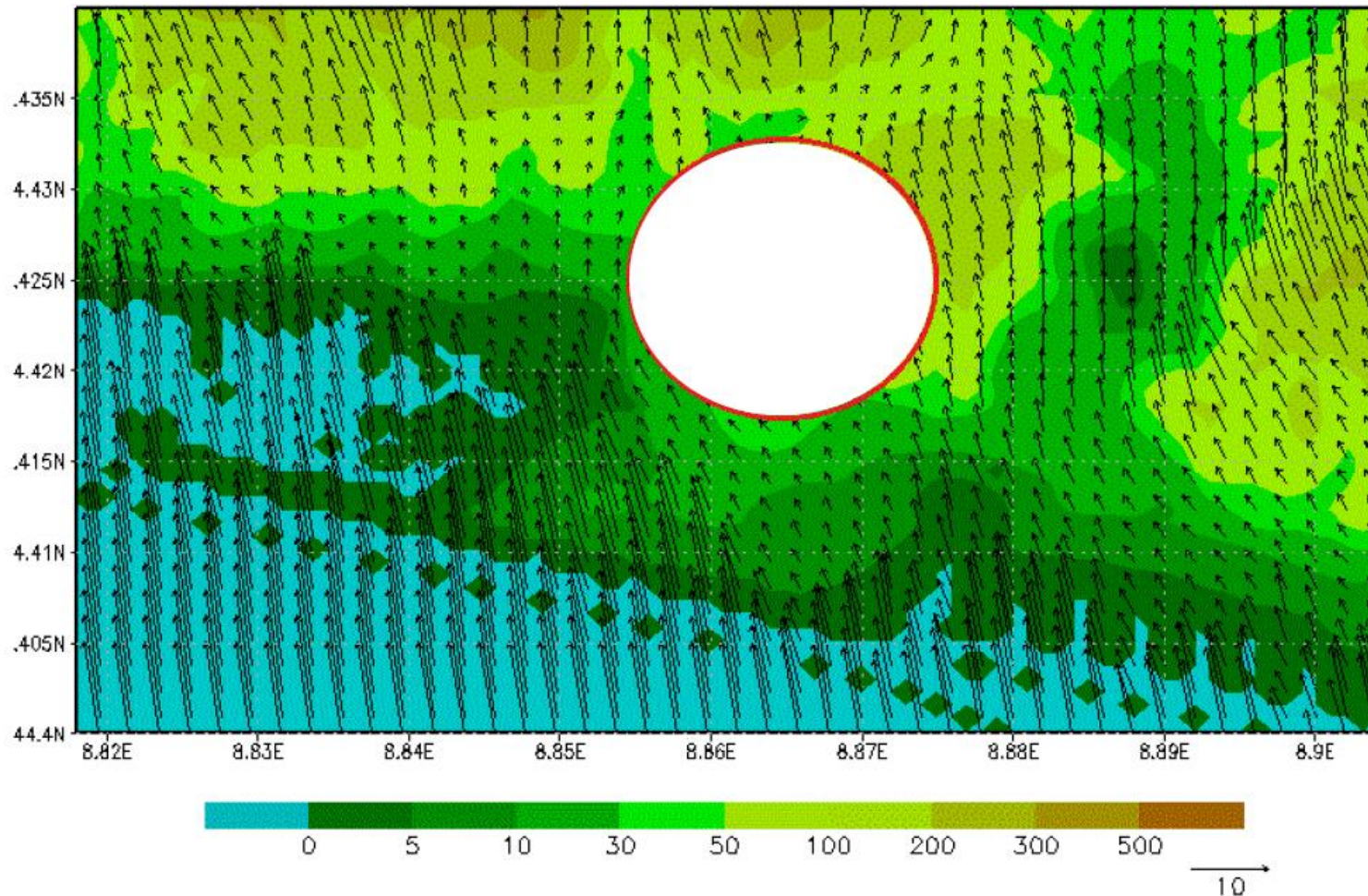


Coefficiente di topografia



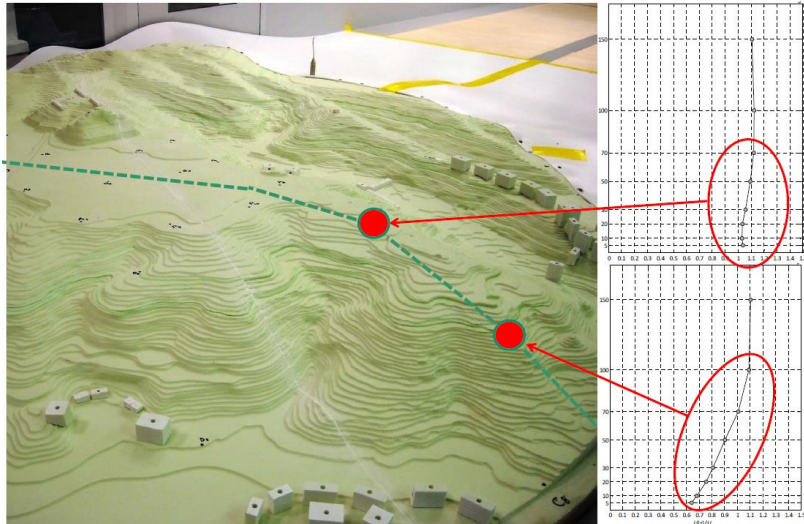
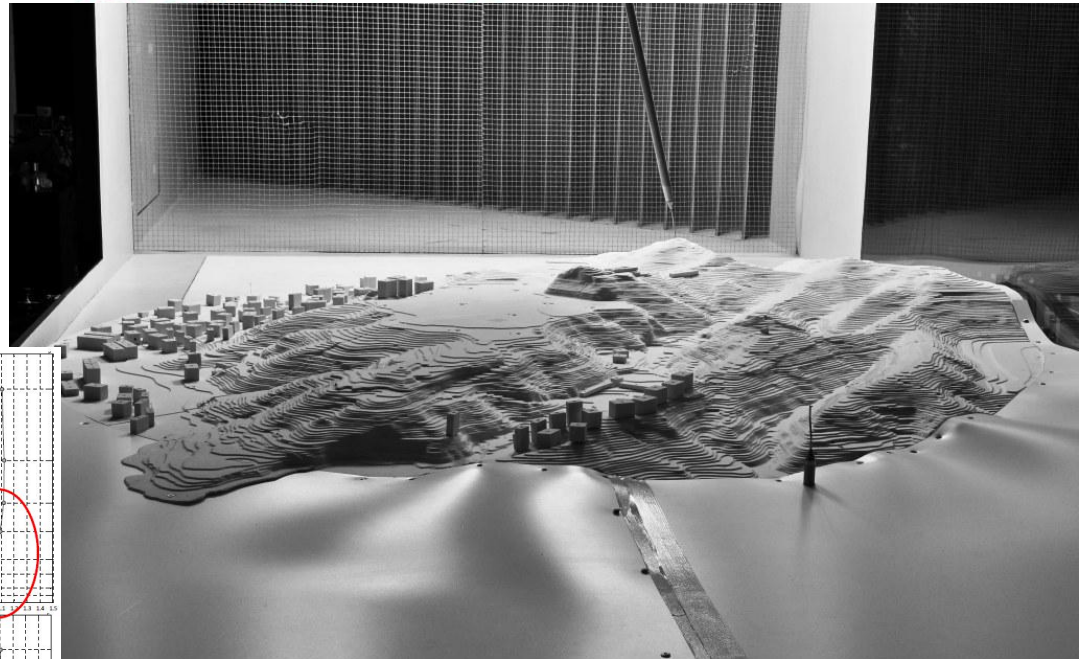
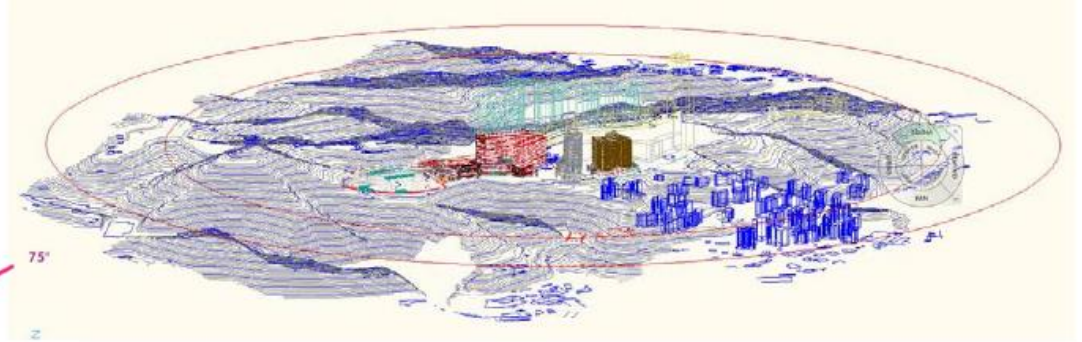
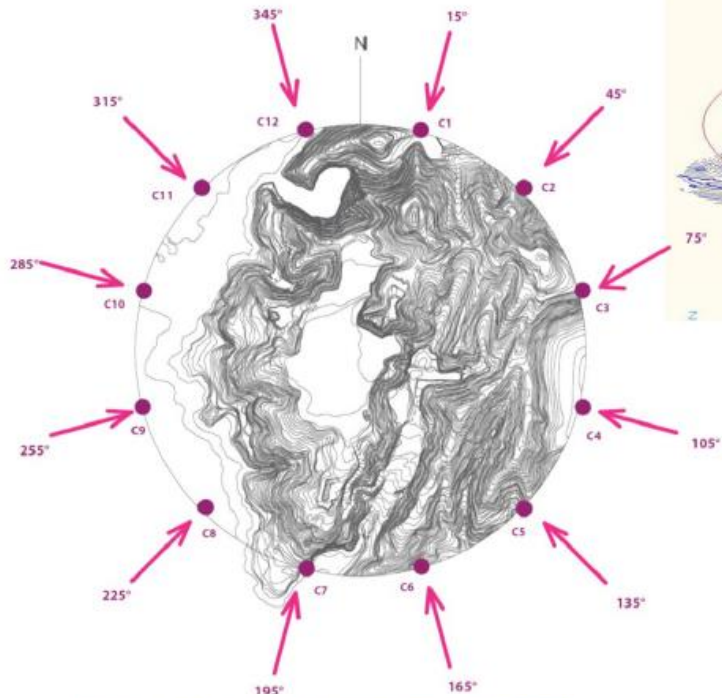
Erzelli Hill, WINDS wind field





Erzelli Hill, WINDS wind field

Coefficiente di topografia



Erzelli Hill – Topography model scale 1:1000



Velocità media e turbolenza

Riferimento

$$v_r = v_{b,0} c_a c_r$$



Sito

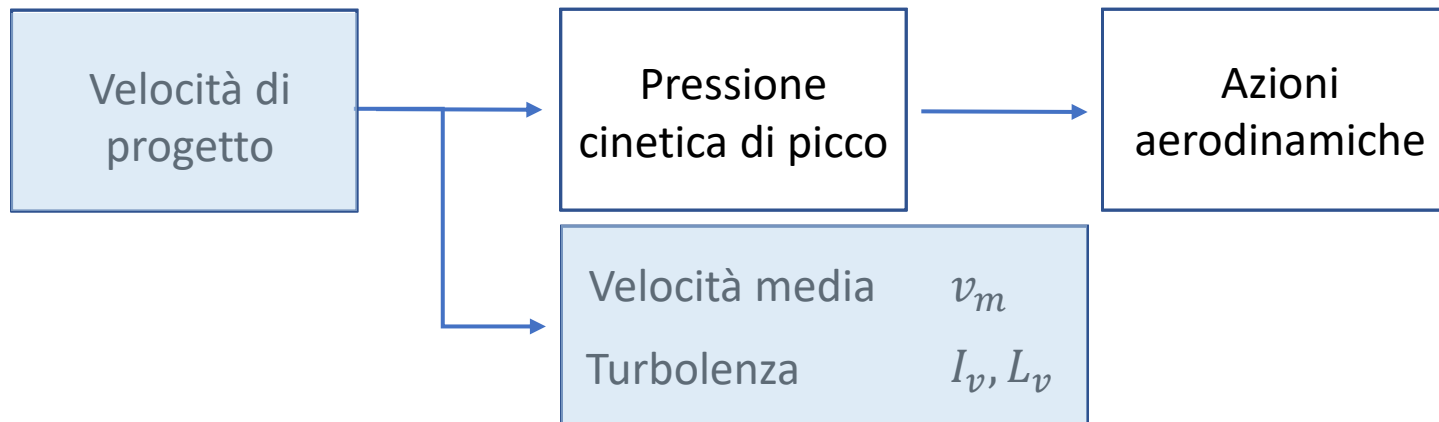
$$c_r(z) \rightarrow k_r, z_0, z_{min}$$
$$c_t(z)$$



Per la determinazione delle azioni aerodinamiche su corpi con superfici arrotondate o per l'analisi dei fenomeni dinamici e aeroelastici si valuta la velocità media del vento v_m



Per l'analisi dei fenomeni dinamici e aeroelastici si valuta l'intensità della turbolenza I_v e la scala integrale L_v



Velocità media

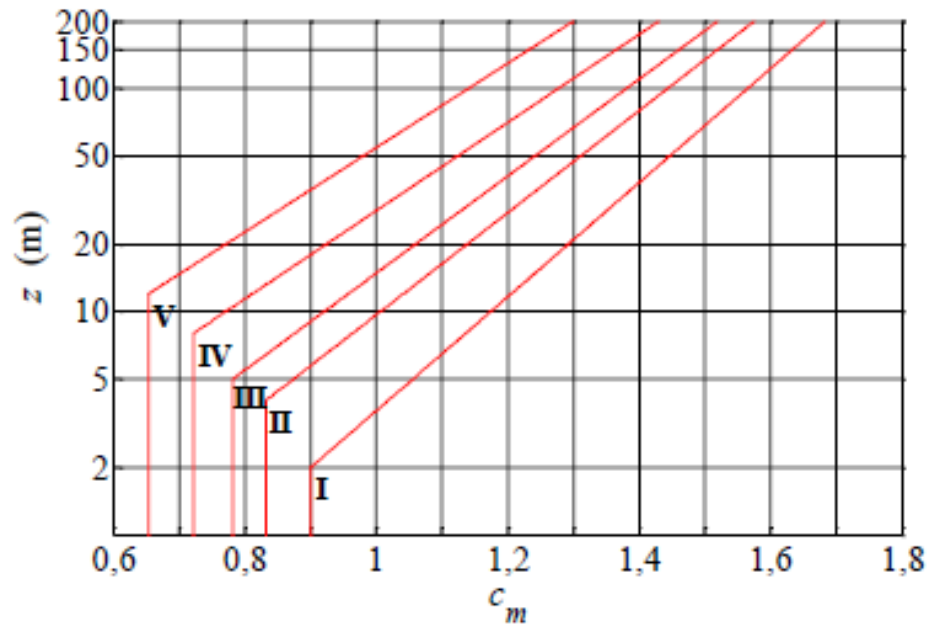
Per la determinazione delle azioni aerodinamiche su corpi con superfici arrotondate o per l'analisi dei fenomeni dinamici e aeroelastici si valuta la velocità media del vento v_m

Par. 3.2.5

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

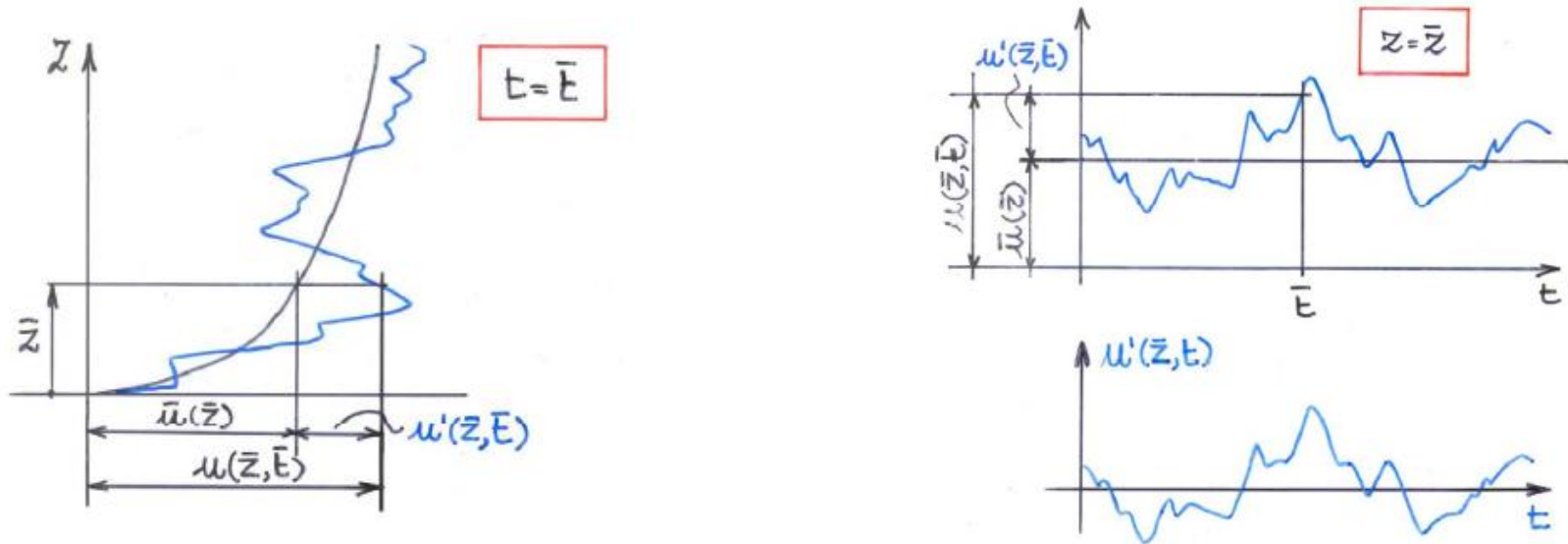
$$c_m(z) = k_r \ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right) c_t(z_{min}) \quad \text{per } z \leq z_{min}$$

$$c_m(z) = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) c_t(z) \quad \text{per } z > z_{min}$$

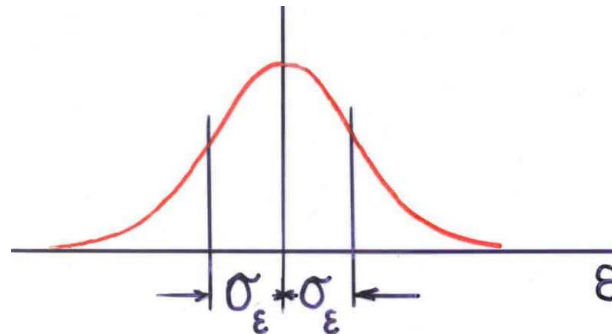
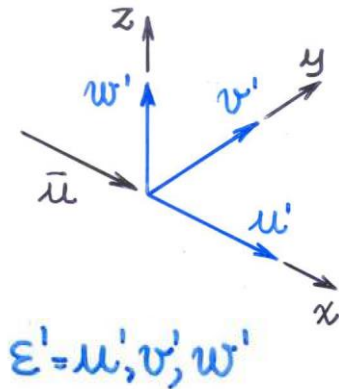


Turbolenza atmosferica

Per l'analisi dei fenomeni dinamici e aeroelastici si valuta l'intensità della turbolenza I_v e la scala integrale L_v (Par. 3.2.6, Appendice E)



La turbolenza atmosferica su 10 minuti è rappresentata come un processo aleatorio stazionario e Gaussiano



$$\sigma_u^2 > \sigma_v^2 > \sigma_w^2$$



Intensità di turbolenza

L'intensità della turbolenza è il coefficiente di variazione della turbolenza:

$$I_\varepsilon(z) = \frac{\sigma_\varepsilon(z)}{\bar{v}(z)} \quad \varepsilon = u, v, w$$

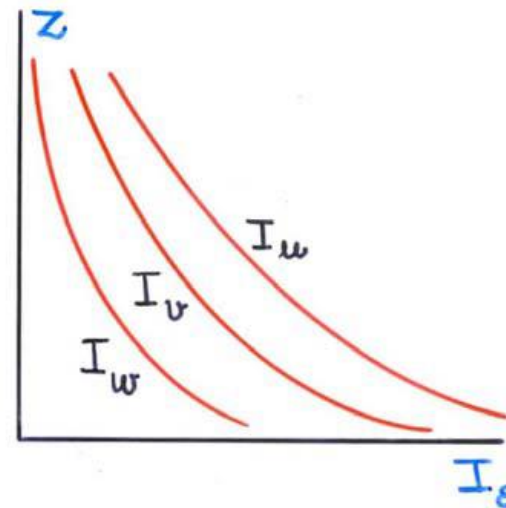
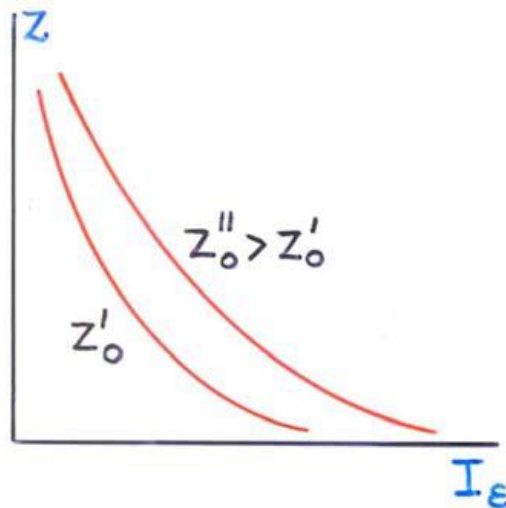
$$\bar{v}(z) = \frac{1}{\kappa} u^* \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

$$\sigma_\varepsilon^2 = \beta_\varepsilon u_*^2$$



$$I_u(z) = \frac{\kappa \sqrt{\beta_\varepsilon}}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) c_t(z)} \cong \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) c_t(z)}$$

$$I_v(z) = 0,50 I_u(z) \quad I_w(z) = 0,75 I_u(z)$$

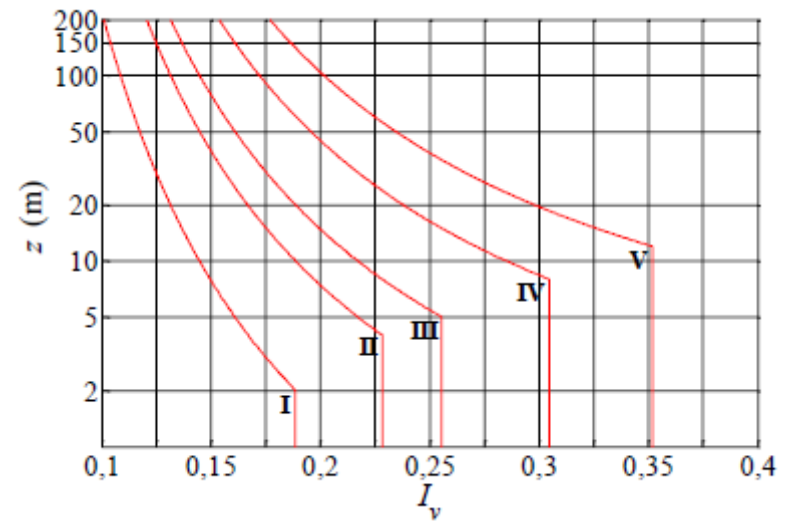


Intensità di turbolenza

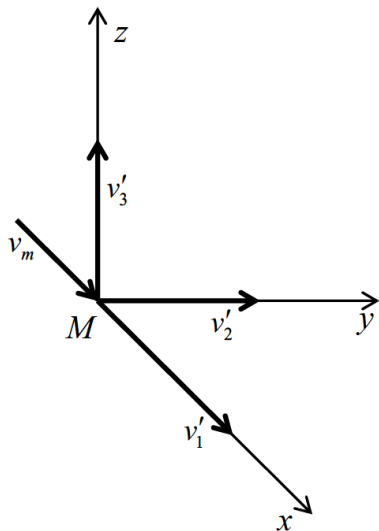
Par. 3.2.6

$$I_v(z) = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right) c_t(z_{min})} \quad \text{per } z \leq z_{min}$$

$$I_v(z) = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) c_t(z)} \quad \text{per } z > z_{min}$$



Appendice E



$$\sigma_1(z) = v_r k_r$$

$$\sigma_2(z) = 0,75 v_r k_r$$

$$\sigma_3(z) = 0,50 v_r k_r$$



$$I_1(z) = I_v(z)$$

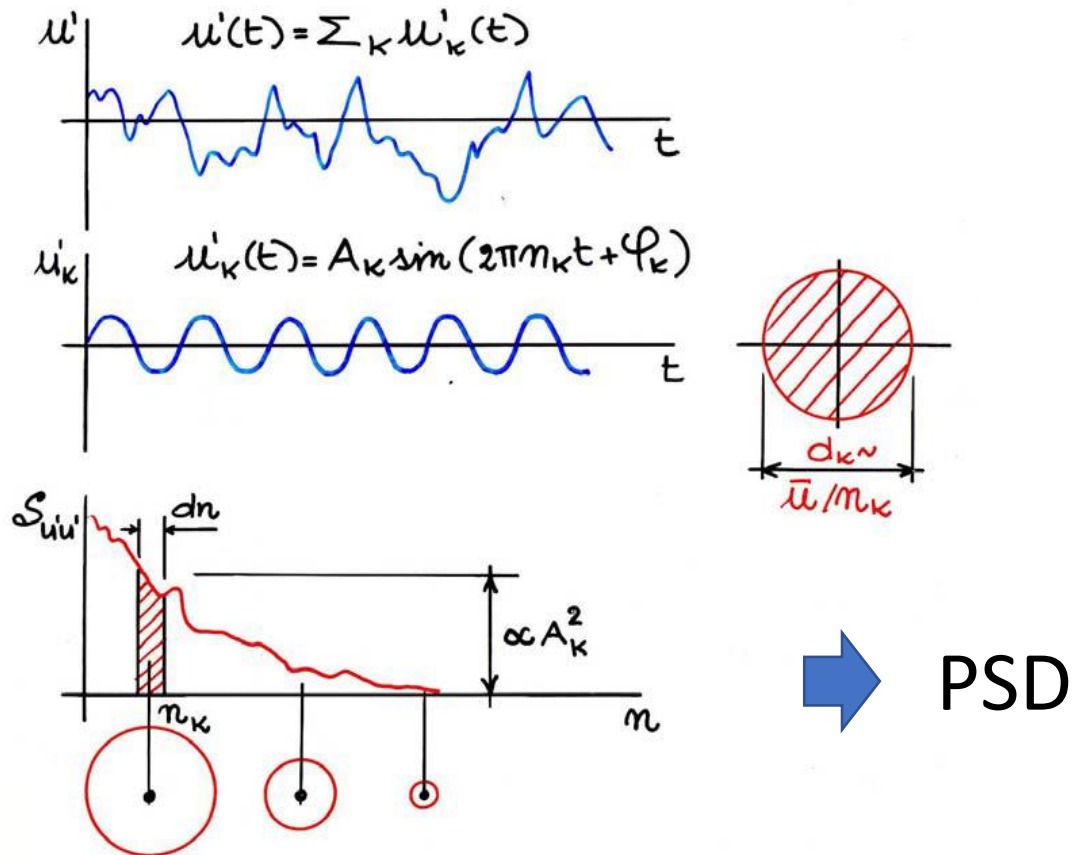
$$I_2(z) = 0,75 I_v(z)$$

$$I_3(z) = 0,50 I_v(z)$$

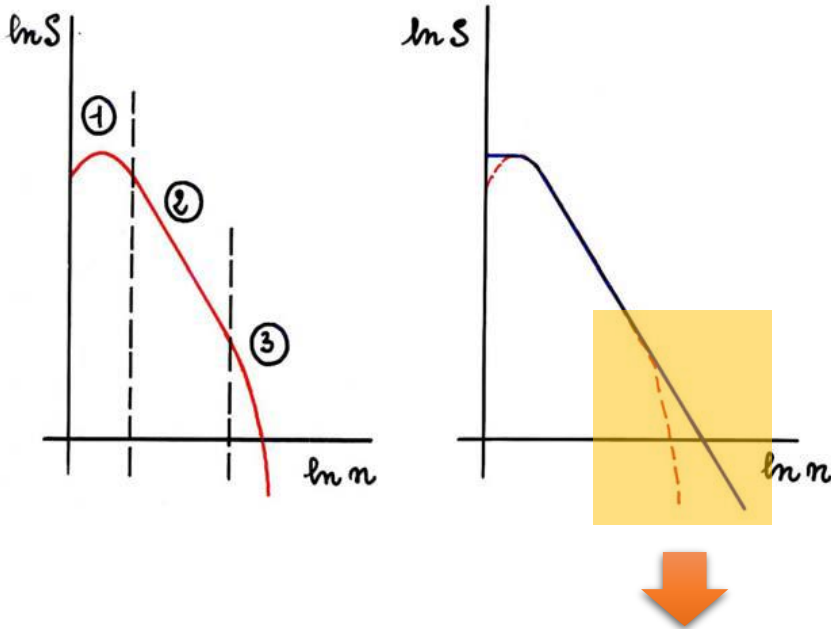


Lunghezza di scala integrale

La turbolenza atmosferica può essere pensata come la somma di diverse componenti armoniche di frequenza n_k a ciascuna delle quali è associato un vortice di forma sferica avente diametro $d_k \sim \bar{u}/n_k$. Viene comunemente rappresentata nel dominio della frequenza in termini di densità di potenza spettrale (Power Spectral Density, PSD).



Energy cascade



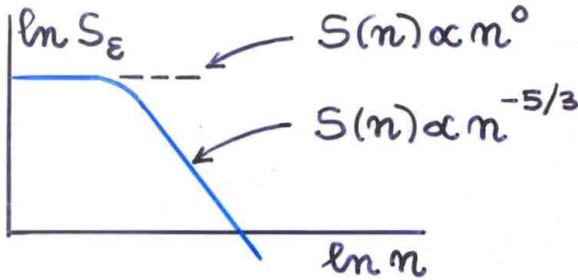
- (1) Fenomeni convettivi di natura termica e meccanica producono energia cinetica a bassa frequenza associata a vortici di grande dimensione.
- (2) Tale energia viene trasferita a vortici di dimensioni più piccole in un intervallo di frequenze noto come 'inertial sub-range', in cui non vi è né produzione né dissipazione di energia.
- (3) A frequenze alta i vortici di piccole dimensioni dissipano poi energia per fenomeni viscosi.

I modelli spettrali comunemente utilizzati in ingegneria del vento sovrastimano il contenuto energetico alle alte frequenze, si tratta di una semplificazione accettabile in quanto esso risulta essere basso



Lunghezza di scala integrale

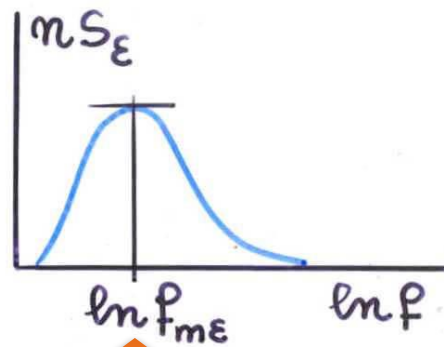
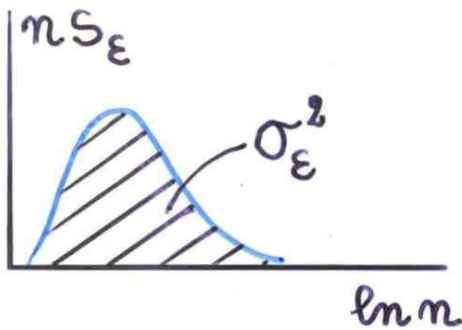
Solari & Piccardo 2001 (Appendice E)



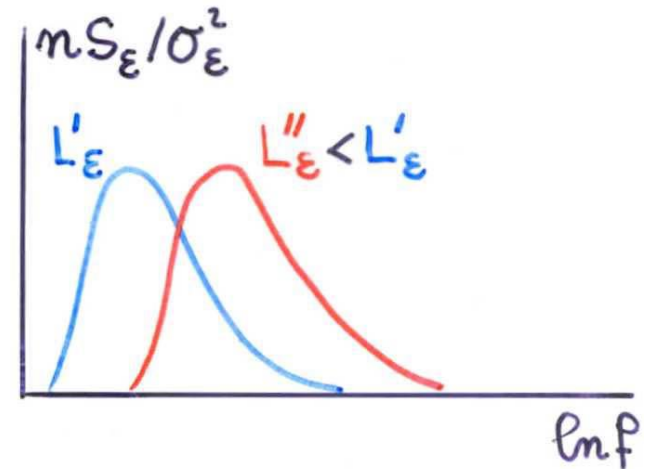
$$\frac{nS_\varepsilon(z, n)}{\sigma_\varepsilon^2} = \frac{d_\varepsilon n L_\varepsilon(z) / \bar{u}(z)}{[1 + 1,5 d_\varepsilon n L_\varepsilon(z) / \bar{u}(z)]^{-5/3}}$$

$$\varepsilon = u, v, w \quad d_u = 6,868; d_v = d_w = 9,434$$

L_ε è la lunghezza di scala integrale della componente ε della turbolenza nella direzione x . Questa quantità rappresenta la dimensione media dei vortici associati alla componente ε nella direzione x .



$$f_{m\varepsilon} = \frac{1}{d_\varepsilon} \frac{z}{L_\varepsilon(z)}$$



Lunghezza di scala integrale

Par. 3.2.6

$$L_v(z) = \bar{L} \left(\frac{z_{min}}{\bar{z}} \right)^\kappa \quad \text{per } z \leq z_{min}$$

$$L_v(z) = \bar{L} \left(\frac{z}{\bar{z}} \right)^\kappa \quad \text{per } z > z_{min}$$

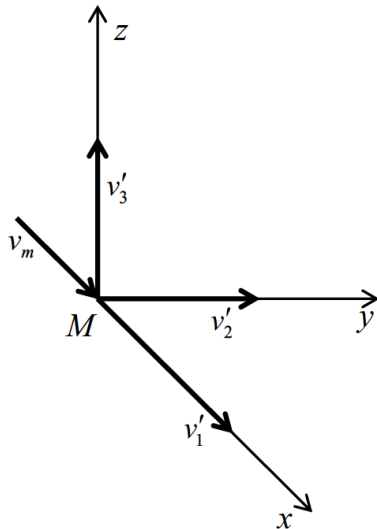
Tabella 3.IV – Valori del coefficiente κ per le diverse categorie di esposizione.

Categorie di esposizione del sito	κ
I	0,44
II	0,52
III	0,55
IV	0,61
V	0,65

$\bar{z} = 200$ m è un' altezza di riferimento

$\bar{L} = 300$ m è una lunghezza di riferimento

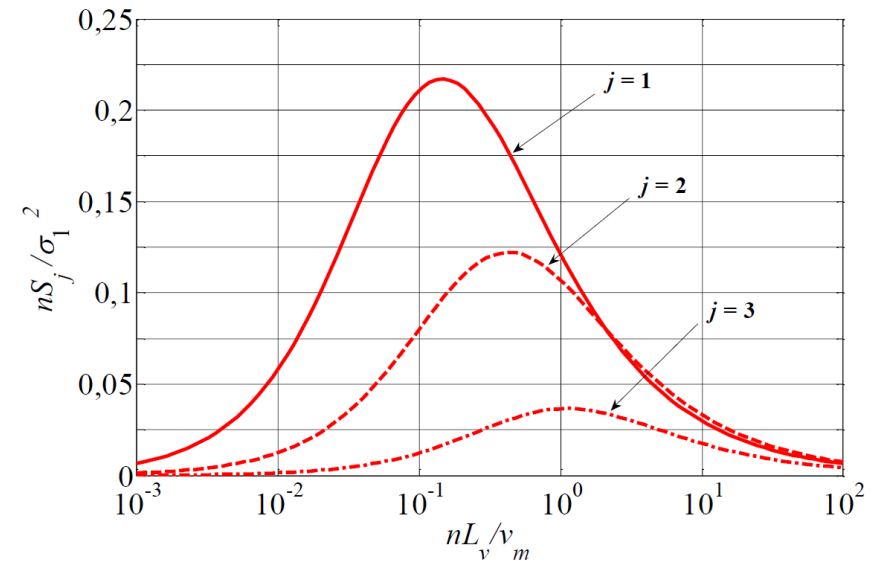
Appendice E



$$L_1(z) = L_v(z)$$

$$L_2(z) = 0,25L_v(z)$$

$$L_3(z) = 0,10L_v(z)$$



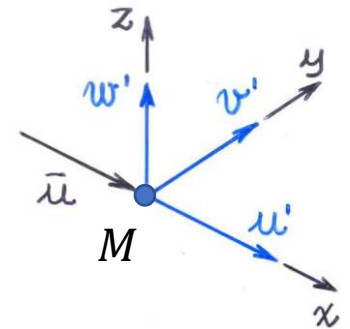
Correlazione tra le componenti

Dall'evidenza teorica e sperimentale si trova che in un punto M dello spazio:

$$u', v' \text{ statistically independent} \Rightarrow \overline{u'v'} = 0, S_{uv}(n) = 0$$

$$v'w' \text{ statistically independent} \Rightarrow \overline{v'w'} = 0, S_{vw}(n) = 0$$

$$u', w' \text{ strongly correlated, with } \overline{u'w'} = -u_*^2$$



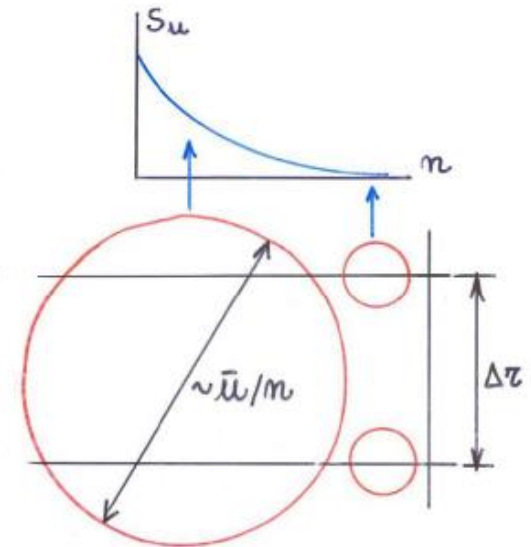
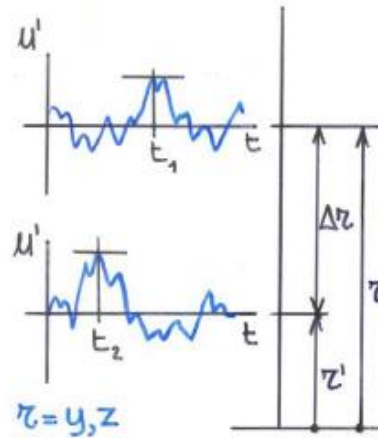
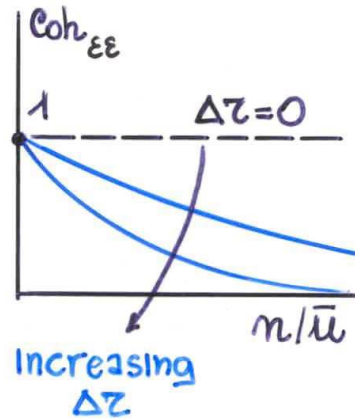
Con S_{uv} e S_{vw} le densità di potenza spettrale incrociate rispettivamente tra le componenti u, v e v, w (cross-power spectral density CPSD).

Prendendo in esame una componente ε della turbolenza in due punti distinti M e M' su di una linea distanti tra loro Δr si ha:

$$S_\varepsilon(M, M', n) = \sqrt{S_\varepsilon(z, n)S_\varepsilon(z', n)}Coh_\varepsilon(M, M', n)$$



$Coh_\varepsilon(M, M', n)$
funzione di coerenza
tra $\varepsilon(M, t)$ e $\varepsilon(M', t)$



Correlazione tra le componenti

Appendice E

$$Coh_{jj}(M, M', n) = \exp \left\{ - \frac{2 \cdot n \cdot \sqrt{C_{jx}^2 \cdot |x - x'|^2 + C_{jy}^2 \cdot |y - y'|^2 + C_{jz}^2 \cdot |z - z'|^2}}{v_m(z) + v_m(z')} \right\} \quad (j = 1, 2, 3)$$

M e M' sono due punti di coordinate (x, y, z) e (x', y', z')

C_{jr} sono i coefficienti di decadimento esponenziale della componente $j = 1, 2, 3$ della turbolenza, nella direzione $r = x, y, z$

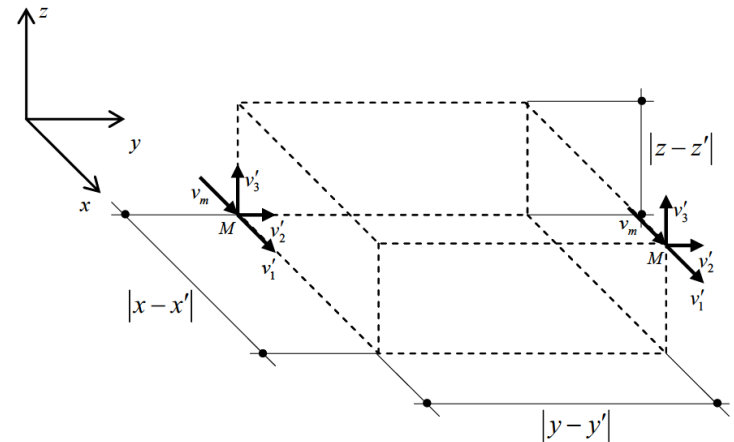
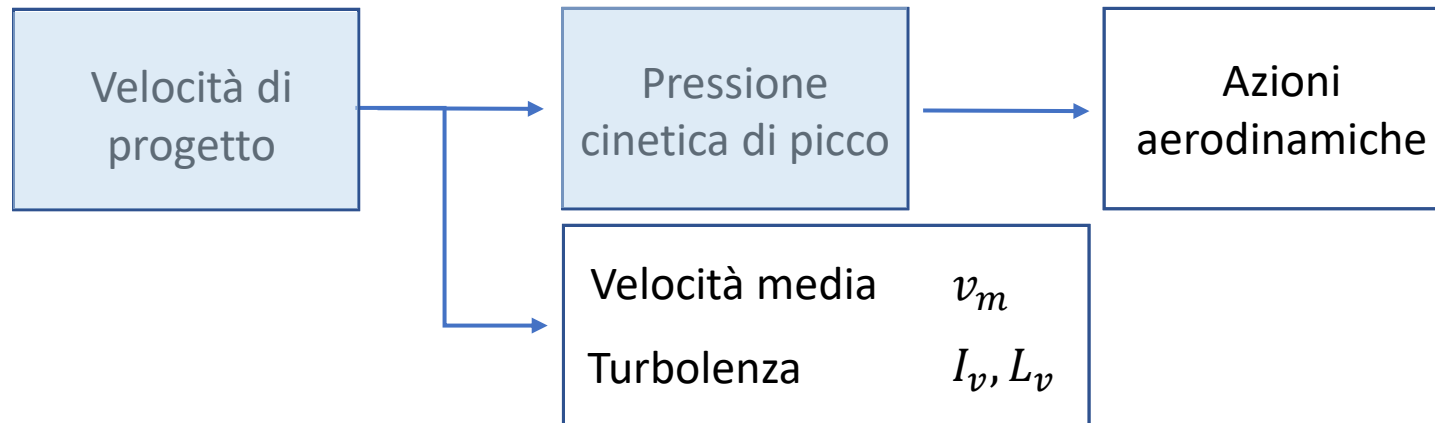


Tabella E.I - Coefficienti di decadimento esponenziale della turbolenza.

C_{1x}	C_{1y}	C_{1z}	C_{2x}	C_{2y}	C_{2z}	C_{3x}	C_{3y}	C_{3z}
3	10	10	3	6,5	6,5	0,5	6,5	3



Pressione cinetica di picco



Par. 3.2.7, Appendice F

La **pressione cinetica di picco** del vento q_p è il valore atteso della pressione cinetica massima del vento nell'intervallo di tempo $T = 10$ minuti. Essa dipende dall'**altezza z sul suolo**, dalla **ventosità della zona** in esame, dal **periodo di ritorno di progetto**, dalle **caratteristiche locali** del sito ove sorge la costruzione e dalla **densità dell'aria ρ** .

$$q_p = \frac{1}{2} \rho v_p^2$$

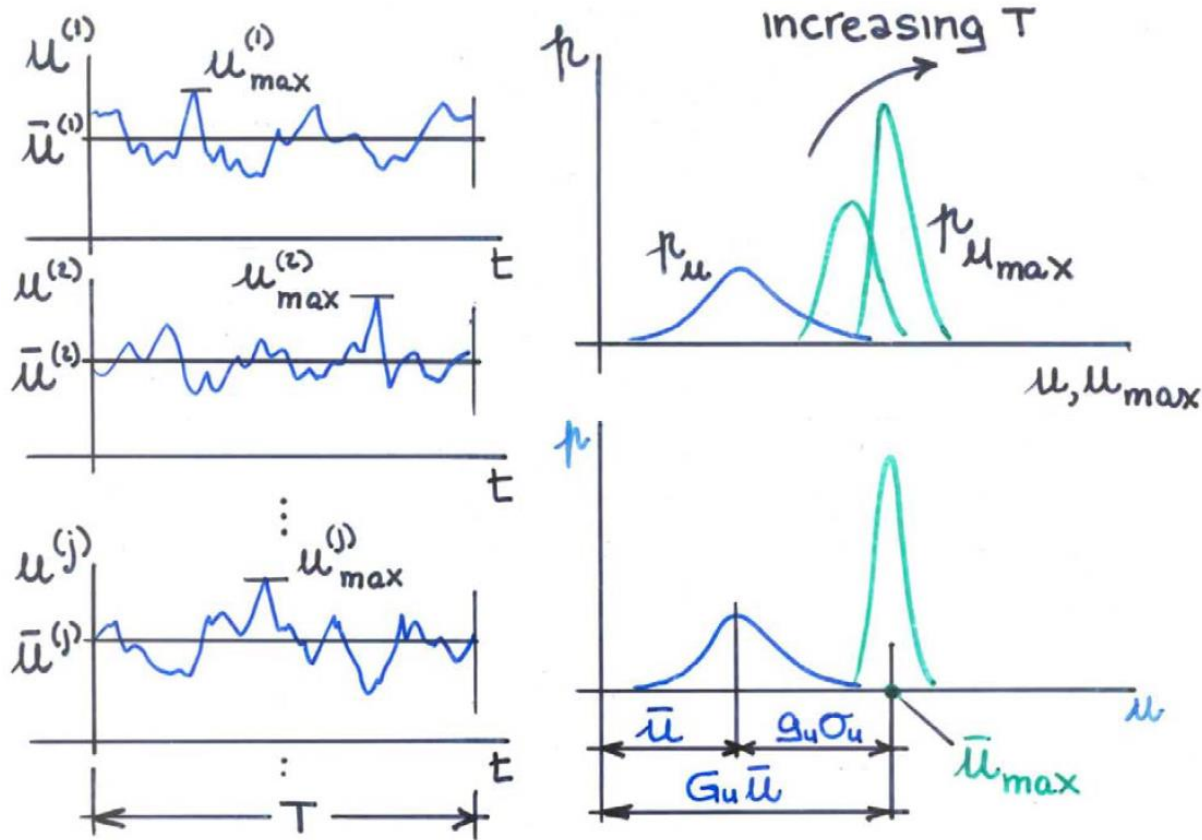
$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

v_p velocità di picco del vento



Velocità di picco

La velocità di picco del vento v_p è il valore atteso della velocità massima del vento nell'intervallo di tempo $T = 10$ minuti, mediato su un intervallo di tempo τ molto minore di T .



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

$$(\bar{u}_{max} = v_p)$$

Maximum wind velocity

$$\bar{u}_{max} = \bar{u} + g_u \sigma_u = \bar{u} \left(1 + g_u \frac{\sigma_u}{\bar{u}} \right) = \bar{u} (1 + g_u I_u)$$

G_u Gust factor



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

Maximum wind velocity

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

$$G_u = 1 + g_u I_u$$

Closed form solution (Solari 1993) (Appendice F)

$$g_u(z) = \sqrt{P_0(z)} \sqrt{1.175 + 2 \ln \left[\tilde{T} \sqrt{\frac{P_1(z)}{P_0(z)}} \right]}$$

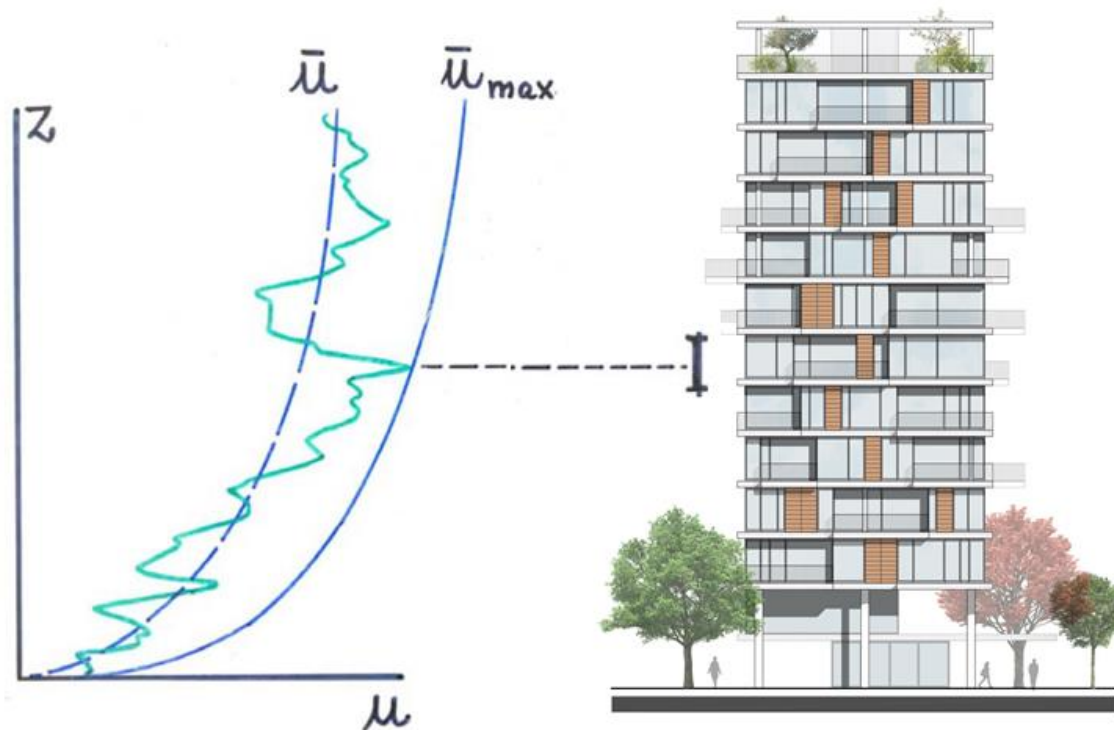
$$P_0 = \frac{1}{1 + 0.56 \tilde{\tau}^{0.74}}; \quad \frac{P_1}{P_0} = \frac{0.032}{\tilde{\tau}^{1.44}}; \quad \tilde{T} = \frac{T \bar{u}(z)}{L_u(z)}; \quad \tilde{\tau} = \frac{\tau \bar{u}(z)}{L_u(z)}$$



Velocità di picco

È importante osservare che, a causa della parziale correlazione della turbolenza, la velocità di picco non si manifesta in contemporanea ad ogni quota. Pertanto progettare una struttura assumendo la velocità di picco lungo tutto lo sviluppo della costruzione è eccessivamente cautelativo e non realistico.

Al contrario, è corretto ed opportuno considerare la velocità di picco quando si tratta di elementi, strutturali e non, di piccole dimensioni.



Pressione cinetica di picco

Velocità di picco $v_p = v_m(z)G_v(z)$ \rightarrow Pressione cinetica di picco $q_p = \frac{1}{2}\rho v_p^2 = \frac{1}{2}\rho[v_m(z)G_v(z)]^2$

Andando a sostituire le seguenti quantità:

$v_m(z) = v_r c_m(z)$; (Par. 3.2.5)

$G_v(z) = 1 + g_v(z)I_v(z)P_v(z)$ (Appendice F)

$$g_v(z) = \sqrt{2 \cdot \ln[v_v(z) \cdot T]} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \cdot \ln[v_v(z) \cdot T]}}$$

$$v_v(z) = 0,179 \frac{v_m(z)}{L_v(z)} \cdot \left[\frac{L_v(z)}{\tau \cdot v_m(z)} \right]^{0,72}$$

$$P_v(z) = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,56 \cdot \left[\frac{\tau \cdot v_m(z)}{L_v(z)} \right]^{0,74}}}$$

È possibile riscrivere la pressione cinetica di picco come:

Ipotesi di piccola turbolenza

$\rightarrow q_p(z) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) \cdot \left[1 + 2 \cdot \cancel{g_v(z)} \cdot I_v(z) \cdot \cancel{P_v(z)} + \cancel{g_v^2(z)} \cdot I_v^2(z) \cdot \cancel{P_v^2(z)} \right] \cong 0$

$= 3,5$ $= 1$



Pressione cinetica di picco

Andando a sostituire c_m ed I_v rispettivamente come da come da Par. 3.2.5 e come da Par. 3.2.6 si ottiene:

$$q_p = \frac{1}{2} \rho v_r^2 c_e(z)$$

Con c_e il **coefficiente di esposizione** (Par. 3.2.7):

$$c_e(z) = k_r^2 \ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right) c_t(z_{min}) \left[\ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right) c_t(z_{min}) + 7 \right] \quad \text{per } z \leq z_{min}$$

$$c_e(z) = k_r^2 \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) c_t(z) \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) c_t(z) + 7 \right] \quad \text{per } z > z_{min}$$



Questa espressione fornisce di norma una stima a favore di sicurezza della pressione cinetica di picco del vento;



Nelle Istruzioni, la pressione cinetica di picco del vento è dapprima trasformata in azioni aerodinamiche di picco (Par. 3.3), poi in azioni statiche equivalenti (Pr. 3.4), attraverso l'introduzione di coefficienti moltiplicativi, rispettivamente di natura aerodinamica e dinamica;



La frequenza attesa delle azioni statiche equivalenti è generalmente molto maggiore della frequenza attesa della turbolenza. L'espressione fornita tiene conto di questa circostanza nella prospettiva di essere usate per valutare le azioni del vento sulle costruzioni. In tale prospettiva, non è lecito sostituire l'espressione fornita con la precedente.



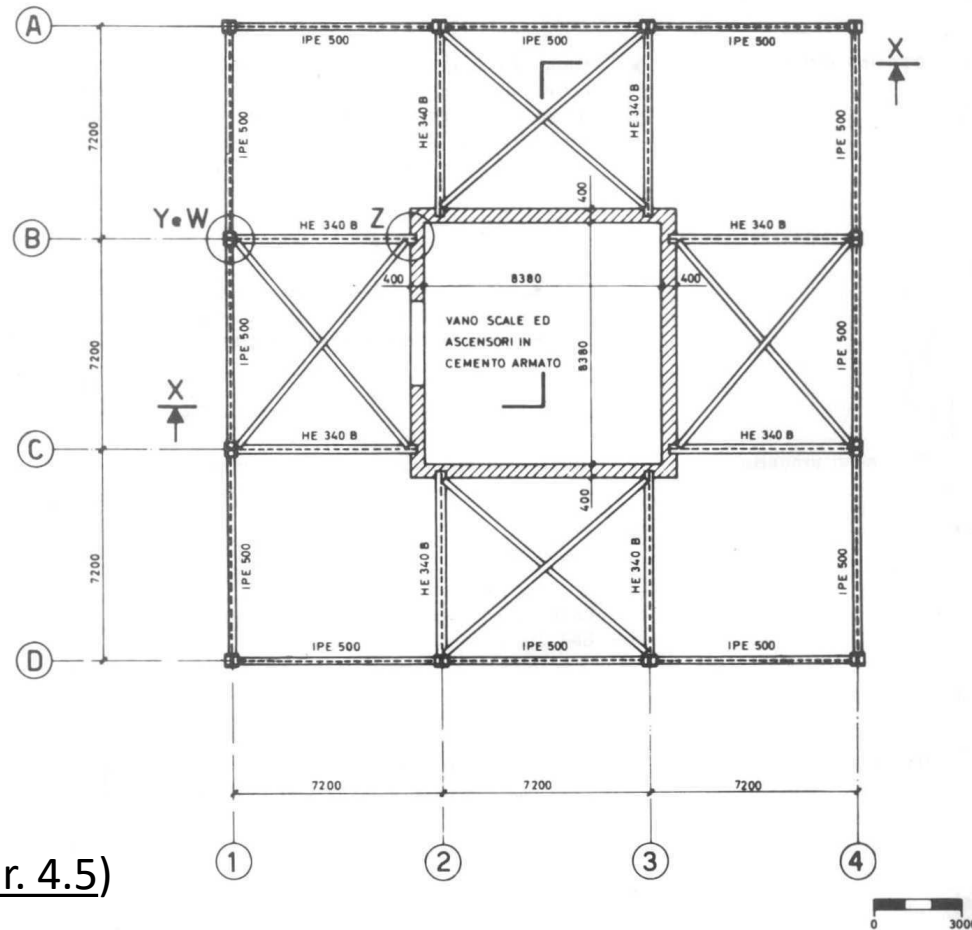
Applicazione



Esempio: edificio multipiano per uffici

Consideriamo a titolo di esempio un edificio di 20 piani destinato ad uffici (quaderni tecnici *Particolari costruttivi di strutture in acciaio*, editi dal CISIA).

L'edificio ha pianta quadrata con lato di 21,6 m. La copertura è piana e posta alla quota di 67,44 m. Lungo il suo perimetro è presente un parapetto alto 1 m.

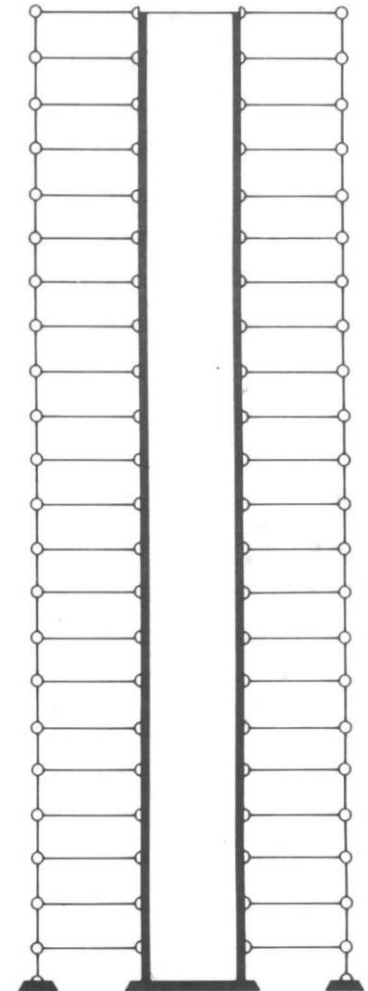
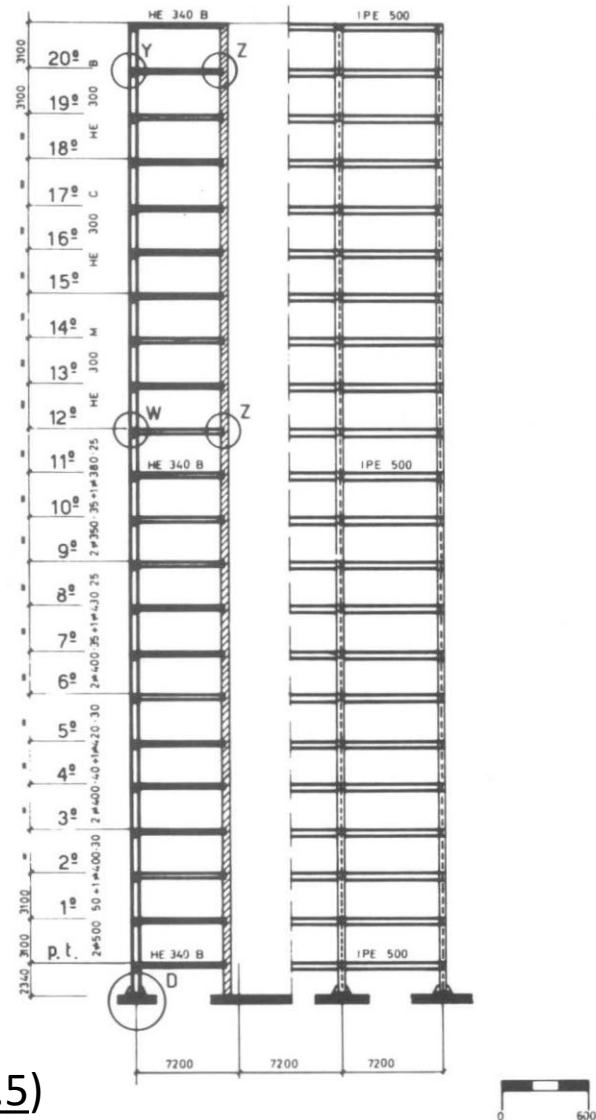


Esempio: edificio multipiano per uffici

Lo schema statico è costituito da un nucleo centrale in cemento armato e da una struttura metallica con colonne pendolari e travi appoggiate.

Il nucleo in cemento armato contiene il vano scale e ascensori; è destinato ad assorbire la totalità delle azioni orizzontali.

Tutti i collegamenti presenti nella struttura metallica sono bullonati ed eseguiti in opera. I solai sono realizzati mediante piastre in cemento armato misto a laterizio.



Supponiamo che l'edificio che intendiamo progettare sia **ubicato nell'Italia Centrale sul livello del mare**. Occorre valutare:

- Velocità base di riferimento;
- Periodo di ritorno e velocità di riferimento di progetto;
- Categoria di esposizione;
- Coefficiente di topografia;
- Velocità media;
- Turbolenza;
- Pressione cinetica di picco.



Esempio: edificio multipiano per uffici

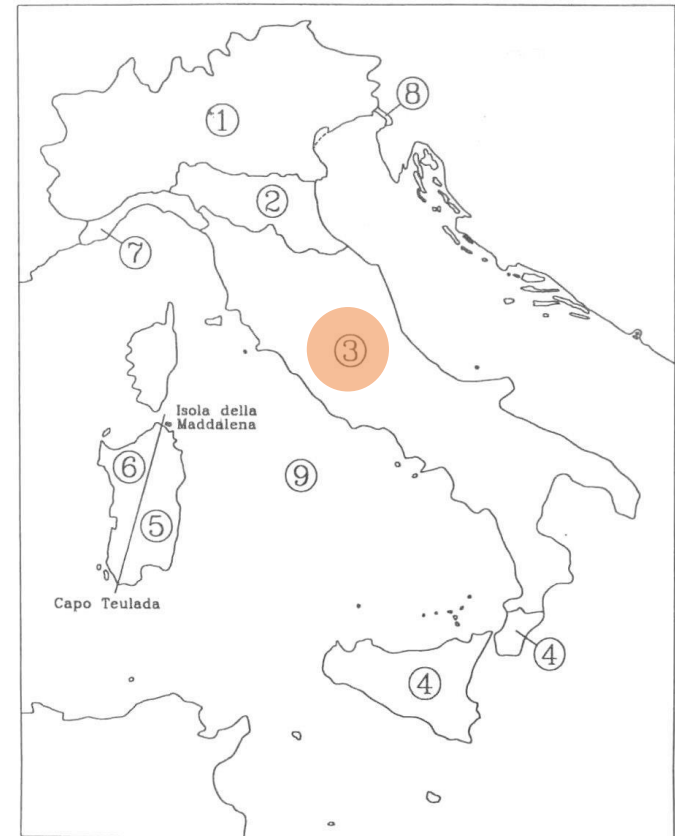
VELOCITÀ BASE DI RIFERIMENTO (Par. 3.2.1)

$$(3.1) \quad v_b = v_{b,0} c_a$$

La costruzione sorge in Zona 3 sul livello del mare ($a_s = 0$ m)

Tabella 3.I – Valori dei parametri $v_{b,0}$, a_0 e k_a per le diverse zone italiane.

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



$$(3.2) \quad a_s < a_0 \quad \rightarrow \quad c_a = 1$$

$$v_b = v_{b,0} = 27 \text{ m/s}$$

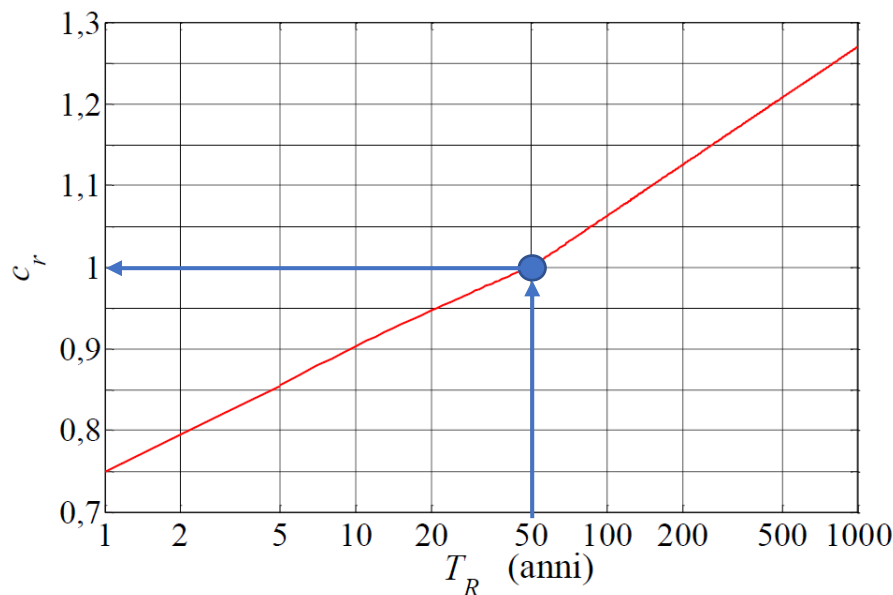


Esempio: edificio multipiano per uffici

PERIODO DI RITORNO E VELOCITÀ DI RIFERIMENTO DI PROGETTO (Par. 3.2.2, Appendice A)

Si tratta di una costruzione ordinaria con vita nominale $V_N = 50$ anni. Pertanto:

Proprietà della costruzione	T_0 (anni)
Costruzione provvisoria, in fase di realizzazione o di demolizione, purché il periodo T in cui sussiste tale stato sia: $T \leq 3$ mesi $T \leq 1$ anno Per le costruzioni provvisorie, è necessario che sia minore di T la somma di tutti i successivi periodi nei quali la costruzione è riutilizzata.	5 10
Costruzione ordinaria	50
Costruzione di rilevante importanza	100
Costruzione di importanza strategica	200



$$(A.1) \quad T_R = T_{R,0} = \max\{T_0, V_N\} = 50 \text{ anni}$$

$$(3.4) \quad c_r = 1$$



$$(3.3) \quad v_r = v_b = 27 \text{ m/s}$$



Esempio: edificio multipiano per uffici

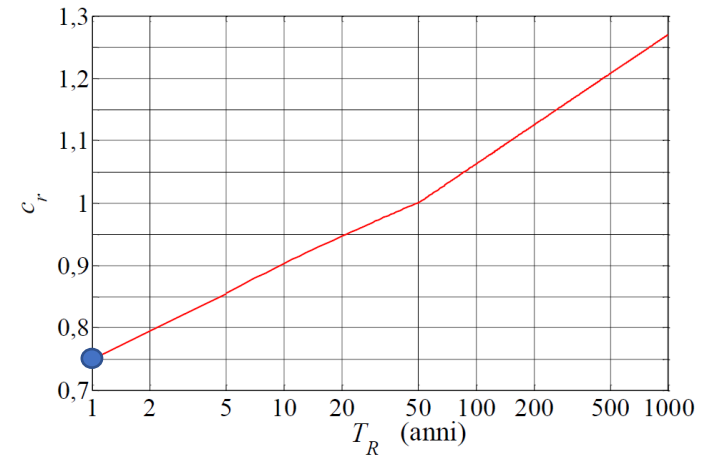
PERIODO DI RITORNO E VELOCITÀ DI RIFERIMENTO DI PROGETTO (Par. 3.2.2, Appendice A)

➔ Per quanto concerne le analisi di abitabilità la velocità del vento viene valutata in corrispondenza di $T_R = 1$ anno. Pertanto:

$$c_r = 0,75$$



$$v_r = 0,75v_b = 20,25 \text{ m/s}$$



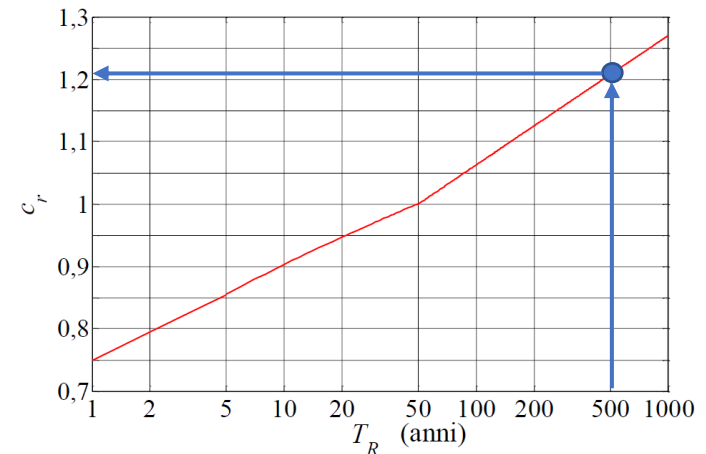
➔ Per eventuali analisi relative al distacco dei vortici e/o altri fenomeni aeroelastici si raccomanda di valutare la velocità del vento in corrispondenza di un periodo di ritorno di progetto $T_R = 10T_{R,0}$. Pertanto:

$$T_R = 10T_{R,0} = 500 \text{ anni}$$

$$c_r = 1,207$$



$$v_r = 1,207v_b = 32,59 \text{ m/s}$$



Esempio: edificio multipiano per uffici

CATEGORIA DI ESPOSIZIONE (Par. 3.2.3)

In mancanza di più approfondite valutazioni si assume che la costruzione sia ubicata in classe di rugosità C e che sorga a 20 km dalla costa

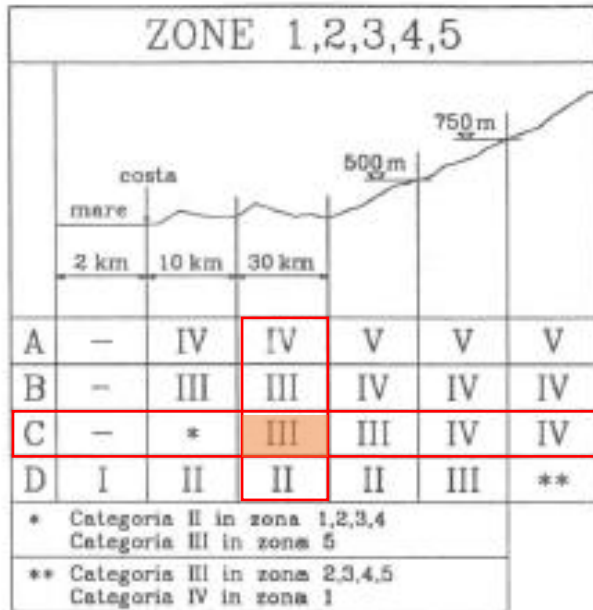


Figura 3.3

Tabella 3.III - Classi di rugosità del terreno.

Classi di rugosità	Descrizione
A	Area urbana, in cui almeno il 15% della superficie del terreno sia coperto da edifici la cui altezza media supera i 15 m
B	Area urbana (non di classe A), suburbana, industriale o boschiva
C	Area con ostacoli diffusi (quali alberi, case, muri, recinzioni,); aree con rugosità non riconducibile alle Classi A, B, D.
D	a) Mare e relativa fascia costiera (entro 2 km dalla riva) b) Lago (con larghezza pari ad almeno 1 km) e relativa fascia costiera (entro 1 km dalla riva) c) Area priva di ostacoli o con al più rari ostacoli isolati (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, pascoli, zone paludose o sabbiose, superfici innevate o ghiacciate, ...)

Tabella 3.II – Valori dei parametri k_r , z_0 , e z_{min} per le diverse categorie di esposizione.

Categorie di esposizione del sito	k_r	z_0 (m)	z_{min} (m)
I	0,17	0,01	2
II	0,19	0,05	4
III	0,20	0,10	5
IV	0,22	0,30	8
V	0,23	0,70	12

COEFFICIENTE DI TOPOGRAFIA (Par. 3.2.4)

In mancanza di più approfondite valutazioni si assume che la costruzione sia posta in zona pianeggiante. Pertanto:

➔ $c_t = 1$



Esempio: edificio multipiano per uffici

VELOCITÀ MEDIA (Par. 3.2.5)

Il profilo verticale della velocità media del vento è dato da:

(3.5)

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



Noti $k_r = 0,20$ $z_0 = 0,10$ m e $z_{min} = 5$ m
si ha:

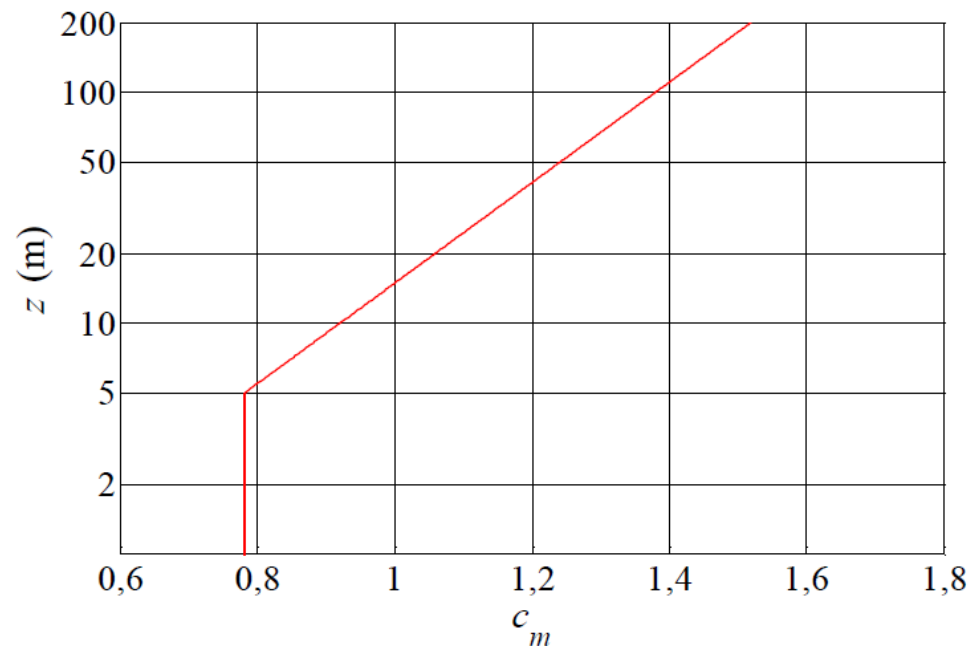
$$c_m(z) = 0,782 \quad \text{per } z \leq 5 \text{ m}$$

$$c_m(z) = 0,20 \ln \left(\frac{z}{0,10} \right) \quad \text{per } z > 5 \text{ m}$$

(3.6)

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

$$c_m(z) = k_r \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) c_t(z) \quad \text{per } z > z_{min}$$



Esempio: edificio multipiano per uffici

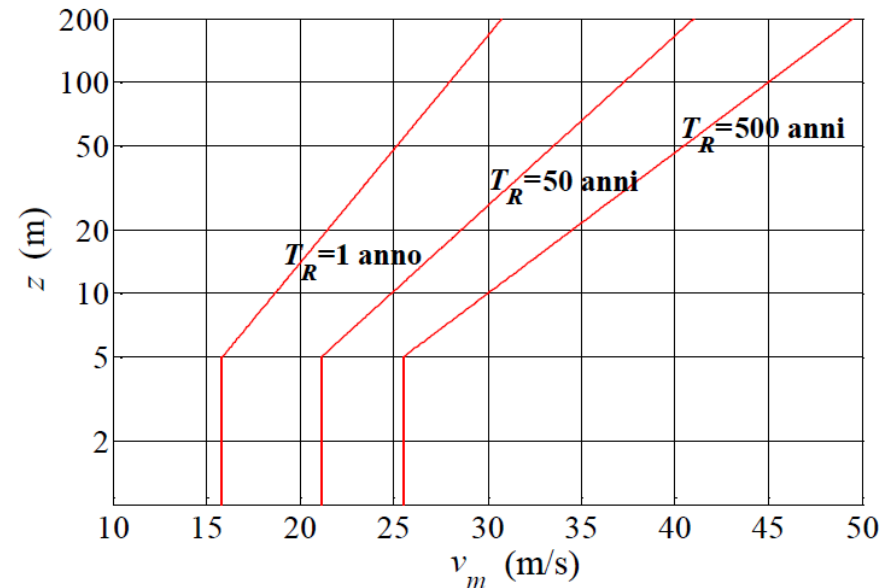
VELOCITÀ MEDIA (Par. 3.2.5)

Il profilo verticale della velocità media del vento è dato da: $v_m(z) = v_r c_m(z)$

$$T_R = 50 \text{ anni} \left\{ \begin{array}{ll} v_m(z) = 21,11 \text{ m/s} & \text{per } z \leq 5 \text{ m} \\ v_m(z) = 5,4 \ln\left(\frac{z}{0,10}\right) & \text{per } z > 5 \text{ m} \end{array} \right.$$

$$T_R = 1 \text{ anno} \left\{ \begin{array}{ll} v_m(z) = 15,84 \text{ m/s} & \text{per } z \leq 5 \text{ m} \\ v_m(z) = 4,05 \ln\left(\frac{z}{0,10}\right) & \text{per } z > 5 \text{ m} \end{array} \right.$$

$$T_R = 500 \text{ anni} \left\{ \begin{array}{ll} v_m(z) = 25,48 \text{ m/s} & \text{per } z \leq 5 \text{ m} \\ v_m(z) = 6,52 \ln\left(\frac{z}{0,10}\right) & \text{per } z > 5 \text{ m} \end{array} \right.$$



Esempio: edificio multipiano per uffici

TURBOLENZA ATMOSFERICA (Par. 3.2.6) Noti $k_r = 0,20$ $z_0 = 0,10$ m e $z_{min} = 5$ m

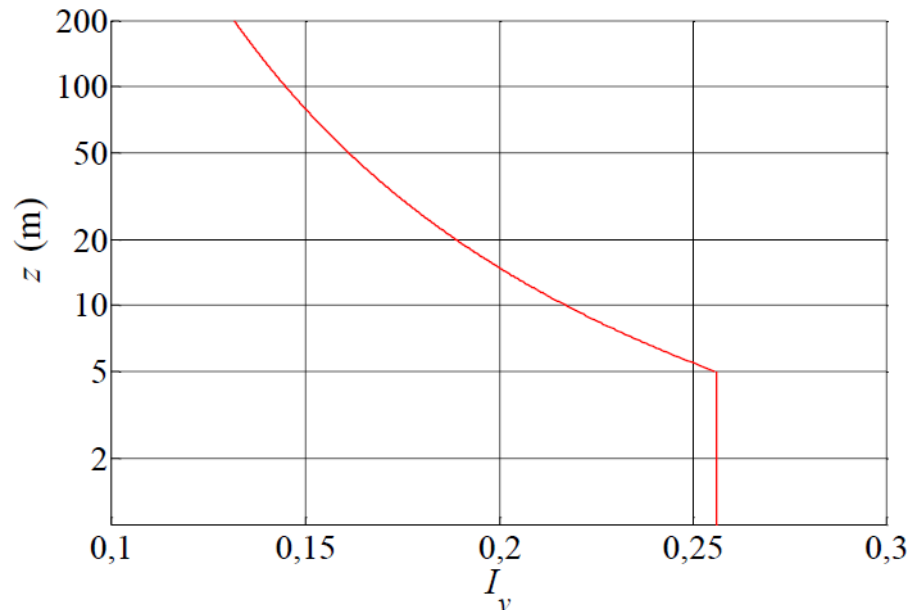
Intensità di turbolenza:

(3.7)

$$I_v(z) = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right) c_t(z_{min})} \quad \text{per } z \leq z_{min}$$
$$I_v(z) = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) c_t(z)} \quad \text{per } z > z_{min}$$

➔

$$I_v(z) = 0,256 \quad \text{per } z \leq 5 \text{ m}$$
$$I_v(z) = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{0,1}\right)} \quad \text{per } z > 5 \text{ m}$$



Esempio: edificio multipiano per uffici

TURBOLENZA ATMOSFERICA (Par. 3.2.6) Noti $k_r = 0,20$ $z_0 = 0,10$ m e $z_{min} = 5$ m

Lunghezza di scala integrale:

(3.8)

$$L_v(z) = \bar{L} \left(\frac{z_{min}}{\bar{z}} \right)^\kappa \quad \text{per } z \leq z_{min}$$
$$L_v(z) = \bar{L} \left(\frac{z}{\bar{z}} \right)^\kappa \quad \text{per } z > z_{min}$$

➔

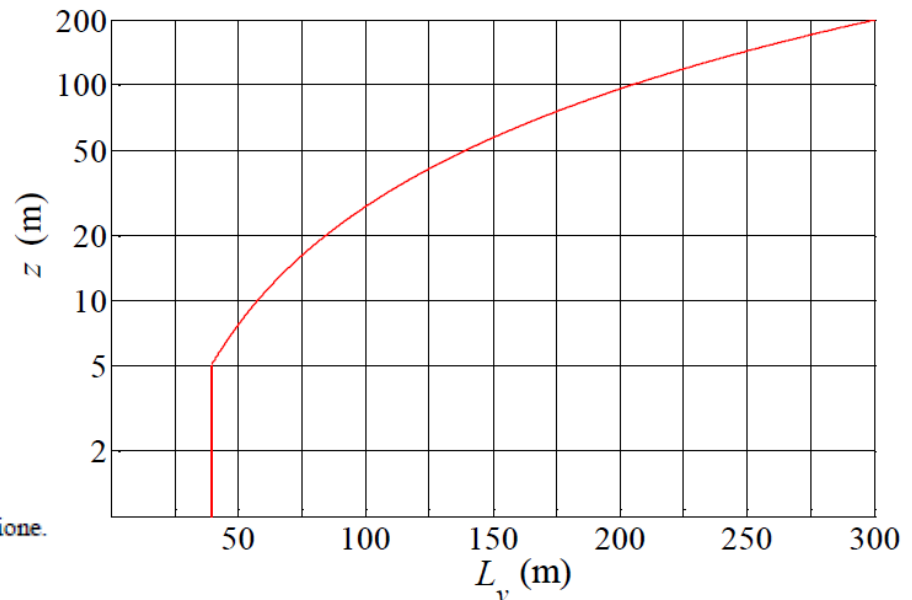
$$L_v(z) = 39,44 \text{ m} \quad \text{per } z \leq 5 \text{ m}$$
$$L_v(z) = 300 \left(\frac{z}{200} \right)^{0,55} \quad \text{per } z > 5 \text{ m}$$

$\bar{z} = 200$ m è un' altezza di riferimento

$\bar{L} = 300$ m è una lunghezza di riferimento

Categorie di esposizione del sito	κ
I	0,44
II	0,52
III	0,55
IV	0,61
V	0,65

Tabella 3.IV – Valori del coefficiente κ per le diverse categorie di esposizione.



Esempio: edificio multipiano per uffici

PRESSIONE CINETICA DI PICCO (Par. 3.2.7)

$$(3.9) \quad q_p = \frac{1}{2} \rho v_r^2 c_e(z)$$

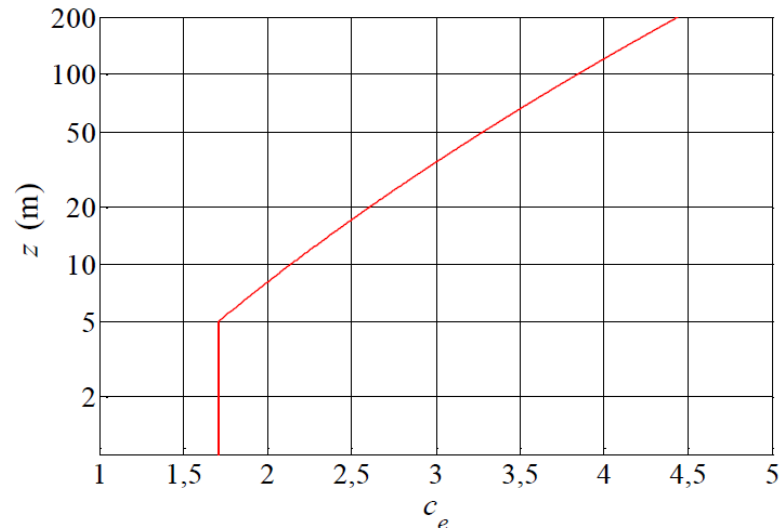
Noti $k_r = 0,20$ $z_0 = 0,10$ m e $z_{min} = 5$ m, ed essendo $\rho = 1,25$ kg/m^3 , si valuta il coefficiente di esposizione:

$$(3.10) \quad c_e(z_{min}) = k_r^2 \ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right) c_t(z_{min}) \left[\ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right) c_t(z_{min}) + 7 \right] \quad \text{per } z \leq z_{min}$$
$$c_e(z) = k_r^2 \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) c_t(z) \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) c_t(z) + 7 \right] \quad \text{per } z > z_{min}$$



$$c_e(z) = 1,708 \quad \text{per } z \leq 5 \text{ m}$$

$$c_e(z) = 0,04 \ln\left(\frac{z}{0,1}\right) \left[\ln\left(\frac{z}{0,1}\right) + 7 \right] \quad \text{per } z > 5 \text{ m}$$



Esempio: edificio multipiano per uffici

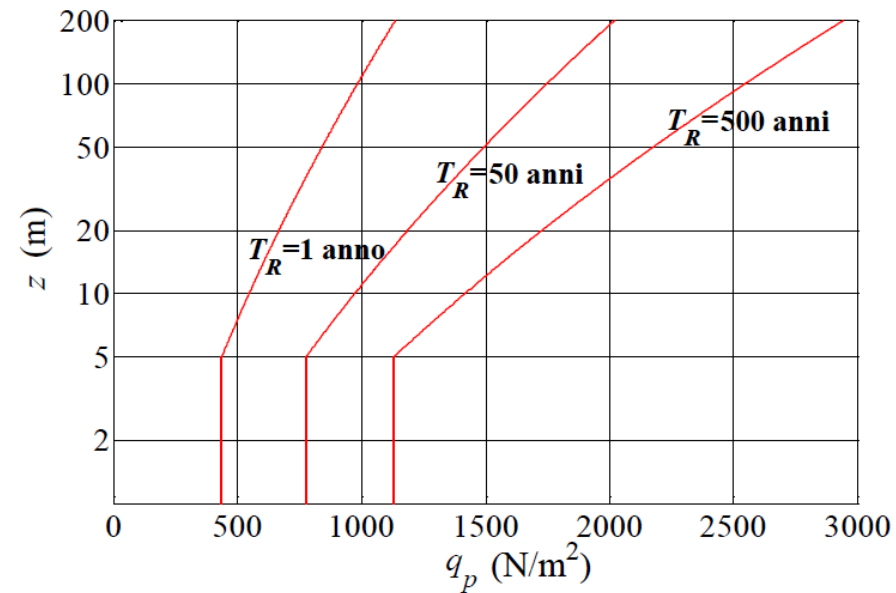
PRESSIONE CINETICA DI PICCO (Par. 3.2.7)

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

$$T_R = 1 \text{ anno} \left\{ \begin{array}{l} q_p(z) = 437,74 \text{ N/m}^2 \quad \text{per } z \leq 5 \text{ m} \\ q_p(z) = 10,25 \ln\left(\frac{z}{0,1}\right) \left[\ln\left(\frac{z}{0,1}\right) + 7 \right] \\ \quad \text{per } z > 5 \text{ m} \end{array} \right.$$

$$T_R = 500 \text{ anni} \left\{ \begin{array}{l} q_p(z) = 1133,73 \text{ N/m}^2 \quad \text{per } z \leq 5 \text{ m} \\ q_p(z) = 26,55 \ln\left(\frac{z}{0,1}\right) \left[\ln\left(\frac{z}{0,1}\right) + 7 \right] \\ \quad \text{per } z > 5 \text{ m} \end{array} \right.$$

$$q_p = \frac{1}{2} \rho v_b^2 c_r^2 c_e(z)$$





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. Giuseppe Piccardo



**Università
di Genova**

