

ILLUSTRAZIONE DEL PROGRAMMA DI CALCOLO AUTOMATICO REALIZZATO PER ESEGUIRE IL DIMENSIONAMENTO E LA VERIFICA DELLA PORTATA GEOTECNICA DEI PALI FONDAZIONALI METALLICI A VITE *Geopal*[®] mod. PVD e PVC.

Pag.	2	-	Premessa
Pag.	3	-	Studio resistenza strutturale Palo PVD
Pag.	18	-	Studio resistenza strutturale Palo PVC
Pag.	34	-	Studio comportamento Palo PVC su terreno coesivo
Pag.	49	-	Programma calcolo Palo
Pag,	75	-	Conclusioni

Introduzione

Quanto viene esposto di seguito vuole essere la sintesi descrittiva del percorso di analisi e progettazione utilizzato da **Geopalitalia srl** per determinare in modo attendibile il valore della capacità portante geotecnica dei pali a vite **Geopal®** che l'azienda produce nei modelli a vite distanziata PVD e vite continua PVC, utilizzati da più di venti anni nei cantieri di tutta Italia.

L'esigenza di dare la massima affidabilità ai dati ottenuti con il nuovo procedimento di calcolo adottato, ha spinto lo staff tecnico di Geopalitalia a realizzare un modello originale di progettazione e verifica automatica dei dati di analisi e sintesi, prodotti elaborando i dati strutturali del palo selezionato, con quelli geotecnici del terreno incassante, utilizzando una formulistica semplice, comprensibile e diversa da quella spesso complessa, farraginosa e approssimativa proposta nelle pubblicazioni di tanti illustri autori del secolo scorso.

E' noto infatti, a chi opera nel settore delle opere fondazionali, come in questi ultimi decenni le strumentazioni per la geognostica abbiano fatto progressi sempre più significativi, tanto da garantire un alto livello di affidabilità sia per le indagini di campagna che per quelle di laboratorio.

Il metodo di studio utilizzato, denominato metodo "*Rp-Rl*" dall'uso dei noti parametri prodotti in campagna utilizzando un penetrometro statico di ultima generazione, è risultato essere il più efficace, rapido ed attendibile fra quelli proposti dai vari cultori della geotecnica classica.

A confermare quanto asserito sono le tante prove di carico (test di collaudo statico) eseguite nel corso di decenni di attività cantieristica, che hanno consentito di studiare, estrapolare ed affinare una tecnologia oggettivamente attendibile e validante il metodo di calcolo messo a punto, per la tipologia di micropali a vite proposti nel mercato delle costruzioni.

Nel presente documento sono state inglobate le tre relazioni che illustrano lo studio strutturale prodotto per determinare la resistenza meccanica delle eliche fissate al palo. Trattandosi di un palo di fondazione realizzato tutto in acciaio strutturale, per ogni modello prodotto della serie PVD è stato fatto lo studio sulla resistenza meccanica delle singole eliche sottoposte a carico assiale. Similmente, è stato fatto lo studio sulla resistenza meccanica della spirale dei pali PVC a vite continua. Trattasi di un'analisi su un modello numerico tridimensionale agli elementi finiti (FEM), utilizzando una modellazione ad elementi tetraedrici a 10 nodi, dotati di tre gradi di libertà per nodo, corrispondenti agli spostamenti nelle tre direzioni x,y,z. Tali elementi presentano funzioni di forma quadratica, idonea alla modellazione di superfici curvilinee come quelle che caratterizzano la spirale elicoidale. Di seguito si riportano gli studi di analisi FEM riguardanti la resistenza strutturale del palo ad eliche distanziate PVD e di quello ad elica continua PVC.

Dopo le tre relazioni, viene illustrato brevemente il programma creato per il calcolo del dimensionamento e validazione dei pali Geopal con alcune videate e delle semplici spiegazioni che illustrano il significato dei vari campi.

Titolo elaborato

**STUDIO DELLA RESISTENZA MECCANICA DELLE ELICHE DEL
SISTEMA “PALO A ELICA” DELLA DITTA
Geopalitalia s.r.l.**

ELICA TIPO 400x250x10 - 114.3x10- S355

Revisione

Data

Aprile 2015

Committente

Geopalitalia S.r.l.

Progettista

Ing. Manuel Forte

1. Premessa

Su incarico della ditta Geopalitalia s.r.l. è stata eseguita una analisi di resistenza meccanica di una configurazione di elica del sistema di fondazione profonda tipo “palo ad elica” commercializzato dalla ditta stessa.

Lo studio in oggetto è volto a valutare numericamente la resistenza strutturale massima di ciascuna elica (o spira) di cui è dotato il sistema.

2. Breve descrizione dell’oggetto

I pali ad elica (o pali a vite) sono un sistema di fondazione profonda auto-perforante e senza asportazione di terreno. Ciascun palo si compone essenzialmente di un fusto centrale costituito da un tubo circolare in acciaio e da una o più “teste portanti” a forma di elica saldate al tubo centrale, detto fusto.

Ciascun elemento, “elica portante”, è formato da una piastra elicoidale destrogira in acciaio, ovvero da un settore circolare sviluppato su 360°, caratterizzato da un predefinito diametro esterno, passo e spessore della lamiera da cui è ricavato.

L’infissione avviene mediante rotazione (impressa con un rotore/avvitatore) del tubo centrale e, conseguentemente, delle eliche.

Il carico verticale di esercizio esterno applicato nella sommità del fusto tubolare, viene trasmesso al terreno mediante due contributi: l’attrito sviluppato sull’area laterale del fusto con il terreno e la resistenza di punta offerta dagli elicoidi circolari, che premono sulla terra sottostante.

La portata del palo varierà, pertanto, in funzione del tipo di terreno, del numero di eliche e della loro distribuzione sulla verticale. In sintesi si può pertanto affermare che le forze che contribuiscono a dare capacità portante al palo sono di due tipi: attritico (fs) lungo il fusto del palo e di pressione normale alla superficie delle eliche (qc), dovuta all’azione del carico da dissipare.

3. Inquadramento del problema

Scopo del presente studio è la valutazione della resistenza meccanica ultima di un’ elica (dotata di tratto iniziale smussato) in differenti configurazioni.

La resistenza meccanica di un’elica è influenzata da numerosi fattori geometrici, sia riguardanti l’elica stessa, che il tubo che costituisce il fusto (diametro e spessore), oltre a quelli meccanici dei (materiali).

Per l’analisi del problema si intende sviluppare, per ciascuna configurazione, un modello numerico FEM con il quale svolgere una analisi non lineare per modello, di cui si tratterà meglio nel prosieguo. L’interazione tra terreno e struttura metallica (in particolare la superficie dell’elica) viene simulato con un supporto elastico alla Winkler di opportuna rigidità.

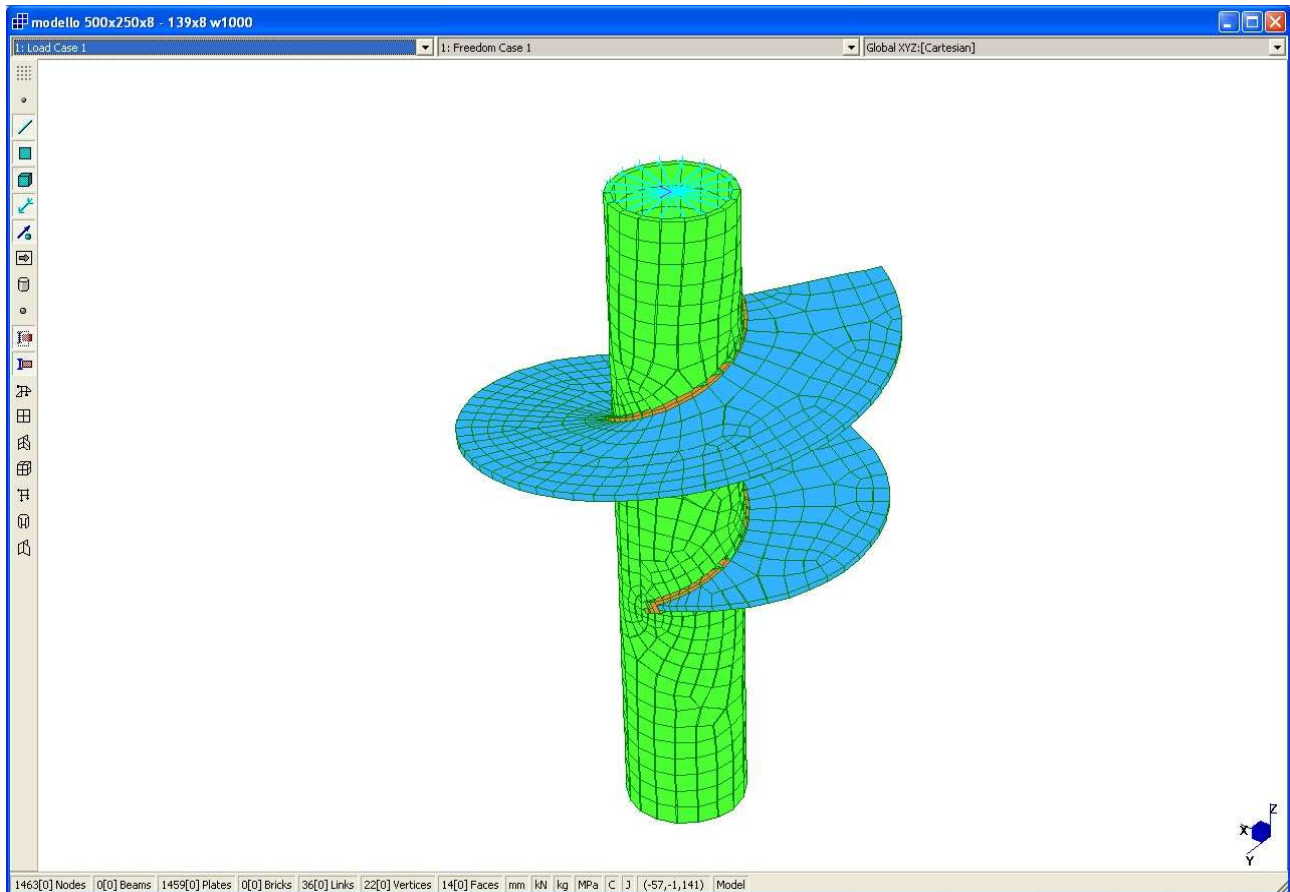


Figura 1 - Esempio di modello FEM sviluppato per le analisi

Le variabili in ingresso allo studio sono dunque le seguenti:

- 1) D_{el} : diametro dell'elica
- 2) D_{sh} : diametro del tubo
- 3) t_{el} : spessore dell'elica;
- 4) t_{sh} : spessore del tubo;
- 5) p : passo di ciascuna spira;
- 6) tipo di acciaio costituente l'elica;
- 7) tipo di acciaio costituente il tubo.
- 8) K_w : rigidità del terreno in cui è immerso il palo rappresentata numericamente del modulo di Winkler del terreno.

Al variare di uno qualunque dei parametri sopra elencati si ottiene una configurazione differente. Potenzialmente pertanto si hanno infinite combinazioni diverse.

Per limitare il numero di combinazioni sono state fatte delle oculute scelte che nel seguito si descrivono. In particolare le scelte riguardano tre fondamentali gruppi di variabili:

- 1) la configurazione geometrica del sistema tubo-elica;
- 2) la scelta dell'acciaio costituente i tubi e le eliche;
- 3) la scelta del modulo di Winkler e le analisi di sensibilità del sistema al variare di questo parametro.

Nel seguito si descrivono le scelte fatte per ciascuno dei suddetti gruppi di variabili.

3.1 Configurazione geometrica del sistema tubo-elica

L'elica in oggetto presenta le seguenti caratteristiche geometriche e meccaniche:

- 1) $D_{el} = 400\text{mm}$: diametro dell'elica
- 2) $D_{sh} = 114.3\text{ mm}$: diametro del tubo
- 3) $t_{el} = 10\text{ mm}$: spessore dell'elica;
- 4) $t_{sh} = 10\text{ mm}$: spessore del tubo;
- 5) $p = 250\text{ mm}$: passo di ciascuna spira;
- 6) tipo di acciaio costituente l'elica: S355;
- 7) tipo di acciaio costituente il tubo: S355.

3.2 Scelta del modulo di Winkler

La resistenza meccanica ultima delle eliche, come dimostrato dalle analisi, è funzione della rigidezza del terreno su cui poggiano.

Numericamente il metodo più semplice per rappresentare la rigidezza di un terreno all'interno di un programma FEM è l'applicazione di una stesa di molle alla Winkler sulla superficie di interfaccia tra la struttura ed il terreno stesso. Si tratta chiaramente di una approssimazione: nella realtà il terreno è un materiale elastoplastico. Tale approssimazione può essere accettata per il calcolo della resistenza meccanica delle eliche, oggetto di questo studio, ma rimane indispensabile una analisi geotecnica della capacità portante e dei cedimenti dei pali. Si osserva tuttavia che tipicamente, durante una prova di carico, il terreno viene plasticizzato quando si raggiungono elevati tassi di lavoro, prossimi alla rottura geotecnica del palo, mentre per i normali carichi di esercizio (che solitamente sono circa 2.5 volte inferiori al carico ultimo geotecnico), il terreno mostra un comportamento ancora all'incirca elastico. Si può quindi ritenere che i risultati delle analisi qui svolte, per piccoli valori di carico, siano abbastanza prossimi alla realtà anche in termini di cedimenti.

Il modulo di Winkler, espresso come una pressione in rapporto ad uno spostamento (kg/cm^3 o ton/m^3) è legato alla natura del terreno.

Nella Figura 2 si riporta un elenco del valore del modulo di Winkler in funzione della natura del terreno. I dati sono tratti da letteratura tecnica.

valori indicativi della costante di Winkler		
terreno	valore minimo [ton/m^3]	valore massimo [ton/m^3]
sabbia sciolta	480	1600
sabbia mediamente compatta	960	8000
sabbia compatta	6400	12800
sabbia argillosa mediamente compatta	2400	4800
sabbia limosa mediamente compatta	2400	4800
sabbia e ghiaia compatta	10000	30000
terreno argilloso con $q_u < 2\text{ kg/cm}^2$	1200	2400
terreno argilloso con $2 < q_u < 4\text{ kg/cm}^2$	2200	4800
terreno argilloso con $q_u > 4\text{ kg/cm}^2$	>4800	

Figura 2

I terreni su cui vengono installati i pali ad elica variano dalle argille morbide sino alle sabbie mediamente addensate o ghiaie sciolte. L'installazione all'interno di strati più rigidi e densi (come ad esempio ghiaie dense) risulta molto difficile. Come si può vedere dalla tabella sopra riportata, i valori del modulo di Winkler per i terreni interessati dalla installazione dei pali ad elica variano da meno di 1000 ton/m³ sino a circa 10000 ton/m³. Nelle analisi si è scelto pertanto di studiare il comportamento delle eliche nel range di valori compreso tra 1000 ton/m³ e 10000 ton/m³.

Da opportune analisi svolte su alcuni modelli è stato riscontrato che tra il modulo di Winkler e il carico ultimo dell'elica è di tipo lineare. Questo permette di analizzare, per ciascuna configurazione di elica, solo i casi con il più alto ed il più basso valore del modulo di Winkler. I carichi ultimi per valori intermedi del modulo di Winkler saranno ottenibili per interpolazione.

4. Normativa di riferimento

Le analisi sviluppate nella presente memoria sono redatte in conformità alle seguenti Normative e Leggi vigenti:

- Legge 05.11.1971 n. 1086 e D.M. 01.04.1993: "Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio normale e precompresso e a struttura metallica";
- D.M. 14/01/2008 – "Norme Tecniche per le Costruzioni".
- Circolare 2 Febbraio 2009, n. 617: "Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008.

Sono state utilizzate per consultazione e per consultazione anche le seguenti Normative:

- UNI EN 1993 (Eurocodice 3 – Progettazione delle strutture in acciaio);
- UNI EN 10025-2 (Prodotti laminati a caldo di acciai per impieghi strutturali);
- UNI EN 10210-1 (Profilati cavi finiti a caldo di acciai non legati e a grano fine per impieghi strutturali).

5. Materiali adottati, e relative tensioni di calcolo, per le strutture da realizzare in opera

Nella realizzazione delle opere in progetto, si utilizzeranno materiali aventi le seguenti caratteristiche nominali conformi al capitolo 11.3.4.1 del DM 2008.

- **acciaio laminati a caldo con profili a sezione aperta S355 per spessori fino a 40mm:**

$$f_{yk} \geq 355 \text{ MPa}$$

tensione caratteristica a snervamento;

$$f_{tk} \geq 510 \text{ MPa}$$

tensione caratteristica a rottura;

$$E = 210000 \text{ MPa}$$

modulo elastico;

$$G = E / [2 \cdot (1 + \nu)] = 80769 \text{ MPa}$$

modulo di elasticità trasversale;

$$\nu = 0.3$$

coefficiente di Poisson;

$$\alpha \approx 12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

coefficiente di espansione termica lineare;

$$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$$

densità;

- **acciaio laminati a caldo con profili a sezione cava S355H per spessori fino a 40mm:**

$$f_{yk} \geq 355 \text{ MPa}$$

tensione caratteristica a snervamento;

$$f_{tk} \geq 510 \text{ MPa}$$

$$E = 210000 \text{ MPa}$$

$$G = E / [2 \cdot (1 + \nu)] = 80769 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0.3$$

$$\alpha \approx 12 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$$

tensione caratteristica a rottura;

modulo elastico;

modulo di elasticità trasversale;

coefficiente di Poisson;

coefficiente di espansione termica lineare;

densità;

Poiché le analisi che si devono condurre sono di tipo elasto-plastico, è necessario conoscere anche l'allungamento massimo a rottura del materiale, che si ricava dalla UNI EN 10025-2 per le eliche e dalla UNI EN 10210-1 per i tubi.

Nella Figura 3 si riportano i dati di allungamento minimo a rottura per i piatti costituenti le eliche. Nella Figura 4 si riportano i dati di allungamento minimo a rottura per i tubi.

I piatti in acciaio S355 di spessore inferiore a 40mm presentano un allungamento minimo del 20%.

I tubi in acciaio S355 di spessore inferiore a 40mm presentano un allungamento minimo del 22%.

Cautelativamente si assume un valore di allungamento minimo uguale per le eliche e per i tubi e pari al 20%.

Con i dati a disposizione è possibile tracciare la curva di comportamento del materiale, che per le analisi in oggetto è schematizzata come una curva bilineare con tratto plastico incrudente. Nella Figura 5 si riporta il diagramma tensione – deformazione impiegato nelle analisi.

prospetto 7 Caratteristiche meccaniche a temperatura ambiente per prodotti lunghi e piani dei tipi e delle qualità di acciai con valori di resilienza (Continua)

Designazione		Posizione dei provini a)	Allungamento percentuale minimo dopo rottura ^{d)} %										
			$L_0 = 80 \text{ mm}$ Spessore nominale mm					$L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$ Spessore nominale mm					
In conformità alla EN 10027-1 e CR 10260	In conformità alla EN 10027-2		≤1	>1 ≤1,5	>1,5 ≤2	>2 ≤2,5	>2,5 ≤3	≥3 ≤40	>40 ≤63	>63 ≤100	>100 ≤150	>150 ≤250	>250 ^{b)} ≤400 solo per J2 e K2
S235JR	1.0038	l	17	18	19	20	21	26	25	24	22	21	-
S235J0	1.0114												-
S235J2	1.0117	t	15	16	17	18	19	24	23	22	22	21	21 (l e t)
S275JR	1.0044	l	15	16	17	18	19	23	22	21	19	18	-
S275J0	1.0143												-
S275J2	1.0145	t	13	14	15	16	17	21	20	19	19	18	18 (l e t)
S355JR	1.0045	l	14	15	16	17	18	22	21	20	18	17	-
S355J0	1.0553												-
S355J2	1.0577												17 (l e t)
S355K2	1.0596	t	12	13	14	15	16	20	19	18	18	17	17 (l e t)
S450J0 ^{b)}	1.0590	l	-	-	-	-	-	17	17	17	17	-	-

a) Per lamiere, nastri e larghi piatti di larghezze ≥600 mm, si applica la trasversale (t) alla direzione di laminazione. Per tutti gli altri prodotti, si applicano i valori per la direzione parallela (l) alla direzione di laminazione.
b) I valori si applicano ai prodotti piani.
c) Applicabile solo ai prodotti lunghi.
d)

Figura 3 - Allungamento a rottura eliche

Designazione		Carico unitario di snervamento minimo R_{eH} in N/mm ²			Resistenza a trazione R_m in N/mm ²		Allungamento percentuale minimo $L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$				Caratteristiche di resilienza	
Secondo EN 10027-1 ed IC 10	Secondo EN 10027-2	Spessore nominale in mm			Spessore nominale in mm		Longitudinale		Trasversale		Temperatura di prova °C	Valore medio minimo di resilienza (J) per provette unificate ²⁾
		≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 65	< 3	≥ 3 ≤ 65	Spessore nominale in mm					
							≤ 40	> 40 ≤ 65	≤ 40	> 40 ≤ 65		
S235JRH ¹⁾	1.0039	235	225	215	360 - 510	340 - 470	26	25	24	23	20	27
S275J0H ¹⁾	1.0149	275	265	255	430 - 580	410 - 560	22	21	20	19	0	27
S275J2H ¹⁾	1.0138	275	265	255	430 - 580	410 - 560	22	21	20	19	- 20	27
S355J0H ¹⁾	1.0547	355	345	335	510 - 680	490 - 630	22	21	20	19	0	27
S355J2H	1.0576	355	345	335	510 - 680	490 - 630	22	21	20	19	- 20	27

1) Le caratteristiche di resilienza sono controllate soltanto qualora ciò sia stato specificato all'atto della richiesta d'offerta e dell'ordine, per prodotti forniti con controllo specifico.

2) Per le caratteristiche di resilienza di provette a sezione ridotta, vedere 6.6.2.

Figura 4 - Allungamento a rottura tubi

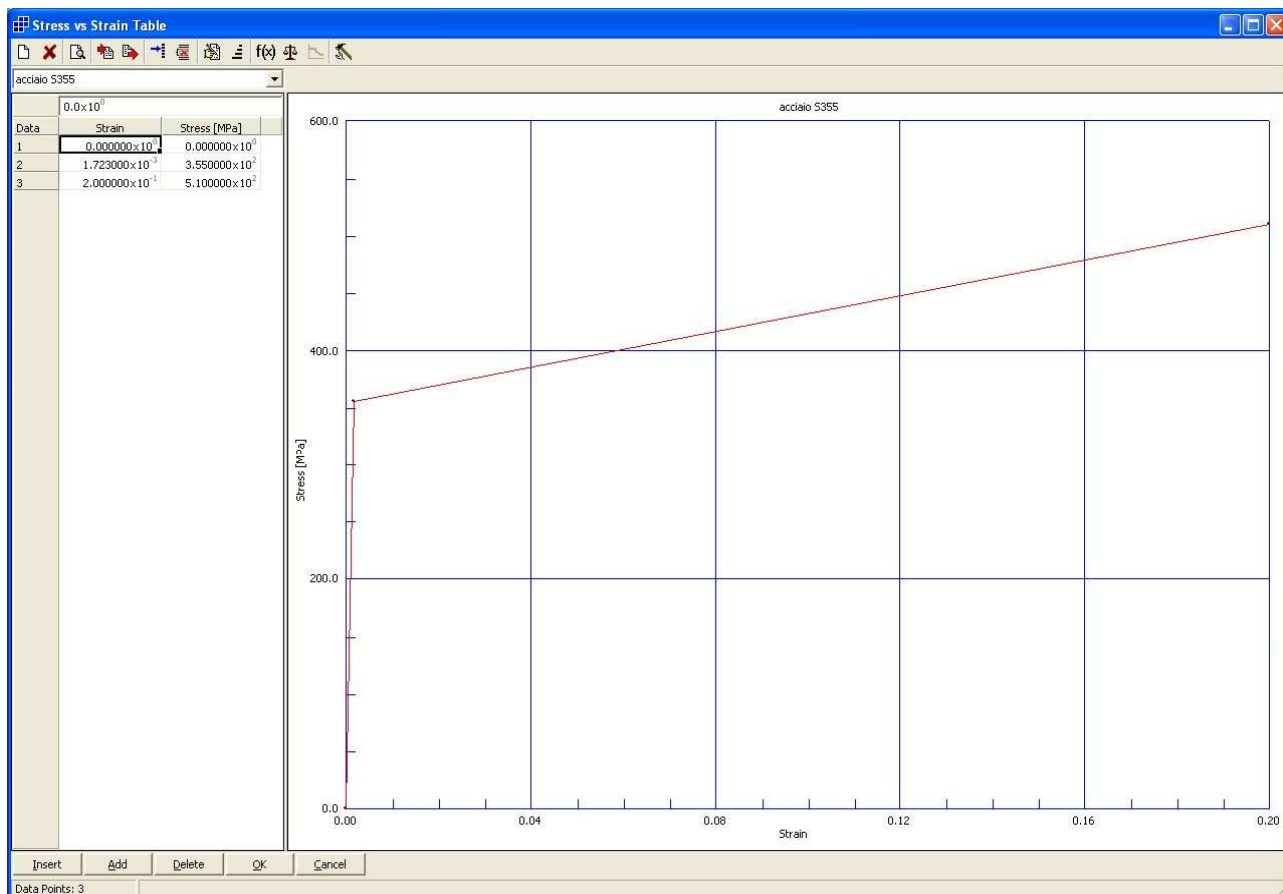


Figura 5 - Diagramma tensione-deformazione dell'acciaio

6. Software di calcolo

Nei calcoli riportati in questa relazione ci si è avvalsi del seguente software:

- Calcolo delle tensioni e delle deformazioni.

STRAUS 7 (www.straus7.com), Release 2.3.6 B5, prodotto dalla *Strand* (Sidney, Australia): programma di calcolo agli elementi finiti. I file di input ed i file di output vengono in questa sede omessi per brevità, ma sono senz'altro disponibili su richiesta. Le unità di misura utilizzate nel programma sono [kN; mm].

7. Descrizione dei modelli e del metodo di analisi

Lo scopo delle analisi qui descritte era valutare la resistenza meccanica ultima del sistema tubo-elica al crescere del carico verticale applicato in corrispondenza dell'asse del tubo.

Si descrivono concettualmente i passaggi necessari per raggiungere il risultato prefisso.

Per prima cosa è stato necessario sviluppare, per ciascuna configurazione del sistema, un modello tridimensionale rappresentativo della geometria e contenente al suo interno i parametri del terreno (modulo di Winkler), e del materiale (curva bilineare inelastica dell'acciaio).

Successivamente è stata svolta una analisi statica non lineare per materiale. L'analisi consiste nell'applicare un carico verticale iniziale unitario (ad esempio 1 kN) in corrispondenza dell'asse del tubo e successivamente incrementarlo. Il carico esterno verticale (diretto dall'alto verso il basso) viene bilanciato dalla reazione del terreno in corrispondenza della superficie dell'elica. La reazione del terreno inflette l'elica e all'interno di essa sorgono degli stati di tensione (per flessione e taglio). Inizialmente, per carichi bassi, le tensioni sono modeste. I valori massimi si ottengono, tipicamente, in corrispondenza del punto di attacco dell'elica al tubo (appena oltre la saldatura). Al crescere del carico crescono sia la tensione che la deformazione (inflexione) dell'elica. Il rapporto tra il carico esterno applicato e la deformazione, in questa fase, è fortemente legato al primo tratto della curva tensione-deformazione dell'acciaio (v. Figura 5). Questo tratto è molto rigido, cioè molto pendente, pertanto si ottengono limitati incrementi di deformazione a fronte di elevati incrementi del carico applicato. Questa è la "fase elastica" di comportamento della struttura. Questo comportamento prosegue sino al raggiungimento della tensione di snervamento del materiale. Il carico sotto il quale in un qualunque punto della struttura si raggiunge la tensione di snervamento dell'acciaio (355MPa nel caso di acciaio S355) è il "carico di primo snervamento". Oltre questo carico il materiale inizia a plasticizzarsi, cioè può sopportare ulteriori incrementi di carico ma a fronte di deformazioni molto più importanti rispetto alla fase precedente. Questa seconda fase di comportamento rappresenta la "fase plastica" di comportamento. Durante la fase plastica il carico esterno cresce circa linearmente sino a raggiungere un valore tale che in un punto della struttura si giunge alla tensione di rottura dell'acciaio. Tale carico rappresenta il "carico ultimo" del sistema. Tipicamente la rottura del materiale si verifica in corrispondenza dell'elica. In alcune configurazioni geometriche tuttavia si raggiunge in corrispondenza del tubo.

Nella fase plastica il rapporto tra carico esterno applicato e deformazione è legata sia alla pendenza del secondo ramo del diagramma tensione-deformazione dell'acciaio, sia al valore del modulo di Winkler. Pertanto, a parità di geometria e di caratteristiche dell'acciaio, mentre il carico di primo snervamento è circa sempre lo stesso al variare del modulo di Winkler, il carico ultimo varia anche sensibilmente al variare del modulo di Winkler.

La dipendenza del comportamento dal modulo di Winkler è stata analizzata con una analisi di sensibilità condotta sull'elica di diametro 500 e spessore 8mm. L'analisi di sensibilità è consistita nel generare più modelli della stessa elica differenti solo per il valore del modulo di Winkler e nell'analizzarli tutti per valutare il valore del carico ultimo. L'analisi ha mostrato un legame lineare tra la variazione di modulo di

Winkler e la variazione del carico ultimo. Per tutte le altre configurazioni di eliche quindi si è proceduto ad analizzare solo i casi con valore minimo (1000 t/m^3) e massimo (10000 t/m^3) del modulo di Winkler, potendo ottenere i risultati intermedi per interpolazione lineare.

Nel seguito si descrivono le caratteristiche dei modelli e delle analisi svolte.

7.1 Caratteristiche dei modelli

I modelli FEM delle strutture sono stati sviluppati con elementi plate.

In ciascun modello FEM viene rappresentata la geometria dell'elica e del tubo mediante elementi plate aventi lo spessore della parte rappresentata. Lungo la linea di collegamento tra elica e tubo sono stati impiegati elementi plate di spessore maggiorato al fine di rappresentare l'irrigidimento strutturale dato dalle saldature. In questa sede non viene svolta la verifica strutturale della saldatura in quanto la saldatura stessa può essere realizzata con modalità differenti. Si considera che la saldatura sia tale da garantire il ripristino della resistenza e della rigidezza lungo la linea di giunzione. Nel modello è stato considerato che il tubo sia irrigidito dalla saldatura immediatamente al di sopra e al di sotto dell'elica per uno tratto di altezza pari a circa lo spessore del tubo stesso. L'elica è stata considerata irrigidita lungo una fascia di larghezza pari a circa lo spessore del tubo a partire dalla superficie esterna del tubo stesso. Alla zona di tubo irrigidita è stato assegnato uno spessore pari a 1.5 volte lo spessore del tubo. Alla zona di elica irrigidita è stato assegnato uno spessore pari alla somma tra lo spessore del tubo e lo spessore dell'elica.

Il programma suddivide lo spessore di ciascun plate in 15 layer e su ciascuno calcola lo stato tensionale. Questo permette di far progredire la plasticizzazione del materiale, durante l'analisi non lineare, anche all'interno dello spessore degli elementi.

Nei modelli sono utilizzati anche elementi link per distribuire la forza assiale (che viene applicata su un nodo posto in asse al tubo) all'intera circonferenza superiore del tubo.

Sui plate che rappresentano le eliche è applicato un supporto elasticamente cedevole alla Winkler.

7.2 Analisi e verifiche

Per il calcolo della resistenza ultima strutturale delle eliche si utilizza il metodo di "analisi globale elasto-plastica" (conformemente a quanto previsto al paragrafo 4.2.3.3 del DM 2008) e la capacità resistente viene valutata con il "metodo elasto-plastico" (conformemente a quanto previsto al paragrafo 4.2.3.2 del DM 2008).

L'applicazione dei due metodi suddetti si traduce, operativamente, nello svolgimento di analisi non lineari per materiale.

Per ciascun modello viene applicato un carico iniziale (è stato applicato un carico iniziale di 10 kN) e successivamente viene svolta una analisi statica non lineare in cui il carico iniziale viene via via amplificato, mediante un fattore moltiplicativo. Ad ogni incremento del carico (detto step) il programma ricalcola lo stato tensionale della struttura. L'analisi procede fino a quando il programma non trova più convergenza numerica (ad esempio perché ha plasticizzato tutto il materiale disponibile) o perché in un punto della struttura viene raggiunto il limite di rottura del materiale.

L'incremento del carico viene deciso in funzione del tipo di struttura analizzata e va "calibrato" allo scopo di ottenere sufficiente precisione di risultato e, contemporaneamente, limitare l'onere di calcolo. Ogni step infatti corrisponde ad un nuovo ciclo di calcolo e quindi l'eccessivo aumento degli step comporta un incremento notevole dei tempi di calcolo. Per le strutture qui esaminate si è scelto di incrementare il carico di 5 kN ad ogni step di calcolo.

8. Analisi di sensibilità nei confronti del modulo di Winkler

Un'elica di diametro 500 e spessore 10mm, montata sul tubo $\varnothing$ 139.7x8 è stata oggetto di analisi di sensibilità nei confronti della variazione del modulo di Winkler. L'elica in oggetto è stata analizzata con 5 valori del modulo di Winkler, variabili da 1000 t/m³ a 10000 t/m³.

Nella Figura 6, a titolo di esempio, si riporta una immagine dello step in cui viene superata la tensione limite di rottura dell'acciaio.

Le analisi, condotte per i diversi valori del modulo di Winkler hanno portato ai risultati di carico ultimo riportati nella Figura 7.

Nella Figura 8 si riportano i dati ottenuti in grafico per visualizzare il rapporto tra il modulo di Winkler e il carico ultimo dell'elica. Come si può vedere il rapporto è di tipo lineare. Questo permette di analizzare, per ciascuna configurazione di elica, solo i casi con il più alto ed il più basso valore del modulo di Winkler. I carichi ultimi per valori intermedi del modulo di Winkler saranno ottenibili per interpolazione.

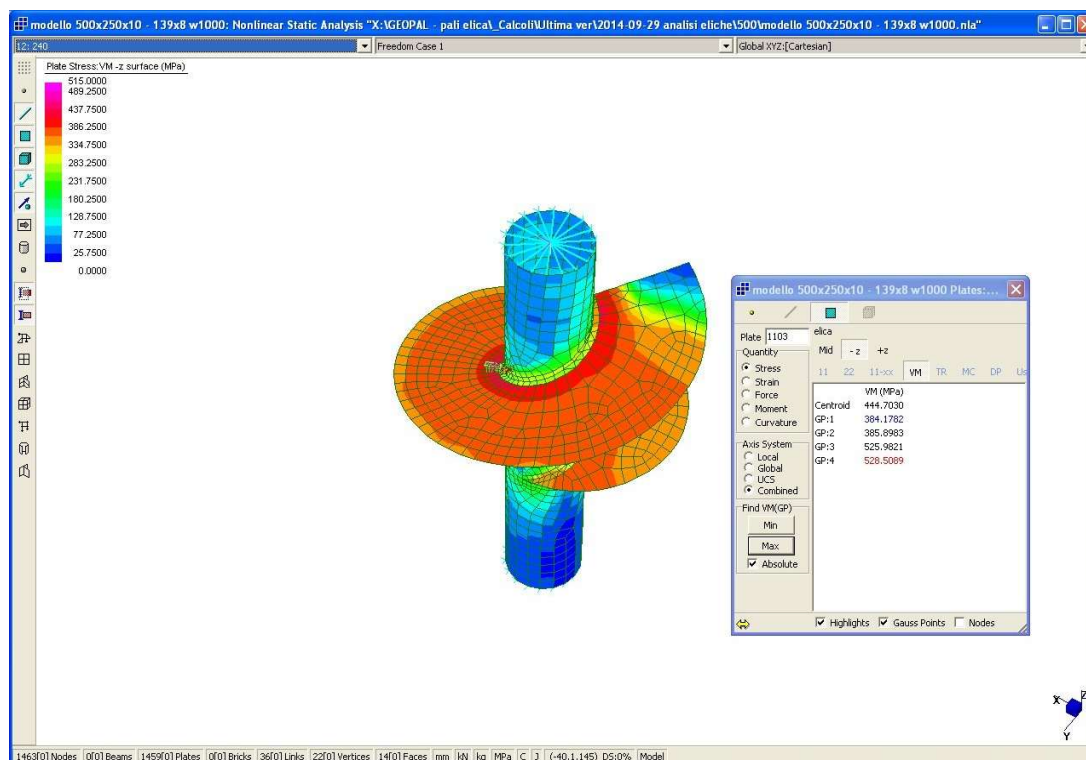


Figura 6 - Step di superamento della tensione di rottura dell'acciaio per $k_w=1000$ t/m³

kw [ton/m ³]	Nu [kN]
1000	220
2500	260
5000	320
7500	360
10000	400

Figura 7

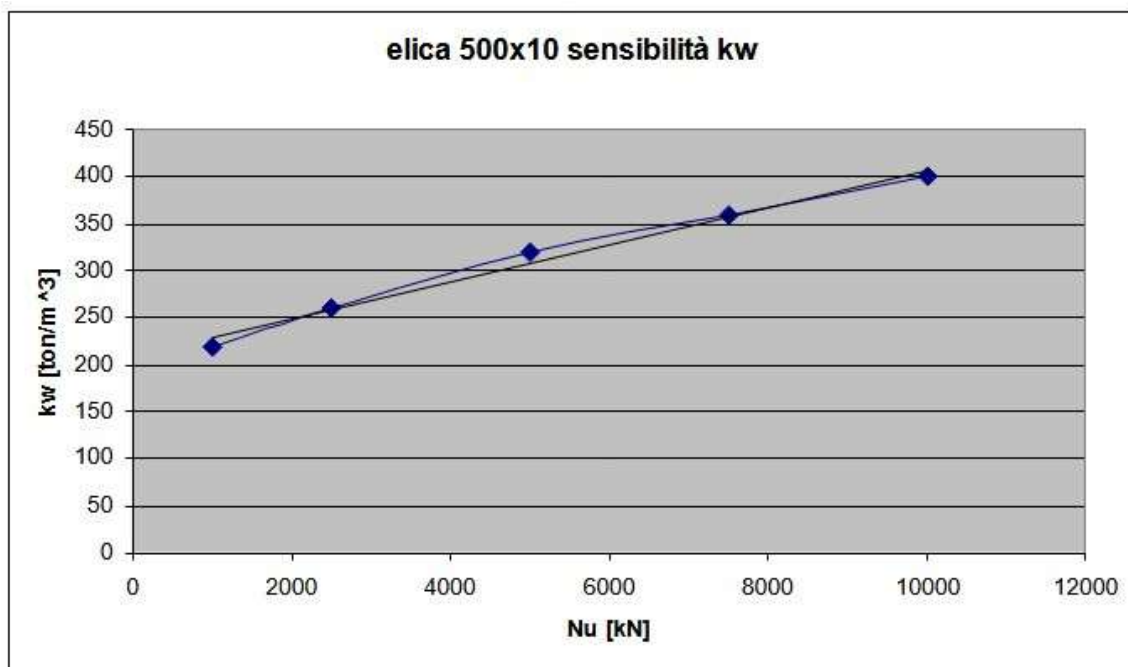


Figura 8

9. Risultati numerici

9.1 Elica 400x250x10 – 114.3x10 – S355 w1000

Nella figure seguenti si riportano le immagini rispettivamente dello step corrispondente al carico di primo snervamento e dello step corrispondente al carico di rottura dell'acciaio. La rottura avviene sul piatto dell'elica.

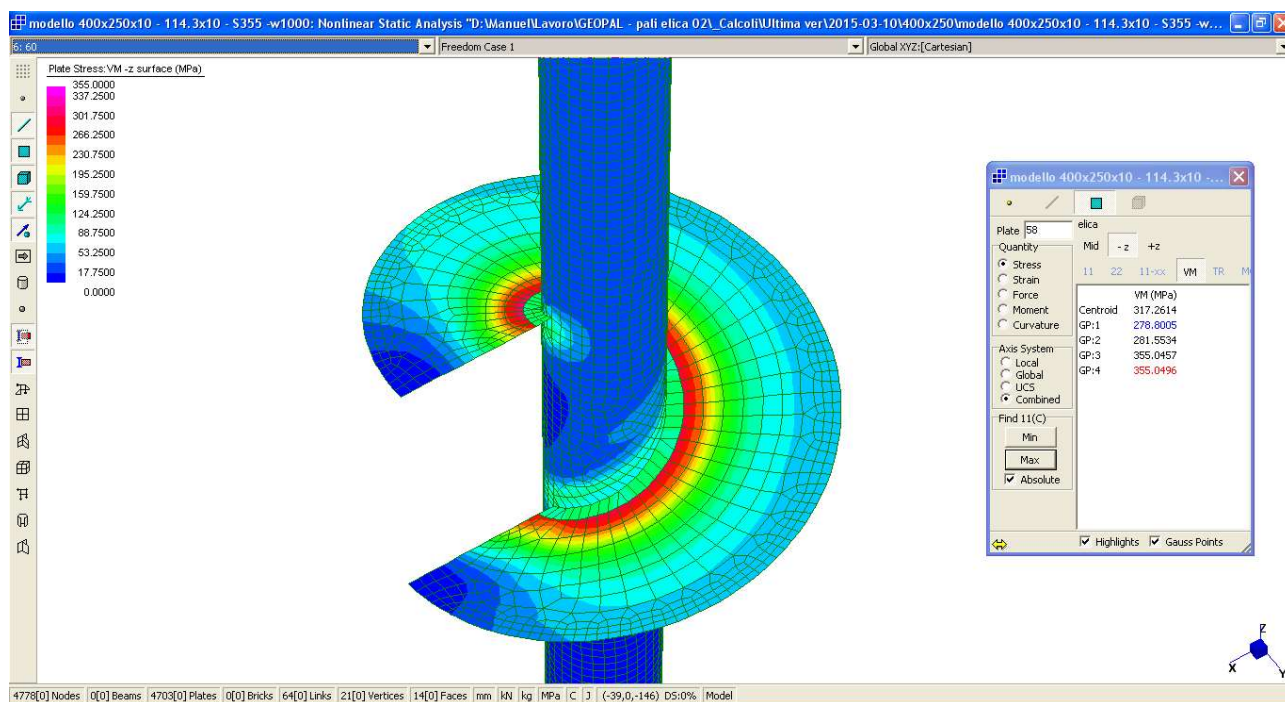


Figura 9 - Carico di primo snervamento

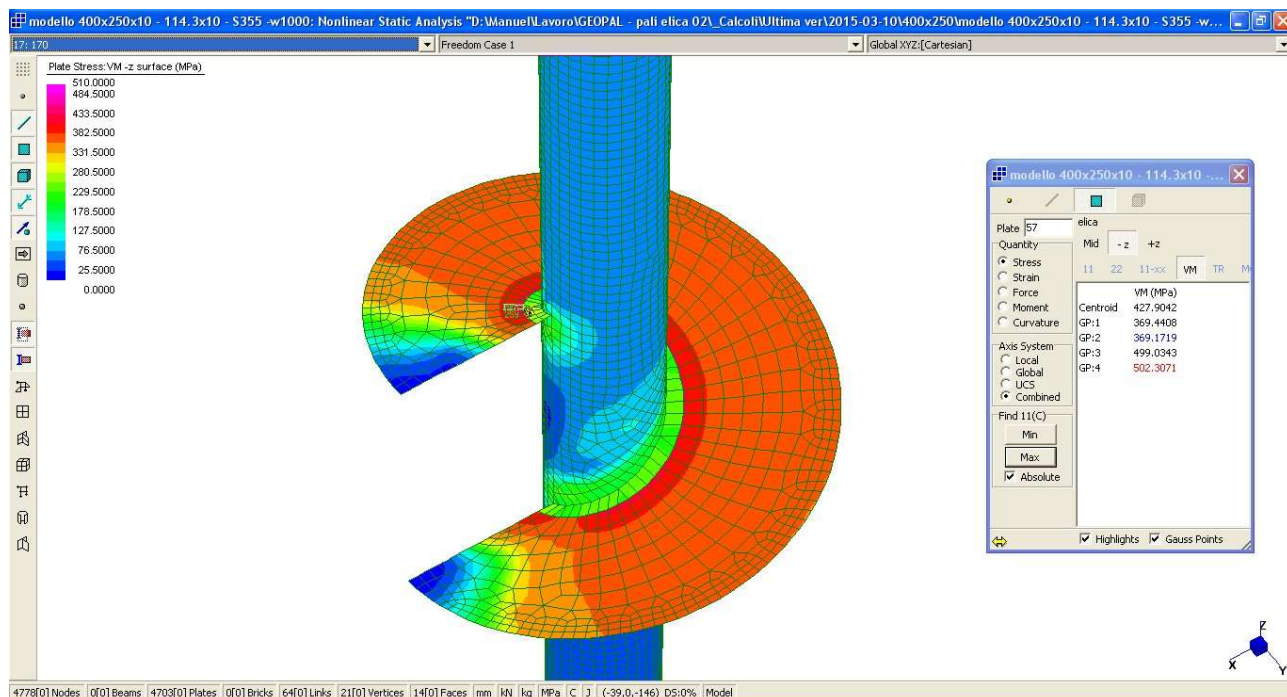


Figura 10 - Carico di rottura

Nella tabella che segue si riportano valori dei carichi applicati ai vari step di calcolo e la corrispondente deformazione dell'elica. La deformazione è riportata come spostamento verticale relativo di un punto posto sul bordo dell'elica rispetto all'asse del tubo. Nell'immagine vengono evidenziati il carico di primo snervamento ed il carico ultimo.

carico [kN]	deformazione [mm]
10	0
20	0
30	1
40	1
50	1
60	1
70	2
80	2
90	2
100	3
110	4
120	5
130	6
140	8
150	11
160	18
170	27

Figura 11 - Valori dei carichi applicati e dei cedimenti corrispondenti

Nell'immagine che segue si riporta il diagramma del carico applicato rispetto alla deformazione dell'elica. È possibile notare il comportamento inizialmente lineare, sino al carico di primo snervamento e, successivamente, la transizione graduale al ramo plastico.

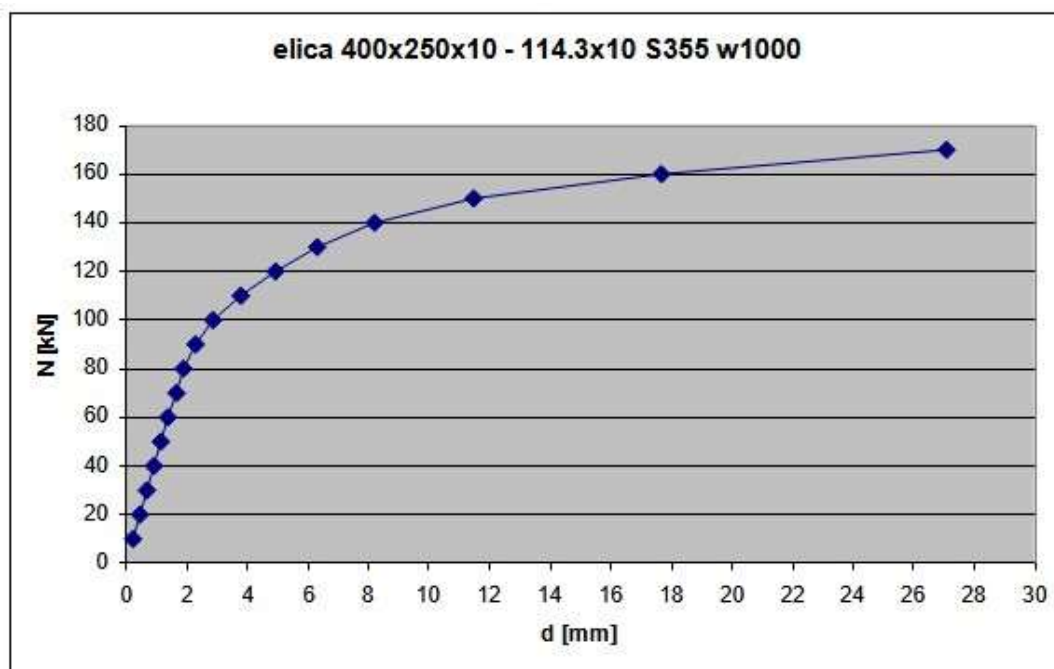


Figura 12

9.2 Elica 400x250x10 – 114.3x10 – S355 w10000

Nella figure seguenti si riportano le immagini rispettivamente dello step corrispondente al carico di primo snervamento e dello step corrispondente al carico di rottura dell'acciaio. La rottura avviene sul piatto dell'elica.

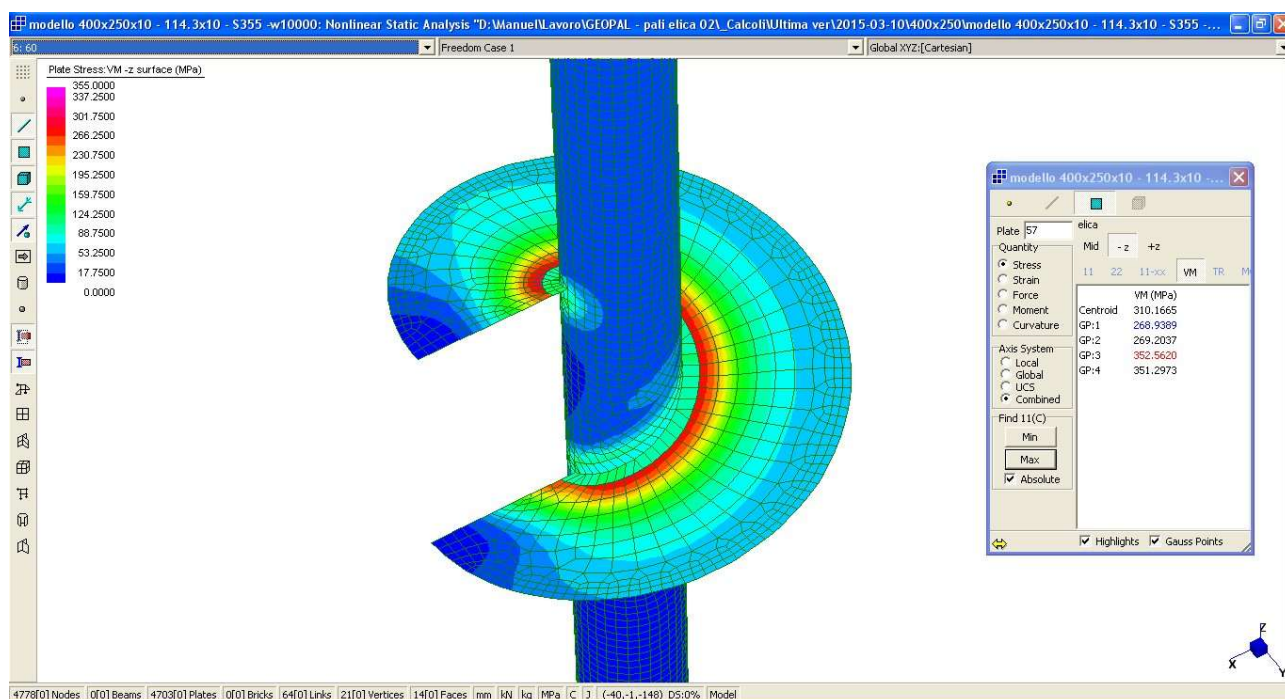


Figura 13 - Carico di primo snervamento

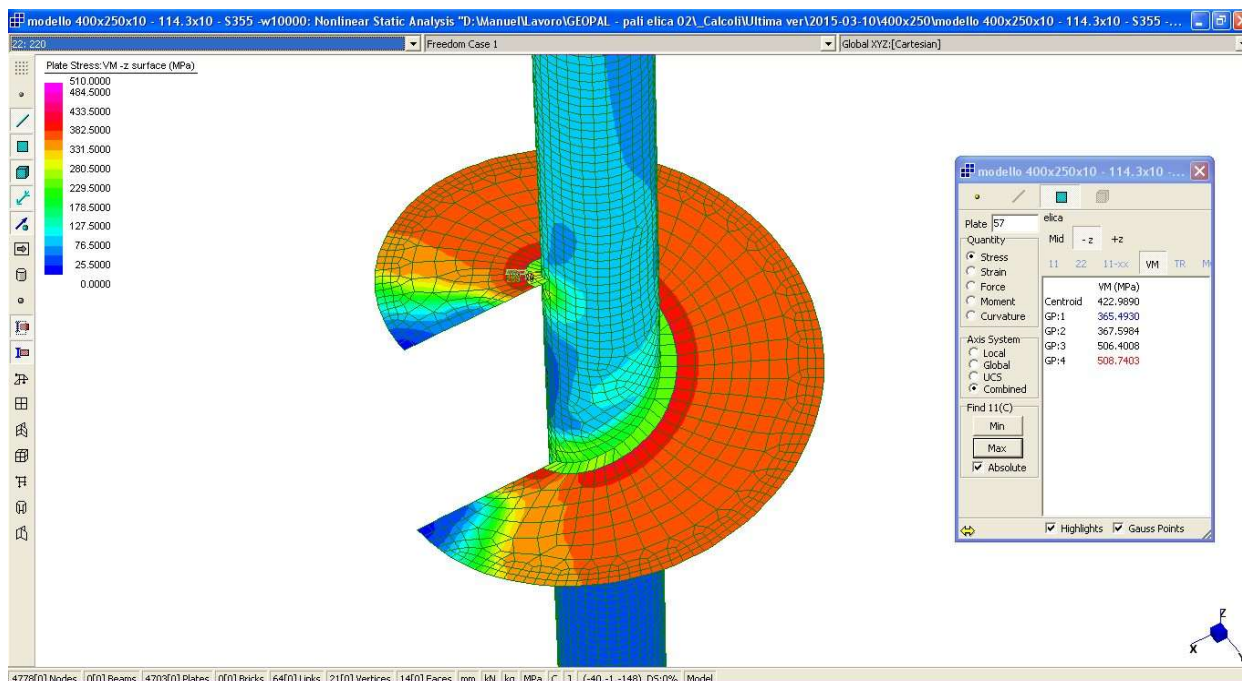


Figura 14 - Carico di rottura

Nella tabella che segue si riportano valori dei carichi applicati ai vari step di calcolo e la corrispondente deformazione dell'elica. La deformazione è riportata come spostamento verticale relativo di un punto posto sul bordo dell'elica rispetto all'asse del tubo. Nell'immagine viene evidenziato il carico di primo snervamento ed il carico ultimo.

carico	deformazione
[kN]	[mm]
10	0
20	0
30	1
40	1
50	1
60	1
70	2
80	2
90	2
100	3
110	3
120	4
130	5
140	6
150	8
160	9
170	12
180	14
190	17
200	21
210	24
220	28

Figura 15 - Valori dei carichi applicati e dei cedimenti corrispondenti

Nell'immagine che segue si riporta il diagramma del carico applicato rispetto alla deformazione dell'elica. È possibile notare il comportamento inizialmente lineare, sino al carico di primo snervamento e, successivamente la transizione graduale al ramo plastico.

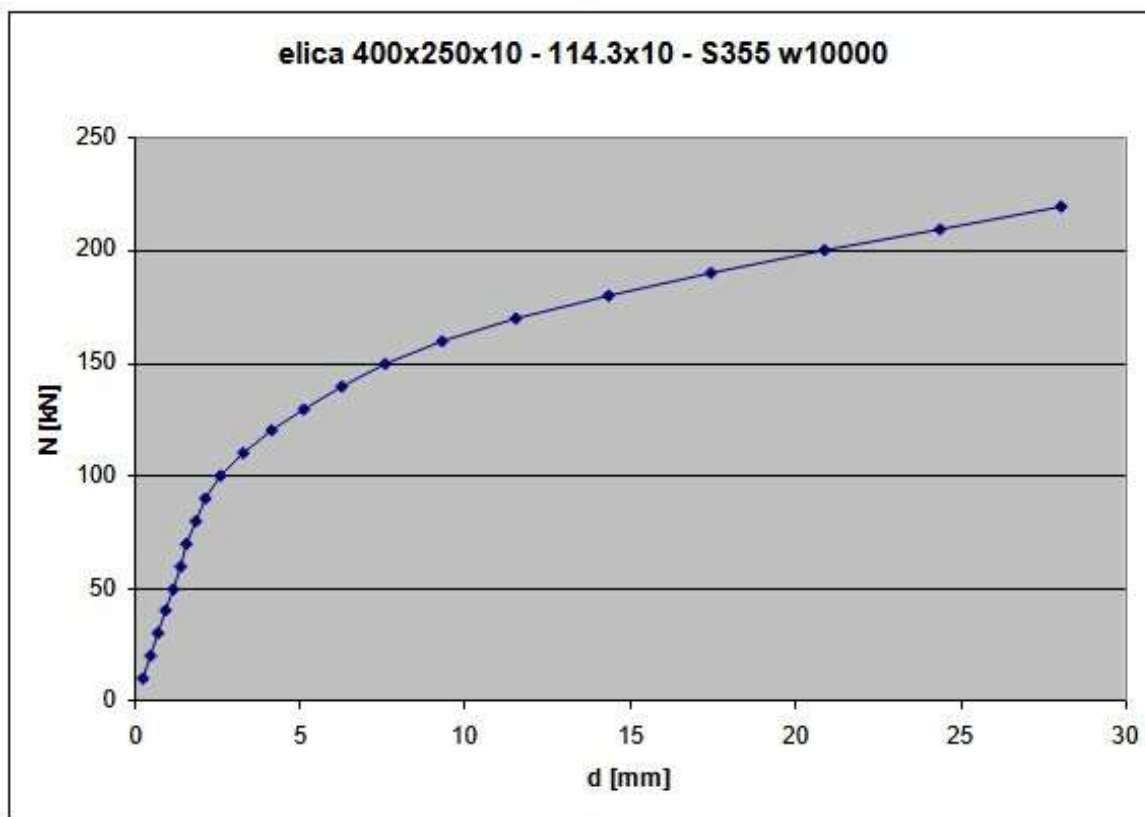


Figura 16

10. Considerazioni in merito alle verifiche secondo DM 2008

Le resistenze meccaniche determinate con gli studi dei paragrafi precedenti sono da intendersi come capacità resistenti ultime caratteristiche determinate secondo il “metodo elastoplastico” (paragrafo 4.2.3.2 del DM 2008). Per le verifiche agli stati limite ultimi, secondo il paragrafo 4.2.4.1.1 del DM 2008, le resistenze di calcolo vanno determinate a partire dalle resistenze caratteristiche secondo la formula.

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M}$$

Dove:

- R_k è la resistenza caratteristica della membratura (nel caso di specie la resistenza dedotta dalle analisi elasto-plastiche);
- γ_M è un coefficiente di sicurezza sul materiale. Per le verifiche di resistenza è assunto pari a 1.05.

11. Precisazioni finali

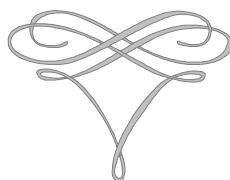
Le analisi svolte in questa memoria riguardano solo il calcolo delle resistenze meccaniche delle eliche. I diagrammi forza-deformazione riportati rappresentano la deformazione elastoplastica dell’elica sottoposta a carico crescente e non rappresentano il diagramma di cedimento del sistema palo-terreno. Le analisi qui svolte non riguardano la portanza geotecnica del palo né il calcolo del cedimento del palo. Le analisi di portanza geotecnica del palo ed il calcolo del cedimento del sistema palo-terreno devono essere sempre di volta in volta svolte in funzione della stratigrafia del sito di installazione.

Ing. Paolo Pavanello

Università di Padova

ANALISI FEM
DELLA RESISTENZA STRUTTURALE
DEI PALI AD ELICA CONTINUA GEOPAL

Luglio 2008



Rev. 02

La presente revisione sostituisce in modo integrale le precedenti redazioni

Introduzione

Scopo del presente studio è quello di indagare la resistenza strutturale della testa dei pali in acciaio Geopal. Il palo in esame è costituito da un elemento tubolare, in acciaio, a cui è connesso, in prossimità della punta, un secondo elemento a forma di spirale elicoidale, realizzato anch'esso in acciaio ed unito all'asta centrale mediante saldatura (fig. 1).

Le dimensioni della spirale possono variare, sia in relazione allo sviluppo longitudinale, ovvero al numero di giri compiuti dalla spira attorno al tubo centrale, sia in funzione del diametro esterno della vite. La spira presenta generalmente una sezione trasversale di tipo trapezoidale, con spessore variabile da un massimo in corrispondenza dell'asta centrale, ad un minimo in corrispondenza del bordo esterno. Analogamente anche l'asta centrale, a sezione anulare, può presentare diversi valori dei parametri geometrici che la definiscono, ovvero dello spessore delle pareti e del diametro esterno del tubo.

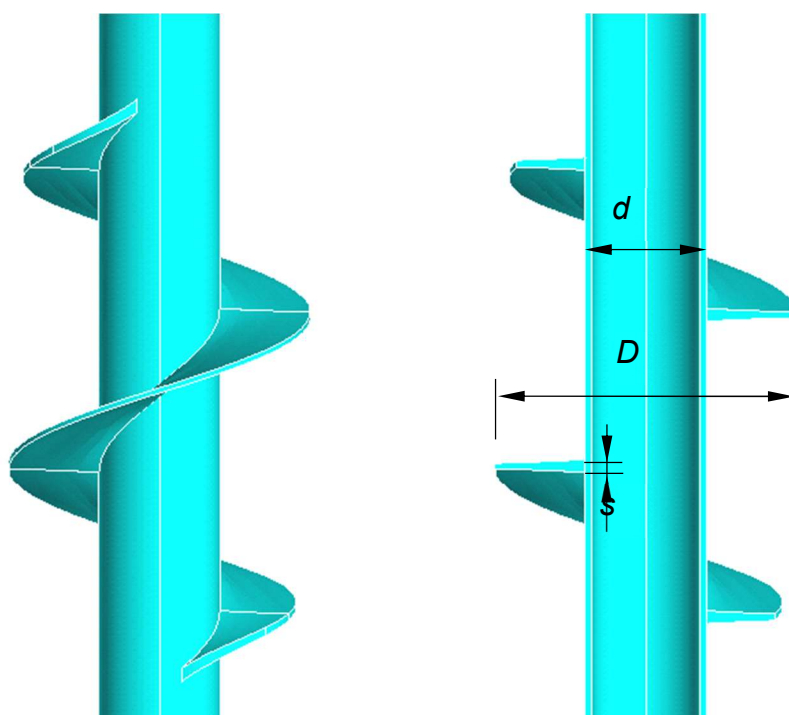


Fig. 1. - Vista frontale e sezione verticale di un palo a elica con indicazione delle dimensioni caratteristiche

Vista la complessità geometrica di questa particolare tipologia di pali, si è indagata la resistenza strutturale facendo ricorso ad analisi numeriche agli elementi finiti (FEM).

Analisi numerica agli elementi finiti

Alla luce della peculiare forma geometrica del palo oggetto di studio, il problema è stato affrontato implementando un modello numerico tridimensionale, volto a rappresentare la specifica geometria della spirale del palo. Per la modellazione sono stati adottati elementi tetraedrici a 10 nodi, dotati di 3 gradi di libertà per nodo, corrispondenti agli spostamenti nelle tre direzioni mutuamente ortogonali x, y, z. Tali elementi presentano funzioni di forma quadratiche, idonee alla modellazione di superfici curvilinee come quelle che caratterizzano la spirale elicoidale.

L'acciaio, con cui è realizzato il palo, è stato modellato come un mezzo elasto-plastico, avente modulo di Young $E = 206 \text{ GPa}$ e rapporto di Poisson $\nu = 0,3$. In particolare si è assunto un comportamento plastico

incrudente di tipo isotropo, con criterio di snervamento di Von Mises (fig. 2). Il valore della tensione di snervamento è stato assunto pari a 235 N/mm^2 , pari a quello previsto in normativa per un acciaio Fe360. Il calcolo è stato svolto considerando, oltre alle non linearità per materiale, anche le non linearità di tipo geometrico.

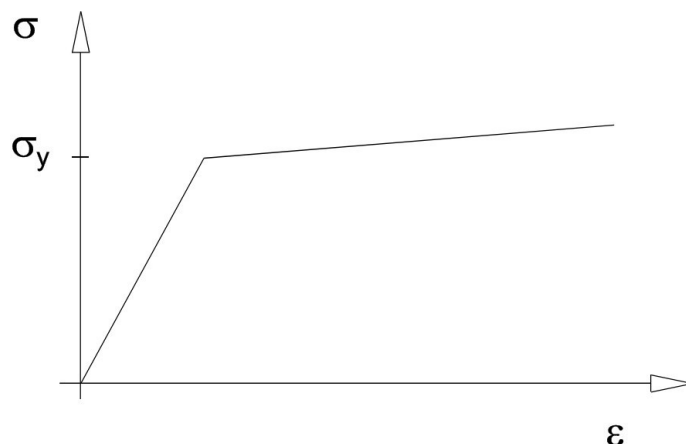


Fig.2 - Legge costitutiva adottata per l'acciaio

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, esse sono rappresentate da vincoli nelle tre direzioni ortogonali applicati a tutti i nodi presenti sulla faccia superiore dell'asta del palo; similmente i nodi appartenenti alla faccia inferiore sono stati vincolati lungo due direzioni orizzontali, mutuamente ortogonali. In corrispondenza della superficie inferiore dell'ala della spirale è stata poi applicata una pressione uniformemente distribuita, normale alla superficie della spira. Ciò equivale a trascurare i fenomeni di attrito all'interfaccia acciaio-terreno.

Tale pressione è stata fatta crescere gradualmente nel corso della simulazione, al fine di valutare l'entità della pressione che produce uno stato di plasticizzazione diffuso lungo la spirale.

In un limitato numero di casi, come sarà meglio descritto in seguito, allorquando si è riscontrato che i fenomeni di plasticizzazione interessavano, oltre che la spira, anche le pareti dell'asta, il calcolo è stato ripetuto assumendo per l'asta centrale un valore della tensione di snervamento pari a 355 N/mm^2 , pari a quello previsto in normativa per un acciaio Fe510, mantenendo invece il valore di 235 N/mm^2 per l'acciaio costituente la spirale. Per ragioni tecnologiche, infatti, non è possibile realizzare la spirale con acciaio di classe superiore a quella dell' Fe360.

Si sottolinea che nel corso delle fasi di produzione del palo, oltre alla verifica delle caratteristiche dei materiali, si dovrà verificare pure l'idoneità dell'unione saldata tra la spira e l'asta. Nelle analisi condotte, infatti, si è ipotizzata la perfetta continuità del materiale tra l'asta del palo e la spirale elicoidale, mentre, nella realtà, tale unione viene realizzata mediante saldatura, eseguita, generalmente, a tratti alterni sulle due facce opposte.

Nelle figg. 3 e 4 si riportano, a titolo di esempio, le viste laterale ed assonometria di alcune delle mesh utilizzate per discretizzare la testa il palo ed il tratto di spirale elicoidale.

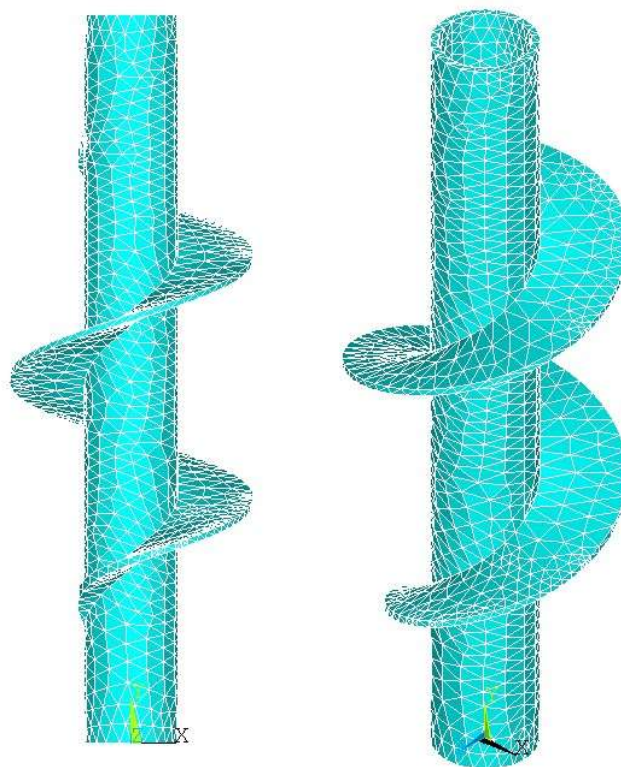
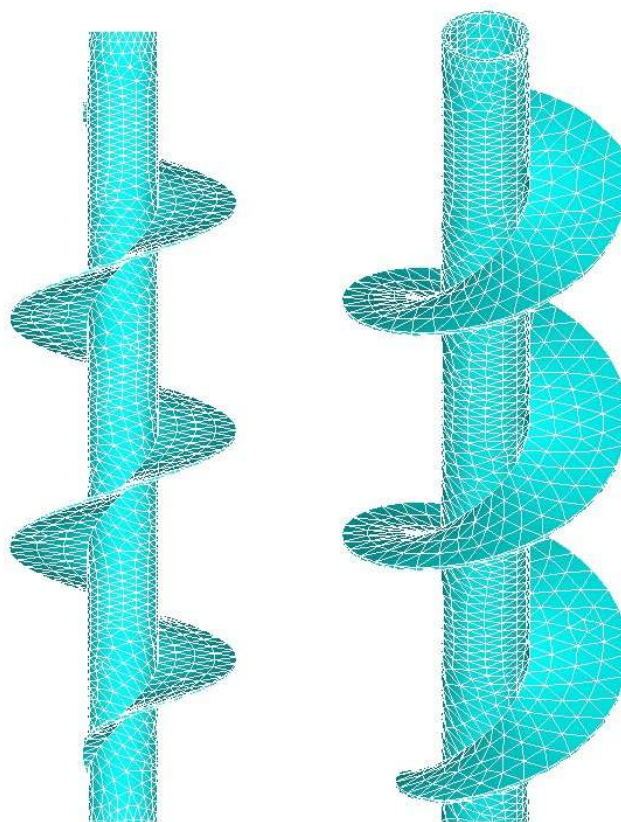


Fig.3 - Vista laterale ed assonometria di una delle mesh utilizzate per modellare i pali



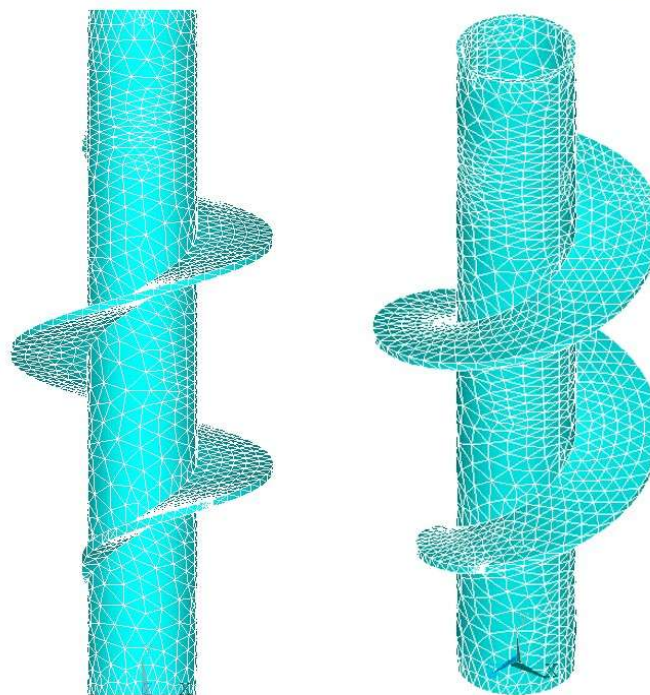


Fig.4 - Vista laterale ed assonometria di alcune delle mesh utilizzate per modellare i pali

Casi analizzati

Le diverse geometrie della spirale e dell'asta centrale, che caratterizzano i pali Geopal, sono state analizzate singolarmente, implementando, per ciascuna geometria di palo, un diverso modello di calcolo che riproduce in modo fedele le dimensioni del palo in esame. Oltre ad analizzare le tipologie standard, sono state condotte anche una serie di analisi volte ad individuare l'influenza, sulla resistenza strutturale del palo, dei principali parametri geometrici che caratterizzano il palo, quali il diametro esterno d dell'asta centrale, il diametro esterno D della spira, lo spessore s dell'ala (si veda la fig.1) ed il passo della spirale.

Le principali caratteristiche geometriche dei casi analizzati sono riassunte nella seguente tabella, unitamente alle caratteristiche del modello implementato per ciascun caso.

Caso	Sigla palo	Diametro esterno spirale (mm)	Passo spirale (mm)	Spessore massimo spirale (mm)	Spessore minimo spirale (mm)	Diametro asta centrale (mm)	Spessore pareti asta (mm)	Numero nodi mesh	Numero elementi mesh
1	P90 (8mm)	230	230	8	4	90	8	14923	8457
2	P90 (12mm)	230	230	12	6	90	8	15006	7375
3	P90 (16mm)	230	230	16	8	90	8	12206	6026
4	D23P114	230	230	12	6	114	8	14910	7341
5	D23P140	230	230	12	6	140	8	16319	8054
6	P114 (8mm)	250	250	8	4	114	8	16218	9436
7	P114 (12mm)	250	250	12	6	114	8	15596	7986
8	P114 (16mm)	250	250	16	8	114	8	15192	7474
9	D25P90	250	250	12	6	90	8	13478	6660
10	D25P140	250	250	12	6	140	8	15912	7815
11	P140 (8mm)	280	280	8	4	140	8	17027	8948

12	P140 (12mm)	280	280	12	6	140	8	17351	8548
13	P140 (16mm)	280	280	16	8	140	8	16666	8255
14	D28P90	280	280	12	6	90	8	14848	7330
15	D28P114	280	280	12	6	114	8	15961	7807
16	D35P114 s	350	350	8	4	114	8	20208	9867
17	D35P114	350	350	12	6	114	8	17825	8722
18	D35P114 b	350	350	15	8	114	8	10621	5510
19	D35P140	350	350	12	6	140	8	20340	9986
20	PP140	400	350	20	12	140	8	23016	11459
21	PP168	400	350	20	12	168	8	24898	12341
22	PP219	400	350	20	12	219	8	22920	11374
23	P GL 90	350	350	12	6	90	8	21315	10137
24	P GL 114	400	400	12	6	114	8	25878	12807
25	P GL 140	450	450	12	6	140	8	22964	11387
26	P90 passo 2/3	230	150	12	6	90	8	11304	5564
27	P90 passo 1/2	230	115	12	6	90	8	10430	5073
28	P90 passo 0	230	0	12	6	90	8	9288	5242

Tabella I - Principali dimensioni geometriche dei pali analizzati

Risultati

Al termine di ciascuna analisi, si è valutata l'entità della pressione normale applicata, in modo omogeneo, alla superficie della spira, che induce nell'acciaio uno stato di sollecitazione superiore alla soglia di snervamento. Si è assunto quindi, come carico limite di plasticizzazione della spirale, il valore di pressione in corrispondenza del quale si osserva la formazione di un diffuso stato di plasticizzazione lungo la spira.

Tale plasticizzazione, nella maggior parte dei casi analizzati, interessa principalmente l'ala della spira e si verifica in corrispondenza della sezione d'incastro. A titolo di esempio si riporta, in fig. 5, una vista assonometrica in cui sono evidenziate le zone di plasticizzazione, mediante indicazione su scala cromatica delle diverse intensità della deformazione plastica equivalente secondo Von Mises. Tale determinazione è una misura della deformazione plastica a taglio subita dal materiale.

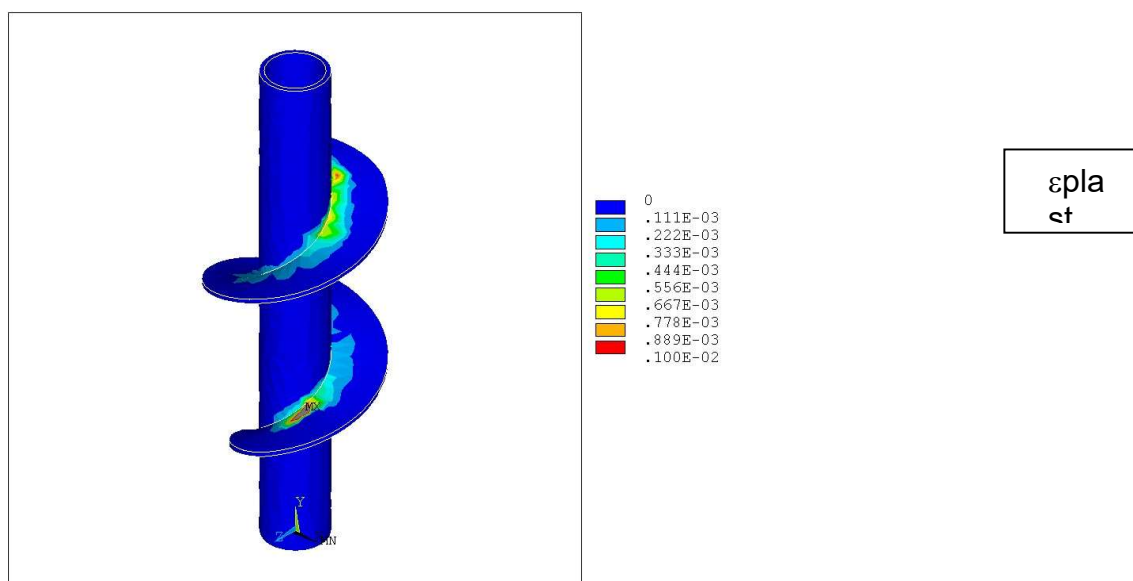


Fig. 5 - Vista assonometrica delle zone di plasticizzazione della spira e dell'asta

In qualche caso, per particolari rapporti delle dimensioni geometriche della spirale, la zona di maggiore plasticizzazione tende a localizzarsi sempre nell'ala ma più all'esterno, restando in vicinanza della sezione d'incastro con l'asta centrale. Un esempio a tal proposito è riportato in fig. 6. In tutti questi casi l'elemento più debole risulta l'ala della spirale ed in particolare la zona prossima all'innesto dell'ala sull'asta centrale. Un incremento delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio dell'asta, ovvero della sua tensione di snervamento o del suo spessore, non incrementa in modo significativo la pressione di plasticizzazione del sistema. A parità di resistenza del materiale, quindi, la resistenza strutturale complessiva della testa del palo dipende principalmente dalle caratteristiche geometriche della spirale (suo spessore e diametro esterno).

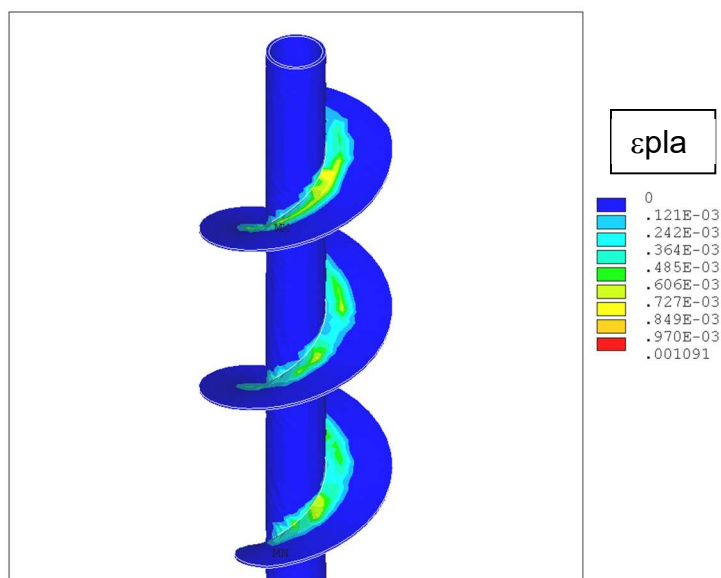


Fig. 6 - Vista assonometrica delle zone di plasticizzazione della spirale e dell'asta

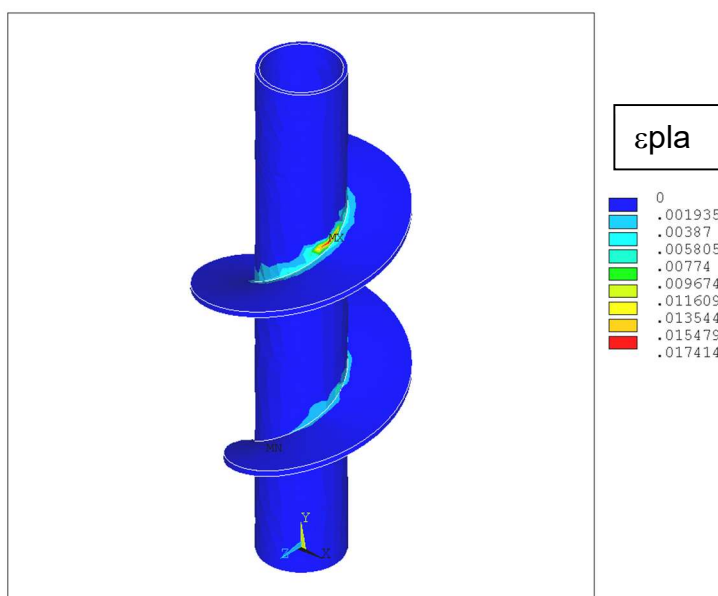


Fig. 7 - Vista assonometrica delle zone di plasticizzazione della spirale e dell'asta

Diversamente, quando lo spessore della spirale diventa rilevante, se rapportato allo spessore delle pareti dell'asta, la plasticizzazione interessa anche l'asta del palo (fig. 7). Tale fenomeno è stato riscontrato per spessori dell'ala pari o superiori a circa due volte quello delle pareti dell'asta.

In questi casi il valore del carico limite di plasticizzazione non è più legato solamente alle caratteristiche geometriche e meccaniche della spirale: un incremento delle caratteristiche meccaniche dell'asta centrale (spessore del tubo e sua tensione di snervamento) porta ad un incremento della pressione limite di plasticizzazione. In questi casi le analisi sono state pertanto eseguite assumendo per l'asta centrale una tensione di snervamento per l'asta pari a 355 N/mm^2 , mentre per la spirale è stata mantenuta la tensione di snervamento di 235 N/mm^2 .

I valori di pressione limite di plasticizzazione, ottenuti per le diverse geometrie considerate nelle analisi condotte, sono riassunti in tabella II.

Caso	Sigla palo	Diametro esterno spirale (mm)	Passo spirale (mm)	Spessore massimo spirale (mm)	Diametro asta centrale (mm)	Spessore pareti asta (mm)	Pressione limite di plasticizzazione (kg/cm^2)
1	P90 (8mm)	230	230	8	90	8	16.8
2	P90 (12mm) *	230	230	12	90	8	38.8
3	P90 (16mm) *	230	230	16	90	8	66.3
4	D23P114	230	230	12	114	8	56.1
5	D23P140	230	230	12	140	8	90.8
6	P114 (8mm)	250	250	8	114	8	17.3
7	P114 (12mm)	250	250	12	114	8	41.8
8	P114 (16mm) *	250	250	16	114	8	71.4
9	D25P90	250	250	12	90	8	29.6
10	D25P140	250	250	12	140	8	65.3
11	P140 (8mm)	280	280	8	140	8	17.1
12	P140 (12mm)	280	280	12	140	8	39.8
13	P140 (16mm) *	280	280	16	140	8	71.9
14	D28P90	280	280	12	90	8	19.9
15	D28P114	280	280	12	114	8	28.6
16	D35P114 s	350	350	8	114	8	6.2
17	D35P114	350	350	12	114	8	13.8
18	D35P114 b	350	350	15	114	8	20.2
19	D35P140	350	350	12	140	8	17.3
20	PP140 *	400	350	20	140	8	28.2
21	PP168 *	400	350	20	168	8	34.7
22	PP219 *	400	350	20	219	8	56.2
23	P GL 90	350	350	12	90	8	10.4
24	P GL 114	400	400	12	114	8	9.7
25	P GL 140	450	450	12	140	8	8.8
26	P90 passo 2/3	230	150	12	90	8	36.7
27	P90 passo 1/2	230	115	12	90	8	35.8
28	P90 passo 0	230	0	12	90	8	33.7
* analisi condotte assumendo per l'asta centrale una tensione di snervamento di 355 N/mm^2							

Tabella II - Valori della pressione limite di plasticizzazione per i casi analizzati

I casi contrassegnati con un asterisco a lato della sigla del palo, sono quelli per i quali si è assunta una tensione di snervamento per l'asta pari a 355 N/mm^2 e per la spirale pari a 235 N/mm^2 . In tutti gli altri casi si è assunta una tensione di snervamento pari a 235 N/mm^2 , sia per la spirale che per l'asta del palo.

I valori della pressione di plasticizzazione mostrano una netta dipendenza dalle tre dimensioni geometriche che caratterizzano il palo: lo spessore dell'ala s , il diametro esterno della spirale D ed il diametro esterno dell'asta centrale d . Tale dipendenza può essere meglio compresa considerando i diagrammi riportati nelle seguenti figg. 8 e 9. Entrambi i diagrammi sono relativi ad uno spessore massimo dell'ala s

pari a 12 mm e sono relativi prevalentemente a casi in cui la plasticizzazione interessa solamente l'ala nella zona d'innesto sull'asta.

Nel diagramma di fig. 8 è riportata la variazione dei valori della pressione limite di plasticizzazione in funzione del diametro esterno d dell'asta del palo, a parità di diametro D della spirale.

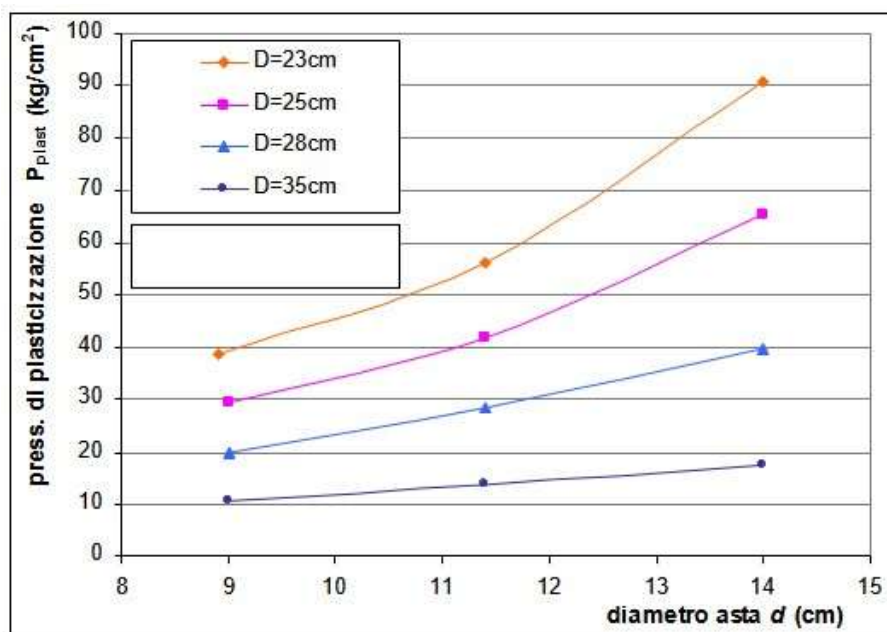


Fig. 8 - Pressione di plasticizzazione in funzione del diametro dell'asta

Nel diagramma di fig. 9 è invece riportata la variazione dei valori della pressione limite di plasticizzazione in funzione del diametro esterno D della spirale, a parità del diametro esterno d dell'asta del palo.

Da tali diagrammi si nota come la pressione di plasticizzazione aumenti al crescere del diametro esterno d dell'asta del palo e diminuisca al crescere del diametro esterno D della spirale.

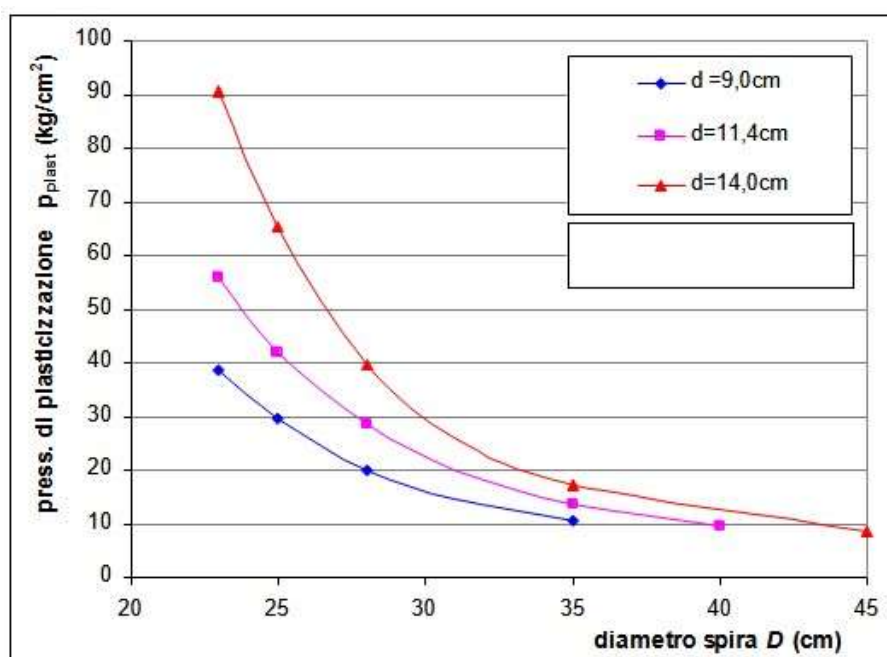


Fig. 9 - Pressione di plasticizzazione in funzione del diametro della spirale

Mediante tali diagrammi è possibile stimare la pressione limite di plasticizzazione per pali con spira dello spessore di 12 mm ma con valori dei diametri D e d intermedi tra quelli considerati nelle analisi.

La variazione della pressione di plasticizzazione in funzione dello spessore dell'ala nella sezione d'innesto è invece rappresentata nel diagramma di fig. 10.

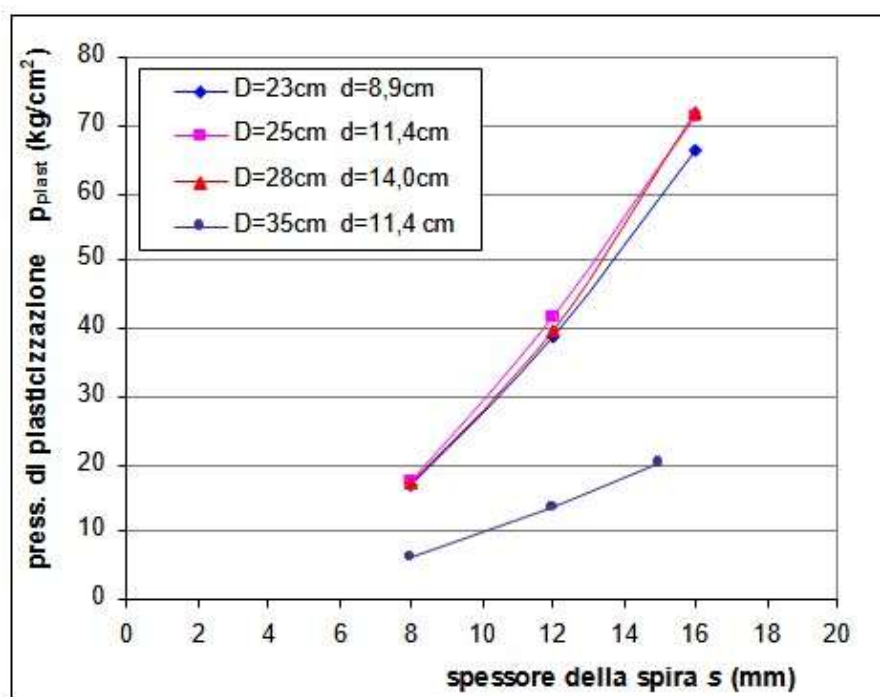


Fig. 10 - Pressione di plasticizzazione in funzione dello spessore della spira

Tale diagramma mostra come, per quattro diverse tipologie di pali, l'incremento della pressione di plasticizzazione sia proporzionale al quadrato dello spessore s dell'ala. In questi casi, quindi, la pressione di plasticizzazione per spirali aventi spessori dell'ala diversi da 12 mm, è ben descritta dalla seguente espressione:

$$p_{\text{plast},s*}$$

dove con $p_{\text{plast},s*}$ si è indicata la pressione di plasticizzazione di un generica spirale avente spessore pari a s * (espresso in mm) e con $p_{\text{plast},12\text{mm}}$ si è indicata la pressione di plasticizzazione della corrispondente spirale avente spessore pari 12 mm e pari diametro dell'asta d e della spira D .

Si precisa che tale espressione è idonea a descrivere la resistenza limite di spirali (in Fe360) fino a spessori dell'ordine di 12mm, qualora l'asta sia realizzata con il medesimo acciaio Fe360, e fino a spessori dell'ordine di 16 mm, qualora l'asta sia realizzata con acciaio Fe510.

Particolare cautela deve essere adottata nell'estendere i valori qui calcolati a spire aventi spessori superiori a quelli sopra indicati o a pali aventi spessore delle pareti dell'asta inferiore al valore qui considerato, pari a 8 mm. Questo perché, come anticipato in precedenza, per elevati spessori della spira e/o bassi spessori dell'asta, i fenomeni di plasticizzazione interessano anche le pareti dell'asta del palo, comportando una riduzione della resistenza limite del sistema.

Analoga cautela deve essere adottata anche nell'estendere i risultati al caso di spirali aventi un'ala con sbalzo assai pronunciato, ovvero rapporto D/d grande, come è il caso dei cosiddetti "pali galleggianti" (contrassegnati dalla sigla P GL), per i quali possono verificarsi fenomeni di plasticizzazione anche all'interno dell'ala stessa. In questi casi, i meccanismi di plasticizzazione sono diversi da quello

preponderante nei casi sopra analizzati, che prevede, invece, la plasticizzazione dell'ala in corrispondenza dell'innesto sull'asta e possono quindi comportare una diversa resistenza del sistema.

Per quanto riguarda l'influenza del passo della spira sulla pressione limite di plasticizzazione, si possono confrontare tra loro i risultati delle analisi n.ro 2 - 26 - 27 - 28. A parità degli altri parametri geometrici del palo, si osserva la tendenza ad una graduale riduzione della pressione di plasticizzazione al decrescere del passo della spira (fig. 11), con un andamento all'incirca lineare.

In particolare, nel caso dell'analisi n. 28, si è analizzato il comportamento di un semplice piatto circolare, come caso limite, rappresentativo di una spirale avente passo nullo. Per la geometria prescelta, il caso limite di piatto circolare mostra una resistenza inferiore di circa il 14% rispetto a quella della spirale a passo quadro, avente pari diametro esterno e pari diametro dell'asta.

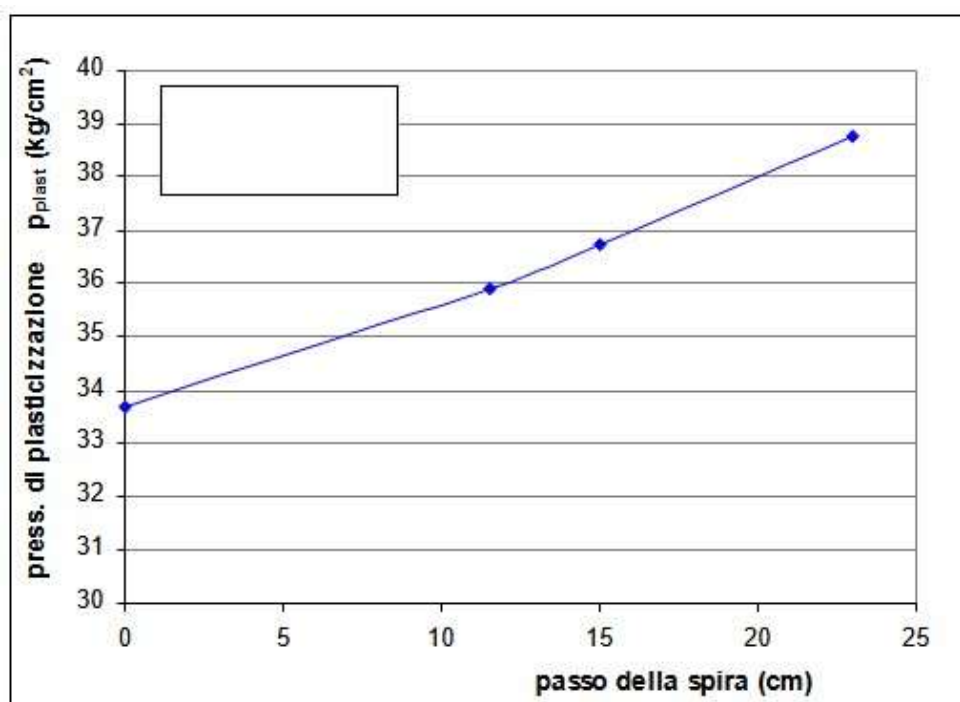


Fig. 11 - Variazione della pressione di plasticizzazione in funzione del passo della spira

In alternativa all'estrapolazione dei risultati sopra esposti, la pressione di plasticizzazione di una spirale può essere stimata anche procedendo per via analitica.

Si consideri, a tal scopo, la sezione trasversale dell'ala della spira, rappresentata in fig. 12 (a destra) ed in particolare il punto d'innesto tra la spira e l'asta, rappresentato ingrandito nella stessa fig. 12 a sinistra.

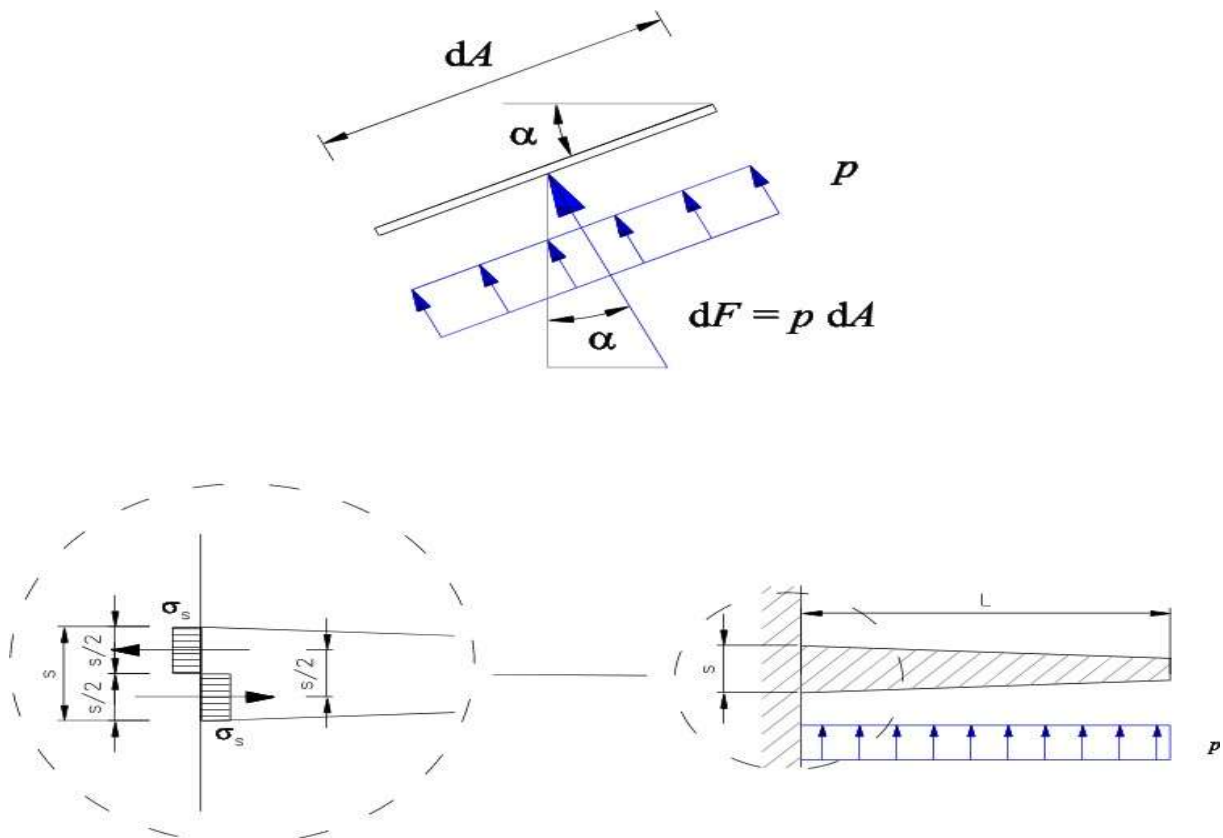


Fig. 12 - Sezione trasversale della spira

Considerando il semplice schema di mensola incastrata, il momento plastico ultimo della sezione d'incastro, per una profondità unitaria, è dato dall'espressione:

$$M_{\text{plast}} = \sigma_s \frac{s}{2} \cdot \frac{s}{2} = \sigma_s \left(\frac{s}{2}\right)^2$$

essendo σ_s la tensione di snervamento dell'acciaio ed s lo spessore della spira.

Il momento dato dalla sollecitazione esterna è invece pari a:

$$M_{\text{est}} = p \frac{L^2}{2}$$

essendo p la pressione uniforme applicata all'ala della spira ed L la lunghezza dello sbalzo dell'ala.

Eguagliando i due momenti si può ricavare il valore della pressione p che provoca la completa plasticizzazione della sezione d'incastro:

$$p \frac{L^2}{2} = \sigma_s \left(\frac{s}{2}\right)^2$$

da cui si ricava l'espressione conclusiva:

$$p_{\text{plast}} = \frac{\sigma_s s^2}{2L^2}$$

Questa trattazione analitica presenta dei chiari limiti e delle evidenti semplificazioni rispetto al problema reale. La posizione del baricentro delle pressioni (di fatto assunta a metà dello sbalzo dell'ala) è senza dubbio diversa da quella che compete ad un settore circolare. Inoltre, sono completamente ignorate le tensioni circonferenziali che si sviluppano all'interno della spira.

Tale trattazione, tuttavia, per quanto semplificata, presenta il pregio di riuscire a descrivere in modo sufficientemente soddisfacente la variazione della pressione di plasticizzazione al variare dei parametri geometrici, nell'ambito delle dimensioni geometriche investigate nel presente studio.

Un confronto tra i risultati delle analisi FEM e le previsioni offerte dal metodo analitico è riportato nelle seguenti figg. 13 e 14 ove i valori ottenuti per via analitica, rappresentati con linea tratteggiata, sono sovrapposti ai risultati delle analisi numeriche, già presentati in precedenza nelle figg. 8 e 9. Si osserva un discreto accordo tra i risultati numerici e quelli analitici, con uno scarto piuttosto contenuto, generalmente inferiore al 13%. Infine, relativamente al campo di valori rappresentato nei diagrammi, i valori ottenuti per via analitica appaiono essere più cautelativi rispetto a quelli forniti dalle analisi numeriche.

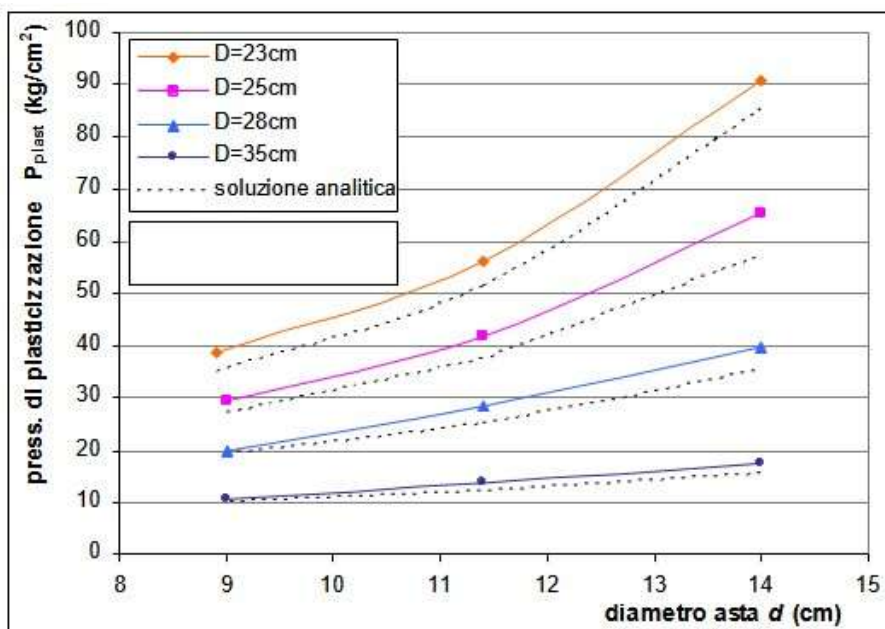


Fig. 13 - Pressione di plasticizzazione in funzione del diametro dell'asta

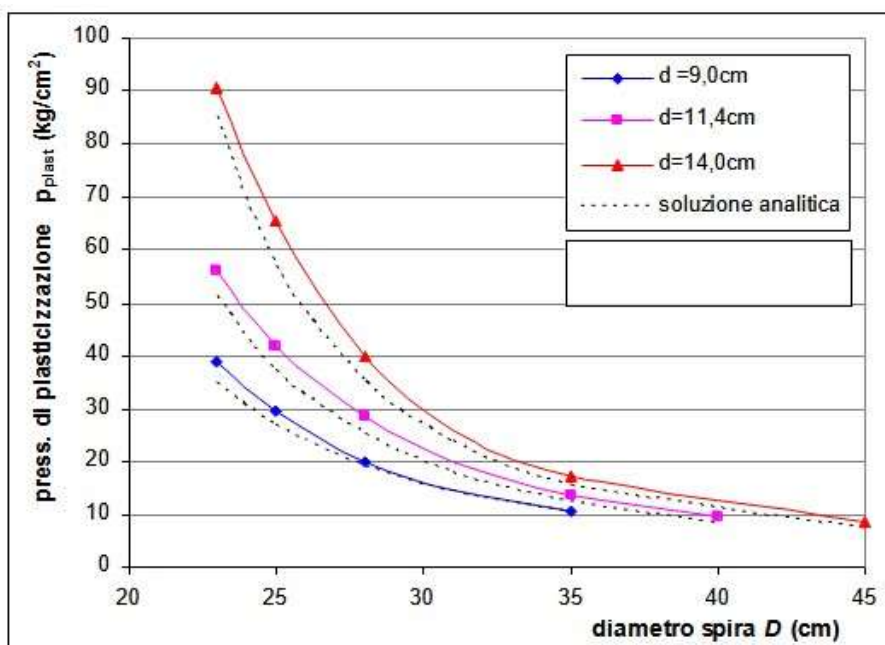


Fig. 14. Pressione di plasticizzazione in funzione del diametro della spira

Si ribadisce, anche in questo caso, che deve essere adottata particolare cautela nell'uso di tale espressione analitica per la stima della pressione di plasticizzazione di spirali aventi sezione di elevato spessore, nel caso di pali aventi spessore dell'asta inferiore al valore qui considerato e nel caso di ali con sbalzo pronunciato. In tutti questi casi, infatti, possono verificarsi fenomeni di plasticizzazione delle pareti

dell'asta o all'interno dell'ala stessa, non prevedibili con la trattazione analitica che considera solo la plasticizzazione dell'ala in corrispondenza della sezione d'incastro. In tali casi, pertanto, la stima analitica potrebbe portare anche ad una sovrastima della resistenza strutturale.

Verifica del palo

I valori di pressione limite, ottenuti dalle analisi FEM o stimati con i metodi esposti nel precedente paragrafo, devono essere confrontati con la massima sollecitazione prevista alla base del palo, al fine di garantire un adeguato fattore di sicurezza alla struttura.

Si osservi che la pressione ipotizzata nelle analisi è applicata in modo uniforme, normalmente alla superficie della spira. La spira, a sua volta, presenta un'inclinazione variabile da punto a punto.

Complessivamente, la pressione applicata dà luogo ad una forza risultante verticale V che si scarica sui vincoli posti al contorno superiore. Tale forza verticale può essere rapportata al numero di giri della spirale al fine di valutare la forza che compete al primo giro di spira, considerato a piena sezione, ovvero prescindendo dal tratto rastremato, avente funzione di raccordo tra la spira e l'asta.

Operando in tal modo, si riscontra che la forza risultante V , per un singolo giro di spira, è pari a:

$$V = p\pi(R^2 - r^2)$$

ovvero è pari al prodotto della pressione p applicata alla spira per l'area della proiezione in pianta della spira stessa, che è proprio pari a:

$$A = \pi(R^2 - r^2)$$

ove con R si è indicato il raggio esterno della spira e con r il raggio esterno dell'asta centrale.

Tale risultato può essere dimostrato anche per via analitica, considerando un generico elementino di spira avente area dA ed inclinazione α rispetto all'orizzontale, come rappresentato in fig. 15.

Su tale elementino agisce una forza risultante pari a $dF = p \cdot dA$, normale alla superficie, che presenta una componente verticale pari a $dV = p \cdot dA \cdot \cos\alpha$.

Tale componente può anche essere vista come il prodotto della pressione p per la proiezione orizzontale dell'area, pari proprio a $(dA \cdot \cos\alpha)$. Pertanto la risultante verticale V della pressione è proprio pari all'integrale della pressione uniforme p sulla proiezione in pianta della spira, ovvero è pari al prodotto della pressione p per l'area della proiezione in pianta della spira stessa.

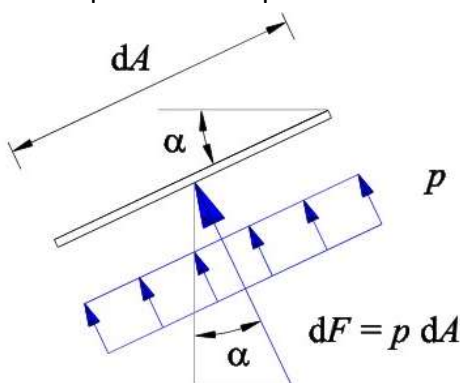


Fig. 15 - Schema della sollecitazione agente su un elementino di spira

Pertanto i valori di pressione limite, ottenuti dalle analisi FEM, se rapportati all'area dell'impronta di base della spira, forniscono dei valori di carico limite di plasticizzazione da confrontarsi con la massima reazione offerta dal terreno alla base del palo.

Nel caso in cui l'asta centrale venga riempita con miscela cementizia si può fare riferimento all'intera area dell'impronta di base della spira. Diversamente si dovrebbe più correttamente detrarre da tale area quella del foro centrale dell'asta.

Al fine di agevolare la scelta delle dimensioni del palo vengono proposti qui di seguito (figg. 16 e 17) due ulteriori diagrammi in cui si riporta il carico ultimo applicabile alla base, nell'ipotesi di asta cava (cioè non riempita), in funzione delle dimensioni geometriche del palo, sempre per spessore dell'ala pari a 12mm.

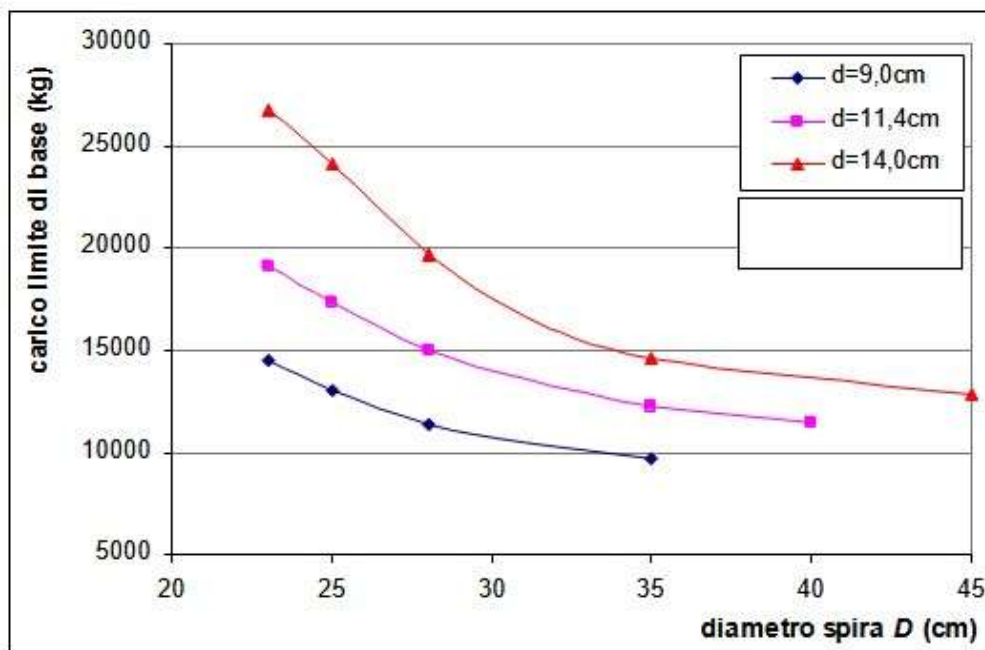


Fig. 16 - Pressione di plasticizzazione in funzione del diametro dell'asta

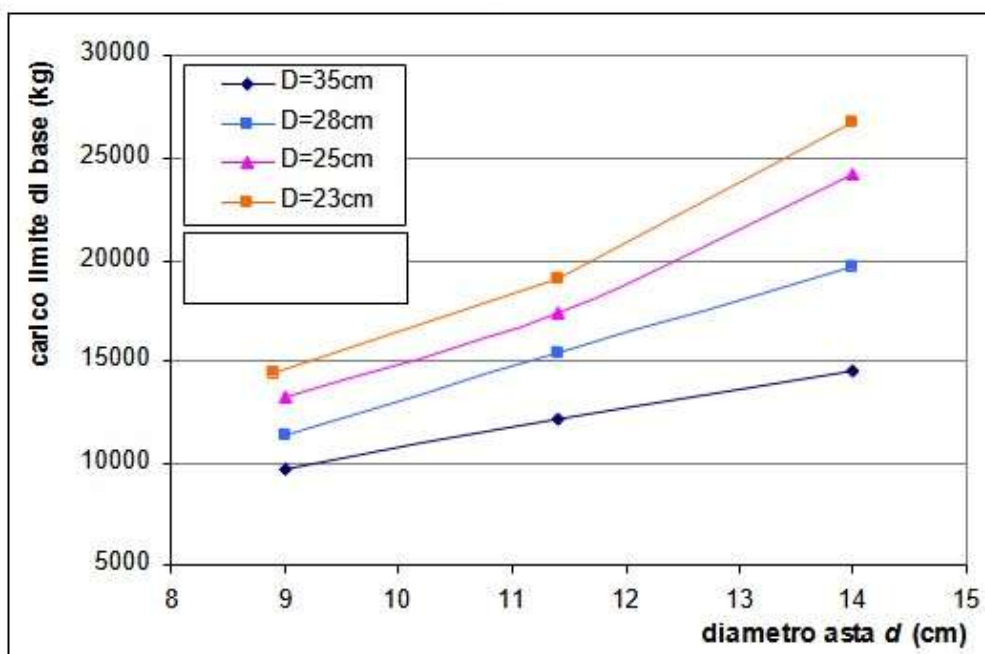


Fig. 17 - Pressione di plasticizzazione in funzione del diametro dell'asta

Noto il carico limite desiderato e fissato il diametro dell'asta è possibile ricavare immediatamente quello della spira, o viceversa, fissato il diametro della spira è possibile ricavare immediatamente quello dell'asta, necessario ad ottenere il carico limite desiderato.

Conclusioni

Nella progettazione di un intervento in un determinato tipo di terreno, si dovrà verificare che la massima sollecitazione prevista alla base del palo, pari alla capacità portante ammissibile di base valutata con i metodi della geotecnica, non superi il carico ammissibile del palo stesso, valutato sotto il punto di vista strutturale.

Il valore del carico ammissibile applicabile alla base del palo, può essere ottenuto a partire dai valori del carico limite di plasticizzazione, applicando un opportuno fattore di sicurezza, scelto a discrezione del progettista, che comunque non deve essere inferiore a quello previsto dalla normativa, pari per l'acciaio a 1,5.

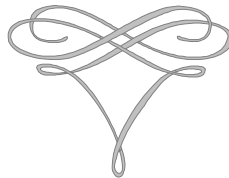
La scelta del fattore di sicurezza dovrà tenere conto del fatto che la reale sollecitazione trasmessa dal terreno alla base del palo può presentare una distribuzione di pressioni diversa da quella uniforme qui ipotizzata. La scelta del fattore di sicurezza dovrà inoltre tenere conto di una possibile riduzione della resistenza nel tempo, per effetto di eventuali fenomeni di corrosione, a meno che quest'ultimi non siano già stati considerati esplicitamente in fase di calcolo, prevedendo un adeguato spessore di sacrificio dell'acciaio

Ing. Paolo Pavanello

Università di Padova

ANALISI FEM
DEL COMPORTAMENTO DEI PALI
A ELICA CONTINUA GEOPAL IN TERRENO COESIVO

Luglio 2008



Rev. 02

La presente revisione sostituisce in modo integrale le precedenti redazioni

Introduzione

Scopo del presente studio è quello di indagare il comportamento statico dei pali in acciaio Geopal. Il palo oggetto di studio è costituito da un elemento tubolare, in acciaio, avente diametro esterno pari a 90 mm. In prossimità della punta è poi presente un allargamento, a forma di spirale elicoidale, realizzato con un secondo elemento, anch'esso d'acciaio, unito all'asta centrale mediante saldatura. La spirale presenta un passo verticale coincidente con il diametro esterno della spira stessa.

Le dimensioni della spirale possono variare, sia in relazione allo sviluppo longitudinale, ovvero al numero di giri compiuti dalla spira attorno al tubo centrale, sia in funzione del diametro esterno della vite. Il numero di giri della spirale è variabile da un minimo di 4 giri ad un massimo di 12 giri. Il diametro esterno, a sua volta, varia da 350 mm a 450 mm. La spira presenta una sezione trasversale di tipo trapezoidale, con spessore variabile da un massimo di 12 mm, in corrispondenza dell'asta centrale, ad un minimo di 6 mm in corrispondenza del bordo esterno.

La vite svolge una duplice funzione: dal punto di vista strutturale essa costituisce un allargamento della sezione resistente del palo, consentendo un notevole incremento della capacità portante. Dal punto di vista operativo, essa permette, nel corso delle operazioni d'infissione, un avanzamento del palo in diretta relazione alla rotazione applicata alla sommità del palo stesso, senza asportazione né rimaneggiamento del terreno presente in sito.

Al fine di studiare l'interazione palo-terreno per questa particolare tipologia di pali, si è fatto ricorso ad analisi numeriche agli elementi finiti (FEM). In particolare è stato esaminato il caso di palo "galleggiante", cioè di palo integralmente infisso in una formazione coesiva. Tale condizione rappresenta uno speciale campo d'impiego dei pali Geopal, particolarmente interessante nei casi in cui non sia presente, a ragionevole profondità, uno strato granulare di adeguata capacità portante, a cui trasferire i carichi applicati al palo.

Analisi numerica agli elementi finiti

Vista la peculiare forma geometrica del palo oggetto di studio, il problema è stato affrontato implementando un modello numerico tridimensionale, volto a rappresentare sia la specifica geometria del palo che il terreno ad esso circostante. Al fine di ridurre l'onere computazionale delle analisi, il modello numerico è stato limitato alla sola porzione inferiore del palo, in corrispondenza della spira.

Per la modellazione sono stati adottati elementi tetraedrici a 10 nodi, dotati di 3 gradi di libertà per nodo, corrispondenti agli spostamenti nelle tre direzioni mutuamente ortogonali x, y, z. Tali elementi sono stati utilizzati per discretizzare sia il palo che il terreno.

È stato esaminato un palo caratterizzato da una spirale a 4 giri con diametro esterno pari a 350 mm. L'acciaio, con cui è realizzato il palo, è stato modellato come un mezzo elastico ideale, avente modulo di Young $E = 206 \text{ GPa}$ e rapporto di Poisson $\nu = 0,3$.

Per quanto riguarda il terreno, visto il campo d'impiego di tale tecnologia, sono stati considerati suoli di natura coesiva. Come è noto, tali terreni mostrano, all'applicazione di un carico, un comportamento di tipo non drenato; per tale motivo le analisi sono state condotte in termini di tensioni totali. Per la descrizione del comportamento meccanico del terreno si è assunta una legge costitutiva elasto-plastica perfetta, con criterio di rottura di von-Mises, assumendo una coesione non drenata $c_u = 22 \text{ kPa}$ e parametri elastici $E = 50 \text{ MPa}$ e $\nu = 0,49$. Agli elementi terreno è stato inoltre assegnato un peso di volume pari a $19,6 \text{ kN/m}^3$.

Come anticipato, il modello numerico considera la sola parte terminale del palo, per un'estensione di 2,0 m a partire dalla punta. I contorni sono stati fissati considerando, al di sotto della testa del palo, uno

Le simulazioni sono state condotte, instaurando, inizialmente, uno stato tensionale nel terreno di tipo geostatico. Successivamente si è materializzato il palo, senza alterare lo stato tensionale iniziale. Questa fase corrisponde ad ipotizzare che l'infissione del palo avvenga senza arrecare un significativo disturbo tensionale al terreno in sito. Infine, si è applicata, alla testa del palo, una forza verticale, progressivamente crescente. In tal modo è stato possibile valutare gli stati di sollecitazione e di deformazione, nel palo e nel terreno, per diversi livelli del carico.

Fig.1 - Vista laterale ed assonometria della mesh utilizzata per modellare la spirale del palo

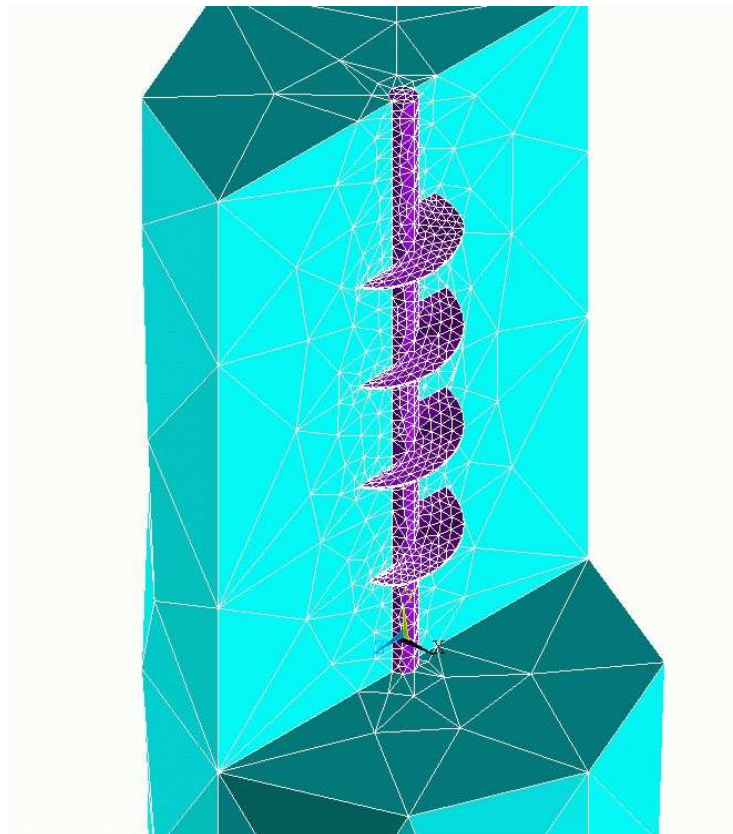


Fig. 2 - Vista parzialmente esplosa della mesh

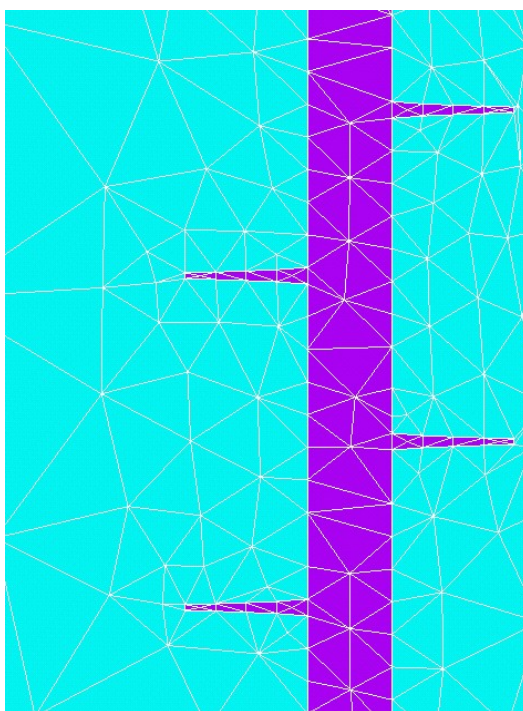


Fig. 3 - Dettaglio della mesh in una sezione trasversale posta in corrispondenza del tratto di spirale elicoidale

Analisi dei risultati

Un primo modo di analizzare i risultati ottenuti è quello di considerare la curva carico-cedimento (fig.4). Tale diagramma riporta in ascissa il valore della forza applicata alla testa del palo ed in ordinata il corrispondente abbassamento del palo. Tale curva presenta un tipico andamento: è possibile notare un primo tratto pressoché rettilineo, in corrispondenza del quale le deformazioni nel terreno sono prevalentemente elastiche. Successivamente si osserva un più rapido incremento dei cedimenti al crescere del carico applicato. In questa fase entrano in gioco i processi di plasticizzazione che si fanno via via sempre più estesi, fino a giungere in prossimità del cinematismo di collasso, quando piccoli incrementi di carico comportano elevati cedimenti del palo.

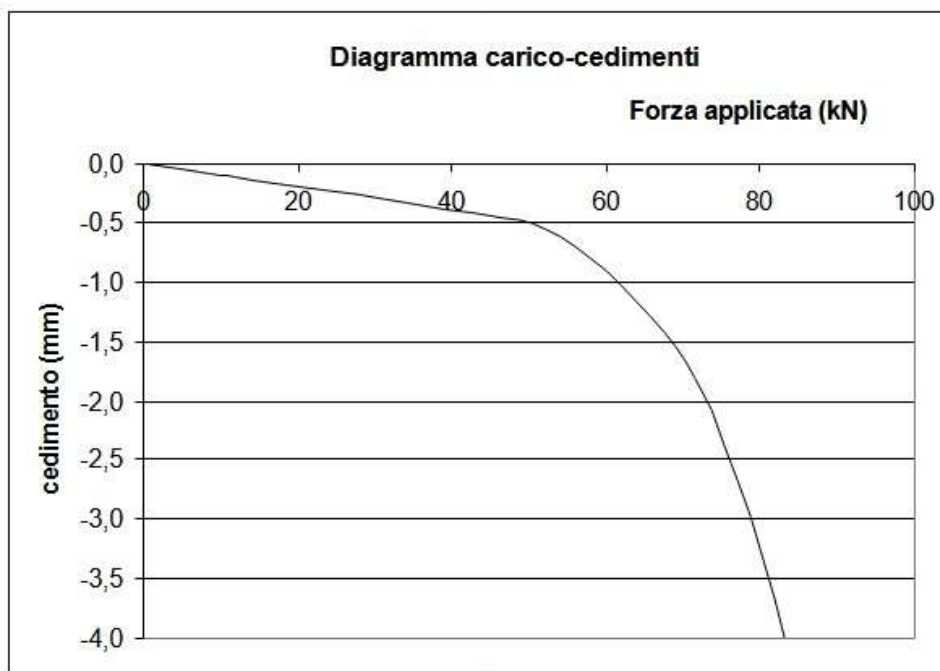


Fig. 4 - Tipica curva carico-cedimento per un palo in terreno coesivo

Nell'ambito dei carichi di esercizio, ovvero per carichi inferiori al valore di rottura del terreno, si instaura un meccanismo di trasferimento dei carichi dalla spirale elicoidale al terreno che può essere visualizzato analizzando l'andamento delle tensioni principali (fig 5). In tale figura è riportata una sezione trasversale in corrispondenza a due successive ali della spirale. Come si può osservare, le tensioni principali di compressione delineano un andamento delle linee di forza di tipo curvilineo che, partendo dall'ala della spirale, si allarga all'esterno, diffondendo la sollecitazione dalla spirale elicoidale al terreno circostante.

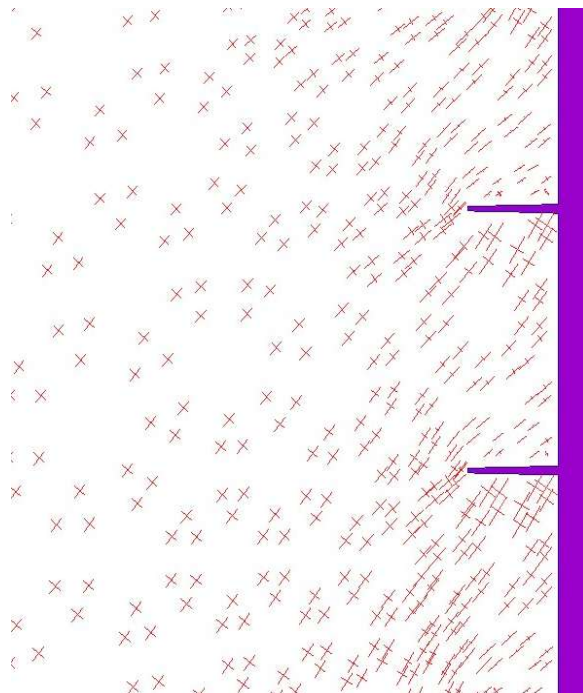


Fig. 5 - Orientazione delle tensioni principali in una sezione trasversale

Quando il carico applicato al palo si avvicina al valore ultimo di capacità portante, si rende invece manifesto il cinematisma di rottura.

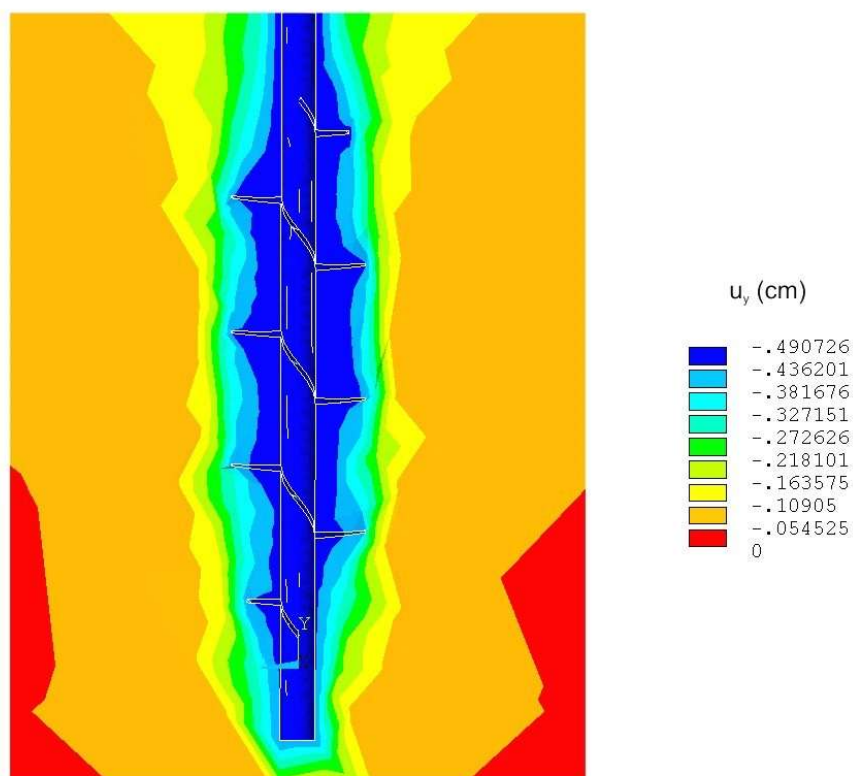


Fig. 6 - Contour degli spostamenti verticali u_y

A tale proposito si può osservare dalla fig. 6, che riporta i contour degli spostamenti verticali, come il cedimento del palo sia associato alla formazione di una superficie di scorrimento, che in prima

approssimazione si può considerare cilindrica, esterna alla spirale elicoidale; lungo tale superficie viene raggiunta la resistenza al taglio del terreno.

Nella fig 7 sono riportati, in vista assonometrica e laterale, gli analoghi contour degli spostamenti verticali (u_y), relativi alla testa del palo. È possibile notare come le ali della spirale tendano a curvarsi verso l'alto in maniera più o meno marcata, in relazione ai diversi livelli di pressione trasmessi al terreno dai diversi giri della spira.

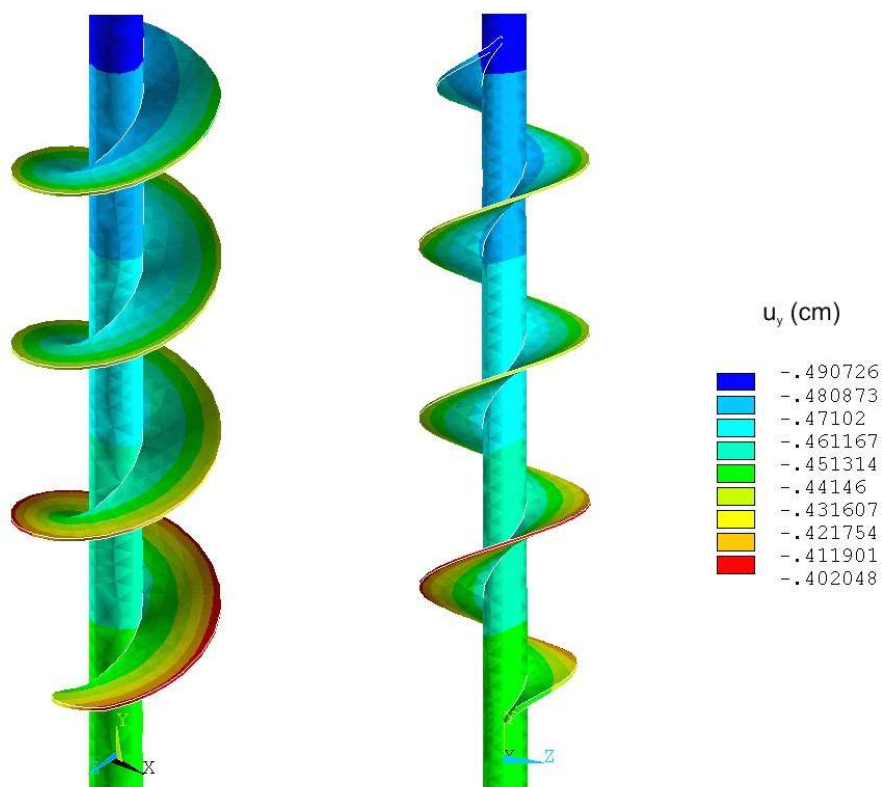


Fig. 7 - Contour degli spostamenti verticali: vista assonometrica e laterale

Al fine di valutare lo stato di tensione che si instaura nella spirale, si riportano in fig. 8 i contour della tensione equivalente secondo von Mises, definita, in funzione delle tensioni principali, per mezzo della seguente espressione:

$$\sigma_e = \left(\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right)^{\frac{1}{2}}$$

In tale rappresentazione si può osservare come la porzione di spirale maggiormente sollecitata sia rappresentata dal primo giro, partendo dal basso. I giri successivi mostrano un grado di sollecitazione nettamente inferiore. Si può ancora osservare come l'ultimo giro della spirale mostri uno stato di sollecitazione maggiore rispetto ai giri immediatamente sottostanti, ma comunque inferiore a quello del primo giro.

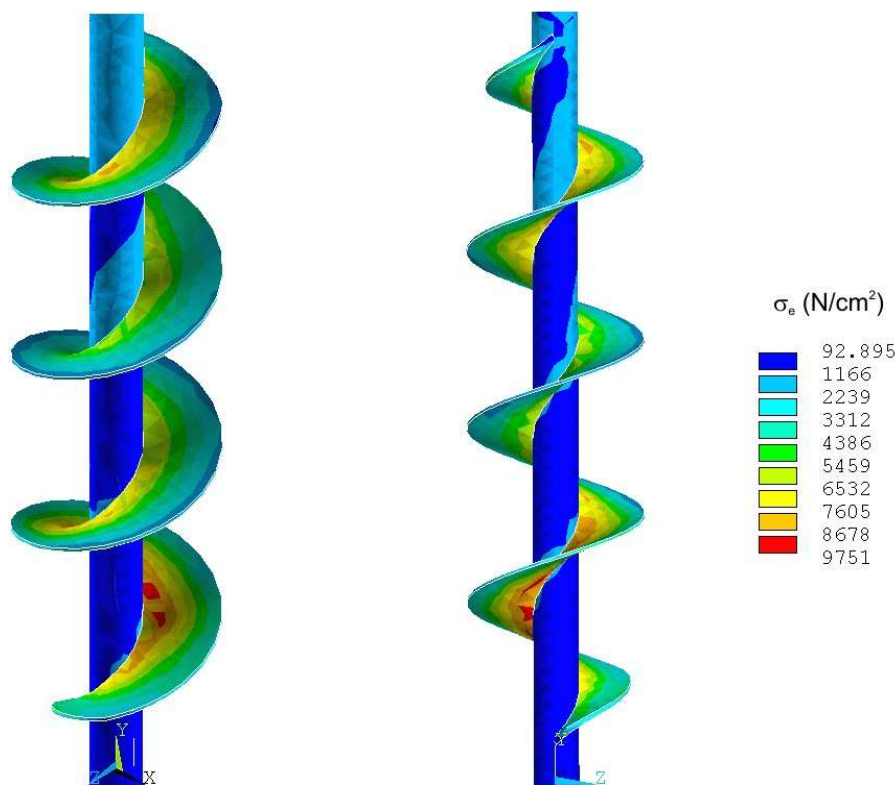


Fig. 8 - Contour della tensione equivalente secondo von Mises: vista assometrica e laterale

Indicazioni per il calcolo della capacità portante dei pali in terreni coesivi

Per quanto visto, il comportamento statico del palo Geopal in terreno coesivo può essere assimilato a quello di un palo in acciaio, avente una sezione maggiorata in corrispondenza del tratto elicoidale. In tale tratto si può considerare, in prima approssimazione, che il comportamento sia simile a quello di un palo equivalente, avente diametro pari al diametro esterno della spirale. La capacità portante può quindi essere valutata come somma di tre termini:

$$Q_{lim} = Q_{base} + Q_{L1} + Q_{L2}$$

dove Q_{base} è la capacità portante data dalla base del palo, Q_{L1} è il contributo legato all'attrito laterale che si sviluppa in corrispondenza del tratto di spirale elicoidale ed infine il termine Q_{L2} è dato dall'attrito tra il terreno e la superficie laterale dell'asta del palo.

Tali termini possono essere così calcolati:

- *Capacità portante di base (Q_{base})*

La capacità portante di base può essere valutata, secondo gli usuali metodi di calcolo per pali in terreni coesivi presenti nella letteratura tecnica. In particolare si ricorda l'espressione:

$$Q_{base} = (9c_u + \sigma_v)A_{base}$$

dove A_{base} è l'area corrispondente alla proiezione in pianta della spirale, c_u è la coesione non drenata e σ_v è la tensione verticale totale agente in corrispondenza della punta.

Nel caso dei pali ad elica l'area di base andrà valutata considerando l'impronta in pianta della spirale; si ha pertanto:

$$A_{base} = \pi D^2/4 \quad \text{dove } D \text{ è il diametro esterno della spira}$$

$$\sigma_v = \gamma L \quad \text{dove } \gamma \text{ è il peso di volume del terreno ed } L \text{ è la lunghezza del palo}$$

- *Portata per attrito laterale nel tratto a spirale (Q_{L1})*

Tale termine tiene conto dell'attrito che si sviluppa lungo la superficie di rottura cilindrica passante immediatamente all'esterno della spira

$$Q_{L1} = c_u \cdot A_{L1}$$

nella quale c_u è la coesione non drenata ed A_{L1} è la superficie laterale in corrispondenza della spirale del palo. Tale termine può anche essere così riscritto:

$$A_{L1} = \pi D b \quad \text{dove } D \text{ è il diametro esterno della spira e } b \text{ la sua estensione longitudinale}$$

- *Portata per attrito laterale lungo l'asta del palo (Q_{L2})*

Per valutare tale termine si può fare riferimento alla seguente espressione:

$$Q_{L2} = \alpha \cdot c_u \cdot A_{L2}$$

nella quale α è un fattore di adesione che tiene conto degli effetti indotti nel terreno dall'infissione del palo; c_u è la coesione non drenata ed A_{L2} è la superficie laterale dell'asta del palo.

Per la stima del parametro α si può fare riferimento a quanto riportato in letteratura tecnica nel caso dei pali battuti.

In particolare, i valori proposti sono i seguenti:

per $c_u \leq 25 \text{ kPa}$	$\alpha = 1.0$
per $25 \text{ kPa} < c_u < 70 \text{ kPa}$	$\alpha = 1 - 0.011(c_u - 25)$
per $c_u \geq 70 \text{ kPa}$	$\alpha = 0.5$

Come indicato in precedenza, il calcolo della capacità portante ultima del palo può essere effettuato considerando la somma di tre termini:

$$Q_{lim} = Q_{base} + Q_{L1} + Q_{L2}$$

Occorre osservare che il carico limite Q_{lim} rappresenta la massima sollecitazione applicabile al terreno. Esso pertanto è pari alla somma della forza verticale applicata alla testa del palo e del peso del palo stesso. Nel caso in esame il peso del palo è dato dal peso del manufatto d'acciaio e dal peso del volume di terreno compreso tra le spire, che, a rottura, trasla solidalmente al palo stesso. Inoltre, al di sopra della spirale elicoidale agisce una certa aliquota della tensione verticale litostatica, non facilmente valutabile, che comunque incrementa la sollecitazione verticale complessiva. Per tali motivi si può cautelativamente assumere che la sollecitazione supplementare trasmessa alla fondazione sia pari al peso della colonna di terreno sovrastante l'impronta di base della spirale elicoidale.

Al fine di calcolare la forza netta applicabile alla testa del palo è quindi opportuno calcolare una capacità portante di base ridotta, secondo la seguente espressione:

$$Q_{base} = c_u A_{base}$$

Come si può notare in tale termine è stato sottratto il contributo dovuto alla tensione verticale, pari per l'appunto al peso del terreno sovrastante: $\gamma L A_{base}$.

La forza netta limite (F_{lim}) applicabile alla testa del palo può ora essere agevolmente calcolata per mezzo dell'espressione algebrica:

$$F_{lim} = Q_{base} + Q_{L1} + Q_{L2}$$

Da tale valore si potrà dedurre il valore del carico ammissibile, mediante applicazione di un opportuno fattore di sicurezza che tenga conto sia delle incertezze geotecniche che delle semplificazioni introdotte nel calcolo.

Stima dei cedimenti

Cedimento istantaneo all'applicazione del carico

Al fine di valutare il cedimento istantaneo all'applicazione del carico, si può fare riferimento ad un diagramma carico-cedimento come quello riportato precedentemente in fig. 4. Come è facilmente intuibile, in condizioni di esercizio, ovvero per carichi inferiori od uguali al carico ammissibile, il comportamento del terreno è ancora prevalentemente elastico (tratto rettilineo del diagramma) ed il valore del cedimento misurato dipende essenzialmente dal modulo elastico del terreno. Per poter valutare l'influenza di tale parametro, unitamente a quella di altri fattori di tipo geometrico (lunghezza del palo, lunghezza della spirale, ecc.) sono state condotte numerose analisi agli elementi finiti. Al fine di testare il maggior numero possibile di casi, si è scelto di operare ricorrendo ad uno schema di calcolo semplificato. In questo caso, infatti, la schematizzazione del palo è stata effettuata in assialsimmetria. La spirale elicoidale, chiaramente non rappresentabile in uno schema assialsimmetrico, è stata sostituita da una serie di piatti circolari, in numero pari al numero di giri della spirale, aventi diametro pari a quello della spirale e disposti con un interasse pari al passo della spirale. In tale schema è stato modellato l'intero palo, per tutta la sua lunghezza.

Per quanto riguarda le leggi costitutive adottate per i materiali, valgono, anche in questo caso, le indicazioni fornite a proposito del modello di calcolo tridimensionale. Per la scelta dei valori del modulo di Young non drenato E_u , si è fatto riferimento alle correlazioni, presenti in letteratura, con altri parametri geotecnici. In particolare si è fatto ricorso ad una correlazione tra il modulo E_u e la coesione non drenata c_u . Tale legame può essere esplicitato nella seguente forma:

$$E_u = 400c_u$$

nella quale è stato considerato per la coesione non drenata un campo di valori che va da 20 kPa a 120 kPa. L'espressione sopra indicata è valida per terreni coesivi di media plasticità ($0.3 < I_p < 0.5$), da normal-consolidati a leggermente sovraconsolidati ($OCR < 3$). Al di fuori di tale campo di valori, valgono analoghe espressioni, riportate per completezza nella tabella sottostante.

OCR	E_u/c_u		
	$I_p < 0.3$	$0.3 < I_p < 0.5$	$I_p > 0.5$
< 3	800	400	200
3 ÷ 5	500	300	150
> 5	300	200	100

Tab. I - Valori del rapporto E_u/c_u presenti in letteratura

Il modello predisposto per queste analisi è stato definito ponendo il limite destro a 3.0 m dall'asse del palo ed il limite inferiore a 3.5 m al di sotto della testa del palo. Sui due contorni laterali sono stati disposti vincoli a carrello, che consentono gli spostamenti verticali ma impediscono quelli orizzontali. Il contorno inferiore è stato invece limitato con vincoli a cerniera. Nella fig. 9 è rappresentato lo schema adottato per le analisi condotte in condizione assialsimmetrica ed un dettaglio della mesh in prossimità dei piatti della spirale.

Nel diagramma di fig. 10 è invece proposto un confronto tra le curve carico-cedimento ottenute dal modello 3D e da quello 2D, per uno stesso valore della coesione non drenata del suolo.

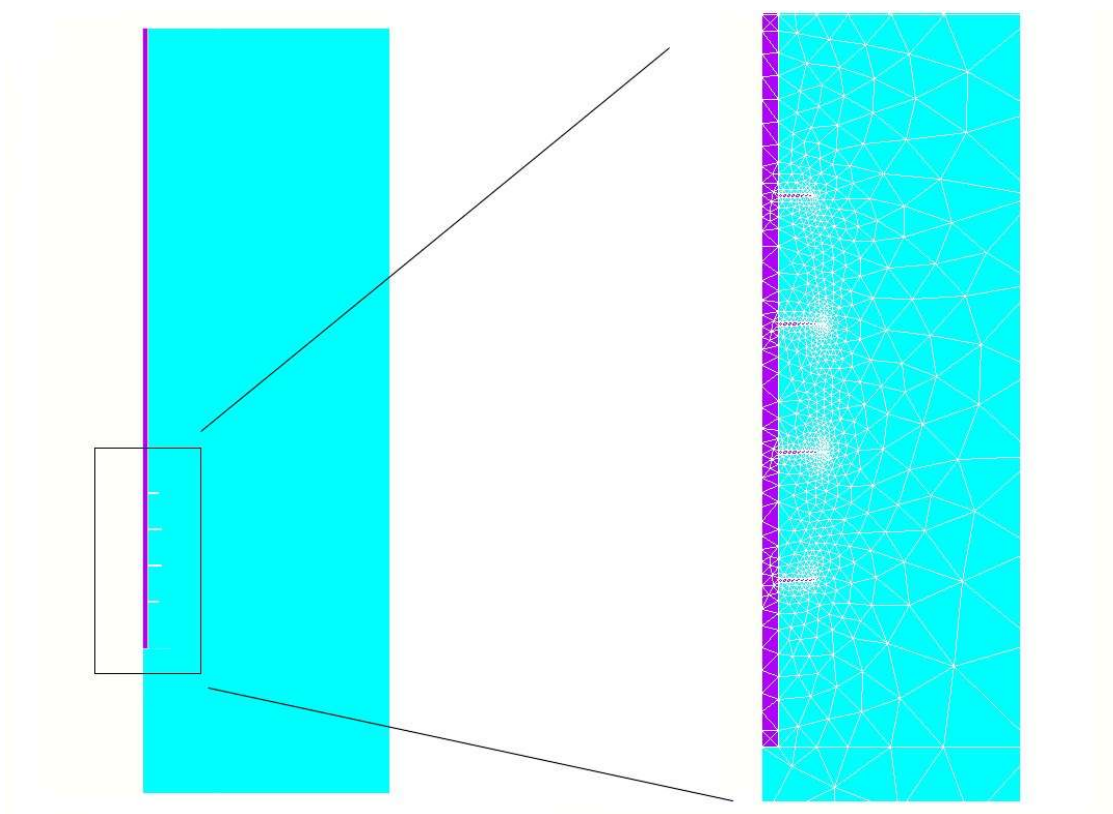


Fig. 9 - Schema assialsimmetrico e dettaglio della mesh

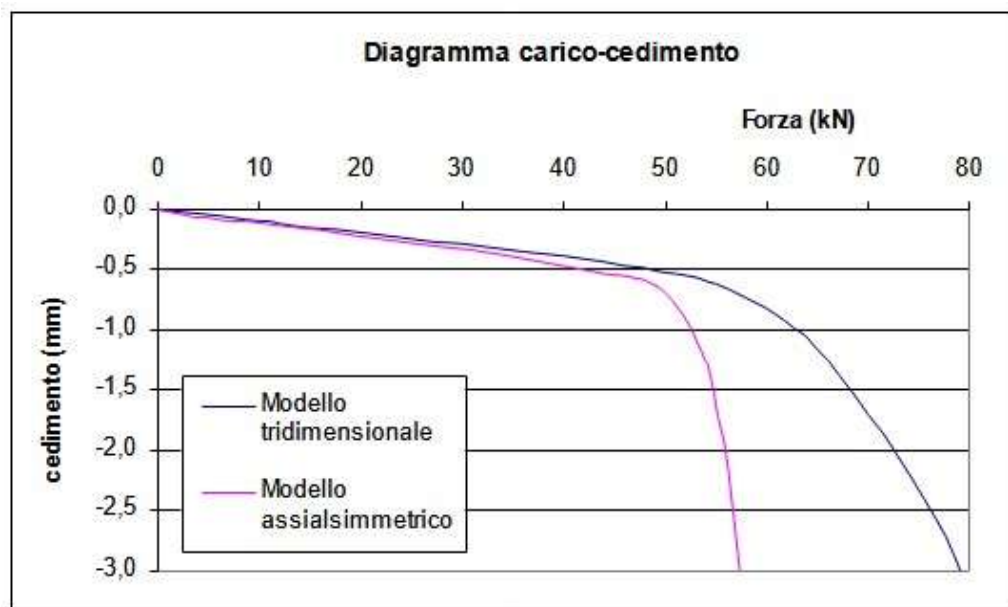


Fig. 10 - Confronto tra i risultati ottenibili con il modello tridimensionale e con quello assialsimmetrico

Come si può osservare il modello assialsimmetrico delinea valori della capacità portante leggermente inferiori a quelli forniti dal modello 3D. Tuttavia il primo tratto della curva carico-cedimento, quello d'interesse per la stima dei cedimenti sotto carichi d'esercizio, mostra un andamento sostanzialmente identico a quello ottenibile con un modello tridimensionale.

Al fine di fornire delle semplici indicazioni per la stima del cedimento immediato, i dati riassunti nella curva carico-cedimento di un dato palo possono essere ridotti ad un unico valore significativo. A tal scopo si può fare riferimento al valore del cedimento registrato per un carico applicato pari al carico ammissibile, valutato secondo le espressioni analitiche precedentemente sviluppate. Per valori del carico inferiori al carico ammissibile, data la linearità del primo tratto della curva carico-cedimento, si potrà dedurre il cedimento corrispondente per proporzionalità diretta.

Nel diagramma di fig. 11 viene proposto un primo confronto tra i valori dei cedimenti, per un carico applicato pari al carico ammissibile, al variare della lunghezza del palo, ovvero della profondità d'infissione. Il confronto è stato eseguito mantenendo inalterate le caratteristiche del terreno e la geometria della testa del palo. Al crescere della lunghezza del palo si registra un lieve incremento del carico ammissibile: tale incremento non si riflette tuttavia in una significativa differenza del cedimento. Presumibilmente ciò può essere imputato al fatto che, al crescere della profondità d'infissione, il terreno posto in corrispondenza della spirale subisce un effetto d'irrigidimento, dovuto alla maggiore tensione di confinamento. Complessivamente la lunghezza del palo non sembra influenzare in maniera significativa i cedimenti immediati. Per tale motivo nel seguito si farà riferimento al palo della lunghezza di 6 m.

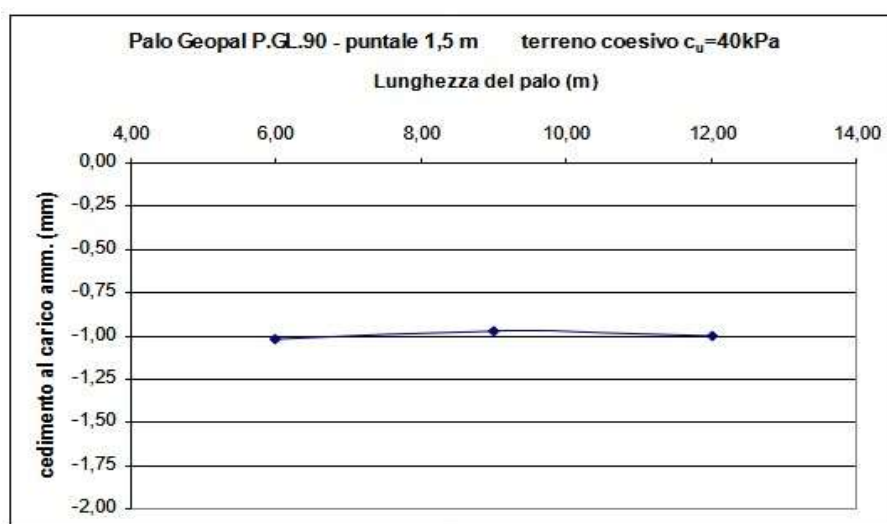


Fig. 11 - Variazione del cedimento immediato in funzione della lunghezza del palo

Nella fig. 12 viene invece evidenziato come il cedimento sia inversamente proporzionale al valore del modulo elastico non drenato E_u prescelto. In particolare, al raddoppiare del valore del modulo elastico si dimezza l'entità del cedimento. Tale considerazione permette di estendere i risultati qui ottenuti ad altri casi, non direttamente considerati, che presentino valori del modulo elastico che si discostano dai valori di riferimento considerati nella presente trattazione.

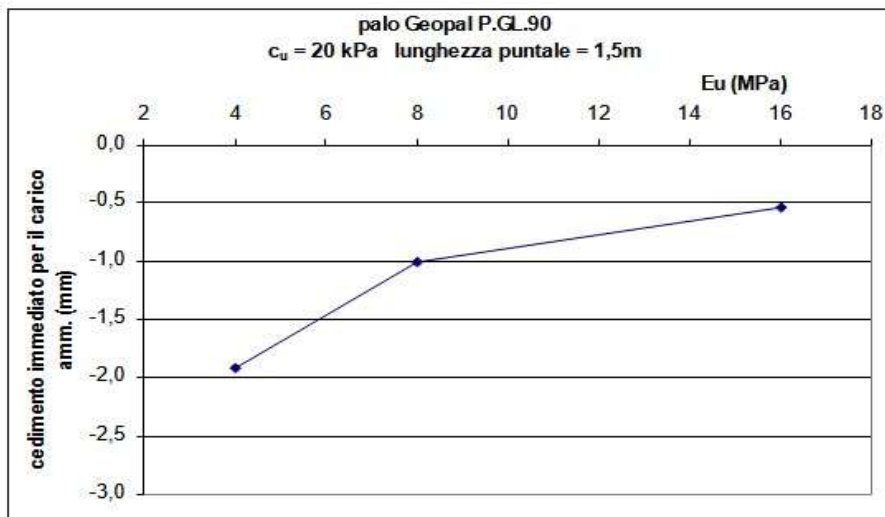


Fig. 12 - Variazione del cedimento immediato in funzione del modulo elastico E_u

Nella fig. 13 viene riportato un abaco per la stima dei cedimenti immediati in funzione del valore della coesione non drenata (c_u) e della lunghezza della spirale elicoidale. Si osservi che al crescere della coesione non drenata si ha un incremento del carico ammissibile ma parallelamente anche un aumento del modulo elastico non drenato e quindi della rigidezza del terreno. Come si può notare, complessivamente, la variazione di questi due termini comporta una relazione di tipo lineare tra il valore del cedimento immediato e quello della coesione, con valori crescenti al crescere della c_u . A prima vista, tale diagramma può dare l'errata impressione che, a parità di coesione non drenata, un palo con spirale della lunghezza di 4.5 m ceda più di un palo avente una spirale di lunghezza inferiore. Ciò è chiaramente in contrasto con quanto l'intuito tende ad indicare.

In effetti i valori di cedimento riportati nell'abaco, a parità di c_u , per i diversi tipi di palo, non sono riferiti al medesimo valore di forza applicata. Come già indicato in precedenza, i cedimenti sono riferiti ad un carico pari a quello ammissibile e tale valore è chiaramente diverso per un palo con puntale della lunghezza di 4.5 m rispetto ad un palo con minore lunghezza del tratto elicoidale.

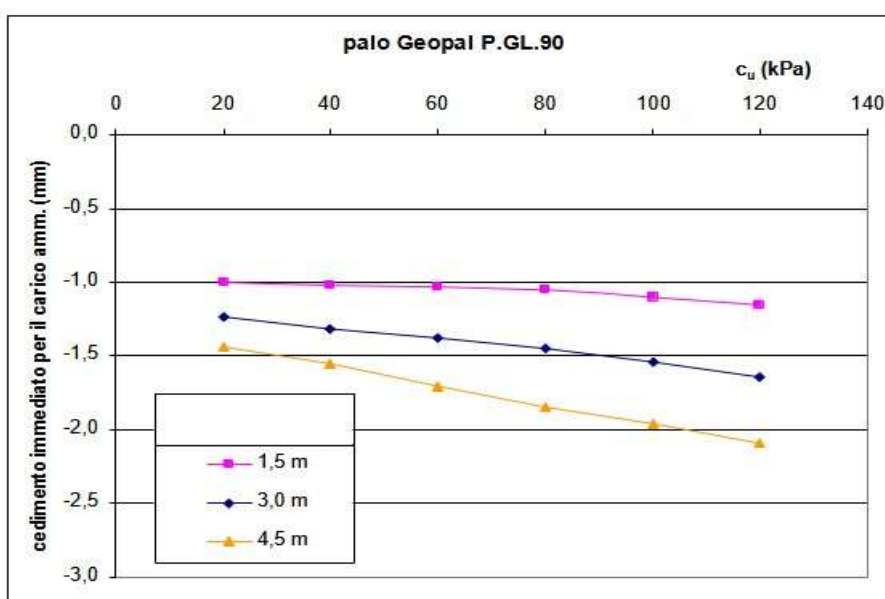


Fig. 13 - Abaco per il calcolo dei cedimenti immediati

Ad integrazione dei dati riportati in fig. 13 si propone nel diagramma di fig. 14 un'analisi dei cedimenti, a parità di carico applicato e di coesione non drenata, in funzione di diverse lunghezze del puntale. In particolare sono stati considerati il caso di una forza applicata $F=25$ kN e di una coesione non drenata $c_u=20$ kPa e quello di $F=140$ kN e $c_u=120$ kPa.

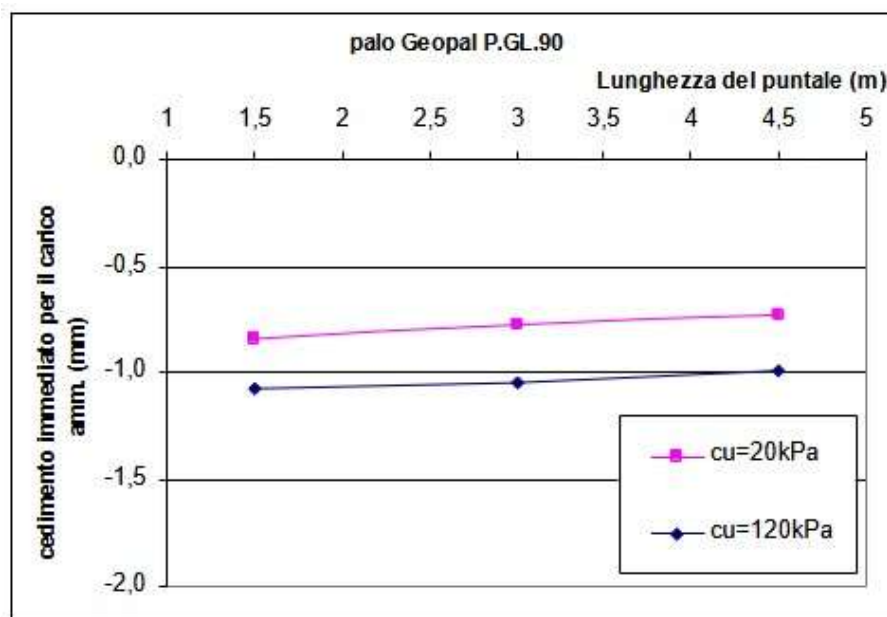


Fig. 14 - Variazione del cedimento immediato in funzione della lunghezza della spirale elicoidale

Come si può osservare, a parità delle rimanenti condizioni, al crescere della lunghezza della spirale elicoidale si riduce il cedimento misurato. Tale variazione risulta, comunque, di entità piuttosto modesta.

Cedimento di consolidazione

Il calcolo dei cedimenti immediati deve essere affiancato, nel caso dei terreni coesivi, da quello dei cedimenti di consolidazione. Tale calcolo risulta piuttosto complesso, data la particolare geometria del palo in esame. Si rende quindi necessario ricondursi a schemi di analisi forzatamente semplificati, che consentano di poter essere analizzati con gli usuali metodi di calcolo della geotecnica.

Per il calcolo del cedimento di consolidazione di un palo singolo, con limitato numero di giri, si può, in prima istanza, ricondurre il problema al calcolo del cedimento di consolidazione di una piastra circolare equivalente.

A tal scopo, appare ragionevole considerare una piastra di diametro pari a quello della spirale, ubicata ad una profondità pari a quella ove si collocano i 2/3 della spirale elicoidale (fig. 15). Tale piastra sarà soggetta ad una pressione uniforme, la cui risultante sarà pari al carico applicato alla testa del palo, diviso per il numero di giri della spirale.

Nel caso invece di pali con numero molto elevato di giri della spirale, ovvero di pali aventi una spirale di lunghezza confrontabile con la lunghezza complessiva del palo stesso, appare più opportuno fare riferimento agli usuali metodi di calcolo del cedimento di pali in terreno coesivo.

Si sottolinea come tali stime del cedimento abbiano carattere puramente indicativo, con il solo scopo di fornire un dato di massima utile ad un primo dimensionamento. D'altro canto si può ancora osservare che il calcolo del cedimento di un palo singolo sia di limitato interesse applicativo nella pratica progettuale, dato che gli interventi più usuali richiedono l'infissione di più pali limitrofi.

Nel caso, invece, di palificate, si può fare riferimento alle indicazioni presenti in letteratura tecnica a riguardo dei gruppi di pali in terreno coesivo, cercando di assimilare il palo Geopal ad un palo avente diametro pari a quello della spirale e lunghezza pari a quella della spira stessa.

In particolare, appare opportuno fare riferimento al metodo della piastra equivalente (Tomlinson, 1995; Randolph, 1994). Tale metodo assimila il comportamento di una palificata a quello di una fondazione diretta equivalente, disposta ad una data profondità, pari ai $2/3$ della lunghezza dei pali. Il cedimento della palificata viene quindi posto uguale a quello della piastra equivalente, facilmente calcolabile con i classici metodi della geotecnica.

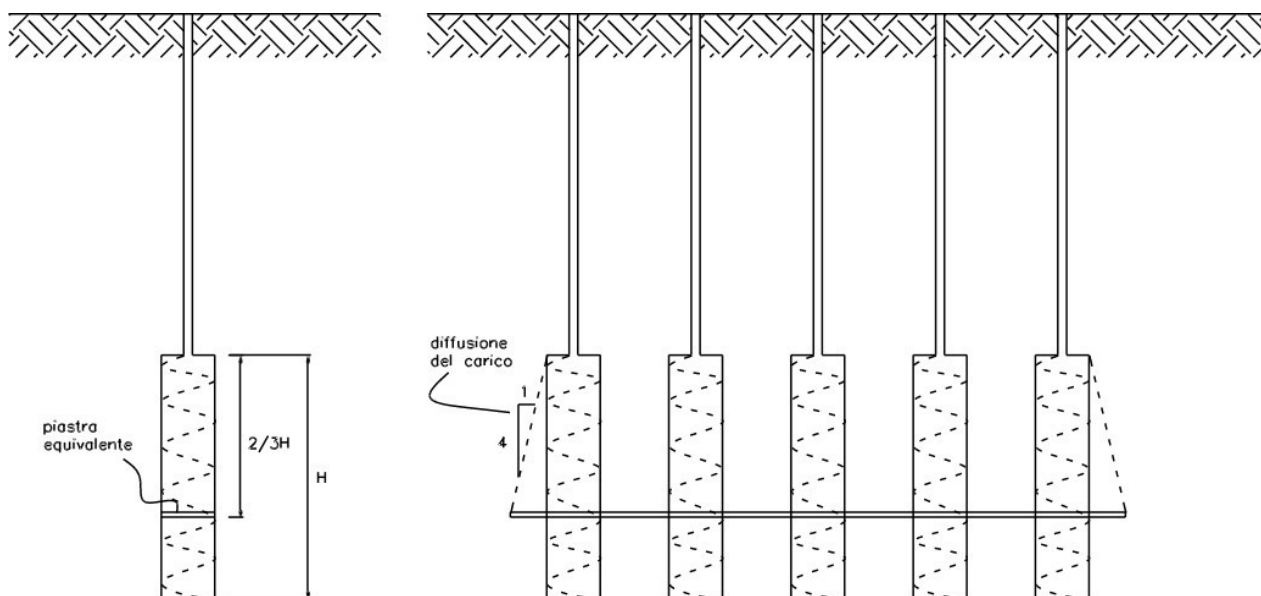


Fig. 15 - Schemi di calcolo semplificati per la stima del cedimento di consolidazione nel caso di pali singoli (a sinistra) e di palificate (a destra)

Estendendo tale procedura al caso dei pali a elica in acciaio, la piastra equivalente andrebbe ubicata ad una profondità pari a quella dei $2/3$ del tratto di spirale elicoidale. Analogamente, la larghezza di tale piastra dovrebbe essere valutata assumendo una diffusione dei carichi con pendenza di $1/4$ (fig. 15). Infine, la pressione agente sulla fondazione equivalente sarà pari alla somma dei carichi applicati ai singoli pali, rapportata all'area della piastra equivalente.

PROGRAMMA DI CALCOLO PER IL DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DEI PALI A VITE GEOPAL®

Al fine di automatizzare i calcoli per la definizione delle caratteristiche di un palo che soddisfino le richieste fatte a Geopalitalia, la sua validazione in termini di portata e la valutazione economica è stato realizzato un programma che esegue tutta una serie di calcoli basati su semplici formule matematiche sviluppate negli anni da Geopalitalia stessa.

Questo programma è stato realizzato utilizzando il linguaggio di programmazione Delphi® versione XE3 (una derivazione del linguaggio Object Pascal ossia Pascal orientato agli oggetti) prodotto dall'azienda Embarcadero Technologies, sono inoltre state utilizzate delle librerie aggiuntive quali DevExpress® VCL library versione 13.2 per la gestione dell'interfaccia grafica e FastReport® 4.0 VCL per la gestione delle stampe. Senza entrare nei dettagli dell'algoritmo studiato, vengono riportate di seguito, in modo semplice e sintetico, le informazioni necessarie per comprendere il lavoro svolto e come utilizzare al meglio il programma realizzato e testato, per le due tipologie di palo (PVD e PVC), con successo.

Il programma è suddiviso in quattro sezioni principali:

- **Dati** - Dati descrittivi del committente e del progetto nel quale i pali andranno utilizzati;
- **Calcolo palo** - Calcolo per il dimensionamento e verifica della portata del palo;
- **Calcolo prezzo** - Valutazione economica del palo moltiplicato per il numero di pali da fornire al committente;
- **Dati strutturali/Costi** - Tabelle contenenti le portate max dei singoli elementi ed il loro prezzo;

Dati descrittivi del committente e del progetto nel quale i pali andranno utilizzati.

Palo mod. PVD - Calcolo a COMPRESSIONE

Calcolo Palo - Cantiere Grado (GO).gpp

Dati | Calcolo Palo | Calcolo Prezzo | Dati strutturali/Costi | Versione libreria di calcolo: 7

Tipologia di palo: PVD - Palo a vite distanziata

Portata totale richiesta - QT richiesto: 12.000 kg

Verifica capacità portante geotecnica a: COMPRESSIONE

Palo Geopal modello selezionato: PVD 90.8.5000.300.8.150/4V

PARAMETRI DEL FUSTO

Lunghezza totale - L: 500 cm

Quota di testa rispetto al p.c. - z: 0 cm

Lunghezza fuori terra - h1: 0 cm

Quota fondo scavo: 0 cm

Quota falda acquifera da p.c.: -140 cm

Diametro - d: 8.89 cm

Spessore: 0.80 cm

PARAMETRI DEGLI ELICOIDI

Diametro - D: 30.00 cm

Passo: 15.00 cm

Spessore: 0.80 cm

Numero di elicoidi: 4

PORTATA DEL FUSTO

fs media di analisi: 1.30 kg/cmq

fs di progetto: 1.30 kg/cmq

Lungh. fuori terra - h1: cm

Lungh. terreno smosso - h2: 27 cm

Lungh. passi elicoidi - h3: 180 cm

Lungh. porzione scarto - H: 207 cm

Lungh. efficace - Le: 293 cm

Area laterale totale - AL: 13.957,30 cmq

Area laterale porzione scarto: 3.769,11 cmq

Area laterale efficace - ALe: 8.188,19 cmq

Portata laterale - QL: 10.644,65 kg

Portata laterale efficace - QLe: 5.609,83 kg

Portata residua da compensare - QR: 6.390,17 kg

PORTATA DEGLI ELICOIDI

Area piena elicoidi di punta - A.p.p.: 706,50 cmq

Area netta 1 elicoidi intermedio - A.n.i.: 644,46 cmq

Area totale efficace di base - A.t.e.b.: 2.639,08 cmq

Elcoidi: Dist. testa palo Quota

Elcoidi 4 (intermedio): -90 -90

Elcoidi 3 (intermedio): -220 -220

Elcoidi 2 (intermedio): -340 -340

Elcoidi 1 di punta: -450 -450

Portata strutturale QBSL - 1 elicoidi: 6.500,00 kg

Pressione unitaria strutturale σSL: 10,09 kg/cmq

Portata di base di progetto - QBproj: 8.347,44 kg

PORTATA MASSIMA DEL PALO E CEDIMENTO INDICATIVO DI ESERCIZIO

QT massima = QLe + QBSL: 13.957,27 kg

QT eccedente = QT massima - QT richiesto: 1.957,27 kg

Pressione norm. unit. eserc. σqa = A.t.e.b./QL: 2,42 kg/cmq

Cedimento indicativo Δw di esercizio: 0,70 cm

Portata di base effettiva - QBe: 6.390,17 kg

LEGENDA

SIMBOLOGIA E SIGNIFICATO DEI TERMINI DI INPUT (E OUTPUT)

QT richiesto = portata totale di progetto assegnata al palo allo SLU, espressa in kg.

L = Lunghezza totale del palo (cm).

fs = forza di attrito laterale misurata con il penetrometro statico (kg/cmq) sulla verticale ed rilevata ogni 20 cm di avanzamento del manico del penetrometro, durante le operazioni di campagna.

qc = pressione unitaria a compressione misurata con il penetrometro statico (kg/cmq) sulla verticale ed rilevata ogni 20 cm di avanzamento del manico del penetrometro, durante le operazioni di campagna.

su = coesione non drenata misurata con il penetrometro statico (kg/cmq) sulla verticale ed rilevata ogni 20 cm di avanzamento del manico del penetrometro, durante le operazioni di campagna.

fsu = fs media di analisi: forza di attrito laterale unitaria media (kg/cmq) utilizzata per calcolare la portata laterale del palo.

fsu = fs di progetto: valore assegnabile discretamente dal progettista alla forza di attrito laterale media, verrà utilizzata nei calcoli al posto della fsu rilevata durante le operazioni di campagna.

γs = γs = coefficienti di sicurezza previsti dalla normativa vigente (NTC-2018) per eseguire i dimensionamenti e le verifiche di fondazioni profonde.

λs = coefficiente a discrezione del progettista per poter ridurre ulteriormente la portata laterale del fusto.

θ = coefficiente a discrezione del progettista per poter ridurre ulteriormente la portata verticale degli elicoidi.

ε = coefficiente a discrezione del progettista per poter ridurre ulteriormente la portata laterale delle spirali.

Δwproj = cedimento di progetto (cm).

ALe = area laterale efficace del fusto (cmq) che interagisce con le forze di attrito laterale e che contribuisce alla portata del palo.

QL = portata laterale del fusto (kg) senza tener conto dei coefficienti di riduzione γs e ε.

QLSL = portata laterale efficace del fusto (kg).

QBSL = portata strutturale del fusto (kg).

Aps = area piena elicoidi di punta (cmq).

Ain = area netta elicoidi intermedio (cmq).

Atsb = area totale efficace di base (cmq) data dalla somma delle portate degli elicoidi di punta ed intermedi (se presenti) del palo.

QBSL = portata strutturale elicoidi di un elicoidi (kg).

QBSL = portata geotecnica di base degli elicoidi/spirali (kg).

QLSL = portata laterale spirali.

Δw = cedimento di esercizio (cm).

QT massima = portata totale: indica la portata massima assegnata al palo, da verificare in sede di collaudo con una prova di carico assiale prevista dalla normativa.

NOTE INTERNE (non vengono stampate)

RACCOMANDAZIONI

Questo programma di calcolo è stato realizzato da tecnici specialisti, in esclusiva per Geopallitalia S.r.l., allo scopo di produrre le analisi tecnico-economiche finalizzate alle previsioni dei costi da fornire ai clienti. Data la finalità per la quale è stato realizzato e la complessità della materia trattata, il suo utilizzo è riservato ai soli tecnici di Geopallitalia o a personale autorizzato dalla medesima.

Tuttavia, in quanto materiale prodotto in esclusiva per uso aziendale, l'uso improprio dello stesso e/o dei risultati ottenuti sarà punito a norma di legge.

INDAGINE PENETROMETRICA

Quota (cm) | qc (kg/cmq) | fs (kg/cmq)

0 | 30 | 1,30

-20 | 30 | 1,30

-40 | 30 | 1,30

-60 | 30 | 1,30

-80 | 30 | 1,30

-100 | 30 | 1,30

-120 | 30 | 1,30

-140 | 30 | 1,30

-160 | 30 | 1,30

-180 | 30 | 1,30

-200 | 30 | 1,30

-220 | 30 | 1,30

-240 | 30 | 1,30

-260 | 30 | 1,30

-280 | 30 | 1,30

-300 | 30 | 1,30

-320 | 30 | 1,30

-340 | 30 | 1,30

-360 | 30 | 1,30

-380 | 30 | 1,30

-400 | 30 | 1,30

-420 | 30 | 1,30

-440 | 30 | 1,30

-460 | 30 | 1,30

-480 | 30 | 1,30

-500 | 30 | 1,30

-520 | 30 | 1,30

-540 | 30 | 1,30

-560 | 30 | 1,30

-580 | 30 | 1,30

-600 | 30 | 1,30

-620 | 30 | 1,30

-640 | 30 | 1,30

-660 | 30 | 1,30

-680 | 30 | 1,30

-700 | 30 | 1,30

-720 | 30 | 1,30

-740 | 30 | 1,30

-760 | 30 | 1,30

-780 | 30 | 1,30

-800 | 30 | 1,30

-820 | 30 | 1,30

-840 | 30 | 1,30

-860 | 30 | 1,30

-880 | 30 | 1,30

-900 | 30 | 1,30

-920 | 30 | 1,30

-940 | 30 | 1,30

-960 | 30 | 1,30

-980 | 30 | 1,30

-1000 | 30 | 1,30

-1020 | 30 | 1,30

-1040 | 30 | 1,30

-1060 | 30 | 1,30

-1080 | 30 | 1,30

-1100 | 30 | 1,30

-1120 | 30 | 1,30

-1140 | 30 | 1,30

-1160 | 30 | 1,30

-1180 | 30 | 1,30

-1200 | 30 | 1,30

-1220 | 30 | 1,30

-1240 | 30 | 1,30

-1260 | 30 | 1,30

-1280 | 30 | 1,30

-1300 | 30 | 1,30

-1320 | 30 | 1,30

-1340 | 30 | 1,30

-1360 | 30 | 1,30

-1380 | 30 | 1,30

-1400 | 30 | 1,30

-1420 | 30 | 1,30

-1440 | 30 | 1,30

-1460 | 30 | 1,30

-1480 | 30 | 1,30

-1500 | 30 | 1,30

-1520 | 30 | 1,30

-1540 | 30 | 1,30

-1560 | 30 | 1,30

-1580 | 30 | 1,30

Calcolo per il dimensionamento e verifica della portata a compressione del palo PVD.

Palo mod. PVD - Calcolo a TRAZIONE

Nuovo		Stampa/P		Calcolo Palo		Calcolo Prezzo		Dati strutturali/Costi		Versione libreria di calcolo: 7		Calcolo Palo - Contiere Grado (GO).gpp		Vers. libreria di calcolo: 7	
Dati di progetto															
Tipologia di palo		PVD - Palo a vite distanziata		Verifica capacità portante geotecnica a		TRAZIONE									
Portata totale richiesta - QT PROGETTO		12.000 kg		Palo Geopalt modello selezionato		PVD 90.8.5000.300.8.150/4V									
PARAMETRI DEL FUSTO															
Lunghezza totale - L		500,0 cm		fs media da indagine Penetrometrica		1,30 kg/cmq									
Quota di testa rispetto al p.c. - z		0,0 cm		fs di progetto (se assente si applica fs media)		1,30 kg/cmq									
Lunghezza fuori terra - h1		0,0 cm		Coefficiente di sicurezza $\gamma_{fs,med}$		1,15									
Quota fondo scavo		0,0 cm		Coefficiente di sicurezza $\gamma_{fs,med}$		1,65									
Quota falda acquifera da p.c.		-140,0 cm		Coefficiente di riduzione λ_{fuso}				(facoltativo)							
Diametro - d		8,89 cm		Press. tangenziale unit. $\sigma = \frac{fs}{(\gamma_{fs} \cdot \lambda_{fuso} \cdot \lambda)}$		0,69 kg/cmq									
Spessore		0,80 cm		Portata strutturale max SLU fusto		65.600 kg		QT MASSIMA 13.421,06 kg							
PARAMETRI DEGLI ELICOIDI															
Diametro - D		30,00 cm		qc (pressione normale superficie elicoidi)		30,00 kg/cmq									
Passo		15,00 cm		Coefficiente di sicurezza $\gamma_{qc,med}$		1,15									
Spessore		0,80 cm		Coefficiente di sicurezza $\gamma_{qc,med}$		1,65									
Numero di elicoidi		4		Coefficiente di riduzione $\lambda_{elicoidi}$		5,00 (facoltativo)									
				Press. norm. unit. progetto $\sigma = \frac{qc}{(\gamma_{qc} \cdot \lambda_{elicoidi} \cdot \theta)}$		3,16 kg/cmq									
				Cedimento indicativo Δw di progetto		1,00 cm									
PORTATA DEL FUSTO															
fs media di analisi		1,30 kg/cmq													
fs di progetto		1,30 kg/cmq													
Lungh. fuori terra - h1		0,0 cm													
Lungh. terreno smosso - h2		0,44 cm													
Lungh. passi elicoidi - h3		180 cm													
Lungh. porzione scarto - H		224 cm													
Lungh. efficace - L _e		276 cm													
Area laterale totale - AL		13.937,30 cmq		Portata laterale - QL		9.999,43 kg									
Area laterale porzione scarto		6.263,43 cmq		Portata laterale efficace - QL _e		5.269,79 kg									
Area laterale efficace - AL _e		7.691,87 cmq		Portata residua da compensare - QR		6.730,21 kg									
PORTATA DEGLI ELICOIDI															
Area piena elicoidi di punta - A.p.p.		706,50 cmq		N.B. I valori di θ e $\lambda_{elicoidi}$ dipendono dal cedimento Δw che si vuole assegnare preventivamente al palo, in forma casellistica, fermo restando il valore di θ scelto dal progettista come esistenza penetrometrica localizzata lungo la verticale.											
Area netta 1 elicoidi intermedio - A.n. θ		644,48 cmq		Il valore del cedimento Δw di progetto e di esercizio, in fase preventiva di analisi e consuntiva di progetto, è puramente indicativo e non vincolante essendo un valore ricavato con analisi statistica eseguita su un numero significativo di misurazioni, svolte direttamente in cantiere ed in laboratorio.											
Area totale efficace di base - A.t.a.b.		2.577,84 cmq													
Elicoidi		Dist. testa palo		Quota											
Elicoidi 4 (intermedio)		- 90		- 90											
Elicoidi 3 (intermedio)		- 220		- 220											
Elicoidi 2 (intermedio)		- 340		- 340											
Elicoidi 1 di punta		- 430		- 430											
Portata strutturale QB _{str} - 1 elicoidi		6.500,00 kg													
Pressione unitaria strutturale σ_{str}		10,09 kg/cmq		pressione normale unitaria di progetto < pressione unitaria strutturale											
Portata di base di progetto - QB _{pro}		8.151,27 kg		portata di base progetto < portata strutturale degli elicoidi											
PORTATA MASSIMA DEL PALO E CEDIMENTO INDICATIVO DI ESERCIZIO															
QT MASSIMA = QL _e + QB _{pro}		13.421,06 kg		QT massima < portata strutturale max SLU fusto				VERIFICATO							
QT ESERCIZIO = QT MASSIMA - QT PROGETTO		1.421,06 kg		QT massima > QT di progetto											
Pressione norm. unit. eserc. σ_{ex} = $\frac{QR}{A.t.a.b.}$		2,61 kg/cmq		pressione normale unitaria esercizio < pressione normale unitaria progetto											
Cedimento indicativo Δw di esercizio		0,80 cm		cedimento indicativo di esercizio < cedimento indicativo di progetto											
Portata di base effettiva - QB _e		6.730,21													

Calcolo per il dimensionamento e verifica della portata a **trazione** del palo PVD.

Tabelle contenenti le portate max dei singoli elementi di un palo PVD ed il loro prezzo.

Valutazione economica del palo PVD moltiplicato per il numero di pali da fornire al committente.

Calcolo Palo - Cantiere Caorle (VE).gpp

Vers. libreria di calcolo 7

DATI PREVENTIVO

Anno/N.ro: 2019 / Variante n.: Data: 16/01/2019

DATI CLIENTE

Rag. sociale: IMAGE GROUP Srl
 Indirizzo: Via Treviso 23 - 30026 Portogruaro (VE)
 Codice fiscale: 04213770276 Partita IVA: 04213770276
 Referente: Mauro Ferrazzo
 Tel./Cell.: 0421-75337 cell. 347 8935053
 Email: info@imagesrl.com

Località cantiere: Tenuta Cà Coriani (Ponte delle Bilance) CAORLE (VE)
 Tipologia intervento: PALI DI SOSTEGNO OPERA TECNOLOGICA A PROFILO ARTISTICO.

Ridimensiona carattere: A⁴

COMPRESSIONE

ACCONTO programma di calcolo e stato realizzato da tecnici specializzati, in esclusiva per Geopallapa S.r.l., allo scopo di produrre le analisi tecnico-economiche finalizzate alle preventivazioni dei pali da fornire ai clienti. Data la finalità per la quale è stato realizzato e la complessità della materia trattata, il suo utilizzo è riservato ai soli tecnici di Geopallapa o a personale autorizzato dalla medesima.

Tuttavia, in collaborazione prodotta attraverso l'utilizzo di dati prognostici forniti dai clienti, Geopallapa, dedica ogni responsabilità sui risultati ottenuti. È fatto divieto di utilizzare i dati ottenuti con il suddetto programma, anche se selettivamente destinati a supporto di altre relazioni tecniche, senza l'esplicita autorizzazione dalla casa madre per la loro pubblicazione.

compressione del palo PVC.

Palo mod. PVC - Calcolo a TRAZIONE

Calcolo Palo - Cantiere Caorle (VE).gpp

Dati | Calcolo Palo | Calcolo Prezzo | Dati strutturali/Costi

Vers. libreria di calcolo: 7

DATI DI PROGETTO

Tipologia di palo: **PVC - Palo a vite continua**

Portata totale richiesta - Q_T richiesto: **3.000 kg**

Palo Geopal modello selezionato: **PVC 114.8.4000.400.8.250/V3000**

Versione libreria di calcolo: **7**

PARAMETRI DEL FUSTO

Lunghezza totale - L : **400 cm**

Quota di testa rispetto al p.c. - z : **20 cm**

Lunghezza fuori terra - h_1 : **20 cm**

Quota fondo scavo: **0 cm**

Quota falda acquifera da p.c.: **-220 cm**

Diametro - d : **114,8 cm**

Spessore: **0,80 cm**

fs media da indagine Penetrometrica: **0,14 kg/cmq**

fs di progetto (se assente si applica fs media): **0,30 kg/cmq**

Coefficiente di sicurezza $\gamma_{fs,med}$: **1,15**

Coefficiente di sicurezza $\gamma_{fs,pro}$: **1,65**

Coefficiente di riduzione $\lambda_{fs,pro}$: **(facoltativo)**

Press. tangenziale unit. $\tau = \frac{f_s}{(\gamma_{fs} \cdot \frac{L}{2} + \lambda)}$: **0,07 kg/cmq**

Portata strutturale max SLU fusto: **86.200 kg**

QT massima: 6.578,38 kg

PARAMETRI DELLE SPIRALI

Diametro - D : **40,00 cm**

Passo: **25,00 cm**

Spessore: **0,80 cm**

☐ Usa elicoide

Coefficiente di sicurezza $\gamma_{fs,spiral}$: **1,65**

Coefficiente di riduzione $\lambda_{fs,spiral}$: **(facoltativo)**

Coefficiente di riduzione $\lambda_{fs,spiral}$: **(facoltativo)**

Press. norm. unit. progetto $\sigma = \frac{Q_T}{(\gamma_{fs} \cdot \frac{L}{2} + \theta)}$: **1,21 kg/cmq**

Forza di taglio di sicurezza $\tau = \frac{Q_T}{(\gamma_{fs} \cdot \frac{L}{2} + \theta)}$: **0,18 kg/cmq**

Cedimento indicativo Δw di progetto: **0,28 cm**

PORTATA DEL FUSTO

fs media di analisi: **0,14 kg/cmq**

fs di progetto: **0,30 kg/cmq**

Lungh. fuori terra - h_1 : **20 cm**

Lungh. terreno smosso - h_2 : **57 cm**

Lungh. spirali - h_3 : **300 cm**

Lungh. porzione scarto - H : **400 cm**

Lungh. efficace - L_e : **0 cm**

Area laterale totale - A_L : **14.356,08 cmq**

Area laterale porzione scarto: **14.356,08 cmq**

Area laterale efficace - A_{Le} : **0,00 cmq**

Portata laterale - Q_L : **0,00 kg**

Portata laterale efficace - Q_{Le} : **0,00 kg**

Portata residua da compensare - Q_R : **3.000,00 kg**

PORTATA DELLE SPIRALI

Area piena elicoide di punta - $A_{p.p.}$: **1.256,00 cmq**

Area netta 1 elicoide intermedio - $A_{n.i.}$: **1.153,44 cmq**

Area totale efficace di base - $A_{t.b.}$: **95,97 cmq**

Lunghezza complessiva spirali: **300,00 cm**

Area laterale complessiva spirali: **35.541,30 cmq**

Portata laterale spirali - Q_{Lsp} : **6.462,05 kg**

Portata strutturale $Q_{B_{sp}}$ ridotta - 1 elicoide: **2.200,00 kg**

Portata strutturale $Q_{B_{sp}}$ - 1 elicoide: **4.400,00 kg**

Pressione unitaria strutturale $\sigma_{B_{sp}}$: **3,81 kg/cmq**

Portata di base di progetto - $Q_{B_{sp}}$: **116,32 kg**

N.B. I valori di θ , λ , e γ dipendono dal cedimento Δw , che si vuole assegnare preventivamente al palo, in forma cautelativa, fermo restando il valore di q_c scelto dal progettista come resistenza penetrometrica localizzata lungo la verticale.

Il valore del cedimento Δw di progetto e di esercizio, in fase preventiva di analisi e consuntiva di progetto, è puramente indicativo e non vincolante essendo un valore ricavato con analisi statistica eseguita su un numero significativo di misurazioni svolte direttamente in cantiere ed in laboratorio.

portata laterale spirali + portata strutturale depotenziata degli elicoide che compongono la spirale

$\rightarrow N_{ro} \cdot 12$ elicoide = Portata strutturale $Q_{B_{sp}}$ di sicurezza: **26.400,00 kg**

pressione normale unitaria di progetto - σ - pressione unitaria strutturale

portata di base progetto + portata strutturale degli elicoide

PORTATA MASSIMA DEL PALO E CEDIMENTO INDICATIVO Q_T massima

Q_T massima = Q_{Le} + $Q_{B_{sp}}$ + Q_{Lsp} : **6.578,38 kg**

Q_T cedimento = Q_T massima - Q_T progetto: **3.578,38 kg**

Cedimento indicativo Q_T massima: **1,08 cm**

VERIFICATO

LEGENDA

SIMBOLOGIA E SIGNIFICATO DEI TERMINI DI INPUT (E OUTPUT)

Q_T richiesto = portata totale di progetto assegnata al palo allo SLU, espressa in kg.

L = lunghezza totale del palo (cm).

f_s = forza di attrito laterale misurata con il penetrometro statico (kg/cmq) sulla verticale ed rilevata ogni 20 cm di avanzamento del manico del penetrometro, durante le operazioni di campagna.

q_c = pressione unitaria a compressione misurata con il penetrometro statico (kg/cmq) sulla verticale ed rilevata ogni 20 cm di avanzamento del manico del penetrometro, durante le operazioni di campagna.

c_u = coesione non drenata misurata con il penetrometro statico (kg/cmq) sulla verticale ed rilevata ogni 20 cm di avanzamento del manico del penetrometro, durante le operazioni di campagna.

f_{su} = f_s media di analisi: forza di attrito laterale unitaria media (kg/cmq) utilizzata per calcolare la portata laterale del palo.

f_{sp} = f_s di progetto: valore assegnabile discrezionalmente dal progettista alla forza di attrito laterale media, verrà utilizzata nei calcoli al posto della f_{su} rilevata durante le operazioni di campagna.

γ_{fs} e λ = coefficienti di sicurezza previsti dalla normativa vigente (NTC-2018) per eseguire i dimensionamenti e le verifiche di fondazioni profonde.

λ_s = coefficiente a discrezione del progettista per poter ridurre ulteriormente la portata laterale del fusto.

θ = coefficiente a discrezione del progettista per poter ridurre ulteriormente la portata verticale degli elicoide.

λ = coefficiente a discrezione del progettista per poter ridurre ulteriormente la portata laterale delle spirali.

λ_{sp} = cedimento di progetto (cm).

A_L = area laterale efficace del fusto (cmq) che interagisce con le forze di attrito laterale e che contribuisce alla portata del palo.

Q_L = portata laterale del fusto (kg) senza tener conto dei coefficienti di riduzione γ_{fs} e λ .

Q_{Le} = portata laterale efficace del fusto (kg).

$Q_{B_{sp}}$ = portata strutturale del fusto (kg).

$A_{p.p.}$ = area piena elicoide di punta (cmq).

$A_{n.i.}$ = area netta elicoide intermedio (cmq).

$A_{t.b.}$ = area totale efficace di base (cmq) data dalla somma delle portate degli elicoide di punta ed intermedi (se presenti) del palo.

$Q_{B_{sp}}$ = portata strutturale elicoide di un elicoide (kg).

$Q_{B_{sp}}$ = portata geotecnica di base degli elicoide/spirali (kg).

Q_{Lsp} = portata laterale spirali.

Δw = cedimento di esercizio (cm).

Q_T massima = portata totale: indica la portata massima assegnata al palo, da verificare in sede di collaudo con una prova di carico assiale prevista dalla normativa.

NOTE INTERNE (non vengono stampate)

DISCLAIMER

Questo programma di calcolo è stato realizzato da tecnici specializzati, in esclusiva per Geopalitalia S.r.l., allo scopo di produrre le analisi tecnico-economiche finalizzate alle preventivazioni dei pali da fornire ai clienti. Data la finalità per la quale è stato realizzato e la complessità della materia trattata, il suo utilizzo è riservato ai soli tecnici di Geopalitalia o a personale autorizzato dalla medesima.

Tuttavia, in quanto materiale prodotto in originale ad esclusivo uso aziendale, l'uso improprio dello stesso o di risultati ottenuti sarà punito a norma di legge.

Calcolo per il dimensionamento e verifica della portata a trazione del palo PVC.

Tabelle contenenti le portate max dei singoli elementi di un palo PVC ed il loro prezzo.

Valutazione economica del palo PVC moltiplicato per il numero di pali da fornire al committente.

Verranno ora descritte campo per campo le varie sezioni del programma.

La prima sezione del programma è comune alle due tipologie di pali fornite (PVD e PVC) per cui verrà illustrata solo una volta mentre le altre tre sezioni, pur avendo buona parte delle parametri in input e dei valori calcolati in comune, ovviamente presentano delle differenze per cui saranno illustrate separatamente.

Sezione DATI DEL PREVENTIVO

DATI PREVENTIVO

Anno/N.ro, Variante n. , Data	Dati identificativi del preventivo/Calcolo palo : anno/numero, eventuale n.ro di variante e la data del preventivo.
----------------------------------	---

DATI CLIENTE

Rag. sociale, Indirizzo, Cod. fiscale, Partita IVA, Referente, Tel./Cell., Email	Informazioni relative al destinatario del preventivo che può essere committente finale o il professionista che seguirà il progetto per conto del committente.
Località cantiere	Località dove si trova il cantiere in cui verranno installati i pali.
Tipologia di intervento	Breve descrizione dell'utilizzo che verrà fatto dei pali proposti.
Premessa	Eventuale spiegazioni/commenti.
Documentazione fornita	Eventuali foto o scansioni con relativa descrizione fornite dal committente per descrivere/illustrare il contesto dove andranno utilizzati i pali oggetto del preventivo.
Descrizione procedimento	Eventuali descrizione/spiegazioni delle procedure di posa ed installazione dei pali.
Descrizione attività	Eventuali descrizione/spiegazioni delle attività che verranno svolte.
Considerazioni	Eventuali considerazioni finali relative ai pali preventivati.

Verranno ora illustrate le altre tre sezioni per ognuna delle due tipologie di palo.

Palo Geopal® - mod. PVD

Sezione CALCOLO PALO

DATI DI PROGETTO

Tipologia di palo	Tipo di palo: PVD (palo a vite distanziata) o PVC (palo a vite continua).
Verifica capacità portante geotecnica	Tipo di sforzo a cui viene sottoposto il palo: a Compressione oppure a Trazione.
Portata totale richiesta - $Q_{T\text{PROGETTO}}$ (kg)	Carico che il palo deve essere in grado di sostenere in sicurezza.

PARAMETRI DEL FUSTO

Lunghezza totale - L (cm)	Indica la lunghezza totale del fusto compresa la parte che rimane fuori dal terreno. E' esclusa la lunghezza della puntazza.
Quota di testa rispetto piano campagna - z (cm)	Indica la distanza della testa del palo dal piano campagna. Un valore positivo indica che la testa si trova sopra il piano campagna mentre un valore negativo indica che è sotto.
Lunghezza fuori terra - h_1 (cm)	Indica la lunghezza della parte di fusto che esce dal terreno. Solitamente almeno 30 cm devono rimanere fuori dal terreno per permettere ai macchinari di sganciare il palo conficcato nel terreno.
Quota fondo scavo (cm)	Profondità dello scavo rispetto al piano campagna.
Quota falda acquifera da p.c. (cm)	Livello della falda acquifera rispetto al piano campagna.
Diametro - d (cm)	Diametro del fusto.
Spessore (cm)	Spessore del fusto.
f_s media da Indagine penetrometrica (kg/cmq)	Valore medio della forza di attrito misurata in campagna con il penetrometro statico.
f_s di progetto (kg/cmq)	Valore, assegnato dal progettista a discrezione, che sostituisce quella misurata. Quando viene riportato questo valore, esso ha la precedenza sul valore medio rilevato con l'Indagine penetrometrica.
Coeff. di sicurezza γ_R (gamma $_R$)	Coefficiente di sicurezza γ_R (gamma $_R$) a riduzione della forza di resistenza da attrito (f_s) cui è sottoposto il palo. Non obbligatorio ma raccomandato dalle N.T.C., va a dividere il valore f_s .

Coeff. di sicurezza ξ (xi)	Coefficiente di sicurezza ξ (xi) a riduzione della forza di resistenza da attrito (fs) cui è sottoposto il palo. Non obbligatorio ma raccomandato dalle N.T.C., va a dividere il valore fs.
Coeff. di sicurezza λ (lambda)	Coefficiente di sicurezza λ (lambda) a riduzione della forza di resistenza da attrito (fs) cui è sottoposto il palo. Facoltativo a discrezione del progettista, va a dividere il valore fs.
Pressione tangenziale unitaria (kg/cm ²)	Attrito laterale risultante dalla riduzione del valore fs secondo i vari coefficienti di sicurezza e riduzione specificati dal progettista.
Portata strutturale max SLU fusto (kg)	Portata massima al punto di rottura SLU. Il dato è ricavato dalla tabella dei dati strutturali.

PARAMETRI DEGLI ELICOIDI	
Diametro - D (cm)	Diametro dell'elicoide.
Passo (cm)	Passo dell'elicoide.
Spessore (cm)	Spessore dell'elicoide.
N.ro di elicoidi	Numero di elicoidi presenti nel palo.
qc (pressione normale superficie elicoidi) (kg/cm ²)	Pressione esercitata (carico verticale) sulla superficie degli elicoidi.
Coeff. di sicurezza γ_R (gamma R)	Coefficiente di sicurezza γ_R (gamma R) a riduzione della pressione cui vengono sottoposti gli elicoidi. Non obbligatorio ma raccomandato dalle N.T.C., va a dividere il valore qc (carico verticale), misurato con il penetrometro statico.
Coeff. di sicurezza ξ (xi)	Coefficiente di sicurezza ξ (xi) a riduzione della pressione cui vengono sottoposti gli elicoidi. Non obbligatorio ma raccomandato dalle N.T.C., va a dividere il valore qc (carico verticale), misurato con il penetrometro statico.
Coeff. di sicurezza θ (theta)	Coefficiente di sicurezza θ (theta) a riduzione della pressione cui vengono sottoposti gli elicoidi. Facoltativo a discrezione del progettista, va a dividere il valore qc (carico verticale), misurato con il penetrometro statico.
Press. normale unitaria di progetto (kg/cm ²)	Pressione verticale risultante dalla riduzione del valore qc secondo i vari coefficienti di sicurezza e riduzione specificati dal progettista.
Cedimento indicativo Δ_w (delta w) di progetto (cm)	Cedimento verticale previsto in base ai parametri dimensionali del palo (fusto + elicoidi), alle caratteristiche del terreno ed ai vari coefficienti di sicurezza e riduzione specificati dal progettista.

PORTATA DEL FUSTO	
fs media di analisi (kg/cm ²)	Riporta valore inserito dall'utente. Vedi sopra: area "Parametri Fusto".
fs di progetto (kg/cm ²)	Riporta valore inserito dall'utente. Vedi sopra: area "Parametri Fusto".

Lungh. fuori terra - h1 (cm)	Riporta valore inserito dall'utente. Vedi sopra: area "Parametri Fusto".
Lungh. terreno smosso - h2 (cm)	Lunghezza della parte di fusto appena sotto il livello del terreno (fondo scavo o piano campagna) dove esso risulta smosso e tale da avere una resistenza/attrito minore.
Lungh. passi elicoidi - h3 (cm)	Lunghezza della parte di fusto dove sono saldati gli elicoidi e che non contribuisce alla portata laterale del fusto stesso.
Lungh. porzione scarto - H (cm)	Lunghezza della porzione di fusto che non contribuisce alla portata laterale del palo. Corrisponde alla somma della parte di fusto fuori dal terreno, dell'area del fusto a contatto con la parte di terreno smosso, dell'area "coperta" dagli elicoidi. Nel caso risultino delle sovrapposizioni delle aree di scarto, relative al terreno smosso ed agli elicoidi, queste verranno considerate una volta sola (ad esempio un elicoide che si trova nell'area del terreno smosso non va ad aumentare la porzione di scarto).
Lungh. efficace - L_e (cm)	Lunghezza del fusto che attraverso l'attrito con il terreno contribuisce effettivamente alla portata del palo.
Area laterale totale - AL (cmq)	Area laterale totale del fusto calcolata considerando tutta la lunghezza del fusto moltiplicata per la circonferenza.
Area laterale porzione scarto (cmq)	Area laterale della porzione di scarto del fusto (area che non contribuisce alla portata laterale del palo) calcolata considerando la lunghezza della porzione di scarto moltiplicata per la circonferenza.
Area laterale efficace - AL_e (cmq)	Area laterale efficace del fusto (area che contribuisce alla portata laterale del palo) calcolata considerando la lunghezza efficace moltiplicata per la circonferenza.
Portata laterale - QL (kg)	Portata laterale della porzione efficace applicando il valore f_s (forza di resistenza da attrito generata dal terreno) senza l'applicazione dei coefficienti di riduzione.
Portata laterale efficace - QL_e (kg)	Portata laterale della porzione efficace calcolata applicando all'area laterale efficace, la pressione tangenziale unitaria risultante l'applicazione dei coefficienti di riduzione al valore f_s (forza di resistenza da attrito generata dal terreno).
Portata residua da compensare - QR (kg)	Portata residua da compensare "a carico" degli elicoidi. Ottenuta sottraendo alla portata totale richiesta, la portata laterale efficace del fusto.

PORTATA DEGLI ELICOIDI

Area piena elicoide di punta - A.p.p. I (cmq)	Area di un cerchio del diametro dell'elicoide comprendente quindi anche l'area di proiezione del fusto.
Area netta elicoide intermedio - A.n. £ (cmq)	Area di un cerchio del diametro dell'elicoide esclusa l'area di proiezione del fusto.
Area totale efficace di base - At.e.b. (cmq)	Area totale efficace data dalla somma delle aree degli elicoidi.

Portata strutturale di un elicoide QB_{STR} (kg)	Portata massima al punto di rottura SLU. Il dato è ricavato da tabelle prodotte mediante calcolo delle tensioni e deformazioni eseguite con il programma STRAUS7 agli elementi finiti.
Pressi. unitaria strutturale σ_{STR} (kg/cm ²)	Pressione unitaria strutturale calcolata sull'area dell'elicoide intermedio.
Portata di base di progetto QB_{GEO} (kg)	Portata totale effettiva degli elicoidi.

PORTATA MASSIMA DEL PALO E CEDIMENTO INDICATIVO DI ESERCIZIO	
QT_{MASSIMA} = QLe + QB_{GEO}	Portata massima del palo progettato, data dalla portata laterale del fusto QLe + la portata verticale degli elicoidi QB_{GEO} .
QT_{ECCEDENTE} = QT_{MASSIMA} - QT_{PROGETTO}	Differenza tra la portata massima del palo progettato (sopra definita) e la portata richiesta QT_{PROGETTO} .
Press. normale unitaria di esercizio σ_{QR} (kg/cm ²)	Pressione normale unitaria di esercizio calcolata dividendo la Portata residua da compensare QR per l'Area totale efficace di base At.e.b. .
Cedimento indicativo Δ_w di esercizio (cm)	Cedimento indicativo di esercizio dipendente dalla pressione normale unitaria di esercizio.
Portata di base effettiva QBe (cm)	Portata di base effettiva degli elicoidi.

Sezione CALCOLO PREZZO

In base alle dimensioni del palo e degli elementi strutturali scelti verrà calcolato il peso ed il prezzo di un singolo palo ed il totale in base al numero di pali.

PALO GEOPAL - FUSTO - ELICOIDI

In queste tre sezioni, per facilitare l'utilizzatore, vengono riportati i dati dimensionali degli elementi del palo. Alcune di queste informazioni vengono recuperate dalla tabella presente nella scheda **"Dati strutturali/Costi"**.

PARAMETRI ECONOMICI

Costo acciaio verniciato	Costo al kg dell'acciaio verniciato.
Costo acciaio zincato	Costo al kg dell'acciaio zincato.
N.ro pali	N.ro di pali che verranno forniti.
Costo elicoide imposto	Nel caso l'utilizzatore del programma decide di imporre il costo del singolo elicoide.

Ricarico palo	Eventuale ricarico applicato al costo finale di un singolo palo.
Ricarico/sconto elicoidi	Eventuale ricarico o sconto applicato al costo degli elicoidi.
N.ro giunzioni	Indica il numero di giunzioni eventualmente presenti nel palo.
Peso nipplo	Peso in kg di in singolo nipplo utilizzato per la giunzione di due segmenti di palo.
Costo bullone	Eventuale costo di una singola vite e relativo bullone utilizzati per la giunzione di due segmenti di palo. Sono necessari due viti/bullone per ogni giunzione.

CALCOLO PESI

Fusto (kg)	Peso totale del fusto e dei nippoli di un palo.
Elicoidi (kg)	Peso totale degli elicoidi di un palo.
Puntazza (kg)	Peso della puntazza di un palo.
Totale (kg)	Peso totale finale di un palo completo di tutti gli elementi.

A fianco dei pesi per un singolo palo, vi sono anche i pesi per il n.ro di pali forniti.

CALCOLO COSTO/PREZZO

Costo palo officina	Costo totale del ferro lavorato dall'officina comprendente gli elementi di un singolo palo: il fusto, gli elicoidi, la puntazza e gli eventuali nippoli per le giunzioni.
Costo bulloni	Costo degli eventuali bulloni necessari per le giunzioni dei segmenti di fusto di un singolo palo.
Costo elicoidi grezzi	Costo degli elicoidi grezzi presenti in un singolo palo.
Costo totale palo	Costo totale del singolo palo.
Prezzo palo finito	Prezzo totale del singolo palo ottenuto applicando l'eventuale ricarico sul palo e l'eventuale ricarico/sconto sugli elicoidi.

A fianco dei vari costi per un singolo palo, vi sono anche i costi per il n.ro di pali forniti. Le due colonne di costi (singolo/totale) sono ripetute per i due tipi di acciaio fornibili e cioè per l'acciaio verniciato e quello zincato. Sotto a questi campi sono inoltre presenti il costo ed il prezzo a metro di un palo in acciaio verniciato e zincato.

Sezione DATI STRUTTURALI / COSTI

Nella tabella presente nella scheda **“Dati strutturali/Costi”** (v. immagine sotto) sono definiti una serie di dati dimensionali, il peso ed il costo dei vari elementi che compongono un palo (fusto, elicoidi, puntazza, nippoli e bulloni) nelle varie misure disponibili (intese come diametri, spessore e passi).

Oltre a questi dati, per ogni combinazione accettabile di fusto (in tutte le sue misure disponibili) ed elicoide (in tutte le sue misure disponibili), vengono riportati anche i valori di portata strutturale per il fusto (Portata strutturale max SLU fusto (kg) spess. min/max) e di portata strutturale per gli elicoidi (Stato Limite di Esercizio (max S.L.E.), Stato Limite Ultimo (max S.L.U.) e Stato Limite Ultimo (max S.L.U.) - A rottura) con la relativa pressione kg/cm calcolata.

Questi valori di portata sono ricavati da specifiche analisi e riportati su tabelle dedicate, che sono illustrate anche alle pagg. 46-100 del Manuale Catalogo di Geopalitalia.

B

VITI Geopal® (acciaio S 355)							
$\varnothing_{\text{est}}$ [mm]	passo [mm]	spessore [mm]	relativo fusto $\varnothing$ [mm]	Portata strutturale max SLE (*a max deformazione considerata) [kN]	Portata strutturale max SLU (*a max deformazione considerata) [kN]	Portata strutturale max SLU (*a rottura) [kN]	Portata geotecnica (*a rottura) [kN]
180	75	5	48,3	24	36	43	Aumenta al crescere dell'area dell'elica e dipende direttamente dalla consistenza del terreno, R_{sp}
220	75	5	60,3	24	36	67	
250	75	6	76,1	24	36	81	
300	150	6	88,9	24	36	90	
300	150	8	88,9	43	65	129	
300	150	10	88,9	57	86	171	
300	150	12	88,9	86	129	238	
400	150	6	114,3	29	44	133	
400	150	8	114,3	38	57	162	
400	150	10	114,3	57	86	210	
400	150	12	114,3	86	129	267	
500	150	8	139,7	57	86	324	
500	150	10	139,7	76	114	381	
500	150	12	139,7	105	158	448	
500	150	15	139,7	133	200	590	
600	150	8	168,3	57	86	248	
600	150	10	168,3	76	114	286	
600	150	15	168,3	95	143	362	
600	150	20	168,3	133	200	533	
700	150	12	219,1	114	171	610	
700	150	15	219,1	152	228	724	

Tabella B.7 - Viti

Tabella B.8 - Nippli di giunzione (pali + prolunghe)

Nippli di giunzione (pali + prolunghe)					
Diametro fusto (Φ_f)	Diametro nipplo (e)	Spessore nipplo (s)	Diametro chiodatura	Max momento torcente fusto	Max momento torcente nipplo
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg m]	[kg m]
48,3	38	4	15	198,74	152,53
60,3	48,3	5	15	310,11	242,82
76,1	60,3	8	15	471,72	469,26
88,9	70	10	28	1399,88	1297,79
114,3	95	10	28	1839,40	1838,54
139,7	121	10	28	2278,92	2400,92
168,3	146	12	28	3424,01	3478,08
219,1	193,7	12	28	4522,80	4716,18

46

D 1.3 - Geopal® PVD PALOTIRANTI A VITI DISTANZIATE

Il palo PVD, come rappresentato a pag. 97, è progettato per scaricare le tensioni indotte attraverso le viti distanziate presenti sul fusto in quei terreni con alternanze di strati portanti e strati meno portanti.

CODICE PALO	Φ fusto (mm)	Sp. fusto (mm)	Lunghezza fusto (mm)	Φ vite (mm)	N. viti	Q str. max Σ viti (a deformazione amm.)		Q GEO Σ viti
						SLE	SLU	

Serie B.T. (basso tonnellaggio)

PVD 48/1V	48,3	3 ÷ 4	da 1000 a 3000	180	1	2,4 Ton	3,6 Ton	da calcolare
PVD 48/2V	48,3	3 ÷ 4	da 1500 a 3000	180	2	4,8 Ton	7,2 Ton	da calcolare
PVD 48/3V	48,3	3 ÷ 4	3000	180	3	7,2 Ton	10,8 Ton	da calcolare
PVD 60/1V	60,3	3 ÷ 4	da 1000 a 3000	220	1	2,4 Ton	3,6 Ton	da calcolare
PVD 60/2V	60,3	3 ÷ 4	da 1500 a 3000	220	2	4,8 Ton	7,2 Ton	da calcolare
PVD 60/3V	60,3	3 ÷ 4	3000	220	3	7,2 Ton	10,8 Ton	da calcolare
PVD 76/1V	76,1	4 ÷ 5	da 1000 a 3000	250	1	2,4 Ton	3,6 Ton	da calcolare
PVD 76/2V	76,1	4 ÷ 5	da 1500 a 3000	250	2	4,8 Ton	7,2 Ton	da calcolare
PVD 76/3V	76,1	4 ÷ 5	3000	250	3	7,2 Ton	10,8 Ton	da calcolare

Serie M.T. (medio tonnellaggio)

PVD 90/1V	88,9	8 ÷ 10	da 1500 a 6000	300	1	5,7 Ton	8,6 Ton	da calcolare
PVD 90/2V	88,9	8 ÷ 10	da 2000 a 6000	300	2	11,4 Ton	17,1 Ton	da calcolare
PVD 90/3V	88,9	8 ÷ 10	da 3000 a 6000	300	3	17,1 Ton	25,7 Ton	da calcolare
PVD 90/4V	88,9	8 ÷ 10	da 4000 a 6000	300	4	22,8 Ton	34,2 Ton	da calcolare
PVD 90/5V	88,9	8 ÷ 10	6000	300	5	28,5 Ton	42,8 Ton	da calcolare
PVD 114/1V	114,3	8 ÷ 10	da 1500 a 6000	400	1	8,6 Ton	12,9 Ton	da calcolare
PVD 114/2V	114,3	8 ÷ 10	da 3000 a 6000	400	2	17,2 Ton	25,8 Ton	da calcolare
PVD 114/3V	114,3	8 ÷ 10	da 4000 a 6000	400	3	25,8 Ton	38,7 Ton	da calcolare
PVD 114/4V	114,3	8 ÷ 10	6000	400	4	34,4 Ton	51,6 Ton	da calcolare

Serie A.T. (alto tonnellaggio)

PVD 140/1V	139,7	8 ÷ 10	da 1500 a 6000	500	1	10,5 Ton	15,8 Ton	da calcolare
PVD 140/2V	139,7	8 ÷ 10	da 3000 a 6000	500	2	21,0 Ton	31,5 Ton	da calcolare
PVD 140/3V	139,7	8 ÷ 10	da 4000 a 6000	500	3	31,5 Ton	47,3 Ton	da calcolare
PVD 140/4V	139,7	8 ÷ 10	6000	500	4	42,0 Ton	63,0 Ton	da calcolare
PVD 168/1V	168,3	7 ÷ 10	da 1500 a 6000	600	1	9,5 Ton	14,3 Ton	da calcolare
PVD 168/2V	168,3	7 ÷ 10	da 4000 a 6000	600	2	19,0 Ton	28,5 Ton	da calcolare
PVD 168/3V	168,3	7 ÷ 10	6000	600	3	28,5 Ton	42,8 Ton	da calcolare
PVD 219/1V	219,1	7 ÷ 10	da 1500 a 6000	700	1	15,2 Ton	22,8 Ton	da calcolare
PVD 219/2V	219,1	7 ÷ 10	da 4000 a 6000	700	2	30,4 Ton	45,6 Ton	da calcolare
PVD 219/3V	219,1	7 ÷ 10	6000	700	3	45,6 Ton	68,4 Ton	da calcolare

N.B.: Le capacità portanti delle viti riportate in tabella sono strutturali e considerate a deformazione ammissibile (Q str.).
Le capacità portanti geotecniche (Q GEO) varieranno in funzione della capacità portante del terreno di fondazione.

La portata complessiva del palo è la somma delle portate geotecniche di ogni singola vite presente sul palo, sommata a quella laterale del fusto (variabile a seconda della sua lunghezza).

Tutte le schede prodotte dei modelli sopra riportati sono disponibili nel sito web: www.geopalitalia.com

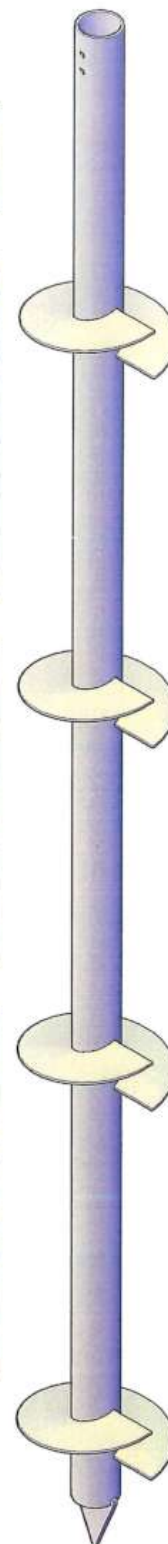


Immagine illustrativa

Palo Geopal® - mod. PVC

Sezione CALCOLO PALO

DATI DI PROGETTO

Tipologia di palo	Tipo di palo: PVD (palo a vite distanziata) o PVC (palo a vite continua).
Verifica capacità portante geotecnica	Tipo di sforzo a cui viene sottoposto il palo: a Compressione oppure a Trazione.
Portata totale richiesta QT_{PROGETTO} (kg)	Carico che il palo deve essere in grado di sostenere in sicurezza.

PARAMETRI DEL FUSTO

Lunghezza totale - L (cm)	Indica la lunghezza totale del fusto compresa la parte che rimane fuori dal terreno. E' esclusa la lunghezza della puntazza.
Quota di testa rispetto piano campagna - z (cm)	Indica la distanza della testa del palo dal piano campagna. Un valore positivo indica che la testa si trova sopra il piano campagna mentre un valore negativo indica che è sotto.
Lunghezza fuori terra - h1 (cm)	Indica la lunghezza della parte di fusto che esce dal terreno. Solitamente almeno 30 cm devono rimanere fuori dal terreno per permettere ai macchinari di sganciare il palo conficcato nel terreno.
Quota fondo scavo (cm)	Profondità dello scavo rispetto al piano campagna.
Quota falda acquifera da p.c. (cm)	Livello della falda acquifera rispetto al piano campagna.
Diametro - d (cm)	Diametro del fusto.
Spessore (cm)	Spessore del fusto.
fs media da Indagine penetrometrica (kg/cmq)	Valore medio della forza di attrito misurata in campagna con il penetrometro statico.
fs di progetto (kg/cmq)	Valore, assegnato dal progettista a discrezione, che sostituisce quella misurata. Quando viene riportato questo valore, esso ha la precedenza sul valore medio rilevato con l'Indagine penetrometrica.
Coeff. di sicurezza γ_R (gamma _R)	Coefficiente di sicurezza γ_R (gamma _R) a riduzione della forza di resistenza da attrito (fs) cui è sottoposto il palo. Non obbligatorio ma raccomandato dalle N.T.C., va a dividere il valore fs.

Coeff. di sicurezza ξ (xi)	Coefficiente di sicurezza ξ (xi) a riduzione della forza di resistenza da attrito (fs) cui è sottoposto il palo. Non obbligatorio ma raccomandato dalle N.T.C., va a dividere il valore fs.
Coeff. di sicurezza λ (lambda)	Coefficiente di sicurezza λ (lambda) a riduzione della forza di resistenza da attrito (fs) cui è sottoposto il palo. Facoltativo a discrezione del progettista, va a dividere il valore fs.
Pressione tangenziale unitaria (kg/cm ²)	Attrito laterale risultante dalla riduzione del valore fs secondo i vari coefficienti di sicurezza e riduzione specificati dal progettista.
Portata strutturale max SLU fusto (kg)	Portata massima al punto di rottura SLU. Il dato è ricavato dalla tabella dei dati strutturali.

PARAMETRI DELLE SPIRALI	
Diametro - D (cm)	Diametro della spirale.
Passo (cm)	Passo della spirale.
Spessore (cm)	Spessore della spirale.
Usa elicoidi	Indica che la spirale invece di essere un unico pezzo sarà composto da singoli elicoidi saldati uno dopo l'altro.
N.ro di spirali da <n> cm	In ogni campo va indicato il numero di spirali di lunghezza <n> presenti nel palo.
qc (pressione normale su elicoidi) (kg/cm ²)	Pressione esercitata sulla superficie del primo elicoidi della spirale (il più in basso in caso di palo a compressione oppure il più in alto in caso di palo in trazione).
cu medio da Indagine penetrometrica (kg/cm ²)	Media della forza di resistenza del terreno alla rottura verticale provocata dal cilindro immaginario composto dagli elicoidi della spirale.
cu di progetto (kg/cm ²)	Valore, impostato dal progettista, per la forza di resistenza del terreno alla rottura verticale. Quando viene specificato, questo valore, ha la precedenza sul valore cu medio rilevato in fase di Indagine penetrometrica.
Coeff. di sicurezza γ_R (gamma R)	Coefficiente di sicurezza γ_R (gamma R) a riduzione della forze cui vengono sottoposti gli elicoidi della spirale. Non obbligatorio ma raccomandato dalle N.T.C., va a dividere il valore qc (pressione unitaria misurata con penetrometro) e di cu (sforzo di taglio).
Coeff. di sicurezza ξ (xi)	Coefficiente di sicurezza ξ (xi) a riduzione della forze cui vengono sottoposti gli elicoidi della spirale. Non obbligatorio ma raccomandato dalle N.T.C., va a dividere il valore qc (pressione unitaria misurata con penetrometro) e di cu (sforzo di taglio).
Coeff. di sicurezza θ (theta)	Coefficiente di sicurezza θ (theta) a riduzione della pressione verticale cui viene sottoposto il primo elicoidi della spirale. Facoltativo a discrezione del progettista, va a dividere il valore qc (pressione unitaria misurata con penetrometro).

Coeff. di sicurezza ϵ (epsilon)	Coefficiente di sicurezza ϵ (epsilon) a riduzione forza di resistenza del terreno alla rottura verticale provocata dalla mobilitazione del cilindro immaginario, composto dagli elicoidi della spirale. Facoltativo a discrezione del progettista, va a dividere il valore c_u (della coesione non drenata).
Pressione normale unitaria di progetto (kg/cmq)	Pressione verticale risultante dalla riduzione del valore q_c secondo i vari coefficienti di sicurezza e riduzione specificati dal progettista.
Forza di taglio di sicurezza	Forza di taglio risultante dalla riduzione del valore c_u (medio o definito dal progettista) secondo i vari coefficienti di sicurezza e riduzione specificati dal progettista.
Cedimento indicativo Δ_w (delta w) di progetto (cm)	Cedimento verticale previsto calcolato in base alla portata richiesta $Q_{T\text{PROGETTO}}$.

PORTATA DEL FUSTO	
fs media di analisi (kg/cmq)	Riporta valore inserito dall'utente. Vedi sopra: area "Parametri Fusto".
fs di progetto (kg/cmq)	Riporta valore inserito dall'utente. Vedi sopra: area "Parametri Fusto".
Lungh. fuori terra - h1 (cm)	Riporta valore inserito dall'utente. Vedi sopra: area "Parametri Fusto".
Lungh. terreno smosso - h2 (cm)	Lunghezza della parte di fusto appena sotto il livello del terreno (fondo scavo o piano campagna) dove esso risulta smosso e tale da avere una resistenza/attrito minore.
Lungh. passi elicoidi - h3 (cm)	Lunghezza della parte di fusto dove sono saldati gli elicoidi e che non contribuisce alla portata laterale del fusto stesso.
Lungh. porzione scarto - H (cm)	Lunghezza della porzione di fusto che non contribuisce alla portata laterale del palo. Corrisponde alla somma della parte di fusto fuori dal terreno, dell'area del fusto a contatto con la parte di terreno smosso, dell'area "coperta" dagli elicoidi. Nel caso risultino delle sovrapposizioni delle aree di scarto, relative al terreno smosso ed agli elicoidi, queste verranno considerate una volta sola (ad esempio un elicoidi che si trova nell'area del terreno smosso non va ad aumentare la porzione di scarto).
Lungh. efficace - Le (cm)	Lunghezza del fusto che attraverso l'attrito con il terreno contribuisce effettivamente alla portata del palo.
Area laterale totale - AL (cmq)	Area laterale totale del fusto calcolata considerando tutta la lunghezza del fusto moltiplicata per la circonferenza.
Area laterale porzione scarto (cmq)	Area laterale della porzione di scarto del fusto (area che non contribuisce alla portata laterale del palo) calcolata considerando la lunghezza della porzione di scarto moltiplicata per la circonferenza.
Area laterale efficace AL_e (cmq)	Area laterale efficace del fusto (area che contribuisce alla portata laterale del palo) calcolata considerando la lunghezza efficace moltiplicata per la circonferenza.

Portata laterale - QL (kg)	Portata laterale della porzione efficace applicando l' f_s (forza di resistenza da attrito generata dal terreno) senza l'applicazione dei coefficienti di riduzione.
Portata laterale efficace QL_e (kg)	Portata laterale della porzione efficace calcolata applicando all'area laterale efficace, la pressione tangenziale unitaria risultante l'applicazione dei coefficienti di riduzione al valore f_s (forza di resistenza da attrito generata dal terreno).
Portata residua da compensare QR (kg)	Portata residua da compensare "a carico" degli elicoidi. Ottenuta sottraendo alla portata totale richiesta, la portata laterale efficace del fusto.

PORTATA DELLE SPIRALI	
Area piena elicoide di punta - A.p.p. I (cmq)	Area di un cerchio del diametro dell'elicoide comprendente quindi anche l'area di proiezione del fusto.
Area netta elicoide intermedio - A.n. I (cmq)	Area di un cerchio del diametro dell'elicoide esclusa l'area di proiezione del fusto.
Area totale efficace di base - At.e.b. (cmq)	Area totale efficace data dalla somma delle aree del primo elicoide (in alto o in basso a seconda di palo a compressione o a trazione) di ogni singola spirale.
Lunghezza complessiva spirali (cm)	Lunghezza totale delle spirali.
Area laterale complessiva spirali (cmq)	Area laterale totale del cilindro immaginario creato dalle spirali calcolata moltiplicando la circonferenza delle spirali per la lunghezza totale delle stesse.
Portata laterale spirali - QL_{SP} (kg)	Portata laterale delle spirali dovuta alla resistenza del terreno alla rottura verticale provocata con la mobilitazione del cilindro immaginario costituito dagli elicoidi delle spirali applicate.
Portata strutturale QB_{STR} ridotta di un elicoide (kg)	Portata massima al punto di rottura SLU ridotta del 50%. Il dato è ricavato da tabelle.
Portata strutturale totale ridotta di sicurezza (kg)	Portata totale massima al punto di rottura SLU ridotta del 50% data dalla somma delle portate di tutti gli elicoidi che compongono la spirale.
Portata strutturale QB_{STR} di un elicoide (kg)	Portata massima al punto di rottura SLU. Il dato è ricavato da tabelle prodotte mediante calcolo delle tensioni e deformazioni eseguite con il programma STRAUS7 agli elementi finiti.
Pressione unitaria strutturale σ_{STR} (kg/cm ²)	Pressione unitaria strutturale calcolata sull'area dell'elicoide intermedio.
Portata di base di progetto (kg)	Portata totale delle spirali.

PORTATA EFFETTIVA DELLE SPIRALI E CEDIMENTO INDICATIVO DI ESERCIZIO	
QT_{MASSIMA} = QL_e + QB_{GEO} - QB_{SP}	Portata massima del palo progettato data dalla portata laterale del fusto QL_e + la portata di base delle spirali QB_{GEO} + portata laterale spirali QL_{SP} .

$QT_{ECCEDENTE} = QT_{MASSIMA} - QT_{PROGETTO}$	Differenza tra la portata massima $QT_{MASSIMA}$ del palo progettato (sopra definita) e la portata richiesta $QT_{PROGETTO}$.
Cedimento indicativo $QT_{MASSIMA}$ (cm)	Cedimento indicativo massimo calcolato in base alla portata massima $QT_{MASSIMA}$ del palo progettato.

Sezione CALCOLO PREZZO

In base ai dimensioni del palo e degli elementi strutturali scelti verrà calcolato il peso ed il prezzo di un singolo palo ed il totale in base al numero di pali.

PALO GEOPAL – FUSTO - SPIRALI

In queste tre sezioni, per facilitare l'utilizzatore, vengono riportati i dati dimensionali degli elementi del palo. Alcune di queste informazioni vengono recuperate dalla tabella presente nella scheda **"Dati strutturali/Costi"**.

PARAMETRI ECONOMICI

Costo acciaio verniciato	Costo al kg dell'acciaio verniciato.
Costo acciaio zincato	Costo al kg dell'acciaio zincato.
N.ro pali	N.ro di pali che verranno forniti.
Costo elicoide imposto	Nel caso l'utilizzatore del programma decide di imporre il costo del singolo elicoide.
Ricarico palo	Eventuale ricarico applicato al costo finale di un singolo palo.
Ricarico/sconto elicoidi	Eventuale ricarico o sconto applicato al costo degli elicoidi.
N.ro giunzioni	Indica il numero di giunzioni eventualmente presenti nel palo.
Peso nipplo	Peso in kg di in singolo nipplo utilizzato per la giunzione di due segmenti di palo.
Costo bullone	Eventuale costo di un singola vite e relativo bullone utilizzati per la giunzione di due segmenti di palo. Sono necessari due viti/bullone per ogni giunzione.

CALCOLO PESI

Fusto (kg)	Peso totale del fusto e dei nippli di un palo.
Elicoidi (kg)	Peso totale degli elicoidi di un palo.
Puntazza (kg)	Peso della puntazza di un palo.
Totale (kg)	Peso totale finale di un palo completo di tutti gli elementi.

A fianco dei pesi per un singolo palo, vi sono anche i pesi per il n.ro di pali forniti.

CALCOLO COSTO/PREZZO

Costo palo officina	Costo totale del ferro lavorato dall'officina comprendente gli elementi di un singolo palo: il fusto, gli elicoidi, la puntazza e gli eventuali nippli per le giunzioni.
Costo bulloni	Costo degli eventuali bulloni necessari per la giunzioni dei segmenti di fusto di un singolo palo.
Costo elicoidi grezzi	Costo degli elicoidi grezzi presenti in un singolo palo.
Costo totale palo	Costo totale del singolo palo.
Prezzo palo finito	Prezzo totale del singolo palo ottenuto applicando l'eventuale ricarico sul palo e l'eventuale ricarico/sconto sugli elicoidi.

A fianco dei vari costi per un singolo palo, vi sono anche i costi per il numero di pali forniti. Le due colonne di costi (singolo/totale) sono ripetute per i due tipi di acciaio trattato, ovvero per l'acciaio verniciato e quello zincato.

Sotto a questi campi sono inoltre presenti il costo ed il prezzo a metro di un palo in acciaio verniciato e di un palo di acciaio zincato.

Sezione DATI STRUTTURALI / COSTI

Nella tabella presente nella scheda **"Dati strutturali/Costi"** sono definiti una serie di dati dimensionali, il peso ed il costo dei vari elementi che compongono un palo (fusto, elicoidi, puntazza, nippli e bulloni) nelle varie misure disponibili (intese come diametri, spessore e passi).

Oltre a questi dati, per ogni combinazione accettabile di fusto (in tutte le sue misure disponibili) ed elicoide (in tutte le sue misure disponibili), vengono riportati anche i valori di portata strutturale per il fusto (Portata strutturale max SLU fusto (kg) spess. min/max) e di portata strutturale per gli elicoidi (Stato Limite di Esercizio (max S.L.E.), Stato Limite Ultimo (max S.L.U.) e Stato Limite Ultimo (max S.L.U.) - A rottura) con la relativa pressione kg/cm calcolata.

Questi valori di portata sono ricavati da specifiche analisi e riportati su tabelle dedicate, che sono illustrate anche alle pagg. 46-102 del Manuale Catalogo di Geopalitalia.

Vedi figure successive

B

VITI Geopal® (acciaio S 355)							
Φ_{est} [mm]	passo [mm]	spessore [mm]	relativo fusto Φ [mm]	Portata strutturale max SLE (*a max deformazione considerata) [kN]	Portata strutturale max SLU (*a max deformazione considerata) [kN]	Portata strutturale max SLU (*a rottura) [kN]	Portata geotecnica (*a rottura) [kN]
180	75	5	48,3	24	36	43	Aumenta al crescere dell'area dell'elica e dipende direttamente dalla consistenza del terreno, R_{ϕ}
220	75	5	60,3	24	36	67	
250	75	6	76,1	24	36	81	
300	150	6	88,9	24	36	90	
300	150	8	88,9	43	65	129	
300	150	10	88,9	57	86	171	
300	150	12	88,9	86	129	238	
400	150	6	114,3	29	44	133	
400	150	8	114,3	38	57	162	
400	150	10	114,3	57	86	210	
400	150	12	114,3	86	129	267	
500	150	8	139,7	57	86	324	
500	150	10	139,7	76	114	381	
500	150	12	139,7	105	158	448	
500	150	15	139,7	133	200	590	
600	150	8	168,3	57	86	248	
600	150	10	168,3	76	114	286	
600	150	15	168,3	95	143	362	
600	150	20	168,3	133	200	533	
700	150	12	219,1	114	171	610	
700	150	15	219,1	152	228	724	

Tabella B.7 - Viti

Tabella B.8 - Nippli di giunzione (pali + prolunghe)

Nippli di giunzione (pali + prolunghe)					
Diametro fusto (Φ_f)	Diametro nipplo (e)	Spessore nipplo (s)	Diametro chiodatura	Max momento torcente fusto	Max momento torcente nipplo
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg m]	[kg m]
48,3	38	4	15	198,74	152,53
60,3	48,3	5	15	310,11	242,82
76,1	60,3	8	15	471,72	469,26
88,9	70	10	28	1399,88	1297,79
114,3	95	10	28	1839,40	1838,54
139,7	121	10	28	2278,92	2400,92
168,3	146	12	28	3424,01	3478,08
219,1	193,7	12	28	4522,80	4716,18

46

D 1.4 - Geopal® PVC PALOTIRANTI A VITE CONTINUA

Il palo PVC, come rappresentato a pag. 97, è progettato per scaricare le tensioni indotte attraverso la vite continua presente sul fusto in quei terreni con strati poco portanti.

CODICE PALO	Φ fusto (mm)	Sp. fusto (mm)	Lungh. fusto (mm)	Φ vite (mm)	Sviluppo vite (mm)	Q str. max vite continua (a deformazione amm.)		Q GEO vite cont.
						SLE	SLU	

Serie M.T. (medio tonnellaggio)

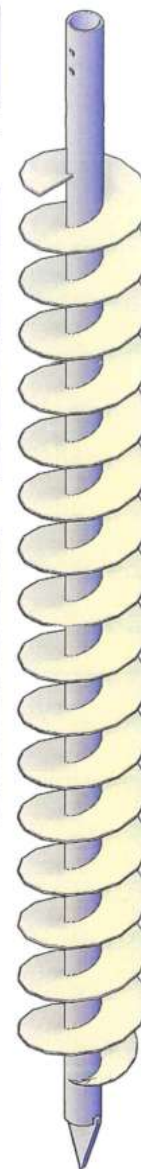
PVC 90/1500	88,9	8 ÷ 10	da 3000 a 6000	300	1500	19,0 Ton	28,5 Ton	da calc.
PVC 90/3000	88,9	8 ÷ 10	da 4000 a 6000	300	3000	38,0 Ton	57,0 Ton	da calc.
PVC 90/4500	88,9	8 ÷ 10	6000	300	4500	57,0 Ton	85,5 Ton	da calc.
PVC 114/1500	114,3	8 ÷ 10	da 3000 a 6000	400	1500	29,0 Ton	43,5 Ton	da calc.
PVC 114/3000	114,3	8 ÷ 10	da 4000 a 6000	400	3000	58,0 Ton	87,0 Ton	da calc.
PVC 114/4500	114,3	8 ÷ 10	6000	400	4500	87,0 Ton	130,5 Ton	da calc.

Serie A.T. (alto tonnellaggio)

PVC 140/1500	139,7	8 ÷ 10	da 3000 a 6000	500	1500	29,0 Ton	43,5 Ton	da calc.
PVC 140/3000	139,7	8 ÷ 10	da 4000 a 6000	500	3000	58,0 Ton	87,0 Ton	da calc.
PVC 140/4500	139,7	8 ÷ 10	6000	500	4500	87,0 Ton	130,5 Ton	da calc.
PVC 168/1500	168,3	7 ÷ 10	da 3000 a 6000	500	1500	43,5 Ton	65,3 Ton	da calc.
PVC 168/3000	168,3	7 ÷ 10	da 4000 a 6000	500	3000	87,0 Ton	130,5 Ton	da calc.
PVC 168/4500	168,3	7 ÷ 10	6000	500	4500	130,5 Ton	195,8 Ton	da calc.

N.B.: Le capacità portanti delle viti continue riportate in tabella sono strutturali e considerate a deformazione ammissibile (Q str.).
Le capacità portanti geotecniche (Q GEO) varieranno in funzione della capacità portante del terreno di fondazione.

La portata complessiva del palo è la somma della portata geotecnica della vite continua presente sul palo, sommata a quella laterale del fusto (variabile a seconda della sua lunghezza).



Tutte le schede prodotto dei modelli sopra riportati sono disponibili nel sito web: www.geopalitalia.com

CONCLUSIONI

A riprova di quanto fin qui presentato, si allegano al presente documento, quattro esempi di studio, completi di verifica analitica e collaudo statico, condotti sull'effettiva capacità portante del palo e relativo cedimento primario.

Tre di questi riguardano la progettazione, il collaudo e l'impiego di pali mod. PVD (a viti distanziate), installati su terreni sabbiosi e sabbioso-limosi di media e medio alta consistenza, mentre uno, il palo mod. PVC (a viti continua), riguarda sempre il dimensionamento, il collaudo e l'impiego di pali a viti continua infissi su terreni limoso-argillosi sciolti, di bassa/bassissima consistenza e capacità portante.

Tutti quattro i modelli sono stati verificati a compressione, mentre il mod. PVC anche a trazione, dove il valore del cedimento (Δw), determinato in fase progettuale, risulta essere confermato dai risultati ottenuti con la prova di carico eseguita in campagna, che ha espresso un valore analogo, estremamente compatibile, essendo di poco differente su scala millimetrica.

TABELLA DI SINTESI SUI CEDIMENTI TEORICI E REALI MISURATI IN FUNZIONE ALLE PRESSIONI ESERCITATE SUGLI ELICOIDI DEI PALI PVD

Cantiere GOBBO-CARUZZO (Silea-TV)

Carico a compressione	7.800 Kg	Mod. palo : PVD.90.8000.300.8.150/4V
$\partial_{\text{PROGETTO}} =$	1,05 Kg/cm ²	$\Delta w_{\text{PROGETTO}} =$ 4,00 mm
$\partial_{\text{ESERCIZIO}} =$	0,41 Kg/cm ²	$\Delta w_{\text{ESERCIZIO}} =$ 2,00 mm
(Palo 1 $\Delta w = 5,2$ mm) (Palo 2 $\Delta w = 6,5$ mm) (Palo 3 $\Delta w = 5,5$ mm)		$\Delta w_{\text{MISURATO}} =$ 5,76 mm $\Delta^* = + 3,76$ mm

Cantiere C.I.T. ing.Pevere (Grado-GO)

Carico a compressione	12.000 Kg	Mod. palo : PVD.90.8.5000.300.8.145/4V
$\partial_{\text{PROGETTO}} =$	3,16 Kg/cm ²	$\Delta w_{\text{PROGETTO}} =$ 10,00 mm
$\partial_{\text{ESERCIZIO}} =$	2,42 Kg/cm ²	$\Delta w_{\text{ESERCIZIO}} =$ 7,00 mm
		$\Delta w_{\text{MISURATO}} =$ 7,21/7,39 mm $\Delta^* = + 0,30$ mm

Cantiere ARREDOLINE (Lido di Bibbona-LI)

Carico a compressione	7.000 Kg	Mod. palo : PVD.90.6.3000.300.8.150/2V
$\partial_{\text{PROGETTO}} =$	3,95 Kg/cm ²	$\Delta w_{\text{PROGETTO}} =$ 14,00 mm
$\partial_{\text{ESERCIZIO}} =$	3,40 Kg/cm ²	$\Delta w_{\text{ESERCIZIO}} =$ 12,00 mm
		$\Delta w_{\text{MISURATO}} =$ 2,90 mm $\Delta^* = - 9,10$ mm

Carico a compressione

Mod. palo : PVC.114.8.4000.400.3000.10/6.250

 $Q_{T\text{ PROGETTO}} = 3.000 \text{ Kg}$ $\Delta_{W\text{ PROGETTO}} = 0,70 \text{ mm}$ $Q_{T\text{ MASSIMO}} = 8.373,33 \text{ Kg}$ $\Delta_{W\text{ TEORICO}} = 3,60 \text{ mm}$ $\Delta_{W\text{ MISURATO}} = 0,76 \text{ mm} \quad \Delta^* = + 0,06 \text{ mm}$ **Carico a trazione**

Mod. palo : PVC.114.8.4000.400.3000.10/6.250

 $Q_{T\text{ PROGETTO}} = 4.000 \text{ Kg}$ $\Delta_{W\text{ PROGETTO}} = 4,40 \text{ mm}$ $Q_{T\text{ MASSIMO}} = 5.720 \text{ Kg}$ $\Delta_{W\text{ TEORICO}} = 8,40 \text{ mm}$ $\Delta_{W\text{ MISURATO}} = 4,33 \text{ mm} \quad \Delta^* = - 0,07 \text{ mm}$

Diversamente dai precedenti casi, in questo cantiere sono stati utilizzati pali a vite continua (tipo PVC) dovendo interagire con terreni prevalentemente coesivi molto poco consistenti. Il collaudo di portata del palo è stato eseguito sia a compressione che a trazione.

Nota: come si può vedere dai risultati sopra indicati, la differenza fra il valore del cedimento stimato con il programma di calcolo sviluppato per calcolare la portata teorica dei pali PVD e quello ottenuto con le prove di carico eseguite in cantiere, è molto modesta. Infatti i valori teorici stimati in fase di progetto (input e output) ricadono (in difetto o in eccesso) in un intorno circoscritto al valore del cedimento rilevato con la prova di carico in cantiere.

Grazie alle tante prove di carico su palo eseguite nel tempo nei vari cantieri, si è riusciti a documentare importanti risultati che, opportunamente elaborati, hanno consentito di ricavare le formule che utilizzano i parametri di compressibilità dei materiali.

Trattandosi di elaborazioni complesse che utilizzano diagrammi ed abachi di rilevante importanza realizzati in anni di studio e raccolta dati, la loro disponibilità è riservata solo ed esclusivamente alla società GEOPALITALIA Srl e al suo amministratore unico. Allo stato attuale, il nuovo programma di calcolo non è in vendita. Geopalitalia srl si riserva il diritto di produrre in esclusiva elaborati tecnici sul pre-dimensionamento dei pali da fornire ai propri clienti. Per tutto quanto precedentemente detto ed ampiamente illustrato nella documentazione allegata, **si ritiene di poter dichiarare** che: il programma realizzato per il calcolo automatico del dimensionamento dei pali a vite Geopal, la verifica della loro capacità portante e la determinazione del cedimento primario sotto azione del carico agente, è da ritenersi testato e validato, ai fini dell'uso tecnico-commerciale a cui viene destinato.

TREVISO, 16 maggio 2025**Geopalitalia Srl**

L' Amministratore

Dr.Geol. Gian Pietro Frare

Seguono allegati 4 esempi di dimensionamento pali (3 PVD e 1 PVC) significativi, testati.