

IL PALOTIRANTE GEOPAL®

B

B 1 - TECNOLOGIA E KNOW-HOW

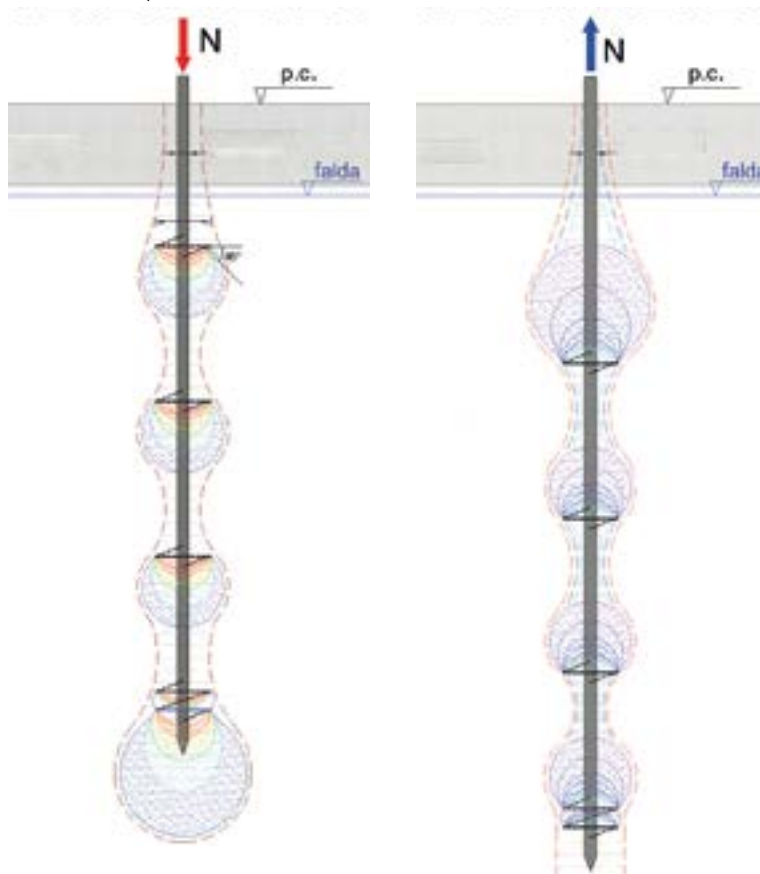
B 1.1 - I PALOTIRANTI Geopal®: GENERALITÀ

I pali a vite Geopal® sono detti anche “palotiranti” poiché hanno lo stesso comportamento sia a compressione che a trazione, benché in direzione diametralmente opposta. Fin dai tempi più remoti, infatti, la vite viene considerata una macchina semplice e perfetta, in quanto capace di creare contrasto nelle opposte direzioni di compressione e trazione, grazie alla specularità di ammortamento degli elicoidi durante l’infissione.

I palotiranti Geopal® sono costituiti da un fusto tubolare cilindrico in acciaio S355 JR/J0 o in acciaio N80, armato di una o più viti elicoidali, pure in acciaio ad alta resistenza, come la puntazza da perforazione. Le viti hanno un passo controllato che consente al palotirante di essere avvitato nel terreno con un disturbo minimo dei materiali. Il fusto è utilizzato per trasferire sia l’energia di torsione durante l’avvitamento che i carichi assiali da dissipare nelle eliche, una volta infissi, dando altresì massima stabilità laterale alla struttura.

Il palotirante viene infisso nel terreno applicando, contemporaneamente alla rotazione, una pressione sulla testa diretta verso il basso, così da consentirgli di avanzare fino alla profondità voluta o di rifiuto. Una volta installato, il palotirante potrà lavorare, ovviamente, sia a compressione che a trazione, trasferendo i carichi della sovrastruttura allo strato litologico desiderato.

Figura B.1 - Rappresentazione schematica dei bulbi di pressione prodotti da un palo PVD sollecitato a compressione e a trazione.



Le figure B.2, B.3 e B.4 illustrano le tre tipologie di palotirante a vite prodotte da Geopalitalia: il P2G, il PVD e il PVC con relative prolunghe tubolari lisce e armate.

Geopalitalia
PAI FONDAZIONALI ANTISISMICI BREVETTATI

Ø _e Diametri dei pali [mm]								
Fusto	48	60	76	90	114	140	168	219
Vite	180	220	250	300	400	500	600	700

Ø _e Diametri dei tiranti [mm]					
Barra di tesatura	30	36	42	52	60
Vite	180	220	250	300	400

Figura B.2 - P2G.



Figura B.3 - PVD.



Figura B.4 - PVC.



Figura B.5 - TIR-AP.



B 1.2 - REQUISITI DI UNA FONDAZIONE

Per chiamare “fondazione” una struttura che ha il compito di assorbire e dissipare i carichi nel terreno, bisogna che l’opera possieda requisiti di resistenza e funzionalità tali da assolvere, efficacemente e in sicurezza, la funzione per cui è stata progettata.

Molte fondazioni profonde, ma anche superficiali, spesso non assolvono le funzioni assegnate nella progettazione, racchiudendo non poche problematiche anche gravi che, al momento della verifica “solenne”, si manifestano con sorprendente sconcerto e brutalità. È il caso di fondazioni con requisiti antisismici dove l’impatto delle onde (s) sulle superfici di contatto, mobilita le strutture con effetti di stiramento e contrazione spesso devastanti.

L’ingegneria geotecnica, negli ultimi anni, ha fatto molti progressi in campo fondazionale, fra i quali quello di dimostrare che le fondazioni sono da calcolarsi come parti attive delle costruzioni e non passive come spesso accade. Con l’ingegneria sismica, sono stati fatti molti passi in avanti in questo settore e, grazie agli ingegneri giapponesi, le fondazioni in acciaio hanno soppiantato molte delle fondazioni in cemento, risultate invasive e spesso poco affidabili.

Con l’adeguamento sismico dei fabbricati, si progettano spesso dei portali d’acciaio che si collegano a dei pali fondazionali, con duplice funzione di puntone e tirante.

È chiaro che Geopalitalia, in questo settore, detiene una tecnologia di estremo interesse ed unicità per i

progettisti, essendo da pochi anni diffusa in Italia la cultura delle fondazioni antisismiche prefabbricate a duplice effetto.

Fattori sensibili

La capacità portante dei pali a vite dipende da:

1. tipo e proprietà geotecniche del terreno;
2. condizioni della superficie e delle acque sotterranee;
3. configurazione del palo (caratteristiche, modello strutturale);
4. tipo di acciaio impiegato (S355 JR/J0, N80, S460);
5. lunghezza e diametro del palo;
6. profondità d’infissione;
7. posizionamento del palo (verticale, inclinato);
8. distanza tra pali (interazione dei pali, effetto singolo e di gruppo);
9. tipo di carico (statico, dinamico, alternato, ad incrementi, ecc.).

B 1.3 - VANTAGGI NELL’UTILIZZO DEI PALOTIRANTI Geopal®

Di seguito si riportano alcune delle peculiarità dei palotiranti Geopal® e dei vantaggi nel loro utilizzo:

1. comprovata ingegneria;
2. capacità portante certificabile;
3. eco-compatibilità;
4. non invasività;
5. possibile rimovibilità;
6. resistenza all’abrasione;
7. facile giuntabilità;
8. rapidità d’infissione;
9. infissione a secco;
10. infissione senza vibrazioni;
11. resistenza alla compressione, trazione e torsione;
12. ottima resistenza ad azioni sismiche;
13. il terreno penetrato viene compattato lateralmente;

14. la loro rimozione comporta il solo rinterro del foro d'infissione;
 15. possono emergere parzialmente dal terreno, costituendo pilastro strutturale;
 16. possono essere installati in qualsiasi condizione climatica, dal polo all'equatore;
 17. installazione rapida e precisa nei terreni fini;
 18. possono essere infissi inclinati;
 19. possono essere installati in aree ristrette con accesso limitato;
 20. bassissima rumorosità durante l'infissione;
 21. possono essere iniettati dopo l'installazione;
 22. resistono alla corrosione mediante la zincatura;
 23. non sono richiesti controlli di integrità;
 24. possono essere immediatamente caricati dalle strutture in elevazione;
 25. rapido impiego anche in situazioni disagiate e/o di emergenza;
 26. trasportabilità anche su container;
 27. massima autonomia nei cantieri;
 28. facilmente giuntabili con accessori per il collegamento di varie strutture (tradizionali e prefabbricate).
4. consolidamento dei terreni fondali ed aumento della capacità portante originaria;
 5. adeguamento sismico delle fondazioni esistenti e parte in elevazione;
 6. stabilizzazione di pendii, scarpate e argini;
 7. palificate reggiscavo (RSC), terrapieni e terrazzamenti;
 8. ponti stradali;
 9. passerelle e piste ciclopedonali;
 10. pensiline stradali, civili ed industriali;
 11. banchine portuali, trabucchi e camminamenti a mare;
 12. piattaforme balneari e strutture marine stagionali;
 13. fondazioni per impianti fotovoltaici ed eolici;
 14. sostegno impalcature e strutture da cantiere;
 15. solai palafittati temporanei e permanenti;
 16. ancoraggi fondazionali per serre, tunnel e tensostrutture;
 17. ancoraggi fondazionali per messa in sicurezza alberi;
 18. ancoraggi fondazionali per arredo urbano (illuminazione-segnaletica-cartellonistica);
 19. ancoraggi fondazionali per condotte, cisterne, piscine e vasche di depurazione;
 20. annullamento cedimenti su carreggiate stradali, piazze e pavimenti industriali;
 21. sostegno passerelle e camminamenti sospesi su pali per siti archeologici e naturalistici;
 22. ancoraggio di recinzioni e barriere removibili per aree militari, confini protetti e zone inaccessibili;
 23. ancoraggi interni per consolidamento fondazioni esistenti;
 24. ancoraggio e stabilizzazione alberature.

B 1.4 - IMPIEGHI DEI PALOTIRANTI Geopal®

I pali a vite Geopal®, insieme all'intera gamma di accessori forniti da GeopalItalia, possono essere impiegati per:

1. costruzioni civili (tradizionali e prefabbricate);
2. costruzioni industriali (tradizionali e prefabbricate);
3. consolidamento di fondazioni

B 2 - CARATTERISTICHE DEI PALOTIRANTI Geopal®

Nel corso degli anni, si è spesso riscontrata una certa titubanza da parte dei tecnici nell'affrontare i calcoli sulla capacità portante dei palotiranti a vite Geopal®.

Il palotirante Geopal® ha la peculiarità di essere armato con viti elicoidali autoancoranti, di sezione molto superiore al fusto, capaci di penetrare i terreni compattandoli lateralmente, senza rimuoverne la giacitura e senza creare vibrazione alcuna.

Di seguito si riportano alcuni degli aspetti ingegneristici che maggiormente caratterizzano questo prodotto e che difficilmente sono reperibili nei libri di testo.

Le caratteristiche che rendono originale e vantaggioso il palotirante Geopal® sono state oggetto di studio per determinare sia i punti di forza che di debolezza di ogni sua parte strutturale interagente con il terreno, oltre che di un'analisi completa degli aspetti economici su cui sviluppare tecnologia, organizzazione e competitività.

B 2.1 - I MATERIALI IMPIEGATI: L'ACCIAIO

I palotiranti Geopal® sono realizzati interamente in acciaio strutturale. Essendo l'acciaio un materiale unico per le sue proprietà meccaniche, il suo impiego garantisce resistenza, efficienza, durata, versatilità, robustezza e riciclabilità. Inoltre, essendo prodotto in officine meccaniche attrezzate e qualificate come Centri di Trasformazione, è possibile controllare e certificare la qualità delle lavorazioni e dei ma-

teriali utilizzati.

È cosa nota che le proprietà dell'acciaio lo rendono un materiale di largo consumo, utilizzabile nelle più svariate opere, come strutture portanti, coperture, ponti, opere infrastrutturali, fino alle architetture impegnative di grandi opere come stadi, grattacieli etc.

L'efficienza degli acciai per impieghi strutturali, così come la durabilità e l'usura (della protezione si parlerà nel capitolo dedicato), è legata sicuramente alle proprietà chimico-fisiche e meccaniche del materiale, che si mantengono costanti nel tempo. Inoltre, l'acciaio è sicuramente, per sua natura, un materiale in grado di assorbire l'energia sismica (si potrebbe dire antisismico) grazie all'elevata resistenza meccanica. Esso si accoppia facilmente con altri materiali da costruzione per dare vita a soluzioni architettoniche che, spesso, sono l'espressione di sapiente connubio fra arte, sicurezza e tecnologia.

Infine, l'acciaio è sicuramente sostenibile e riciclabile al 100%. Il suo recupero rientra nel bilancio economico dell'opera.

Gli acciai utilizzati per costruire i palotiranti Geopal® sono quelli previsti dal D.M. 17 Gennaio 2018, relativi alle opere strutturali, con riferimento alle indicazioni contenute nelle relative norme disponibili UNI EN 10080:2005, della serie UNI EN 10025:2005, UNI EN 10210:2006 e UNI EN 10219:2006. In particolare viene usato principalmente acciaio al carbonio non legato come S355 JR/J0, N80 e, per talune viti speciali, S460.

Saldature e lavorazioni necessarie per realizzare i prodotti Geopal® vengono eseguite da officine meccaniche certificate come Centri di Trasformazione autorizzati dal Ser-

vizio Tecnico Centrale, che ne autorizza la certificazione dei prodotti lavorati a norma CE.

Ogni pezzo originale, contraddistinto da un segno distintivo di marchiatura, consente la rintracciabilità del costruttore e dei materiali utilizzati dallo stesso.

Oltre alla marchiatura, GeopalItalia fornisce la scheda illustrativa del prodotto, che descrive ogni aspetto tecnico dell'elemento realizzato e commercializzato.

B 2.2 - L'ARCHITETTURA DEI PALOTIRANTI Geopal®

Le architetture strutturali dei pali a vite Geopal® commercializzati da GeopalItalia risultano essere semplici ma allo stesso tempo versatili

e adattabili a molteplici condizioni geotecniche del sottosuolo.

Di seguito si riportano i tre modelli di palotirante Geopal®, strutturalmente ingegnerizzati secondo normativa, che la casa madre consiglia di utilizzare a seconda delle caratteristiche geotecniche dei terreni da palificare.

B 2.3 - COMPONENTI STRUTTURALI

Il palotirante Geopal® è costituito da un fusto tubolare cilindrico in acciaio, munito di foro passante per l'aggancio della testa e di una punta a vite ad ala larga, pure in acciaio, cui segue a distanza predefinita una puntazza triangolare atta a favorire l'infissione.

Peculiarità del palotirante Geopal®

Figura B.6 - Palo P2G.

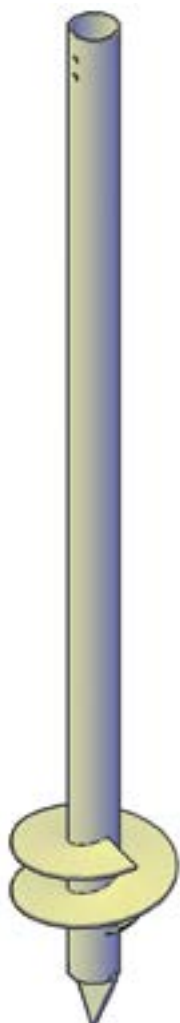


Figura B.7 - Palo PVD.

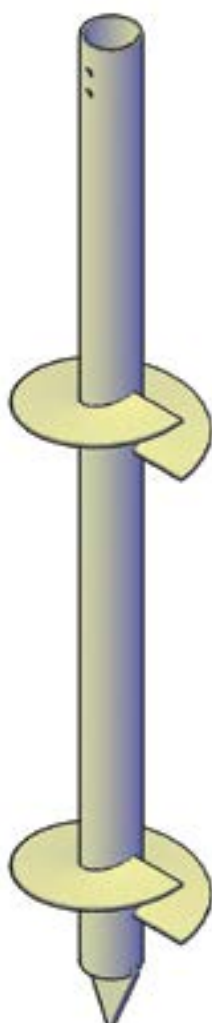
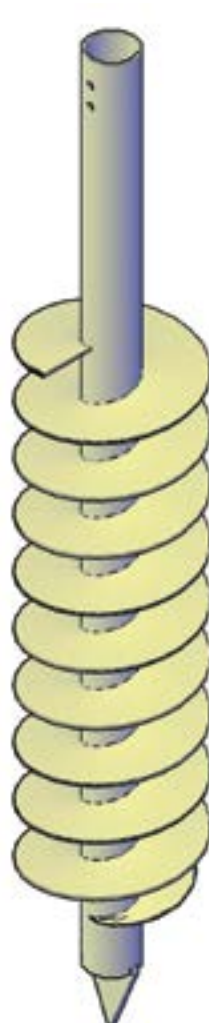


Figura B.8 - Palo PVC.



sono, quindi, le zone dove la geometria elicoidale dell'ala della vite, unita al fusto, amplia la superficie di contatto con il terreno, aumentandone la capacità portante.

Le giunzioni eseguite con saldatura autogena ad arco di tipo semiautomatico a filo continuo garantiscono la stessa resistenza a rottura dell'acciaio utilizzato, rendendo il prodotto finale decisamente affidabile e sicuro per reggere gli sforzi ai quali è destinato.

Ogni palotirante Geopal® può essere prolungato con elementi modulari semplici o con viti distanziate a diversa metratura, permettendo l'infissione entro spazi di manovra limitati, dove la palificazione può risultare difficile o addirittura impossibile. Con questa tecnica è possibile aumentare ulteriormente la capacità portante complessiva del palo o di ancoraggio del tirante. Le prolunghe sono collegate mediante bulloni, conformi per caratteristiche dimensionali e proprietà meccaniche alle norme UNI EN ISO 898-1:2001 per le viti e UNI EN 20898-2:1994 per i dadi riguardanti bulloni per giunzioni ad attrito. Le chiodature a caldo vengono eseguite nel rispetto della UNI 7356.

Il palo Geopal® è proposto in diverse serie e modelli con dimensioni,

diametri e spessori variabili in relazione a esigenze di progetto e di carico, terreni da attraversare, profondità da raggiungere e funzioni da svolgere.

B 2.3.1 - Il fusto

Il fusto del palotirante Geopal® viene realizzato in acciaio strutturale S355 JR/J0 o in N80. Esso può essere costituito da un unico elemento tubolare cilindrico o da più elementi giuntabili tra loro mediante un raccordo coassiale (nipplo) saldato con quattro chiodature, fra loro ortogonali, che ne garantiscono la resistenza torsionale impressa.

Lo spessore della sezione tubolare del nipplo è sempre maggiore a quella del fusto, per poter garantire la tenuta allo sforzo torsionale impresso dall'avvitatore durante la fase di infissione.

In seguito saranno riportati i valori di resistenza massima a torsione cui possono essere sottoposti durante l'infissione i pali prodotti da Geopalitalia.

Vedi tabella caratteristiche fusti utilizzati a pag. 45.

B 2.3.2 - La vite

L'elemento caratteristico del "palotirante a vite" è, ovviamente, la

Figura B.9



Figura B.10 - Vite continua a più elicoidi.

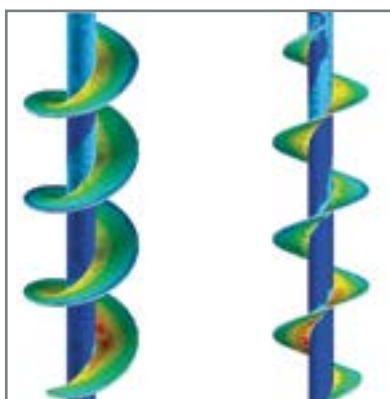
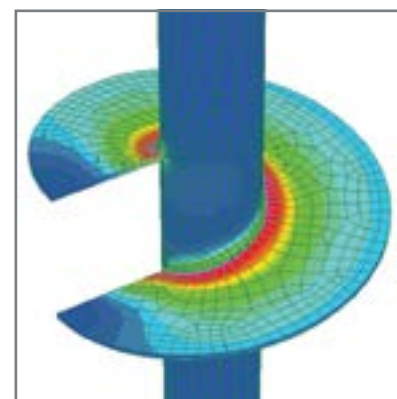


Figura B.11 - Vite singola o elicoidale.



vite stessa, che consiste in una lamina elicoidale saldata al palo, che si avvolge con passo costante ad andamento destrogiro lungo il suo asse.

La sporgenza alare della vite è generalmente compresa tra 0.5 e 1.5 volte il diametro del fusto ed è contrassegnata da una sezione trapezia o rettangolare, a seconda che derivi dalla lavorazione di una bobina nastriforme (coils) o da una lamiera tagliata ad elementi circolari (dischi).

La geometria elicoidale dell'ala della vite, unita al fusto, amplia la superficie di contatto del palo con il terreno, aumentandone la capacità portante, con particolare beneficio soprattutto nei terreni più scadenti.

L'infissione è condizionata dal passo della vite, che deve essere costante, e dalla direzione di avvolgimento, generalmente destrogira, poiché questo condiziona il senso di rotazione del palo durante le operazioni di infissione.

La vite doppia - P2G

Due elicoidi in successione continua danno origine ad una vite a due giri: modello 2G. Essa può essere realizzata tramite l'unione di due viti singole, ovvero mediante la calandratura conicizzata a vite di una lamina continua (o coils).

Figura B.14 - Vite singola.



Ogni tipologia di vite utilizzata da GeopalItalia nei palotiranti di serie, è stata dimensionata e verificata dettagliatamente ai fini della capacità portante strutturale massima praticabile.

La vite singola (elicoide) - PVD

La vite singola è costituita da una piastra di acciaio curvilinea, avvolta lungo una spirale idealmente tracciata sul fusto.

Operativamente, si tratta di una corona circolare di acciaio, aperta fino all'ampiezza desiderata, corrispondente al passo.

La corona circolare è generalmente di spessore uniforme, in quanto ricavata da una lastra piana; è comunque possibile anche ricavarla da coils. Ogni modello di vite riportata a catalogo è stata dimensionata e verificata strutturalmente ai fini della capacità portante massima utilizzabile.

La vite continua - PVC

La vite continua è costituita da un numero finito, e maggiore di 2, di giri di spira avvolti in continuità attorno al fusto.

Come già visto all'inizio di questo capitolo, l'elica è caratterizzata da raggio e passo che, quindi, si manterranno costanti per tutto il suo sviluppo.

Come l'elicoide doppio, anche la vite continua può essere realizzata

Figura B.12 - Vite doppia.



Figura B.13 - Vite doppia.



Figura B.15 - Vite singola.



tramite l'unione di più elicoidi singoli, oppure mediante la calandratatura, conicizzata a vite, di una lamina continua stirata a freddo.

Vedi tabella caratteristiche viti utilizzate a pag. 46.

B 2.3.3 - La puntazza

L'elemento che aiuta il palo a penetrare il terreno, divaricandolo sotto la forza impressa dalla macchina operatrice pianta pali, è la puntazza: elemento a geometria triangolare o a W realizzato in acciaio ad alta resistenza per poter meglio penetrare i terreni da palificare.

Il terreno rimosso dalla puntazza, nella fase di infissione del palo, viene spostato radialmente, quindi, compattato lungo il fusto tubolare, rimanendo compresso lungo tutta la verticale così da aumentare significativamente l'adesione della

terra all'acciaio del fusto.

Questo fattore, a favore della capacità portante, che di fatto agisce come una morsa circolare attorno al fusto, tende ad aumentare la sua stretta di circa il 15% rispetto al suo valore iniziale, nello spazio di soli pochi giorni.

B 2.4 - LE GIUNZIONI

Gli elementi che consentono di allungare un palotirante in cantiere sono tra loro collegati mediante bullonatura. I bulloni passanti il fusto del palotirante sono costituiti da viti e dadi di acciaio ad alta resistenza, che consentono di scaricare la forza torsionale praticata con l'avvitatore sulle mezze lune dei fori passanti.

Geopalitalia ha verificato, per ogni modello, la tenuta delle giunzioni al massimo sforzo praticabile prima di raggiungere la rottura per torsione del palo.

Figura B.16 - Vite continua.



Figura B.17 - Vite continua.



Figura B.18 - Puntazza.



Figura B.19 - Giunzioni.



Figura B.20 - Giunzioni.



B 2.4.1 - I nippoli di giunzione

Come accennato precedentemente, i nippoli, che consentono la giunzione in cantiere degli elementi che costituiscono il palo, vengono saldati al fusto mediante chiodature ortogonali tra loro.

L'area delle chiodature è sempre superiore a quella della corona circolare della sezione del tubo con cui viene realizzato il fusto e il nippolo, così da garantire lo sforzo torsionale in sicurezza.

La tabella a pag. 46 riporta i valori di momento torcente massimo nei quali sono stati verificati i fusti e i nippoli di giunzione dei modelli di palotiranti e prolunghe Geopal®.

B 2.5 - SALDATURE

Una particolare attenzione va posta alle saldature.

Il procedimento di saldatura utilizzato da Geopalitalia è quello della saldatura ad arco semiautomatica o a filo conduttore sotto gas protettore (MAG).

Le saldature devono essere eseguite a regola d'arte, avendo cura di tenere l'arco il più corto possibile e di regolare l'inclinazione della torcia e la velocità di avanzamento in funzione della tipologia di giunto ed elettrodo.

Tutte le operazioni di saldatura sono eseguite in officina e in condizioni ambientali termo-igrometriche idonee.

Questi tipi di lavorazione sono eseguite da saldatori qualificati secondo la norma UNI EN 287-1:2004. Il costruttore dei prodotti Geopalitalia è certificato a norma UNI EN ISO 3834:2006.

Un esame visivo al termine del processo di saldatura permette di

Figura B.22 - Particolare di giunzione standard dei pali Geopal®.

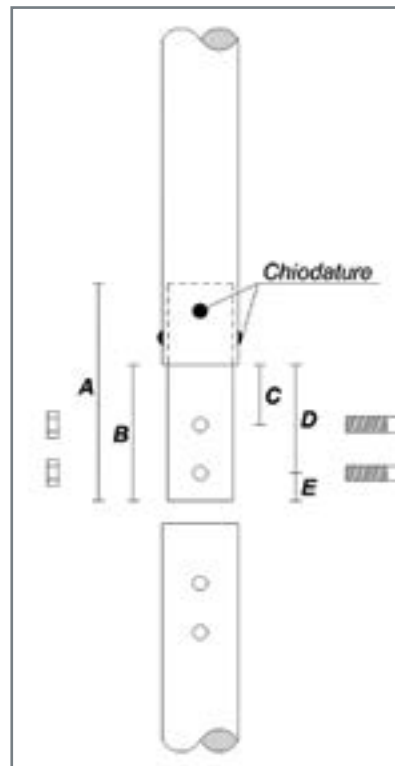


Figura B.21 - Particolare dei nippoli standard dei pali Geopal®.

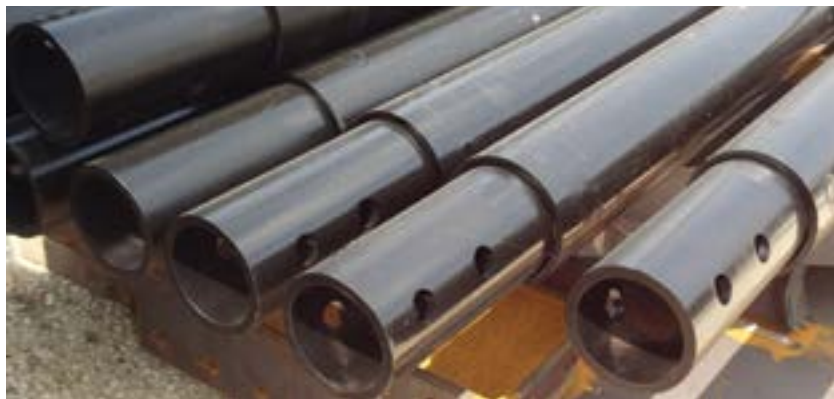
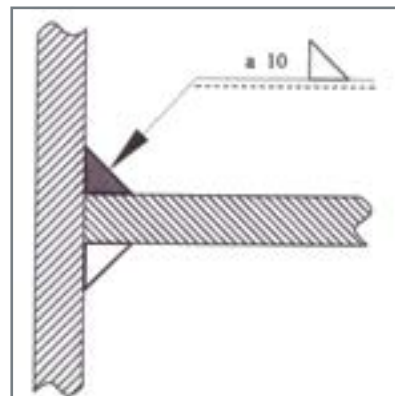


Figura B.23

Figura B.24

Figura B.25



riscontrare eventuali difetti esterni mentre eventuali difetti interni dovuti a discontinuità metalliche e disomogeneità metallurgiche, se presenti, si manifestano sicuramente durante l'infissione del palo che, grazie ai notevoli sforzi applicati in fase di messa in opera, manifesterà subito i difetti strutturali eventualmente presenti.

B 2.6 - BULLONI DI FISSAGGIO

Come accennato, le unioni bullonate sono utilizzate per collegare tra di loro le prolunghe, ma anche per fissare eventualmente gli elicoidi da montaggio manuale, che si posizionano lungo il fusto del palo. Data la geometria del palo e le sollecitazioni cui è soggetto, i bulloni sono sottoposti solitamente solo a taglio.

La normativa 898-1/2013 inerente alle viterie ha subito delle importanti variazioni: per quanto riguarda la materia prima non è più sufficiente utilizzare un C45 o C48 bonificato ma occorre un 42CrMo-4bon con la tempra a cuore. Il suddetto materiale deve inoltre rispettare i canoni di resilienza a $-20^{\circ} + 27^{\circ}$.

Noi ci siamo adeguati ed il nostro prodotto è conforme al 100%, tanto più che rientra anche nella EN 1090.

Generalmente Geopalitalia utilizza

bulloni di diametro $\varnothing 14$ (per i pali di diametro 48,3 - 60,3 - 76,1 mm) e bulloni di diametro $\varnothing 27$ (per i pali di diametro 88,9 - 114,3 - 139,7 - 168,3 - 219,1 mm).

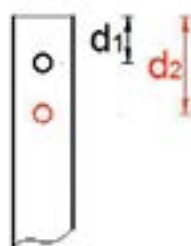
B 2.7 - I FORI DI FISSAGGIO

All'estremità di ogni palo e di ogni prolunga a questo collegata vengono eseguiti uno o due fori passanti, di diametro e a distanza tale da consentirne l'infissione e, quindi, la funzione di palotirante (compressione - trazione).

È chiaro che, di volta in volta, il progettista, nel verificare la tenuta a trazione di un palotirante, dovrà verificare non solo il carico massimo sopportato dagli elicoidi ma anche quello agente nei fori di fissaggio degli elementi, essendo questi un punto debole della struttura. In ogni caso Geopalitalia garantisce la tenuta delle parti deboli, in quanto aventi resistenza superiore al limite di snervamento della sezione tubolare del fusto.

La posizione dei fori per le unioni bullonate o chiodate rispetta le limitazioni previste nella Tab. 4.2.XVIII delle NTC 2018 e gli stessi fori hanno un diametro maggiorato al massimo di 1 mm per bulloni sino a 20 mm di diametro e di 1,5 mm per bulloni diametro maggiore di 20 mm.

Tabella B.1 - Tabella dei valori caratteristici delle bullonature praticate per le giunzioni.



Diametro fusto (Φ_f) [mm]	Distanza fori [mm]		Diametro fori [mm]	Diametro bulloni [mm]
	d1	d2		
48,3 - 60,3 - 76,1	60	120	15	14
88,9 - 114,3 - 139,7 - 168,3 - 219,1	110	200	28	27

B 3 - VERIFICHE STRUTTURALI SECONDO LE NTC 2018

Pur essendo realizzati a regola d'arte, nel rispetto di tutte le norme e da officine certificate come centri di trasformazione, occorre che i palotiranti Geopal® siano verificati anche dal progettista così come prescritto dalle NTC 2018. In particolare, la normativa prescrive le seguenti verifiche:

- verifica del fusto;
- sforzi assiali a compressione;
- sforzi assiali a trazione;
- instabilità all'equilibrio;
- verifica delle saldature;
- verifica dei bulloni e delle unioni bullonate;
- verifica a rifollamento dei fori di fissaggio.

Per uno studio più approfondito, si rimanda agli specifici paragrafi de-

dicati nelle Norme Tecniche per le Costruzioni 2018.

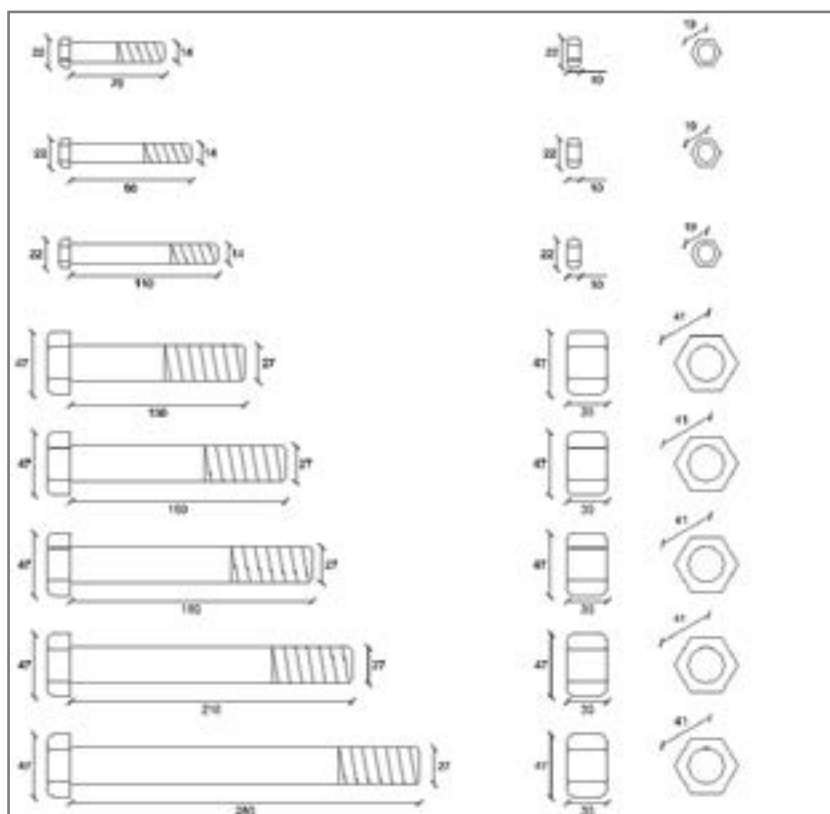
B 3.1 - VERIFICA CAPACITÀ PORTANTE MASSIMA DI UNA VITE TIPO

La resistenza meccanica di una vite dipende da diversi fattori come: la geometria (diametro, spessore, passo), la lavorazione (a caldo, a freddo o mista), la tipologia di acciaio etc. Al variare di uno di questi parametri si ottiene una configurazione differente. Potenzialmente, pertanto, si hanno infinite combinazioni diverse.

Lo scopo delle analisi svolte è stato quello di valutare la resistenza meccanica ultima del sistema fusto-vite al crescere del carico verticale applicato in corrispondenza dell'asse del fusto.

Sviluppando, per ciascuna configurazione del sistema, un modello tridimensionale rappresentativo

Figura B.26



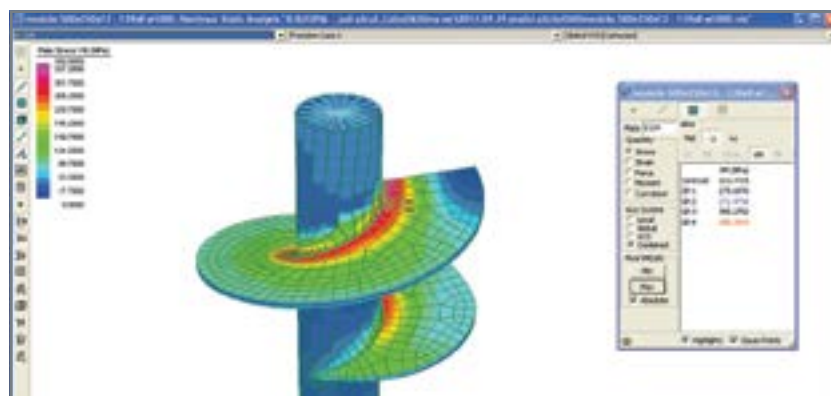


Figura B.28

della geometria e contenente al suo interno i parametri del terreno (modulo di Winkler) e del materiale (curva bilineare incrudente dell'acciaio) 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 fusto e successivamente incrementarlo.

Il carico esterno verticale (diretto dall'alto verso il basso) viene bilanciato dalla reazione del terreno in corrispondenza della superficie dell'elicoide a vite. La reazione del terreno inflette la vite 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 della vite al tubo (appena oltre la saldatura).

Al crescere del carico crescono sia la tensione che la deformazione (inflexione) della vite.

Nella "fase elastica" si ottengono limitati incrementi di deformazione a fronte di elevati incrementi del carico applicato.

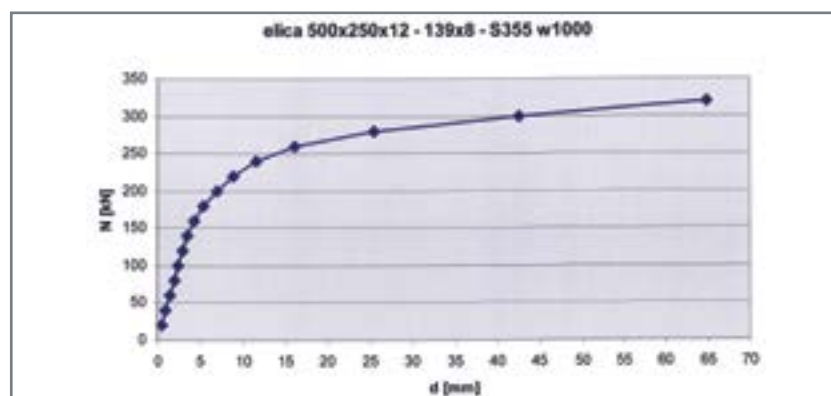
Questo comportamento prosegue fino al raggiungimento del "carico di primo snervamento" (355MPa nel caso di acciaio S355).

Oltre questo carico il materiale inizia a plasticizzarsi, nella "fase plastica", cioè può sopportare ulteriori incrementi di carico ma a fronte di deformazioni molto più importanti rispetto alla fase precedente.

Durante la fase plastica il carico esterno cresce pressoché linearmente fino 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 del-

Figura B.29



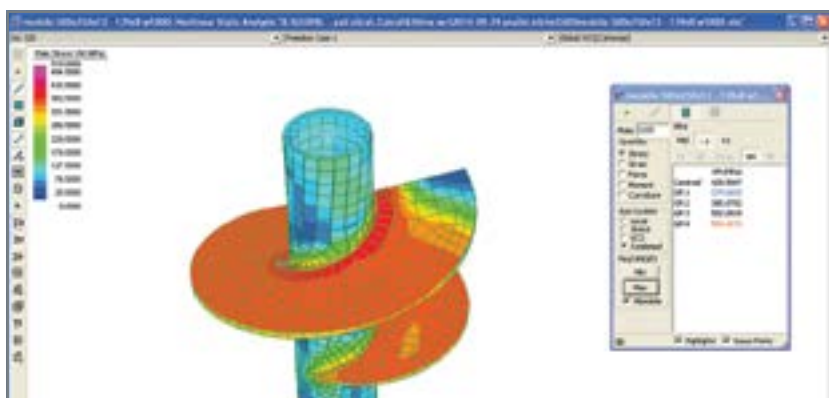


Figura B.30

la vite. In alcune configurazioni geometriche tuttavia si raggiunge in corrispondenza del fusto tubolare.

B 3.2 - CALCOLO RESISTENZA ULTIMA STRUTTURALE DEGLI ELICOIDI

Per il calcolo della resistenza ultima strutturale degli elicoidi (viti) si utilizza il metodo di "analisi globale elasto-plastica" (conformemente a quanto previsto al paragrafo 4.2.3.3 del D.M. 2018) e la capacità resistente viene valutata con il "metodo elasto-plastico" (conformemente a quanto previsto al paragrafo 4.2.3.2 del D.M. 2018).

L'analisi del problema viene fatta mediante un modello numerico FEM, con il quale è possibile svolgere un'analisi non lineare per ogni tipologia di materiale.

Per ciascun modello viene applicato un carico iniziale (nel caso di

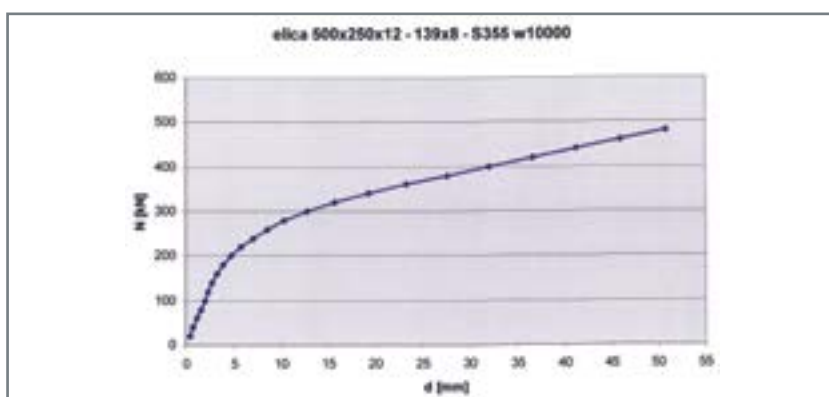
specie, pari a 10 kN) e successivamente viene svolta un'analisi statica, non lineare, in cui il carico iniziale viene via via amplificato mediante un fattore moltiplicativo. Ad ogni incremento di carico (step) il programma ricalcola lo stato tensionale della struttura.

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.

Per tale analisi è stato utilizzato il programma agli elementi finiti STRAUS 7.

È doveroso precisare che le analisi svolte riguardano solo il calcolo delle resistenze meccaniche delle viti. I diagrammi carico-deformazione ottenuti rappresentano la deformazione elasto-plastica della

Figura B.31



vite sottoposta a carico crescente e non rappresentano il diagramma di cedimento del sistema palo-terreno. Inoltre, le analisi svolte non riguardano la portanza geotecnica del palo né il calcolo del cedimento del sistema palo-terreno, che devono essere sempre di volta in volta calcolate in funzione alla stratigrafia del sito di installazione.

B 3.3 - CONSIDERAZIONI IN MERITO ALLE VERIFICHE SECONDO IL D.M. 2018

Le resistenze meccaniche determinate sono da intendersi come capacità resistenti ultime caratteristiche determinate secondo il "metodo elasto-plastico" (paragrafo 4.2.3.2 del D.M. 2018).

Per le verifiche agli stati limite ultimi, secondo il paragrafo 4.2.4.1.1 del D.M. 2018, le resistenze di progetto 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.

B 3.4 - VALUTAZIONE DELLE PORTATE STRUTTURALI PALO-ELICOIDE

B 3.4.1 - Inquadramento del problema

L'analisi svolta con il programma STRAUS 7 ha permesso di valutare la resistenza meccanica ultima di

un elicoide-vite, in differenti configurazioni palo-elicoide, al crescere del carico verticale applicato in corrispondenza all'asse del fusto.

Per ciascuna configurazione studiata, sono state fornite le curve carico applicato-deformazione vite con l'individuazione dei relativi valori del carico per il quale si verifica il primo snervamento e la rottura della vite (o, in alcuni casi, del fusto). Sulla base dei suddetti risultati, l'obiettivo del presente lavoro è di determinare le portate strutturali della vite agli SLE e agli SLU per ciascuna delle differenti configurazioni analizzate con modello numerico FEM.

B 3.4.2 - Normativa di riferimento

- D.M. 17/01/2018, "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;
- D.M. 14/01/2008;
- D.M. 14/09/2005;
- O.P.C.M. 20/03/2003 n. 3274;
- D.P.R. 06/06/1999 n. 380;
- C.M. 14/12/1999 n. 346/STC;
- C.M. 16/12/1999 n. 349/STC;
- D.P.R. 21.04.1993 n. 246;
- L. 02.02.1974 n. 64;
- L. 05.11.1971 n. 1086;
- UNI EN 1993 (Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture in acciaio).

B 3.4.3 - Descrizione metodo di calcolo

Per prima cosa i risultati ottenuti dalla precedente analisi FEM, per ciascuna configurazione palo-elicoide, sono stati divisi per il coefficiente γ_M da normativa (1.05).

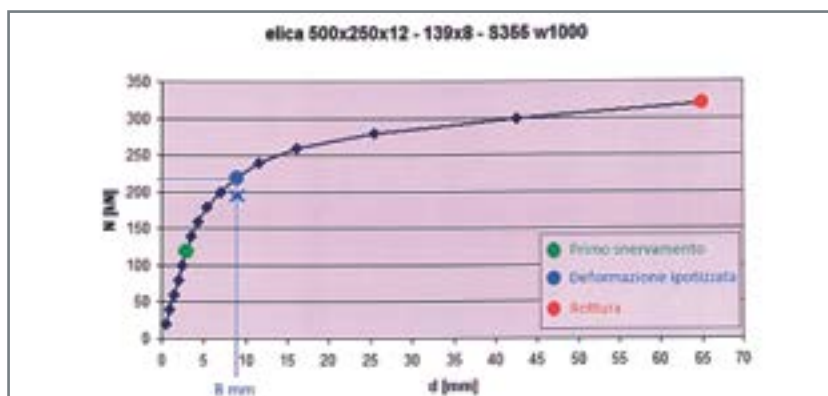


Figura B.32 - Diagramma deformazione acciaio; limitazione deformazione elica per modulo di Winkler 1000 t/m³.

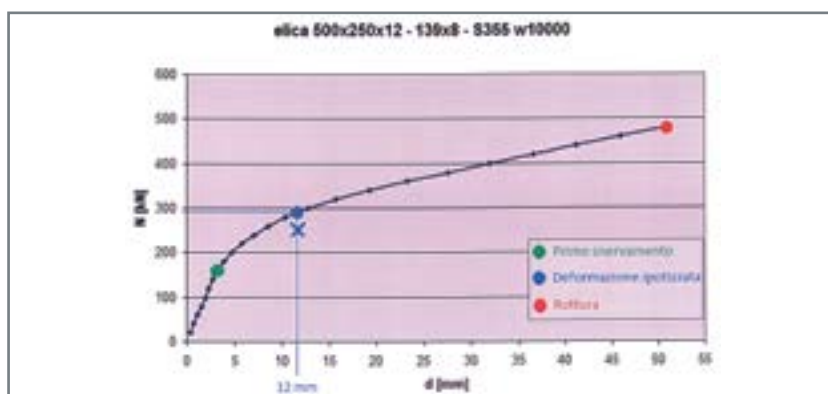
Successivamente, poiché lo studio delle resistenze meccaniche è stato svolto per modulo di Winkler pari a 1000 t/m³ e 10000 t/m³, è stata svolta un'interpolazione lineare dei risultati ottenuti (curva carico applicato-deformazione elica), così da consentire di estendere i carichi strutturali agli SLE e agli SLU, per valori del modulo di Winkler compresi tra 500 e 10000 t/m³.

A questo punto, per proseguire l'analisi, è stata fatta l'ipotesi, opportunamente ragionata e giustificata dal voler limitare i cedimenti complessivi (originati dal terreno e dall'acciaio) del sistema palo-terreno, di limitare le deformazioni agli estremi dell'elica a 8 mm per Winkler 1000 t/m³ e 12 mm per Winkler 10000 t/m³ (fatta eccezione per i diametri dei pali 48,3; 60,3; 76,1 e 88,9 mm per i quali si è ipotizzata una deformazione massima

di 7,5 mm per entrambi i valori del modulo di Winkler) ottenendo i valori del carico strutturale agli SLU (valore "x" riportato nell'esempio delle figure B.32 e B.33) con deformazione elica compresa tra 8 e 12 mm. Successivamente sono stati individuati i tipi di terreno ed i relativi valori di R_p , corrispondenti ai vari moduli di Winkler. Inoltre, per ciascuna configurazione palo-elicoide, è stata calcolata la portata geotecnica relativa al solo elicoide. Fatto ciò, sono stati riportati i valori del carico strutturale agli SLE e agli SLU per il corrispondente tipo di terreno (o modulo di Winkler).

Infine, i carichi strutturali ottenuti dai calcoli precedentemente svolti sono stati analizzati in modo tale da determinare la portata strutturale del singolo elicoide in relazione al tipo di terreno. In pratica è stata svolta un'analisi delle portate in

Figura B.33 - Diagramma deformazione acciaio; limitazione deformazione elica per modulo di Winkler 10000 t/m³.



modo tale da attribuire all'elicoide la portata minima tra quella geotecnica offerta dal terreno e quella strutturale offerta dall'elicoide stesso.

Esempio tabella riassuntiva portate strutturali

La tabella di seguito riportata ha la finalità di fornire, per ciascuna

Figura B.34

Palotirante $\Phi 139.7$ - Elicoide $\Phi 500.200$ (ACCIAIO S355)

Il progettista DEVE verificare, una volta stabiliti gli elicoidi ed il diametro del tubo da adottare, la stabilità del tubo a compressione ed instabilità.

ELICOIDI IN ACCIAIO S355

- Qp** = portata geotecnica della fusto tubolare alla base.
Q1 = carico limite massimo DI OGNI ELICOIDE per capacità portante del terreno e campo elastico dell'elicoide
Q2 = carico limite massimo DI OGNI ELICOIDE per capacità portante del terreno e rottura dell'elicoide (Secondo calcoli FEM)
Q3 = carico limite massimo DI OGNI ELICOIDE. (Valore SLE x 1.5) - (Nel rispetto delle NTC 2008)
nr = per tale tipologia di terreno, il carico a rottura dell'elicoide non è teoricamente raggiungibile

FUSTO	diámetro	
	139,7	
ELICOIDE	diámetro	passo
	500	200

		Acciaio S355			Q3 (t) (SLE) Coefficientato	
	Rp (kg/cm ²)	PORTATA DI PUNTA FUSTO	PORTATA ELICOIDE			
		Qp (t)	Q1 (t) (SLE)	Q2 (t) (SLE) Reale		
argille	1,0	0,09	1,1	nr	1,6	
	2,0	0,18	2,1	nr	3,2	
	4,0	0,36	4,3	nr	6,4	
	6,0	0,54	6,4	nr	9,6	
	8,0	0,72	8,5	nr	12,8	
	10,0	0,90	10,6	nr	16,0	
limi sabbiosi	12,0	1,08	11,4	12,8	17,1	
	14,0	1,26	11,4	14,9	17,1	
	16,0	1,44	11,4	17,0	17,1	
	18,0	1,62	11,4	19,1	17,1	
	20,0	1,80	11,4	19,9	17,1	
	22,0	1,98	11,4	19,9	17,1	
	24,0	2,16	11,4	20,7	17,1	
	26,0	2,34	11,4	20,7	17,1	
	28,0	2,52	11,4	20,7	17,1	
	30,0	2,70	11,4	21,6	17,1	
sabbie limose	35,0	3,15	11,4	21,6	17,1	
	40,0	3,60	11,4	21,6	17,1	
sabbie limo argillose	45,0	4,05	11,4	22,4	17,1	
	50,0	4,50	11,4	22,4	17,1	
	55,0	4,95	11,4	22,4	17,1	
	60,0	5,40	11,4	23,3	17,1	
sabbie	65,0	5,85	11,4	23,3	17,1	
	70,0	6,30	11,4	25,0	17,1	
	75,0	6,75	11,4	26,7	17,1	
	80,0	7,20	11,4	26,7	17,1	
sabbie ghiaiose	85,0	7,65	11,4	26,7	17,1	
	90,0	8,11	11,4	26,7	17,1	

Winkler 1000 [t/m²] 30,5

Portata strutturale elicoidale a rottura

Winkler 10000 [t/m²] 45,7

Portata strutturale elicoidale a rottura

N.B. I valori riportati in tabella sono riferiti ad elementi elicoidali ad 1 giro (360°).

configurazione palo-elica e in funzione del tipo di terreno (o R_p) in cui va ad ammortarsi l'elica, la portata strutturale agli SLE e agli SLU dell'elica oggetto di studio.

Nella Figura B.34 sono riportate la portata geotecnica di punta del fusto (Q_p) e le portate strutturali dell'elicoide-vite agli SLE (Q_1) e agli SLU (Q_2) ottenuti dai passaggi precedentemente descritti.

B 3.4.4 - Portata geotecnica di punta del fusto

La portata Q_p è stata calcolata moltiplicando l'area di base del fusto del palo per R_p .

Il risultato è stato poi diviso per i coefficienti $\xi_3=1.48$, relativo al numero di verticali indagate (in questo caso 3), e $\gamma_p=1.15$, coefficiente da applicare alle resistenze caratteristiche (in questo caso coefficiente R_3) in conformità a quanto prescritto dalle NTC 2018.

B 3.4.5 - Portata strutturale della vite-elicoide

La portata Q_1 è stata calcolata utilizzando, al variare del modulo di Winkler, i valori dei carichi corrispondenti al primo snervamento dell'elicoide.

La portata Q_2 , invece, è stata calcolata utilizzando, al variare del modulo di Winkler, i carichi corrispondenti alle deformazioni dell'elicoide ipotizzate in fase di analisi (come precedentemente spiegato).

Interpretando i risultati si evince che nella parte evidenziata in giallo il terreno non è in grado di far raggiungere il carico a rottura della vite; nella parte evidenziata in arancio si riporta la portata geotecnica che il terreno è in grado

di fornire, la quale, però, non è in grado di raggiungere il carico a rottura della vite; nella parte evidenziata in rosso si riporta la portata strutturale della vite (il terreno è in grado di garantire una portata geotecnica maggiore, ma non lo consente la vite stessa poiché per carichi maggiori non sarebbe rispettato il limite di deformazione ipotizzato in precedenza).

L'ultimo valore riportato nella colonna Q_2 rappresenta il carico a cui corrisponde una deformazione (elasto-plastica) dell'elicoide di 12 mm, oltre il quale è possibile ottenere portate strutturali maggiori, ma con la conseguenza di deformazioni maggiori.

Per determinare la portata strutturale della vite di punta, è sufficiente sommare $Q_p + Q_1$ (nel caso degli SLE) oppure $Q_p + Q_2$ (nel caso degli SLU).

N.B. Per ottenere le portate strutturali "reali" delle eliche agli SLU, occorre moltiplicare il valore ottenuto agli SLE per 1,5.

Pressoché lo stesso risultato può essere ottenuto dividendo il valore ottenuto agli SLU per 1,5.

Esempio determinazione portata strutturale elicoide

Portata richiesta palo:

SLE $\rightarrow$ 30 t SLU $\rightarrow$ 45 t

R_p medio terreno: 35 kg/cm²

Palotirante scelto: Φ 139,7 mm con viti di Φ 500.200 mm

Calcolo portate

A seguito di quanto precedentemente detto, per ottenere la portata strutturale del singolo elicoide agli SLU (secondo normativa), non bisogna considerare il valore riportato nella colonna Q_2 in tabella (SLU reale da analisi FEM), bensì moltiplicare il valore agli SLE cor-

rispondente, ad esempio con R_p di 35 kg/cm^2 , e cioè 11.4 t , per 1.5 ottenendo 17.1 t .

Per garantire le portate richieste, si dovranno prevedere 3 elicoidi, opportunamente distanziati lungo il fusto del palo. Con questa configurazione, le portate offerte dal palo sono:

$$\text{SLE} \rightarrow Q_{\text{SLE}} = Q_p + Q_1 = 3,15 + (3 \cdot 11,4) = 37,35 \text{ t} > 30 \text{ t}$$

$$\text{SLU} \rightarrow Q_{\text{SLU}} = Q_p + Q_3 = 3,15 + (3 \cdot 17,1) = 54,45 \text{ t} > 45 \text{ t}$$

B 4 - GEOTECNICA DEL PALOTIRANTE Geopal®

Il palotirante che viene avvitato nel terreno attraversa strati di varia natura e consistenza dalle diverse caratteristiche geo-meccaniche. Ne consegue un diverso comportamento e una diversa capacità portante a seconda di dove ricadano la punta o le viti intermedie.

Nella maggior parte dei casi, risulta che lo studio geotecnico dell'area si basa sui risultati di prove CPTU (CPT, SPT, ecc.) da cui si rilevano i dati diretti della resistenza alla punta R_p , la resistenza laterale R_L , il loro rapporto ' R_p/R_L ' (il quale permette di individuare il tipo di terreno) e la pressione neutra dell'acqua ' u '.

In assenza di prove di laboratorio, dalle prove penetrometriche è possibile ricavare alcuni parametri geotecnici (γ_{sat} , ϕ , c_u etc.) appoggiandosi a diversi studi teorici e correlazioni empiriche. Senza entrare in merito all'attendibilità dell'individuazione dei parametri geotecnici, si suggerisce di utilizzare, per quanto possibile, i valori ricavati direttamente in situ (R_p , R_L , u), con strumentazioni oggi giorno

attendibili, consentendo di limitare all'opportuno i coefficienti di sicurezza.

Sarà sempre e comunque compito del progettista scegliere i valori dei parametri e anche le teorie che cercano di descriverli, nella maniera più adatta al caso in esame, anche secondo propria esperienza.

Non si vuole qui ora esporre una trattazione generalista della parametrizzazione geotecnica dei terreni (che si affronterà più nel dettaglio negli esempi di calcolo), ma si andrà ad analizzare la materia geotecnica che si incontra nell'utilizzo dei palotiranti Geopal®.

Il terreno tende naturalmente a disporsi in livelli e strati di vario spessore, ognuno con i suoi punti di forza e di debolezza.

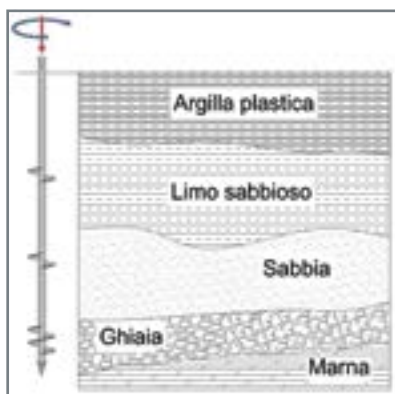
La Figura B.35 illustra il concetto di stratificazione.

Quando il palo viene avvitato nel terreno, passa attraverso strati di varia consistenza. Poiché ogni strato ha caratteristiche differenti, saranno osservati valori diversi di resistenza e di torsione mentre il palo attraversa ogni strato che incontra nella verticale.

Allo scopo Geopalitalia sta sviluppando e testando nuove strumentazioni atte a misurare, durante la fase di infissione, la resistenza che oppone il terreno alla penetrazione del palo e quindi, attraverso opportune formule e tabelle comparative, la capacità portante dello stesso, consentendo all'operatore di conoscere subito il valore senza eseguire le classiche prove di carico a fine lavori.

Tale strumentazione, però, richiede frequenti tarature così da consentire lo svolgimento di misure con una tolleranza massima del

Figura B.35



2%. Resta comunque sempre valida la prova di carico eseguita con martinetto idraulico, comparatori centesimali e contrasti, che però richiede più tempo e maggiori costi di realizzazione.

La capacità portante geotecnica di un palo è sempre dovuta alla natura e consistenza del terreno circostante, poiché la forza di carico viene trasmessa in esso.

I terreni coesivi e non coesivi hanno reazioni differenti quando sono soggetti a forze sollecitanti. Le particelle di sabbia nei terreni incoerenti agiscono tendenzialmente indipendentemente le une dalle altre, a causa della bassa coesione che le lega.

Questa qualità dà a tali terreni molte caratteristiche simili ai fluidi viscosi. I terreni coerenti generalmente tendono a comprimersi quando sottoposti a pressione, mentre i terreni fini consolidati hanno caratteristiche più rigide di quelli sciolti.

Per esempio, le argille dure tendono ad avere un comportamento più vicino alla roccia, rimanendo increspate e inflessibili fino alla rottura; le argille molli, invece, hanno caratteristiche più flessibili, rimodellandosi sotto sollecitazione per plasticizzazione.

Si ritiene utile sottolineare che, nel caso il palo lavori a trazione, la forza di tiro verso l'alto tende ad estrarlo sbulbando l'ancoraggio dalla sua posizione. Nei terreni saturi d'acqua o comunque abbastanza umidi si forma una forza di adesione che contribuisce a compensare la trazione.

La presenza dell'acqua nel terreno esercita una pressione interstiziale nel terreno circostante e, quindi, al di sotto della vite, si forma un'area

depressa a causa dell'effetto ventosa. Questo causa aspirazione, con conseguente risucchio verso il basso della vite.

Questo fenomeno si verifica maggiormente nelle argille, poiché il terreno è incapace di riempire il vuoto (Figura B.36).

Durante l'infissione, l'avanzamento del palotirante comprime il terreno posto ai lati, aumentando così la capacità di aderenza del palo stesso. La forza di attrito palo/terreno si oppone alla forza applicata e incrementa quindi la capacità portante del palo.

La pressione del terreno spostato aiuta anche a ricompattare il terreno che può essere stato disturbato durante il processo d'infissione.

Si precisa che i palotiranti prodotti da GeopalItalia hanno le viti posizionate sul fusto e distanziate in modo tale da consentire il verificarsi di un unico solco di passaggio della vite nel terreno, così da non smuovere significativamente i terreni attraversati.

In particolar modo, sui terreni coesivi, il taglio a spirale prodotto dalla prima vite rimane unico anche al passaggio di altre viti successive. In ogni caso non si genera alcun rimaneggiamento del terreno tale da produrre in seguito dell'attrito negativo sul fusto, dovuto al riassetamento dello strato.

B 5 - PROGETTAZIONE DELLA FONDAZIONE

Le fondazioni profonde hanno l'obiettivo di trasmettere in profondità i carichi della struttura, nei casi in cui le fondazioni superficiali risultino inadatte, poiché poggianti su terreni cedevoli.

Le fondazioni su pali hanno il note-

Figura B.36 - Effetto "ventosa" prodotto dall'elicoide di fondo soggetto a trazione.

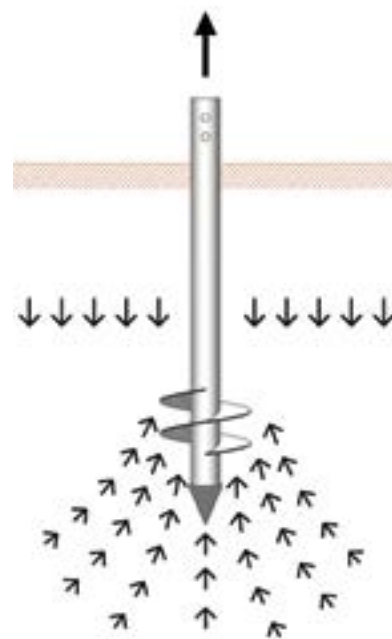
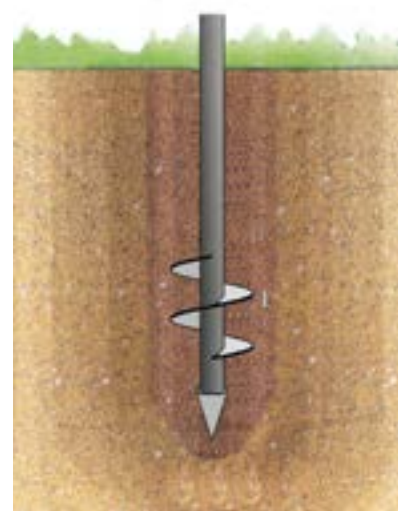


Figura B.37 - Costipamento laterale del terreno.



vole vantaggio di ridurre al minimo i cedimenti: nel caso dei palotiranti a vite Geopal®, i cedimenti si riducono al minimo, funzione assolta dall'inserimento di un numero maggiore di viti progettate con criterio.

Prendendo come esempio il caso di una semplice fondazione (Figura B.40) i pali fondazionali dovranno essere dimensionati per sostenere i carichi incombenti e il valore dovrà essere ricavato seguendo le NTC 2018 come si approfondirà nel capitolo successivo.

Il numero e la dimensione degli elementi elicoidali necessari dipendono, ovviamente, sia dal carico che dovranno sostenere sia dalle condizioni geologiche e geotecniche del sottosuolo. Normalmente queste vengono ricavate, come precedentemente detto, mediante indagini geognostiche puntuali che ne illustrano le caratteristiche.

Come si esporrà nel capitolo successivo, il calcolo della capacità portante sarà svolto con metodi basati su dati di ingegneria geotecnica affidabili per il particolare sito. Mediante il loro utilizzo, l'ingegnere geotecnico individuerà la tipologia di palo a vite più adatta (P2G-PVD-PVC) e ne andrà a determinare le dimensioni che garanti-

ranno le portate di progetto.

Dopo aver messo in opera i pali fondazionali, il D.L. dovrà assicurarsi che i ferri d'armo previsti nello zoccolo fondazionale siano disposti in modo tale da garantire il pieno coinvolgimento delle teste, così da evitare sia effetti di punzonamento che possibili mobilitazioni laterali. Il riempimento con cls della parte tubolare cava del palotirante consentirà non solo un miglior collegamento dei pali allo zoccolo ma anche una migliore distribuzione delle tensioni indotte, da dissipare nel sottosuolo.

Trattandosi di un palo tutto d'acciaio che ben reagisce agli sforzi di taglio orizzontali, sarà sufficiente immerarlo sul dado di fondazione per 20÷40 cm a seconda dello spessore dello stesso.

In ogni caso, a meno di una piastra copritesta, forata, di ripartizione delle tensioni, da fissare sulla testa del palo, il bordo del fusto tubolare va opportunamente distanziato 15÷20 cm dalla parte superiore dello zoccolo, per evitare il c.d. effetto di punzonamento.

Le foto a fianco riportate mostrano degli esempi di collegamento delle teste dei palotiranti allo zoccolo di fondazione.

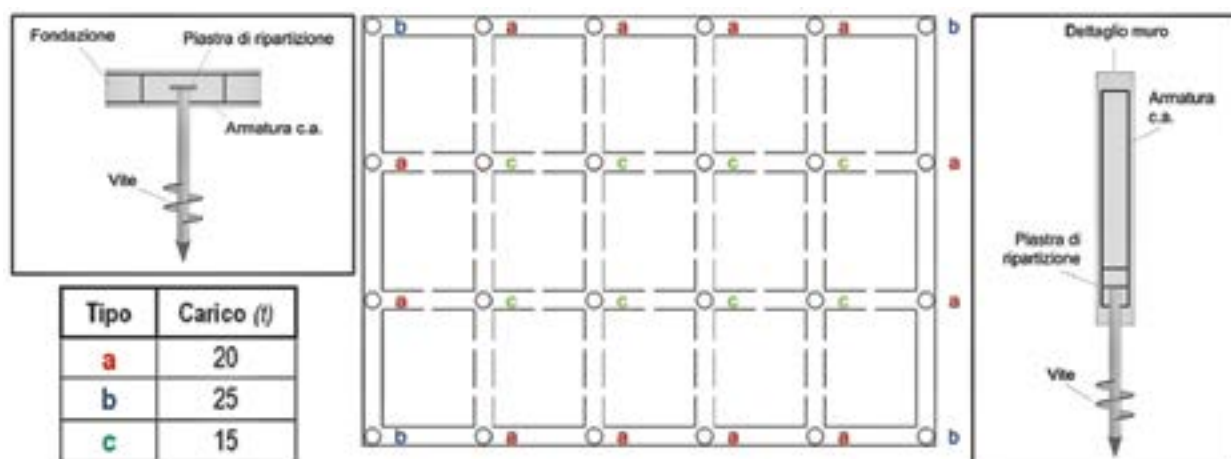


Figura B.38



Figura B.39

Figura B.40 - Progetto della fondazione.



B 5.1 - SCELTA DEL PALO A VITE Geopal® DA UTILIZZARE

La scelta del palo a vite più idoneo da impiegare per il caso di specie è di fondamentale importanza.

Essa dipende da:

1. caratteristiche geologiche del sottosuolo;
2. caratteristiche idrogeologiche del sottosuolo;
3. caratteristiche geotecniche del sottosuolo;
4. entità dei carichi, quindi delle tensioni indotte, da dissipare nel sottosuolo;
5. tipo di struttura in elevazione;
6. cedimenti massimi compatibili con la struttura in elevazione.

Nel caso dei pali Geopal® è possibile scegliere, sulla base del carico da sostenere e dissipare nel sottosuolo, la dimensione e il numero di viti da dislocare lungo il fusto. Tale numero dipende da:

1. stratigrafia del sottosuolo;
2. caratteristiche geotecniche ottenute dalle prove penetrometriche eseguite in situ.

Le figure sottostanti indicano come orientarsi nella scelta del palo a vite più idoneo, sulla base della situazione geologica e geotecnica del sottosuolo.

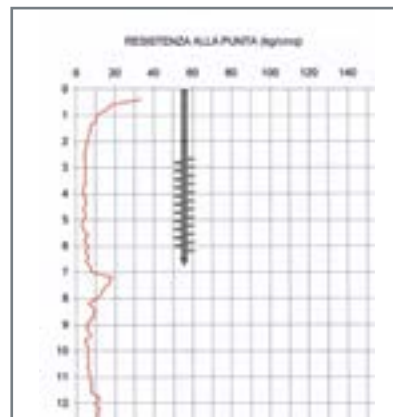
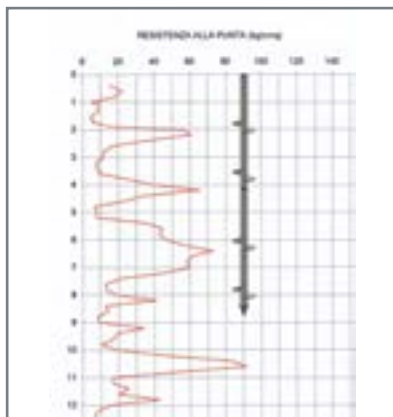
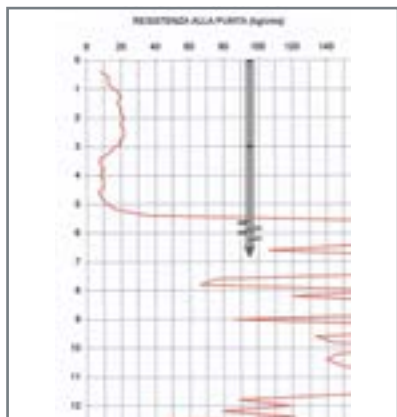
B 6 - PROTEZIONE DEI PALOTIRANTI A VITE

B 6.1 - TRATTAMENTI DI PROTEZIONE: GENERALITÀ

I materiali sono spesso richiesti sulla base dei requisiti meccanici e per il modo in cui devono essere impiegati. Tuttavia ciò non è sufficiente a rendere durevole l'opera, se non si ricorre a dei sistemi protettivi che ne impediscano la corrosione.

Si può intervenire innanzitutto

Tipologie di palo Geopal® in fase d'infissione: Figura B.41 - P2G, Figura B.42 - PVD, Figura B.43 - PVC.



scegliendo materiali adatti all'ambiente in cui andranno installati. Tale tipo di prevenzione è, in genere, il più costoso, sia per il tipo di materiale su cui ricadrebbe la scelta, sia per le analisi preliminari necessarie per conoscere perfettamente l'ambiente in cui va fatta la posa.

Un'alternativa è quella della passivazione. Essa consiste nel permettere l'ossidazione del metallo, affinché si crei uno strato di ossido uniforme ed aderente alla superficie: dopo la formazione di questo strato, l'ossidazione viene ad ostacolarsi ed il processo di corrosione prosegue a velocità pressoché nulla. Non tutti i metalli consentono questo tipo di trattamento; tra quelli che possono "passivarsi" citiamo: l'alluminio, lo zinco e il cromo. Il ferro, invece, non consente la passivazione, in quanto la ruggine non costituisce uno strato protettivo. Spesso il processo di passivazione viene velocizzato attraverso il processo di anodizzazione.

I metalli in grado di passivarsi vengono spesso utilizzati per ricoprire altri metalli che non posseggono questa proprietà. In tal caso, si raccomanda un corretto utilizzo dei materiali; il potenziale standard di riduzione dell'ossigeno del materiale utilizzato per il ricoprimento deve essere minore di quello del metallo che viene protetto.

L'isolamento del materiale può quindi essere realizzato con rivestimenti metallici, in resina sintetica, con vernici oppure con strati di ossidi protettivi.

La tecnica del rivestimento a metallo ricopre il prodotto con uno strato, di spessore variabile, di un metallo che resista all'ossidazione o che sia in grado di passivarsi. Il rivestimento può avvenire per placcatura, per deposito elettrolitico

(galvanostegia), per immersione in bagni di metalli fusi, per trattamenti a caldo con polveri metalliche. Rientrano in tale categoria la zincatura, la cromatura etc.

Alternativa è il rivestimento in resina sintetica, cui si ricorre per ricoprire manufatti di vario genere, di cemento, di pietra naturale, oltre che di metallo. La resina sintetica isola il prodotto dall'umidità atmosferica e da quella del terreno. L'applicazione può avvenire per impregnazione del materiale da proteggere; in genere vengono utilizzate resine epossidiche, acriliche o PVC.

Un'altra possibilità è offerta dalla verniciatura, che risulta essere la protezione più fruibile e di facile applicazione su prodotti di vario genere, siano essi metalli o non. La vernice, però, forma raramente uno strato compatto ed è invece più spesso dotata di micro pori. Se la superficie sottostante non è adeguatamente protetta, l'umidità e l'ossigeno riescono comunque a penetrare e provocare alterazioni, causando il distacco della vernice e quindi una crescente possibilità di corrosione.

Ad esempio, il ferro non protetto, in atmosfera non corrosiva, ha una velocità di corrosione stimata nell'ordine di $0,070 \text{ g/cm}^2$ per anno.

Se si ricopre il ferro con vernice porosa, l'attacco risulta dimezzato, ma comunque notevole.

È abitudine quindi utilizzare, in accoppiamento con la verniciatura, un primo strato di pigmento inibitore della corrosione; tale strato ha anche la funzione di assicurare la buona aderenza del film di vernice al supporto, di livellare eventuali irregolarità e di otturare i pori.

Un'ultima opportunità è la pro-

tezione catodica, la quale sfrutta a proprio vantaggio la corrosione galvanica. Si collegano infatti le strutture ad un blocco di metallo "sacrificale", il quale fungerà da anodo, corrodendosi, e rendendo catodica la struttura da proteggere. Tale metodo è utilizzato in genere per strutture metalliche molto grandi, per le quali è il metodo di protezione più affidabile.

La protezione dei pali metallici di fondazione si ottiene, generalmente, mediante rivestimenti metallici, zincatura o verniciatura.

Le protezioni dei pali, però, vanno considerate all'interno del mezzo che i pali stessi andranno ad attraversare. Se si tratta di materiale a pezzatura grossolana, le protezioni si possono scalfire per abrasione. Procedendo nell'infissione, il terreno "leviga" il palo stesso, rimuovendo il velo superiore dei rivestimenti più deformabili.

Va però considerato che, generalmente, in presenza di materiali a grana grossa (ghiaia) si fa ricorso a fondazioni superficiali piuttosto che a pali di fondazione. Eventualmente, nel caso in cui il palo poggiasse di punta su terreni non coesivi, è necessario assicurarsi che la punta non sia soggetta ad escursioni del livello della falda, il cui ossigeno disciolto in acqua, però, avrebbe un assai basso gra-

diente di corrosione, tale da aggredire l'integrità del metallo in modo poco significativo ai fini della vita nominale dell'opera stessa.

Nel caso in cui, invece, si infigga il palo in terreni coesivi (argilla), la collosità delle particelle consente di creare uno strato protettivo attorno alla struttura penetrante. Tale strato riduce la frizione del terreno sul fusto tanto da annullare, o quasi, l'abrasione, ricoprendo la vernice protettiva di cui può essere rivestito il metallo.

Grande affidabilità in questo campo hanno le vernici bituminose, le quali sono specificatamente progettate per la protezione tramite impermeabilizzazione delle strutture a contatto con il terreno o destinate all'interramento.

GeopalItalia privilegia due possibili sistemi di protezione, a seconda dell'aggressività dell'ambiente di posa e delle richieste che si valuteranno con criterio:

- la verniciatura con Rapid Primer. Vernice nera bituminosa in soluzione di solventi volatili, formulata con speciali bitumi modificati; viene impiegata come prodotto impermeabilizzante, quindi antiossidante e anticorrosivo a rapida essiccazione. La modalità di applicazione prevede un'accurata pulizia e preparazione del manufatto per poi

Figura B.44



Figura B.45



applicare la vernice con impianto a spruzzo semi automatico.

- Durata nel tempo: garantita per 10 anni;

Nella Figura B.45 sono raffigurati palotiranti Geopal® trattati con una mano di Rapid Primer anticorrosivo (10 anni).

Nella Figura B.44 è raffigurata la vite di un palotirante Geopal® P2G trattato con due mani di Rapid Primer anticorrosivo (20 anni).

- la zincatura a caldo. Eseguita come da Normativa EN ISO 1461. Il processo comprende l'immersione in zinco fuso tenuto mediamente alla temperatura di 455°C che andrà a ricoprire l'acciaio. Grazie al pretrattamento in un bagno di sali fusi di zinco-cloruro e ammonio-cloruro, l'acciaio si lega allo zinco conferendo resistenza alla corrosione superiore alla zincatura elettrolitica, garantita per 50 anni in ambiente aerobico e per oltre 100 anni in ambiente anaerobico, coincidenti con la vita nominale di un'opera.

Nelle figure sotto riportate sono raffigurati palotiranti trattati con zincatura a caldo (50-100 anni).

B 6.2 - LA CORROSIONE NEI PALI DI FONDAZIONE

“La corrosione è la trasformazione chimica esotermica (produzione

di energia) di un metallo o di una lega metallica in un composto covalente non reattivo come un ossido o un silicato che è spesso simile o addirittura identico alla forma minerale da cui sono stati estratti i metalli.”

Il terreno in cui sono immerse le opere di fondazione e le opere sotterranee è, in generale, un mezzo corrosivo solido, a struttura porosa, nel quale sono presenti sia acqua che ossigeno.

I terreni in cui prevale la presenza di particelle grossolane e quelli sabbiosi possiedono elevata capacità di drenaggio e quindi un basso grado di ritenzione dell'acqua, caratteristica che però favorisce le escursioni di falda. I terreni a grana fine, come limi e soprattutto argille, tendono a trattenere l'acqua all'interno dei loro pori.

È fondamentale, quindi, che il problema della corrosione venga affrontato già in fase di progetto per tutte le fondazioni metalliche. La protezione per i pali metallici va stabilita in accordo con le caratteristiche del suolo. Alcuni terreni risultano particolarmente aggressivi, per la presenza di sostanze naturali, per l'alternarsi di strati umidi e secchi (o falda che si alza e si abbassa), per la contaminazione da prodotti chimici.

Un termine comune frequente-

Figura B.46



Figura B.47



4Fe	+	3O ₂	+	4H ₂ O	+	8H ⁺	-	2(Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O)	+	2H ₂ O	+	8H ⁺
ferro	+	ossigeno	+	acqua	+	acido	-	ematite idrata	+	acqua	+	acido

Tabella B.2

mente utilizzato per indicare la corrosione di ferro e acciaio è “ruggine”. La composizione della ruggine dipende dalla densità e dal tipo di altri composti chimici presenti durante la corrosione. La composizione elettrochimica della soluzione acquosa controlla, quasi sempre, il tasso di corrosione e la composizione della ruggine.

Nella Tabella B.2 si riporta un esempio della reazione chimica netta relativa alla corrosione di ferro e acciaio in presenza di acqua acida con abbondante ossigeno disciolto. L’ematite idrata è il minerale bruno-rosso più spesso indicato come ruggine.

Nonostante tutti gli ioni idrogeno e parte dell’acqua siano mantenuti in entrambi i lati della reazione netta, queste sostanze chimiche sono facilitatori significativi della reazione di corrosione mostrata. Il ferro è reso più reattivo chimicamente dagli ioni idrogeno che rimuovono gli elettroni. Maggiori densità di ioni idrogeno (pH più basso) possono causare velocità di corrosione maggiori. L’acqua conduce il flusso di ioni e aiuta l’ossidazione del ferro. Difatti, la velocità di corrosione è insignificante in assenza d’acqua.

La velocità di corrosione dei pali a vite è solitamente determinata dalle seguenti caratteristiche chimico-fisiche del terreno:

1. acidità (pH);
2. contenuto di umidità;
3. quantità di ossigeno disciolto e libero;
4. conducibilità idraulica;

5. presenza di sali disciolti;
6. velocità di diffusione dell’ossigeno.

Come regola generale, i terreni con elevato contenuto di umidità, con ampia disponibilità di ossigeno disciolto e con un notevole contenuto di sali e spiccata acidità sono i più corrosivi. Generalmente però in natura, oltre il metro di profondità, l’ambiente è anaerobico, quindi a bassa capacità ossidativa.

Una funzione di contenuto di umidità, contenuto di sali, densità e tipo di terreno chiamata resistività è un parametro facilmente misurabile, spesso utilizzato per valutare la corrosività del terreno (vedi Tabella B.3).

Ramanoff (1989) ha condotto uno studio utilizzando la perdita in peso di acciaio e zinco per fornire una stima campione della vita dei pali a vite in funzione della resistività del terreno. I risultati sono mostrati in Figura B.48.

In questo studio di Ramanoff, la vita stimata dei pali a vite è stata considerata pari al tempo in cui l’intero rivestimento di zinco e il 5% dello spessore di acciaio della vite sono persi per corrosione.

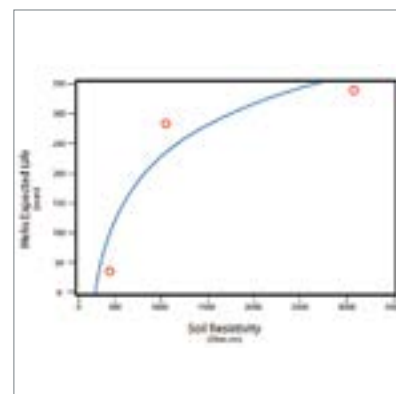
Non esiste un metodo semplice per misurare i parametri del terreno e determinarne la corrosività. Comunque, valori bassi di resistività del terreno indicano aree di potenziale elevata corrosività, che meritano ulteriori indagini.

Vari tipi di acciaio, ghisa e zinco corrodono essenzialmente con lo stesso tasso, in quasi tutti i tipi di terreno.

Tabella B.3 - Tabella sulla classificazione di corrosività del terreno.

Classe di corrosività	Resistività [Ω-cm]
Molto Bassa	> 10000
Bassa	da 5000 a 10000
Moderata	da 2000 a 5000
Alta	da 1000 a 2000
Molto Alta	< 1000

Figura B.48 - Durata prevista dell’elica.



A causa di ciò, alcuni ingegneri erroneamente credono che la zincatura dei pali a vite non sia importante. Con una conoscenza più ampia della funzione del rivestimento di zinco e della corrosione, si dimostra che il rivestimento di zinco non è solo importante ma anche necessario.

È proprio l'accoppiamento a caldo dello zinco con l'acciaio che rende passiva l'azione ossidante, essendosi creata, di fatto, una lega fra i due metalli. Similmente risulta efficace proteggere i pali con della vernice nera bituminosa anticorrosiva che, stesa in più strati, isola l'acciaio da eventuali agenti aggressivi. A titolo esemplificativo riportiamo di seguito alcuni dati riferiti dalla bibliografia specialistica sui valori di corrosione su acciaio nudo e acciaio zincato.

AASHTO (2004) - Per terreni moderatamente aggressivi

- Perdita zincatura
 - = 15µm/anno per i primi due anni
 - = 4 µm/anno per gli anni successivi
- Perdita di acciaio al carbonio
 - = 12 µm/anno dopo l'esaurimento dello zinco

PERKO (2004)

- Acciaio nudo

Valori della corrosione	
Forte (<2000 Ω cm)	= 0,071 mm/anno
Moderata-Alta (2000-30000 Ω cm)	= 0,033 mm/anno
Bassa (>30000 Ω cm)	= 0,008 mm/anno

Tabella B.4

- Acciaio zincato

Valori della corrosione	
Forte (<2000 Ω cm)	= 0,028 mm/anno
Moderata-Alta (2000-30000 Ω cm)	= 0,013 mm/anno
Bassa (>30000 Ω cm)	= 0,003 mm/anno

Tabella B.5

La pellicola di zinco ostacolerà la corrosione delle aree nude fino a una larghezza di circa 0.005 mm (Industrial Galvanizers America, Inc., 1999).

Inoltre, il rivestimento in zinco:

- protegge le superfici in ferro e in acciaio sia all'interno che all'esterno;
- è più duro di qualsiasi vernice;
- è legato chimicamente e normalmente non si spella né si sfalda mai;
- è immune ai danni da radiazioni ultraviolette.

È necessario che gli ingegneri indichino rivestimenti con zincatura a caldo invece che con zincatura a freddo. I rivestimenti con zincatura a caldo sono spessi da 80 a 100 micron, moderatamente flessibili e producono una lega zinco-ferro più dura dell'acciaio. I rivestimenti con zincatura a freddo (o elettrolitica) sono di solito spessi 12-25 micron, estremamente flessibili e più morbidi dell'acciaio (Industrial Galvanizers America, Inc., 1999).

Nel sottosuolo, inoltre, può esserci la presenza di correnti elettriche, di

natura continua o alternata, che possono avere origine, ad esempio, da impianti ferroviari o tranviari, da messe a terra etc. La corrente dispersa può investire le strutture metalliche interrate. Le superfici metalliche in cui la corrente circola dal terreno verso il metallo risultano in parte o completamente protette, viceversa in quelle dove la corrente circola dal metallo verso l'ambiente i processi di corrosione risultano accelerati.

È importante ricordare, a tal proposito, che sono le correnti continue ad essere le più aggressive verso i metalli; quelle alternate sono molto meno aggressive e, comunque, solo se presenti in grande concentrazione. Nel caso di terreni con sospette correnti vaganti o potenziali elettrici spontanei, è opportuno interpellare uno specialista che ne rilievi la presenza effettiva e l'intensità.

I geologi, che ben conoscono come rilevare le correnti vaganti nel terreno e che meglio di altri conoscono la mineralogia del sottosuolo, sono le figure più qualificate per rilevare la conduttività/resistività dei siti da palificare. Per i terreni più aggressivi, si possono avere velocità di corrosione che arrivano al massimo a circa 0,10 mm/anno.

Si fa notare che, mentre un palo fondazionale con fusto in acciaio tubolare da 8 mm di spessore e tutto zincato può durare dagli 80÷100 anni in su, un palo trivellato gettato in opera col metodo tradizionale può deteriorare la sua struttura anche dopo soli 25÷30 anni, con serie conseguenze per l'opera che sostiene.

A tal proposito ricordiamo che il ferro d'armo contenuto nelle fondazioni non è immune dalla corrosione, essendo facilmente raggiunto dall'acqua di permeazione, il cui

ossigeno disciolto genera ossidazione.

Geopalitalia dimensiona gli spessori dei pali, considerando la sezione ridotta del fusto e delle eliche, cioè "scontando" lo spessore di compensazione della corrosione, che varia sulla base delle condizioni del terreno.

B 7 - TABELLE DI RIFERIMENTO CARATTERISTICHE DIMENSIONALI PALI Geopal®

Tabella B.6 - Fusti

Fusti dei pali Geopal® (acciaio S 355)		
Ø _{fusto ext} [mm]	spessore fusto [mm]	Portata a compressione assiale [kN]
		plasticizzazione (sez. acciaio)
48,3	3,2	146,32
48,3	4	179,66
48,3	4,5	199,84
60,3	3,2	185,26
60,3	4,0	228,33
60,3	5,0	280,34
76,1	4,0	292,40
76,1	5,0	360,43
76,1	6,3	445,84
88,9	6,3	527,60
88,9	8,0	656,18
114,3	6,3	689,84
114,3	8,0	862,20
114,3	10,0	1.057,47
139,7	6,3	852,08
139,7	8,0	1.068,22
139,7	10,0	1.315,00
168,3	7,1	1.160,40
168,3	8,0	1.300,20
168,3	10,0	1.604,97
219,1	7,1	1.526,09
219,1	10,0	2.120,02

VITI Geopal® (acciaio S 355)							
$\varnothing_{\text{ext}}$ [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_p
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