

Calcolo della pressione del vento

file: F:\Google Drive 2019\Programmi\VERIFICA\PaliAntenne\Esempio 412 v31\Esempio 412 v31

DATA: 10 gennaio 2022

Normativa di riferimento: D.M. 17/01/2018 - Circolare 21/01/2019 - CNR-DT 207/2018

Periodo di ritorno = 50 anni

$v_{b,0}$ = 27 m/s (velocità base di rif. a livello del mare, Tab. 3.3.I)
 a_0 = 500 m (Tab. 3.3.I)
 k_s = 0.37 (Tab. 3.3.I)
 a_s = 0 m (altitudine sul livello del mare)
 v_r = 27.00 m/s (velocità di riferimento con periodo di ritorno indicato § 3.3.2)
 q_r = 455.63 m/s (pressione cinetica di riferimento § 3.3.6)

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

Categoria di esposizione: III

h = 30.0 m (altezza dell'edificio)
 b = 0.7 m (larghezza dell'edificio)
 d = 0.7 m (profondità dell'edificio)
 k_r = 0.20 (Tab. 3.3.II)
 z_0 = 0.10 m (Tab. 3.3.II)
 z_{min} = 5 (Tab. 3.3.II)
 c_t = 1 (coefficiente di topografia - § 3.3.7)
 c_d - il coefficiente dinamico viene definito nel seguito
 $c_e(h)$ = 2.90 (coefficiente di esposizione - § 3.3.7)

Pressioni minime e massime, a meno del coefficiente di forma

p_{min} = 777.99 N/m² (pressione a $z = z_{min}$ - § 3.3.4)

p_{max} = 1320.58 N/m² (pressione a $z = h$ - § 3.3.4)

Strutture snelle: valutazione delle forze per unità di lunghezza

nel seguito si fa riferimento alle norme CNR-DT 207

$F_x(z) = q(z) \cdot l \cdot c_{fx0} \cdot \psi_\lambda \cdot c_d$ - equazioni 3.14a + 3.19 + G.19 (rel.1)

dove: - $F_x(z)$ è la forza per unità di lunghezza in direzione x, espressa in N/m
(in direzione y la forza è F_y)
- $q(z)$ è la pressione cinetica di picco - eq. (3.9)
- l è la dimensione di riferimento

- c_{fX0} (indicativamente la larghezza b della struttura)
è il coefficiente di forza in direzione X (c_{fY0} in direzione Y)
- Ψ_λ è il coefficiente di snellezza (§ G.10.8)
- c_d è il coefficiente dinamico - eq. (3.17)

Struttura a sezione circolare - § G.10.6

dimensione di riferimento $l = b = 0.690$ m
 scabrezza k = $2.000E-05$ m
 velocità di riferim. di progetto $V_r(h) = 2.700E+01$ m/s (§ 3.2.2)
 coeff. di profilo medio del vento $C_m(h) = 1.141E+00$ (eqq. 3.6)
 velocità media del vento $V_m(h) = 3.080E+01$ m/s (eq. 3.5)
 numero di Reynolds alla quota h = $3.080E+06$ (eq. 3.18)

$k / b = 1.333E-05$
 $c_{fX0} = 0.617$ (eq. G.23)
 $\lambda = 39.122$ (Tabella G.20)
 $\Psi_\lambda = 0.848$ (eqq. G.24)

Coefficienti di forza

$c_{fX} = c_{fX0} \cdot \Psi_\lambda = 0.523$ (eqq. G.24)
 $c_{fY} = c_{fX}$

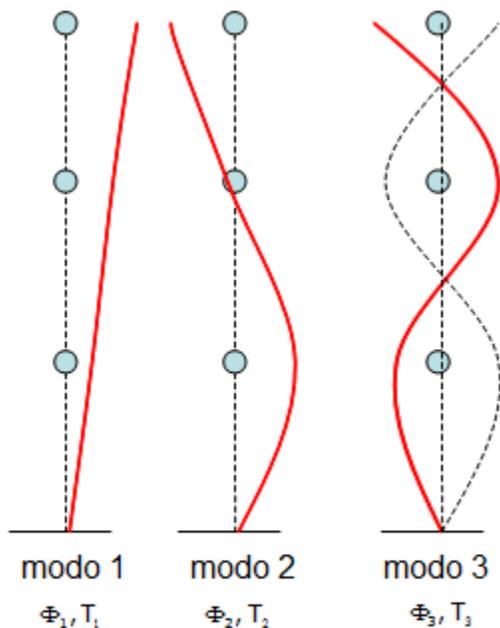
Le forze F_x , F_y nelle direzioni longitudinali e trasversali, sono calcolate con l'equazione (rel.1) applicando i coefficienti dinamici c_{dD} , c_{dL} calcolati nel seguito.

Parametri dinamici longitudinali e trasversali - Appendici I, L, O

massa equivalente per unità di lunghezza $m = 1.424E+02$ (kg massa/m) - modi 1, 2
 $m = 1.464E+02$ (kg massa/m) - modi 3, 4

frequenze proprie dei primi modi di vibrare (Hz)

modo n° 1 $9.034E-01$
 modo n° 2 $9.034E-01$
 modo n° 3 $2.807E+00$
 modo n° 4 $2.807E+00$
 modo n° 5 $7.373E+00$
 modo n° 6 $7.373E+00$



Rapporto di smorzamento relativo al critico - § I.6

rapporto di smorzamento strutturale $\xi_s = 0.002$ (*)

rapporto di smorzamento aerodinamico $\xi_a = 0.008$ (I.33)

rapporto di smorzamento aerodinamico totale $\xi = 0.01$

(*) vanno considerati in questo valore eventuali elementi dissipativi

Determinazione del coefficiente dinamico longitudinale - § 3.4.1 + Appendice L

equazione/rif.	parametro
figura L.2	h = 30.0 m b = 0.7 m z _e = 18.0 m
(3.5)	v _m (z _e) = 28.04 m/s
(3.7)	I _v (z _e) = 0.193
(3.8)	L _v (z _e) = 79.791 m
analisi f.e.m.	n _D = 0.903 Hz
(I.28)	$\xi = \xi_s + \xi_a = 0.01$
(L.4)	B ² = 0.670
(L.6)	S _D = 0.071
(L.9)	$\eta_h = 3.866$

	$\eta_b = 0.089$
(L.7)	$R_h = 0.225$
(L.8)	$R_b = 0.943$
(L.5)	$R_D^2 = 1.198$
(L.11)	$V_D = 0.723$
(L.10)	$g_D = 3.651$
(L.3)	$G_D = 2.922$
(L.2)	$c_{dD} = 1.244$

Il coefficiente dinamico c_{dD} sopra calcolato è stato utilizzato nell'equazione (rel.1) per il calcolo della forza F_x

Determinazione del coefficiente dinamico trasversale - § 3.4.1 + Appendice O

equazione/rif.	parametro
figure O.1 e O.2	$\phi = 0.0$ $h = 0.0$ $l = 30.0 \text{ m}$ $z_e = 18.0 \text{ m}$
Figura O.3	$k_L = 0.273$
(3.5)	$v_m(z_e) = 28.04 \text{ m/s}$
(3.7)	$I_v(z_e) = 0.193$
(3.8)	$L_v(z_e) = 79.791 \text{ m}$
Tabella O.VIII	$c_D = 0.523$ $c_L = 0.000$ $(c_D + c_L') = 0.523$
analisi f.e.m.	$n_L = 0.903 \text{ Hz}$
Tabella O.VIII	$\xi_s = 0.002$
(O.10) Tab. O.III	$B_{L2}^2 = 0.097$
(O.12) Tab. O.III	$S_{L2}^2 = 0.018$

(0.15)	$\eta_{L2} = 1.717$
(0.14)	$R_{L2} = 0.418$
(0.6) Tab. O.II	$\mu_L = 0.000$
(0.7) Tab. O.II	$B_L^2 = 0.0968$
(0.8) Tab. O.II	$R_L^2 = 2.966$
(0.5)	$V_L = 0.889 \text{ Hz}$
(0.4)	$g_L = 3.889$
(0.3)	$G_L = 2.621$
(0.2)	$c_{dL} = 1.116$

Il coefficiente dinamico c_{dL} sopra calcolato è stato utilizzato nell'equazione (rel.1) per il calcolo della forza F_y

Parametri dinamici trasversali per distacco dei vortici - Appendice Q

Velocità critiche, numeri di Strouhal e di Scrouton - § 0.1, 0.2, 0.3

modo di vibrare	altezza z (m)	$v_{cr,i}$ (m/s) eq. 0.2	n° di Strouhal (/) - § 0.2	n° di Scrouton (/) - eq. 0.4	$v_{m,1}$ (m/s) § 3.2.5
1	30.0	6.09	0.22	1.27	37.19
2	30.0	19.14	0.22	1.31	37.19

Risulta necessario valutare gli effetti del distacco dei vortici per i primi 2 (distinti) modi di vibrare in quanto $v_{cr,3} > v_{m,1}$ (eq. 0.3)

Modo n° 1

Spostamento trasversale di picco - metodo spettrale - § 0.5

$$g_L = 1.417 \quad (\text{eq. 0.8})$$

$$\sigma_L = 0.542 \text{ m} \quad (\text{eq. 0.11})$$

$$Y_{pL,1} = 0.787 \text{ m} \quad (\text{eq. 0.7})$$

Spostamento trasversale di picco - metodo armonico - § 0.6

$$K_w = 0.600 \quad (\text{tab. O.V})$$

$$Y_{pL,1} = 0.376 \text{ m} \quad (\text{eq. 0.14})$$

Forza statica equivalente trasversale - § 0.4

La forza statica equivalente trasversale per il modo corrente viene calcolata considerando lo spostamento $Y_{pL,1} = 0.787$ m

La scelta è cautelativa.

$$C_{TR,i} = 1.00 \quad (\text{eq. 0.6})$$

$$F_{L,i}(s) = 2.5342E+01 \cdot m(z) \cdot \Phi_{L,i}(s) \quad (\text{N/m}) \quad (\text{eq. 0.5})$$

dove $m(z)$ è la massa alla quota z , e $\Phi_{L,i}(s)$ è la forma modale del modo i

Modo n° 2

il metodo spettrale si può applicare solo al 1° modo - § 0.5

Spostamento trasversale di picco - metodo armonico - § 0.6

$$K_w = 0.600 \quad (\text{tab. 0.V})$$

$$Y_{pL,2} = 0.370 \text{ m} \quad (\text{eq. 0.14})$$

Forza statica equivalente trasversale - § 0.4

La forza statica equivalente trasversale per il modo corrente viene calcolata considerando lo spostamento $Y_{pL,2} = 0.370$ m

La scelta è cautelativa.

$$C_{TR,i} = 1.00 \quad (\text{eq. 0.6})$$

$$F_{L,i}(s) = 1.1498E+02 \cdot m(z) \cdot \Phi_{L,i}(s) \quad (\text{N/m}) \quad (\text{eq. 0.5})$$

dove $m(z)$ è la massa alla quota z , e $\Phi_{L,i}(s)$ è la forma modale del modo i

Numero di cicli di carico - § 0.8

La valutazione del numero dei cicli di carico causati dal distacco risonante dei vortici nel corso della vita nominale della struttura, $V_N = 50$ anni, è svolta applicando le equazioni (0.17) e (0.18), considerando una vita nominale della struttura pari a 50 anni.

Facendo riferimento al 1° modo di vibrare, il numero di cicli risulta: $N_1 = 1.671E+06$

Ovalizzazione dinamica (1° modo) - § 0.10

In sommità del palo è presente un mascheramento, la verifica dei fenomeni di ovalizzazione dinamica viene demandata al produttore del mascheramento stesso.

Fatica alla base della struttura per azione della turbolenza - Appendice P (metodo dettagliato)

$$\text{tensione caratteristica di rottura} \quad f_{t,k} = 510 \text{ MPa}$$

$$\text{resistenza a fatica per } N = 2E6 \text{ cicli} \quad \Delta\sigma_c = 36 \text{ MPa}$$

coefficiente di sicurezza per fatica $\gamma_F = 1.35$ (Tabella P.I)
 modulo di resistenza alla base $W = 4.452E+06$ mm³
 tensione per carichi permanenti $s_p = 2.35$ MPa

equazione/rif.	parametro
(F.4)	$V_V = 0.060$ Hz
(P.7)	$s_D = 27.408$ Mpa
(P.8)	$\sigma_{SD} = 19.475$ MPa
(P.9)	$\lambda_{RD} = 0.641$
(P.17)	$v_{m, fat}(z_e) = 14.021$ m/s
(L.5)	$R^2_D = 0.395$
(P.15)	$\alpha_\sigma = 2.405$
(P.16)	$\alpha_\lambda = 0.790$
(TAB. P.IV)	$k = 1.200$
(P.10)	$A_0 = 0.005$
(P.11)	$A_{BM} = 0.555$
(P.12)	$A_M = 1.110$
(P.13)	$A_{SN} = 2.110$
(P.14)	$B_{SN} = 0.998$
(P.3)	$D_0 = 8.99E-03$
(P.4)	$C_{BM} = 0.4394$
(P.5)	$C_M = 1.0747$
(P.6)	$C_{SN} = 0.6812$
(P.2)	$D(1) = 2.89E-03$
(P.1)	$T_F = 3.46E+02$ anni = vita a fatica

Valori calcolati delle forze del vento (kN/m)

Ex = forze per vento longitudinale (direzione x)

Fy = forze per vento trasversale (y) dovute alla turbolenza

Fy modo 1 = forze per vento trasversale (y) dovute al distacco dei vortici legati al primo modo

Fy modo 2 = forze per vento trasversale (y) dovuto al distacco dei vortici legati al secondo modo

(i modi 1 e 2 sono da intendere come modi distinti: in realtà sono i modi (1,2) e (3,4) dell'analisi 3D)

Nodo	Altezza	Fx	Fy	Fy modo 1	Fy modo 2
1	0.00	5.4354E-01	4.8766E-01	0.0000E+00	0.0000E+00
2	2.24	5.1705E-01	4.6390E-01	2.0508E-02	-4.5695E-01
3	4.48	5.0073E-01	4.4926E-01	9.2027E-02	-1.8116E+00
4	5.00	4.8749E-01	4.3738E-01	9.0262E-02	-1.7234E+00
5	6.72	5.1268E-01	4.5997E-01	1.6250E-01	-2.7893E+00
6	8.96	5.2973E-01	4.7527E-01	2.7535E-01	-4.0532E+00
7	11.20	5.3741E-01	4.8216E-01	4.2692E-01	-5.2732E+00
8	12.80	5.3558E-01	4.8052E-01	9.9877E-01	-1.0693E+01
9	15.04	5.2355E-01	4.6972E-01	6.7328E-01	-5.7011E+00
10	17.28	5.0542E-01	4.5346E-01	8.3486E-01	-5.2637E+00
11	19.52	4.8240E-01	4.3281E-01	9.9656E-01	-4.2037E+00
12	21.76	4.5534E-01	4.0853E-01	1.3968E+00	-3.0830E+00
13	24.00	1.2166E+00	1.0915E+00	4.9527E+00	-1.3482E+00
14	25.00	1.2297E+00	1.1032E+00	5.6439E-01	3.2008E-01
15	26.00	1.2423E+00	1.1146E+00	6.1044E-01	8.4934E-01
16	27.00	1.2545E+00	1.1255E+00	2.9188E+00	6.4227E+00
17	28.00	1.2663E+00	1.1361E+00	7.0797E-01	2.1200E+00
18	29.00	1.2777E+00	1.1463E+00	7.2790E+00	2.7466E+01
19	30.00	1.2888E+00	1.1563E+00	3.6035E+00	1.6349E+01

Momenti alla base (kNm)		3.6655E+02	3.2887E+02	7.9190E+02	1.6349E-01

N.B. - I momenti sopra riportati sono senza i coefficienti di combinazione SLU

Le forze trasversali dovute al distacco dei vortici risultano elevate, indicando problemi di risonanza trasversale dovuta al vento.

È stato scelto di proseguire con le verifiche utilizzando, fra le forze trasversali calcolate, quella che induce il massimo momento flettente alla base del palo (scelta cautelativa).

Il vento trasversale di riferimento è Fy modo 1, con Mxx = 7.9190E+02

