

# **EDIPLIN 2**

## **Progettazione della fondazione di una torre eolica**

**NEWSOFT**

[www.newsoft-eng.it](http://www.newsoft-eng.it)

---

## Abstract

Nel presente articolo viene illustrata la progettazione e la verifica della fondazione di una torre eolica eseguita con il software Ediplin. Ediplin consente di eseguire il progetto e le verifiche strutturali e geotecniche sia di fondazioni su pali, sia di fondazioni superficiali, sfruttando le caratteristiche distintive dei prodotti Newsoft, ovvero: semplicità di utilizzo, affidabilità della modellazione, potenza e velocità di calcolo. Le azioni caratteristiche agenti sulla fondazione possono essere introdotte manualmente dall'utente o direttamente importate dall'output di altri programmi Newsoft. Ediplin consente l'inserimento di più strati di terreni aventi differenti caratteristiche meccaniche, con l'eventuale presenza di falda freatica. Il programma effettua le verifiche di sicurezza previste dalle NTC2008 e restituisce in output le carpenterie strutturali di tutti gli elementi della fondazione.

Il presente articolo illustra la progettazione della fondazione di una torre eolica di altezza dell'ordine dei 100 m.

Per tali strutture un requisito fondamentale, indicato generalmente dai fornitori, è costituito dal raggiungimento di valori minimi delle rigidezze traslazionali e rotazionali della fondazione, imposte al fine di limitare gli effetti del secondo ordine sulla struttura in elevazione.

Sulla torre agiscono azioni dovute ai carichi permanenti (Gk) e al vento (Qk). In tabella 1 sono riportati i valori caratteristici delle sollecitazioni per ognuna delle condizioni di carico definite:

	Gk	Qk
N (kN)	1000	1500
V (kN)	400	600
M (kNm)	27000	45000
T (kNm)	2000	3000

**Tabella 1:** Valori caratteristici delle sollecitazioni agenti sulla fondazione

Il terreno di fondazione è costituito da un terreno argilloso caratterizzato da valori di coesione non drenata linearmente crescenti con la profondità. L'articolo illustra le fasi di modellazione, progettazione e verifica della fondazione, effettuate mediante il programma EDIPLIN di Newsoft.

Nel modello numerico il plinto è schematizzato come piastra rigida poggiante su pali. I pali sono schematizzati come travi elastiche su letto di molle orizzontali alla Winkler. La rigidezza di tali molle, rappresentata dal valore della costante di Winkler, può in generale avere un andamento lineare con la profondità, i cui valori possono essere assegnati direttamente per ogni strato di terreno o stimati secondo metodi proposti da vari autori.

Il modello prevede inoltre una distribuzione di molle verticali lungo l'altezza del palo, la cui rigidezza viene valutata in base alle caratteristiche geotecniche degli strati attraversati e dell'interfaccia palo-terreno. Alla punta del palo, inoltre, viene applicata una rigidezza assiale concentrata, valutata in base alla rigidezza degli strati di terreno sottostanti.

Per il terreno di fondazione può essere adottata una stratigrafia con la possibilità di differenziare le caratteristiche meccaniche dei vari strati e introdurre la presenza della falda ad una certa profondità dal piano campagna.

La valutazione del carico limite della fondazione può essere effettuata secondo uno dei metodi preimpostati all'interno del programma (Vesic, Hansen, Meyerhof, Terzaghi) oppure in modo autonomo dall'utente in base a correlazioni empiriche o altri metodi teorici. Per quanto riguarda il terreno, anche la valutazione delle tensioni limite orizzontali può essere effettuata secondo i metodi di Vesic, Hansen, Meyerhof, Terzaghi, Brooms e Matlock-Reese oppure in modo autonomo con le impostazioni dell'utente.

Il programma consente la definizione di diverse condizioni di carico a partire dalle quali genera in automatico le combinazioni di carico agli stati limite ultimi, di esercizio e i relativi involuppi delle sollecitazioni.

In base ai valori di involuppo viene eseguita la progettazione delle armature dei plinti e dei pali oltre alle verifiche strutturali in esercizio e per gli stati limite ultimi, nei confronti di:

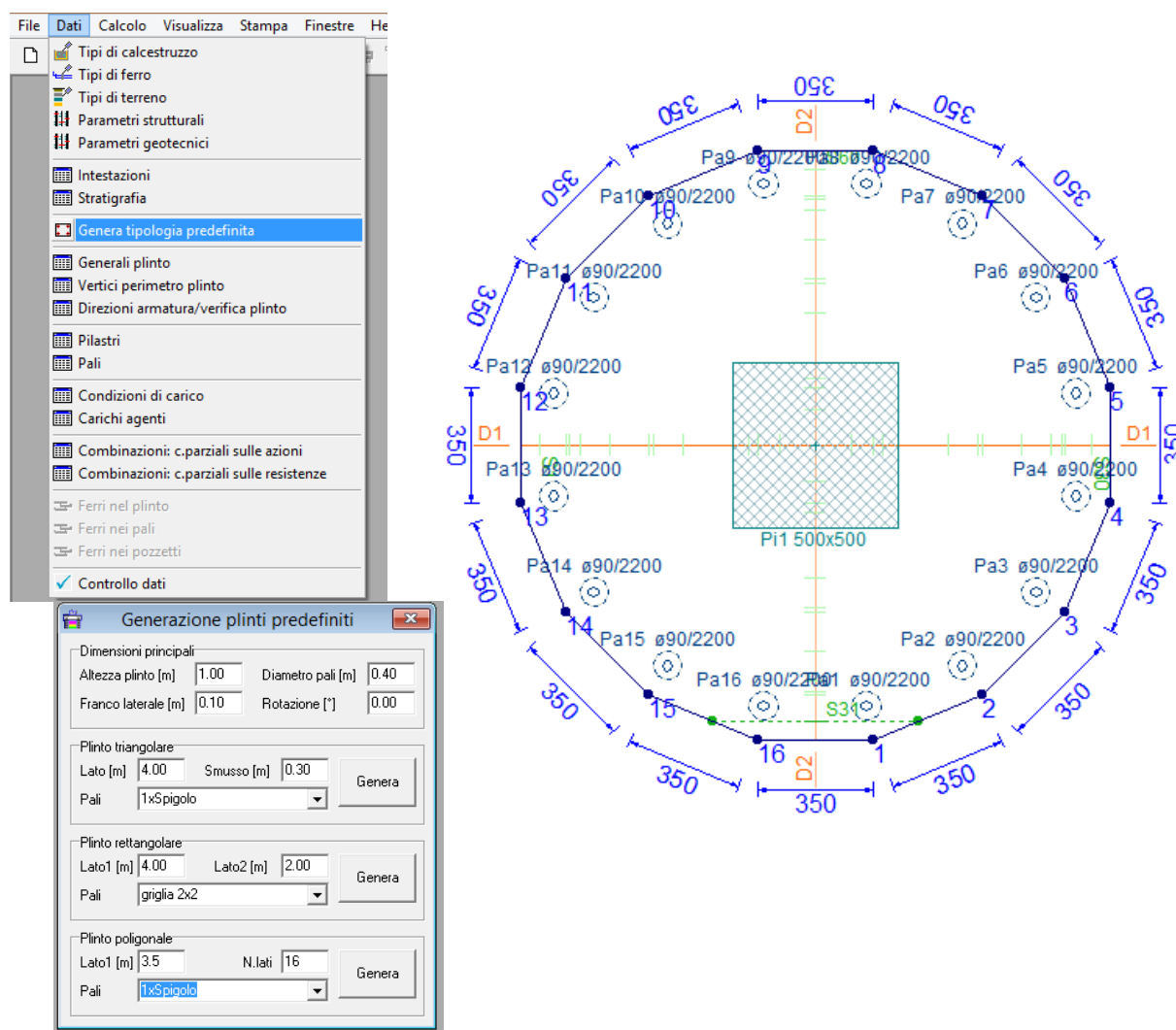
- punte di tensione;

- fessurazione;
- punzonamento;

Dal punto di vista geotecnico il programma esegue le verifiche della portanza sia verticale che orizzontale e calcola gli spostamenti della fondazione sotto i carichi di esercizio.

Per il caso studio considerato, il modello numerico della fondazione su pali è stato creato in modo semplice e veloce sfruttando l'opzione di generazione automatica del programma. Tale opzione è disponibile scegliendo dal menu Dati l'opzione generazione tipologia predefinita.

La fondazione è caratterizzata da un plinto a forma poligonale con 16 lati, ciascuno di lunghezza 3,5 m. Sono stati ipotizzati 16 pali trivellati da 0,90 m di diametro e 22 m di profondità, disposti in corrispondenza di ciascuno dei vertici della poligonale creata.



**Figura 1:** Generazione della fondazione su pali in Ediplin

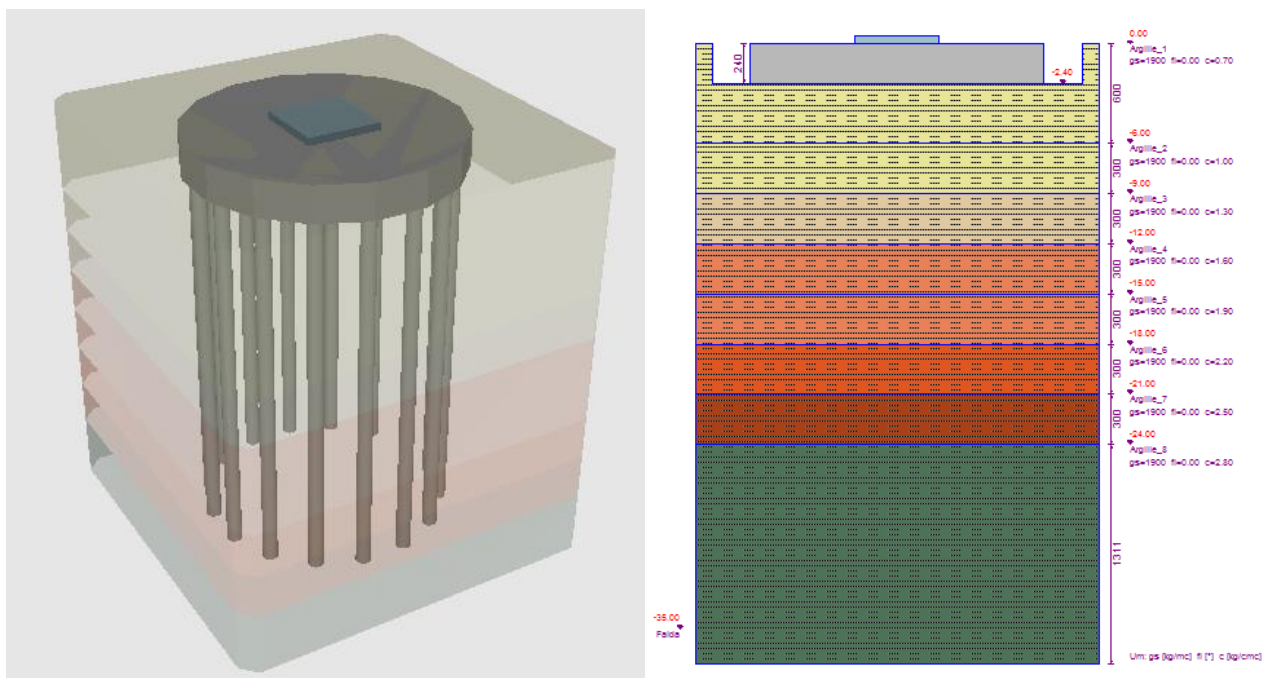


Figura 2: Viste 3d ed in sezione del modello numerico

Tipi di terreno												
n°	nome	ps	pw	c	fi	cai	de	Es	Vs	retino	colore	
1	Argille_1	1900	2000	0.70	0.0	0.20	0.0	200	0.20	argilla		
2	Argille_2	1900	2000	1.00	0.0	0.20	0.0	200	0.20	argilla		
3	Argille_3	1900	2000	1.30	0.0	0.20	0.0	200	0.20	argilla		
4	Argille_4	1900	2000	1.60	0.0	0.20	0.0	500	0.20	argilla		
5	Argille_5	1900	2000	1.90	0.0	0.20	0.0	500	0.20	argilla		
6	Argille_6	1900	2000	2.20	0.0	0.20	0.0	500	0.20	argilla		
7	Argille_7	1900	2000	2.50	0.0	0.20	0.0	500	0.20	argilla		
8	Argille_8	1900	2000	2.80	0.0	0.20	0.0	500	0.20	argilla		

Stratigrafia terreno										
n°	descrizione	tipo terreno	an	zs	Metodo	qlo	kwo	iq	ik	
1	Strato_1	Argille_1		0.00	Mathlock-Reese	2.09	0.82	0.74	0.29	
2	Strato_2	Argille_2		6.00	Mathlock-Reese	6.59	2.59	1.34	0.53	
3	Strato_3	Argille_3		9.00	Mathlock-Reese	10.64	4.19	1.25	0.49	
4	Strato_4	Argille_4		12.00	Mathlock-Reese	14.40	5.66	0.89	0.35	
5	Strato_5	Argille_5		15.00	Mathlock-Reese	17.09	6.73	0.90	0.35	
6	Strato_6	Argille_6		18.00	Mathlock-Reese	19.80	7.79	0.89	0.35	
7	Strato_7	Argille_7		21.00	Mathlock-Reese	22.49	8.85	0.89	0.35	
8	Strato_8	Argille_8		24.00	Mathlock-Reese	25.19	9.92	0.00	0.00	

Figura 3: Griglie per la definizione dei terreni e della stratigrafia

Come mostrato in Figura 2 e Figura 3, per la modellazione del terreno sono stati definiti 8 strati di terreno argilloso, caratterizzati dal parametro meccanico coesione non drenata, assunto linearmente variabile con la profondità partendo da un minimo di  $0,7 \text{ kg/cm}^2$  ad un massimo di  $2,8 \text{ kg/cm}^2$  ad una profondità di 24 m.

La Figura 4 mostra le verifiche di portanza dei pali eseguite secondo il metodo di Hansen; sono indicati i coefficienti di carico limite  $N_q$  ed  $N_c$ , il carico limite alla punta ( $Q_{puc}$ ) e la resistenza laterale in compressione ( $Q_{luc}$ ), la resistenza laterale in trazione ( $Q_{lut}$ ) e i massimi sforzi sul palo di compressione ( $F_{zc}$ ) e trazione ( $F_{zt}$ ). Le verifiche di portanza dei pali risultano soddisfatte in quanto nessuno dei valori degli sforzi risulta evidenziato in rosso (ossia supera il valore limite).

In Figura 5 è riportata la tipica finestra di visualizzazione delle armature e delle verifiche strutturali dei pali. Nella finestra è riportato anche l'andamento delle sollecitazioni lungo l'altezza del palo. E' possibile visualizzare le diverse verifiche svolte, in condizioni ultime o di esercizio, con i relativi istogrammi di impegno dei pali. Nel caso in esame sono raffigurati i diagrammi di impegno agli stati limite ultimi di flessione e taglio per combinazione statica, i quali evidenziano il rispetto dei margini di sicurezza richiesti dalle NTC2008.



In Figura 6 sono riportati gli spostamenti del plinto sottoposto ad una combinazione di carico quasi permanente, visualizzati all'interno del tabulato di calcolo elaborato dal programma; valori indispensabili per valutare la funzionalità dell'opera in condizioni di esercizio.

Grazie alla sua interfaccia semplice ed intuitiva, Ediplin consente al professionista una progettazione completa e immediata di fondazioni su pali con riferimento ad aspetti di natura sia geotecnica che strutturale, fornendo la possibilità di analizzare il comportamento strutturale e geotecnico nei confronti sia degli stati limite ultimi che di esercizio.

pal	d	L	Metodo	Nq	Nc	Qpuc	Qluc	Qlut	Fan	Qdc	Qdt	Fzc	Fzt
1	90	2200	Hansen	1.000	16.322	320.24	124.41	124.41	0.00	310.40	134.52	172.45	0.00
2	90	2200	Hansen	1.000	16.322	320.24	124.41	124.41	0.00	310.40	134.52	228.20	0.00
3	90	2200	Hansen	1.000	16.322	320.24	124.41	124.41	0.00	310.40	134.52	270.88	0.00
4	90	2200	Hansen	1.000	16.322	320.24	124.41	124.41	0.00	310.40	134.52	293.97	0.00
5	90	2200	Hansen	1.000	16.322	320.24	124.41	124.41	0.00	310.40	134.52	293.97	0.00
6	90	2200	Hansen	1.000	16.322	320.24	124.41	124.41	0.00	310.40	134.52	270.88	0.00
7	90	2200	Hansen	1.000	16.322	320.24	124.41	124.41	0.00	310.40	134.52	228.20	0.00
8	90	2200	Hansen	1.000	16.322	320.24	124.41	124.41	0.00	310.40	134.52	172.45	0.00
9	90	2200	Hansen	1.000	16.322	320.24	124.41	124.41	0.00	310.40	134.52	117.85	0.00
10	90	2200	Hansen	1.000	16.322	320.24	124.41	124.41	0.00	310.40	134.52	98.70	0.00
11	90	2200	Hansen	1.000	16.322	320.24	124.41	124.41	0.00	310.40	134.52	84.04	12.18
12	90	2200	Hansen	1.000	16.322	320.24	124.41	124.41	0.00	310.40	134.52	76.11	32.83
13	90	2200	Hansen	1.000	16.322	320.24	124.41	124.41	0.00	310.40	134.52	76.11	32.83
14	90	2200	Hansen	1.000	16.322	320.24	124.41	124.41	0.00	310.40	134.52	84.04	12.18
15	90	2200	Hansen	1.000	16.322	320.24	124.41	124.41	0.00	310.40	134.52	98.70	0.00
16	90	2200	Hansen	1.000	16.322	320.24	124.41	124.41	0.00	310.40	134.52	117.85	0.00

Figura 4: Verifiche di portanza verticale dei pali di fondazione (Metodo di Hansen)

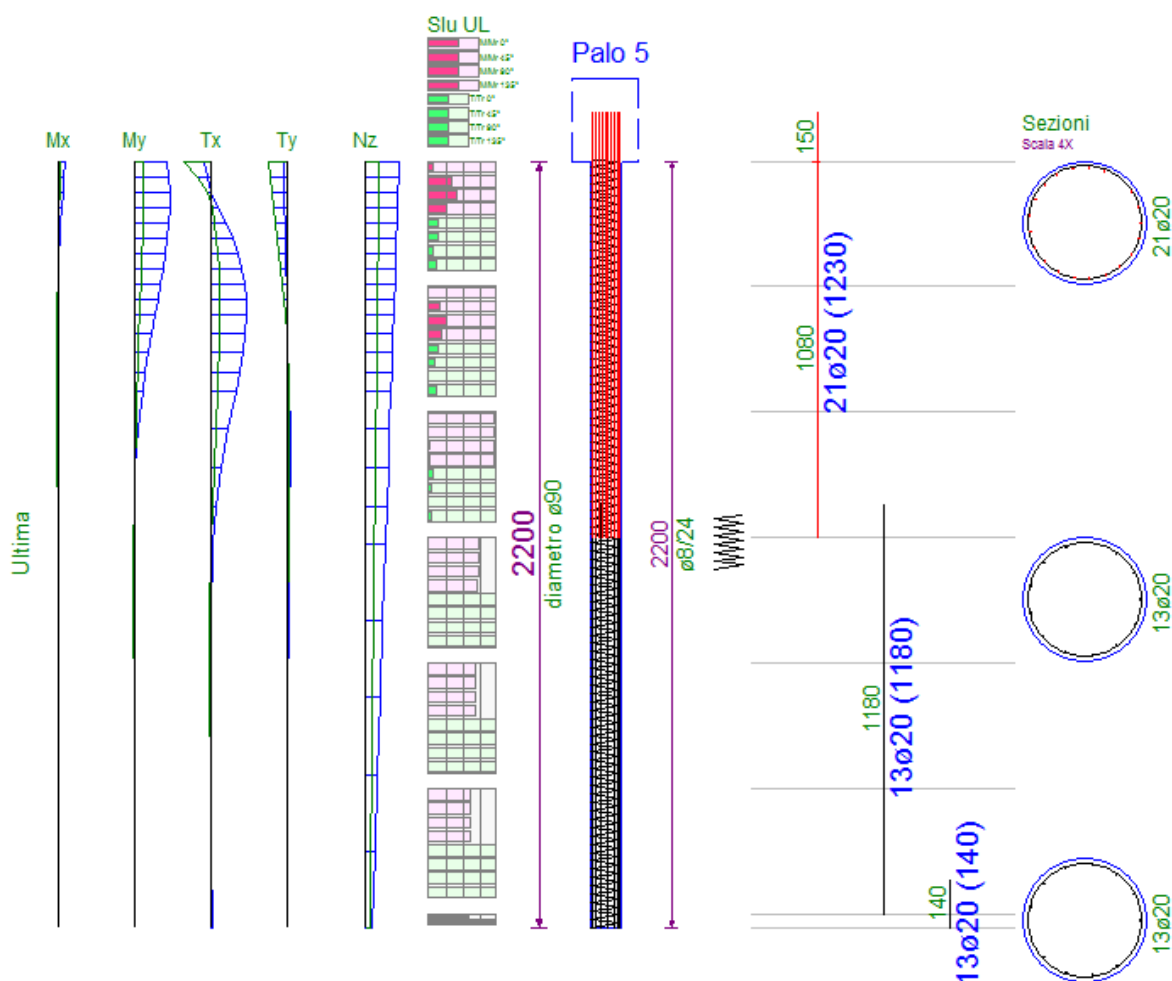


Figura 5: Vista delle verifiche e delle armature dei pali

### Spostamenti elastici nel plinto per combinazione Quasi permanente

elemento	x	y	z	ux	uy	uz	ux	uy	uz
elemento	x	y	z	max	min	max	min	max	min
Piede pilastro 1	0.0	0.0	0.0	0.307	0.277	0.000	0.000	-1.077	-1.196
Testa palo 1	155.1	-779.8	-240.0	0.177	0.159	0.004	0.003	-1.164	-1.293
Testa palo 2	441.7	-661.1	-240.0	0.174	0.157	0.011	0.010	-1.325	-1.472
Testa palo 3	661.1	-441.7	-240.0	0.169	0.152	0.016	0.015	-1.448	-1.609
Testa palo 4	779.8	-155.1	-240.0	0.162	0.145	0.019	0.018	-1.514	-1.683
Testa palo 5	779.8	155.1	-240.0	0.154	0.138	0.019	0.018	-1.514	-1.683
Testa palo 6	661.1	441.7	-240.0	0.147	0.132	0.016	0.015	-1.448	-1.609
Testa palo 7	441.7	661.1	-240.0	0.141	0.127	0.011	0.010	-1.325	-1.472
Testa palo 8	155.1	779.8	-240.0	0.138	0.124	0.004	0.003	-1.164	-1.293
Testa palo 9	-155.1	779.8	-240.0	0.138	0.124	-0.003	-0.004	-0.990	-1.100
Testa palo 10	-441.7	661.1	-240.0	0.141	0.127	-0.010	-0.011	-0.829	-0.921
Testa palo 11	-661.1	441.7	-240.0	0.147	0.132	-0.015	-0.016	-0.706	-0.784
Testa palo 12	-779.8	155.1	-240.0	0.154	0.138	-0.018	-0.019	-0.639	-0.710
Testa palo 13	-779.8	-155.1	-240.0	0.162	0.145	-0.018	-0.019	-0.639	-0.710
Testa palo 14	-661.1	-441.7	-240.0	0.169	0.152	-0.015	-0.016	-0.706	-0.784
Testa palo 15	-441.7	-661.1	-240.0	0.174	0.157	-0.010	-0.011	-0.829	-0.921
Testa palo 16	-155.1	-779.8	-240.0	0.177	0.159	-0.003	-0.004	-0.990	-1.100

Figura 6: Valutazione dei cedimenti elastici in condizioni di esercizio

## Bibliografia

- [1] D.M. 14 gennaio 2008. Norme tecniche per le costruzioni.
- [2] Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 - Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008.