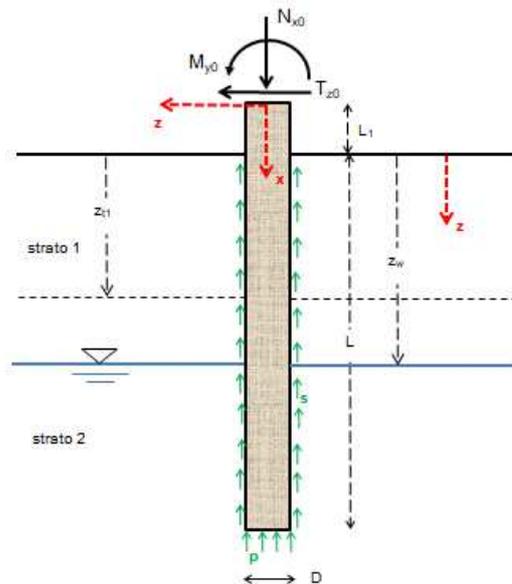


Pali.Az

Software per il calcolo geotecnico e strutturale dei pali di fondazione

(versione 3.0)



Manuale d'uso

Autore

Ing. *Ciro Azzara*

Via E. Majorana, 8 – 90035 *Marineo (PA)*

Cell. 348 1514947

e-mail: ing.azzara@libero.it azzara.ciro@gmail.com

Sommario

1	INTRODUZIONE	4
2	AVVIO DEL SOFTWARE.....	5
3	SISTEMI DI RIFERIMENTO.....	7
4	DATI GENERALI	9
4.1	Unità di misura	10
4.2	Normativa di riferimento	10
4.3	Condizioni di rottura	12
5	MENÙ GEOMETRIA.....	13
5.1	Palo e stratigrafia.....	13
5.2	Sezione metallica micropalo o palo acciaio	13
6	MENÙ MATERIALI.....	14
6.1	Terreni	14
6.2	Terreni-carico limite.....	15
6.3	Terreno modello Winkler	17
6.4	Palo.....	20
6.4.1	Palo in c.a.....	20
6.4.2	Micropalo (anima resistente in acciaio) o palo in acciaio.....	21
6.4.3	Palo in materiale generico	21
7	MENÙ CARICHI ESTERNI.....	22
7.1	Combinazioni di carico allo SLU	22
7.2	Combinazioni di carico allo SLE.....	23
8	ARMATURE.....	23
9	VERIFICHE S.L.E.....	24
10	MENÙ IMPOSTAZIONI.....	25
10.1	Scelte di calcolo	25
10.2	Coefficienti parziali e di sicurezza	26
11	CALCOLO	26
12	OUTPUT (MENÙ VISUALIZZA).....	27
13	LICENZA D'USO E RESTRIZIONI	30
	APPENDICE 1 – Valori indicativi proprietà fisico-meccaniche terreni.....	32
	APPENDICE 2 – Gestione errori e requisiti di sistema.....	33
	APPENDICE 3 – Novità ultime versioni del software	35
	APPENDICE 4 – Esempi svolti.....	36

Pali.Az 3.0 <i>(Ing. Ciro Azzara)</i>	Manuale d'uso	Pag. 3 di 46
---	----------------------	--------------

1) Palo circolare in c.a. trivellato in terreno omogeneo incoerente con presenza di falda.....	36
2) Palo circolare in c.a. in argilla omogenea.....	39
3) Palo incastrato in sommità soggetto a carico trasversale in terreno a grana fina	41
Bigliografia	46

1 INTRODUZIONE

Il presente applicativo, sviluppato in ambiente Microsoft Excel^{®1}, effettua il calcolo geotecnico e strutturale dei pali di fondazione.

Il software consente di calcolare pali cilindrici trivellati, battuti in opera o ad elica continua in **conglomerato cementizio armato** (armatura longitudinale con tondini e armatura trasversale con staffe circolari singole o a spirale), in **acciaio**, **micropali** (anima in acciaio) o in **materiale generico** (es. legno, calcestruzzo prefabbricato, calcestruzzo precompresso).

Nel caso di pali in c.a. viene effettuato il **progetto/verifica delle armature con disegno degli esecutivi**, restituiti anche in **file dxf**. Per gli altri tipi di palo, con esclusione di quelli in materiale generico, viene effettuata la verifica strutturale delle sezioni.

È possibile effettuare il calcolo in **condizioni drenate** (terreni a grana grossa o a grana fina con verifica a lungo termine o con applicazione molto lenta dei carichi) e in **condizioni non drenate** (terreni a grana fina a breve e medio termine o con applicazione normale dei carichi). Qualora presente, può essere portata in conto la **falda** (in quiete).

Il terreno, con piano di campagna è orizzontale, può anche essere **stratigrafico**. Il software consente di gestire i dati geotecnici dei terreni di fondazione e di interfaccia palo-terreno per tutte le **verticali di indagine** disponibili.

Le **condizioni di vincolo** che è possibile considerare sono:

- palo libero di ruotare in testa
- palo a rotazione in testa impedita (quando è presente ad es. la piastra di fondazione o una trave rovescia).

Il **carico** (permanente e/o variabile) è applicato in testa al palo ed è rappresentato dalle componenti verticale (N), orizzontale (T) e coppia flettente (M). Possono essere inserite più di una combinazione di carico.

Il software consente di effettuare i calcoli sia in base alla normativa di cui al **D.M. 11/03/1988** (approccio alle **Tensioni Ammissibili**), che in base alle Norme Tecniche sulle Costruzioni di cui al **D.M. 14/01/2008** e al recente **D.M. 17/01/2018** (nel seguito NTC o NTC 2018) con l'approccio agli **Stati Limite**.

Vengono eseguite sia le verifiche agli **stati limite ultimi** di carattere geotecnico e strutturale (*capacità portante per carichi assiali di compressione e di trazione, capacità portante per carichi trasversali, verifiche strutturali*) che quelle agli **stati limite di esercizio** (*cedimenti verticali e spostamenti orizzontali, fessurazione, tensioni di esercizio*).

¹ Per l'utilizzo di *Pali.Az* è necessario che l'utente disponga del software Microsoft Excel[®] con regolare licenza d'uso.

Il calcolo strutturale sotto carico (sollecitazioni e spostamenti) è effettuato con l'analisi lineare del **Palo elastico su suolo elastico alla Winkler** o con l'analisi non-lineare con le molle che simulano il terreno di tipo **elasto-plastico**. Il metodo di soluzione è il **Metodo agli Elementi Finiti (F.E.M.)** con il quale il palo viene discretizzato in una serie di elementi finiti tipo trave (beam), mentre il terreno viene schematizzato con una serie di molle a comportamento elastico o elastico-perfettamente plastico.

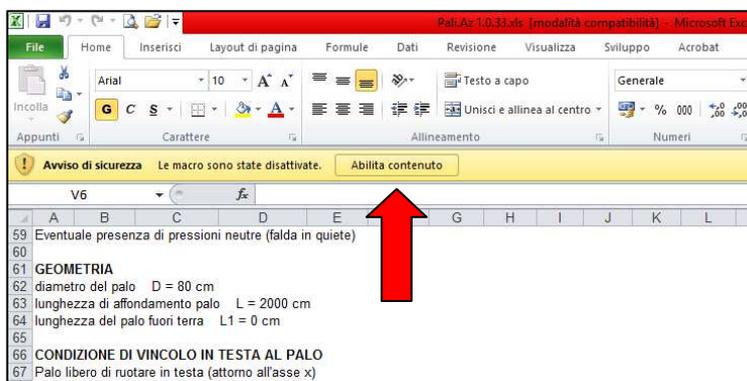
Come per ogni software tecnico, l'utente di *Pali.Az* deve essere un tecnico dotato di buona padronanza della materia (Geotecnica, Idraulica, Scienza e Tecnica delle Costruzioni) e deve conoscere i metodi e i principi a base delle tecniche risolutive adottate dal software; è sempre necessario che l'utente verifichi l'attendibilità dei risultati ottenuti.

L'applicativo, abbastanza semplice ed intuitivo, è molto indicato ai fini didattici oltre che per scopi professionali.

2 AVVIO DEL SOFTWARE

Il file contenente l'applicativo si **installa** come uno comune file e può essere allocato in qualsiasi cartella.

Per il funzionamento del software occorre che alla sua apertura le **macro** ivi inserite



vengano attivate. Se compare l'**Avviso di sicurezza** di cui all'immagine accanto occorre premere sul pulsante **"Abilita contenuto"**.

Se non compare la schermata di presentazione del

programma di cui sotto (il che vuol dire che le macro non si sono attivate), occorre impostare il livello di protezione delle macro a "medio" o "basso".

Per fare ciò occorre:

- ✓ se si utilizza Microsoft Excel 1997, 2000, 2003 o successivo: scegliere il menù *Strumenti*, quindi *Macro*, *Protezione* e scegliere il livello di protezione: se si sceglie "media" occorre premere il bottone "attiva macro" quando si aprirà l'applicativo *Pali.Az*;
- ✓ se si utilizza Microsoft Excel 2007, 2010, 2013 o successivo: occorre mantenere il file come *"Cartella di lavoro di Excel 97-2003"* e visualizzare il menù **Sviluppo** con la seguente procedura:

Pali.Az 3.0 <i>(Ing. Ciro Azzara)</i>	Manuale d'uso	Pag. 6 di 46
---	----------------------	--------------

- con Excel 2007: fare clic sul pulsante in alto a sinistra **Microsoft Office** e quindi su **Opzioni di Excel**, scegliere **Impostazioni generali** e quindi selezionare la casella di controllo **Mostra scheda Sviluppo sulla barra multifunzione**;
- con Excel 2010/2013: cercare il menù **Opzioni** (di Excel) facendo clic sul pulsante in alto a sinistra **Microsoft Office** o **File**; quindi scegliere **Personalizza barra multifunzione** e spuntare, nell'elenco *Schede principali*, la voce *Sviluppo*.

Successivamente dal menù **Sviluppo** scegliere **Protezione macro** => **Impostazioni macro** => scegliere **Attiva tutte le macro** o **Disattiva tutte le macro con notifica**, quindi chiudere e riaprire *Pali.Az*. Nella barra dei menù in alto a destra si formerà il menù "*Componenti aggiuntivi*" che comprenderà i menù personalizzati di *Pali.Az*.

Il software funziona perfettamente ma ha una durata limitata nel tempo. Per eliminare la limitazione temporale occorre **attivarlo** dal menù INFORMAZIONI SU inserendo il codice di attivazione fornito dall'autore. A tale scopo l'utente deve preventivamente comunicare all'autore il **codice HD** che viene visualizzato nel menù INFORMAZIONI SU, tenendo conto che alle volte detto codice è preceduto da un segno meno "-". Il codice di attivazione è riferito al solo PC su cui è stato installato il software e sui cui quindi si è letto il codice HD. Ad attivazione avvenuta è possibile inserire il titolare della licenza d'uso.

Il software non attivato è comunque funzionante per un certo periodo di tempo e per un determinato numero di volte ma **non può essere utilizzato per scopi professionali** (il tabulato di calcolo e ogni altro riferimento al software non possono essere allegati a progetti sia pubblici che privati).

Avviato il software (anche se non attivato) appare la seguente schermata di presentazione in cui è indicato, tra l'altro, il titolare della licenza d'uso.

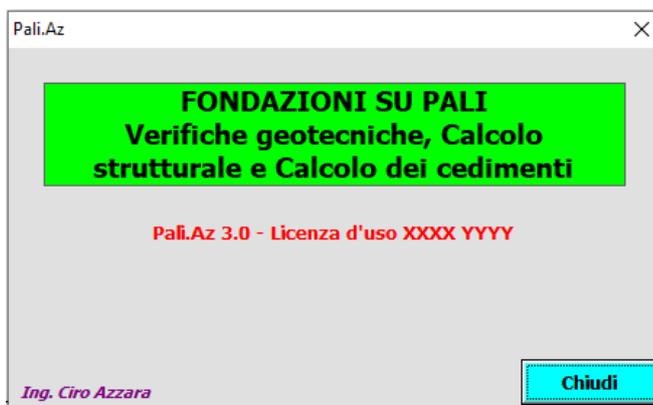
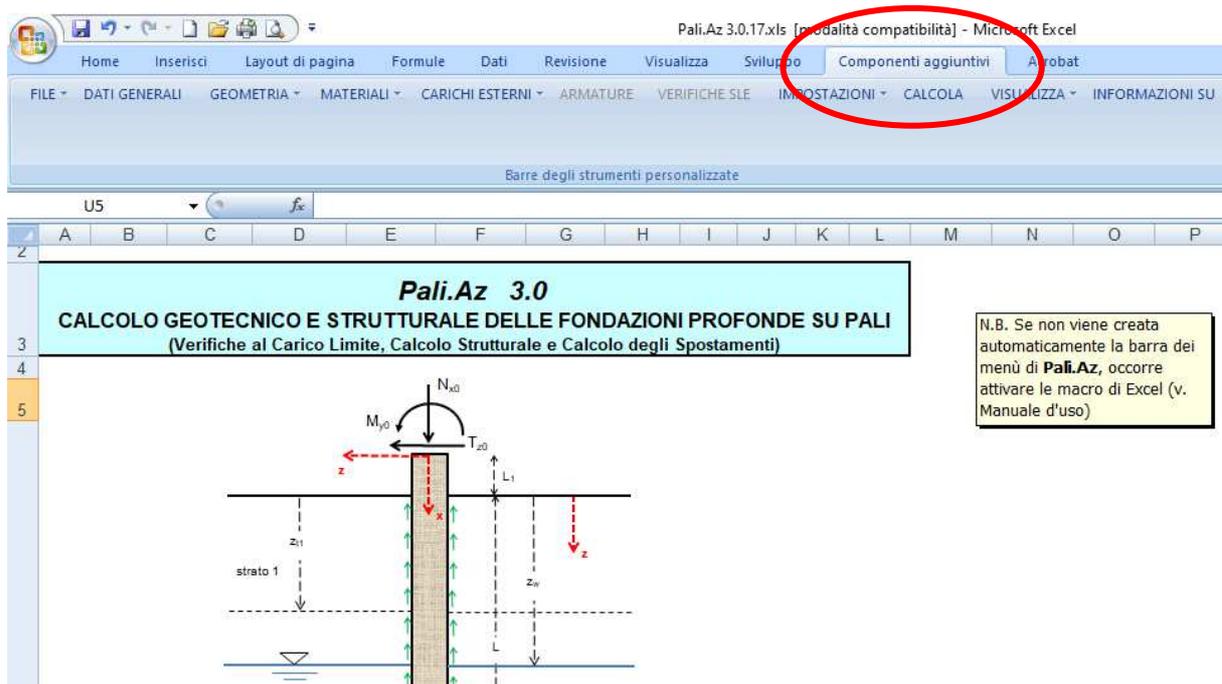


Fig. 1 Schermata di presentazione del software

Chiusa la schermata di presentazione, l'area di lavoro di *Pali.Az* si presenta come segue (notare la barra menù personalizzata, che in Excel 2007/2010/2013 e successivi è sotto il menù **Componenti aggiuntivi**):

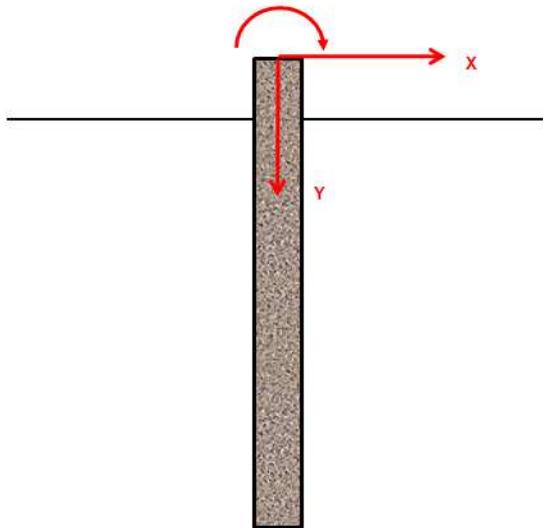


Il menù **FILE** (il primo da sinistra) contiene i comandi per:

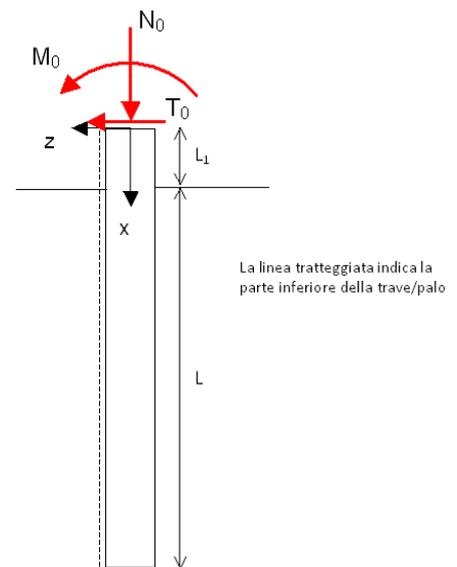
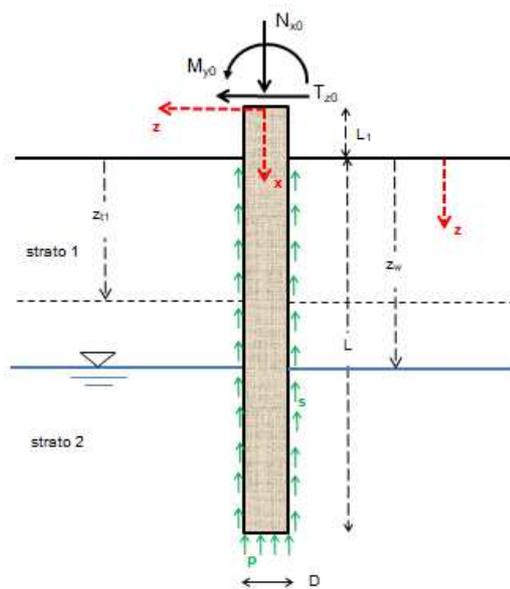
- effettuare un nuovo calcolo: vengono cancellati tutti i dati riferiti al precedente calcolo, previo avviso di conferma;
- salvare il calcolo con le modifiche apportate;
- salvare le modifiche in un altro file (Salva con nome...), da allocare ovunque si vuole;
- effettuare l'anteprima di stampa;
- stampare il tabulato di calcolo e i disegni;
- impostare l'area di stampa;
- cancellare l'area di stampa precedentemente impostata.

3 Sistemi di riferimento

La *sistema di riferimento globale XYZ* assunto dal software ha l'origine 0 nel punto di intersezione dell'asse del palo con la sezione iniziale del palo, l'asse X orizzontale verso destra, l'asse Y verticale verso il basso e l'asse Z orizzontale entrante nel foglio del disegno (regola della mano destra).



Sono poi assunti due **sistemi di riferimento locali** come indicati sotto: 1) asse verticale z verso il basso per il **terreno** (calcolo delle tensioni nel terreno), con origine nel piano di campagna orizzontale; 2) assi x,y,z per il **calcolo strutturale del palo** (asse x verticale verso il basso coincidente con l'asse del palo, asse z orizzontale verso sinistra, asse y ortogonale al piano del disegno e uscente).



Nel seguito si illustreranno i vari pannelli di input dati. Per i numeri decimali occorre usare il carattere virgola “,”. Durante la fase di inserimento dei dati di input è opportuno effettuare ogni tanto il “salvataggio” degli stessi per mezzo del menù FILE

o dell'icona .

4 DATI GENERALI

DATI GENERALI	
Progetto/Lavori	
Committente	
Comune	
Progettista/Tecnico	Ing. Ciro Azzara
Direttore Lavori	
Impresa esecutrice	
Luogo e data esecuzione calcoli	
Annotazioni	
Sistema unità di misura	Normativa di riferimento
<input type="radio"/> Sistema Tecnico (kg, m)	<input checked="" type="radio"/> D.M. 11/03/1988 (Tensioni Ammissibili)
<input checked="" type="radio"/> Sistema Internazionale (N, m)	<input type="radio"/> D.M. 14/01/2008 (Stati Limite)
	<input type="radio"/> D.M. 17/01/2018 (Stati Limite)
Tipologia costruttiva	Condizioni di rottura
<input checked="" type="radio"/> trivellato	<input checked="" type="radio"/> drenate (terreni a grana grossa o media; terreni a grana fina con verifica a lungo termine o con
<input type="radio"/> battuto o infisso	<input type="checkbox"/> presenza di falda in quiete
<input type="radio"/> ad elica continua	<input type="radio"/> non drenate (terreni a grana fina - verifica sia breve che a lungo termine)
Verifiche	Tipologia palo
<input type="checkbox"/> verifiche SLU (carico limite assiale e trasversale, strutturali)	<input type="radio"/> cemento armato
<input checked="" type="checkbox"/> verifiche SLE (spostamenti, fessurazione, tens eserc.)	<input checked="" type="radio"/> micropalo (acciaio)
	<input checked="" type="checkbox"/> metodo Bustamante e Doix
	<input type="radio"/> acciaio
	<input type="radio"/> materiale generico
	Stratigrafia
	1 n° di strati (1 per terreno omogeneo)
	1 n° verticali di indagine
	Annula
	Salva e chiudi

Qui si inseriscono i dati generali sul calcolo da effettuare. Il nominativo indicato nel campo "Progettista/Tecnico" viene riportato in calce al tabulato di calcolo.

Per i pali in C.A., i micropali e i pali in acciaio è possibile eseguire anche il calcolo strutturale, contrariamente a quelli in materiale generico. Per il calcolo del carico limite assiale dei micropali ($D < 0,25$ m) si può utilizzare il metodo di "Bustamante e Doix (1985)".

Occorre precisare il **numero di strati** di terreno presenti: possono essere inseriti fino a un massimo di sei strati. Nel caso di terreno omogeneo occorre inserire il valore uno. Nel casi di calcolo agli stati limite (DM 2008 e DM 2018) occorre inserire anche il numero di "**verticali di indagine**" a disposizione, ognuna delle quali con propri parametri geotecnici di ogni strato (calcolo del carico limite assiale e trasversale). Le nuove normative premiano, in fase di calcolo, la numerosità e la completezza degli accertamenti (indagini geognostiche).

Le verifiche agli Stati Limite Ultimi (SLU) sono: verifica al carico limite assiale di compressione e di trazione, verifica al carico limite trasversale, verifiche strutturali.

Le verifiche agli Stati Limite di Esercizio (SLE) sono: spostamenti orizzontali e cedimenti verticali, per ogni tipo di palo; fessurazione e tensione di esercizio, per i pali in c.a.).

4.1 Unità di misura

Per le unità di misura si può adottare sia il Sistema Tecnico che il Sistema Internazionale.

grandezza	Unità di misura	
	Sistema Tecnico	Sistema Internazionale
Calcoli generali e geotecnici		
dimensioni geometriche, lunghezze, coordinate [L]	m	m
aree sezioni	m ²	m ²
volumi	m ³	m ³
momenti di inerzia sezioni	m ⁴	m ⁴
forze concentrate, resistenza alla punta e laterali, sforzi normali e di taglio [F]	kg	kN
momenti stabilizzanti e instabilizzanti, momenti flettenti e torcenti, coppie	Kg m	KN m
carichi distribuiti per unità di lunghezza	kg/m	kN/m
carichi distribuiti per unità di superficie, coesione terreno, tensioni nel sottosuolo, pressioni neutre	kg/m ²	kN/m ² =kPa
carichi limite unitari	kg/cm ²	N/mm ²
pesi specifici materiali e terreni	kg/m ³	kN/m ³
costante di sottofondo o di Winkler	kg/cm ³	N/cm ³
Calcoli strutturali		
dimensioni, copriferro, interferro	cm	cm
diametri tondini metallici, trefoli, staffe e spirali	mm	mm
aree sezioni	cm ²	cm ²
volumi	cm ³	cm ³
momenti statici e moduli di resistenza sezioni	cm ³	cm ³
momenti di inerzia sezioni	cm ⁴	cm ⁴
tensioni/pressioni, resistenze caratteristiche, tensioni ammissibili, moduli elastici dei materiali	kg/cm ²	N/mm ²

Attenzione: quando si varia il sistema di riferimento (ad esempio da S.T. a S.I.) con i dati di input già inseriti, ricordarsi di cambiare i valori dei vari parametri di input per adeguarli alle nuove unità di misura; ad esempio il valore di Rck del calcestruzzo di 250 kg/cm² nel S.T. passa a 25 N/mm² nel S.I.

4.2 Normativa di riferimento

La normativa di riferimento ha riflessi essenzialmente su:

- coefficienti di amplificazione delle azioni (A), coefficienti di riduzione delle resistenze dei materiali (M) e coefficienti di sicurezza dei sistemi geotecnici (R);
- metodo per le verifiche di sicurezza strutturali (Stati Limite Ultimi o Tensioni Ammissibili).

Con le NTC di cui al D.M. 14/01/2008 e al D.M. 17/01/2018 si adotta, per le verifiche di sicurezza, il **metodo agli Stati Limite Ultimi (SLU)**. Vengono introdotti i cosiddetti coefficienti parziali da applicare alle azioni (A), ai parametri di resistenza dei terreni (M) e alle resistenze globali (R). La scelta appropriata di tali coefficienti parziali, i cui valori sono fissati dalla norma (v. menù Impostazioni), individua i cosiddetti **Approccio 1** e **Approccio 2**. L'approccio progettuale 1 comprende due combinazioni di coefficienti (combinazione 1: A1+M1+R1; combinazione 2: A2+M1+R2). L'approccio 2 invece è costituito dall'unica combinazione A1+M1+R3.

I coefficienti parziali γ_F relativi alle azioni (A), stabiliti dalle NTC, sono i seguenti:

Tabella 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni.

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Permanenti non strutturali ⁽¹⁾	Favorevole	γ_{G2}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevole	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

(1) Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. i carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti, si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

I coefficienti parziali γ_M relativi ai parametri geotecnici (M), stabiliti dalle NTC, sono i seguenti:

Tabella 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

PARAMETRO	GRANDEZZA ALLA QUALE APPLICARE IL COEFFICIENTE PARZIALE	COEFFICIENTE PARZIALE γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \phi'_k$	$\gamma_{\phi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	γ_c	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ	γ_r	1,0	1,0

Da notare che i coefficienti parziali sulle azioni (A) e sui parametri geotecnici (M) previsti dalla NTC 2018 sono gli stessi di quelli previsti dalle NTC 2008.

Nella seguente tabella vengono indicati i coefficienti parziali utilizzati per le singole verifiche con le NTC 2008 e NTC 2018:

Verifica	NTC 2008		NTC 2018	
	combinaz. statiche	combinaz. sismiche	combinaz. statiche	combinaz. sismiche
Carico limite pali per carichi assiali di compressione	<u>Approccio1:</u> $A1+M1+R1(\gamma_{base}=1,00$ $\gamma_{lat}=1,00)$ $A2+M1+R2(\gamma_{base}=1,45$ per pali battuti, 1,7 per pali trivellati e 1,6 per pali ad elica; $\gamma_{lat}=1,45)$ <u>Approccio2:</u> $A1+M1+R3(\gamma_{base}=1,15$ per pali battuti, 1,35 per pali trivellati e 1,3 per pali ad elica; $\gamma_{lat}=1,15)$	<u>Approccio1:</u> $A0+M1+R1(\gamma_{base}=1,00$ $\gamma_{lat}=1,00)$ $A0+M1+R2(\gamma_{base}=1,45$ per pali battuti, 1,7 per pali trivellati e 1,6 per pali ad elica; $\gamma_{lat}=1,45)$ <u>Approccio2:</u> $A0+M1+R3(\gamma_{base}=1,15$ per pali battuti, 1,35 per pali trivellati e 1,3 per pali ad elica; $\gamma_{lat}=1,15)$	$A1+M1+R3(\gamma_{base}=1,15$ per pali battuti, 1,35 per pali trivellati e $1,3$ per pali ad elica; $\gamma_{lat}=1,15)$	$A0+M1+R3(\gamma_{base}=1,15$ per pali battuti, 1,35 per pali trivellati e $1,3$ per pali ad elica; $\gamma_{lat}=1,15)$
Carico limite pali per carichi assiali di trazione	<u>Approccio1:</u> $A1+M1+R1(\gamma_{lat,t}=1,00)$ $A2+M1+R2(\gamma_{lat,t}=1,60)$ <u>Approccio2:</u> $A1+M1+R3(\gamma_{lat,t}=1,25)$	<u>Approccio1:</u> $A0+M1+R1(\gamma_{lat,t}=1,00)$ $A0+M1+R2(\gamma_{lat,t}=1,60)$ <u>Approccio2:</u> $A0+M1+R3(\gamma_{lat,t}=1,25)$	$A1+M1+R3(\gamma_{lat,t}=1,25)$	$A0+M1+R3(\gamma_{lat,t}=1,25)$

Verifica	NTC 2008		NTC 2018	
	combinaz. statiche	combinaz. sismiche	combinaz. statiche	combinaz. sismiche
Carico limite pali per carichi trasversali	<u>Approccio1:</u> A1+M1+R1 ($\gamma_{TR}=1,00$) A2+M1+R2 ($\gamma_{TR}=1,60$) <u>Approccio2:</u> A1+M1+R3 ($\gamma_{TR}= 1,30$)	<u>Approccio1:</u> A0+M1+R1 ($\gamma_{TR}=1,00$) A0+M1+R2 ($\gamma_{TR}=1,60$) <u>Approccio2:</u> A0+M1+R3 ($\gamma_{TR}= 1,30$)	A1+M1+R3 ($\gamma_{TR}=1,30$)	A0+M1+R3 ($\gamma_{TR}=1,30$)
Strutturali pali di fondazione	A1+M1	A0+M1	A1+M1	A0+M1

A0 = azioni permanenti e accidentali non amplificate

Tra parentesi il coefficiente parziale di sicurezza R sulla singola verifica.

Con la normativa di cui ai DD.MM. 11/03/1988 e 16/01/1996 si adotta per le verifiche di sicurezza, invece, il **metodo alle Tensioni Ammissibili**. Le azioni non vengono amplificate, i parametri di resistenza dei terreni e dei materiali in genere non vengono ridotti (si utilizzano i valori caratteristici) e si assume come coefficiente di sicurezza nei riguardi delle verifiche geotecniche il seguente valore:

- verifica al carico limite del complesso fondazione terreno, sia per carichi assiali che trasversali: 2,5.

Si fa osservare che i coefficienti parziali con le NTC 2008 e 2018 e i coefficienti di sicurezza con il D.M. 11/03/1988 possono essere impostati e/o modificati dall'utente agendo sul menù Impostazioni.

4.3 Condizioni di rottura

Occorre scegliere le condizioni di rottura tra **drenate** e **non drenate**, a seconda del caso di studio. In assenza di falda si hanno sempre le condizioni drenate. In terreni a grana grossa o media, anche in presenza di falda, essendo la permeabilità molto elevata la pressione dell'acqua non subisce incrementi anche per movimenti bruschi del palo (a meno che si verificano condizioni eccezionali come ad esempio azioni sismiche ripetute), per cui si opera con l'analisi in termini di pressioni efficaci (condizioni di rottura drenate). L'analisi in condizioni drenate si effettua anche nei terreni a grana fina in cui si vogliono effettuare le verifiche a lungo termine o in pali con applicazione molto lenta dei carichi.

In terreni a grana fina (argille e limi) con analisi a breve e medio termine, la pressione dell'acqua subisce incrementi rispetto al valore idrostatico anche per movimenti normali del palo; in questo caso si opera in termini di pressioni totali (condizioni di rottura non drenate). Scegliendo l'opzione "condizioni non drenate" il software effettua anche la verifica a lungo termine in condizioni drenate in termini di pressioni efficaci. È bene precisare che nei terreni a grana fina quasi sempre le condizioni più gravose sono quelle drenate a lungo termine (con poche eccezioni relative a terreni argillosi di consistenza molto bassa).

Si fa rilevare che nel caso di terreno stratigrafico con contemporanea presenza di strati in condizioni non drenate (es. argille) e strati in condizione drenate (es. sabbie e

ghiaie), volendo effettuare anche le verifiche a breve termine occorre scegliere l'opzione "Condizione NON DRENATE". Se invece non si è interessati alle condizioni a breve termine si può scegliere l'opzione "Condizioni DRENATE".

5 Menù GEOMETRIA

5.1 Palo e stratigrafia

In questo pannello si inseriscono i dati geometrici del problema. La figura rende chiaro a cosa si riferiscono i parametri richiesti. La condizione di vincolo in testa rileva ai fini del calcolo del carico limite alle azioni trasversali.

GEOMETRIA DEL PROBLEMA

Diametro palo D (cm)

Lunghezza di affondamento palo L (cm)

Lunghezza palo fuori terra L_1 (cm)

Affondamento z_w della falda rispetto al piano campagna (cm)

Condizioni di vincolo in testa al palo

Palo libero di ruotare in testa

Palo a rotazione in testa impedita

Rotazione attorno all'asse y e ortogonale al piano del disegno

Stratigrafia

z_t = profondità del profilo di base dello strato

strato n°	z_t (cm)
strato n° 1	<input type="text"/>
strato n° 2	<input type="text"/>
strato n° 3	<input type="text"/>
strato n° 4	<input type="text"/>
strato n° 5	<input type="text"/>

Gli strati sono numerati dall'alto verso il basso. Per l'ultimo strato si considera il profilo di base a profondità indefinita

Nel caso di terreno stratigrafico è necessario specificare la profondità z_t del profilo topografico di base del generico strato. Gli strati sono numerati a partire da uno dall'alto verso il basso. Per l'ultimo strato si considera il

profilo topografico di base a profondità infinita.

5.2 Sezione metallica micropalo o palo acciaio

ARMATURA METALLICA MICROPALI

forma sezione

Profilato

base b (cm)

altezza h o diametro esterno D_e (cm)

spessore anima o tubo t/t_w (cm)

spessore ali laterali s/t_f (cm)

raggio r raccordo anima-ali (cm)

dati della sezione metallica micropalo

Area lorda sezione A (cm²)

Momento di inerzia elastico I_y (cm⁴)

Modulo di resistenza elastico W_y (cm³)

Modulo di resistenza plastico $W_{pl,y}$ (cm³)

Classe della sezione

Nel caso di micropalo (avente come anima resistente un profilato in acciaio) o palo in acciaio occorre inserire i dati della sezione metallica.

L'utente specifica la forma ("Tubolare a sez. circolare", "Circolare", "a doppio T", "IPE", "HEA", "HEB", "HEM") e inserisce le dimensioni della sezione, mentre i dati della sezione possono essere calcolati in automatico premendo su **Calcola**. Per i profilati commerciali (IPE, HEA, HEB, HEM) i

dati vengono richiamati dagli archivi presenti nel software.

Nel caso di calcolo agli stati limite, il bottone “C” consente di calcolare la Classe della sezione di acciaio (allo scopo occorre inserire in MATERIALI la resistenza caratteristica di snervamento f_{yk} dell'acciaio).

6 Menù MATERIALI

6.1 Terreni

Descrizione	g	g_sat	f	c'	cu	delta_a	delta_p	OCR	BT
strato 1	18	30	0	0	0	0	0	1	Drenate

Per ogni strato di terreno vengono inseriti qui i dati geotecnici medi (valori caratteristici).

Gli angoli di attrito palo-terreno vengono considerati nel calcolo strutturale FEM non lineare del palo su suolo con molle elasto-plastiche. Per tali angoli è bene assumere valori compresi tra 0° e $1/2$ dell'angolo di resistenza al taglio drenato ϕ' . Tanto più prossimo a zero si assume tale angolo, tanto più si va a favore di sicurezza.

Come noto il grado di sovra-consolidazione OCR per i terreni normal-consolidati vale 1, mentre nei terreni sovra-consolidati assume valore maggiore di 1. Esso serve a calcolare il *coefficiente di spinta a riposo* K_0 (compreso tra 0,4 e 2,5) con la seguente formula di Jaky $K_0 = \sqrt{OCR} \cdot (1 - \sin \phi')$

Il campo “Condizione a breve termine”, attivo solo se in Dati Generali si è scelto “Condizioni non drenate”, permette di specificare se lo strato di terreno in oggetto a breve termine è in condizioni drenate (terreno a grana grossa) o in condizioni non drenate (terreno a grana fina). Ciò consente di modellare situazioni di coesistenza di terreni in condizioni non drenate e in condizioni drenate (ad. esempio terreno a grana grossa che poggia su terreno argilloso saturo).

6.2 Terreni-carico limite

DATI GEOTECNICI TERRENI E AL CONTATTO PALO-TERRENI (per il calcolo del carico limite assiale e...)

Verticale di indagine n. Descrizione

terreno di fondazione

	strato 1	strato 2	strato 3	strato 4	strato 5	strato 6
Angolo di resistenza al taglio drenato ϕ' (°)	30					
Coesione drenata c' (kN/mq)	0					
Coesione non drenata c_u (kN/mq)						

proprietà al contatto palo-terreno (condiz. drenate e non)

Adesione (kN/mq)	0					
coefficiente μ di attrito fra palo e terreno	0,4					
coefficiente empirico k	0,5					
coefficiente α (x adesione non drenata)	<input type="text" value="C"/>					
tensione tangenziale x attrito laterale q_s (kN/mq)	100					

Per ogni verticale di indagine presente in progetto occorre inserire i dati del terreno di fondazione, che può essere costituito da più strati, e le proprietà al contatto palo-terreno ai fini del calcolo del carico limite assiale e trasversale.

Il bottone *valori consigliati* permette di visualizzare un pannello in cui sono riportati, in funzione del tipo di palo e dello stato di addensamento del terreno, i valori consigliati in letteratura per il coefficiente μ di attrito fra palo e terreno e per il

Tipo di palo	Valori di k per stato di addensamento		Valori di μ
	sciolto	denso	
Battuto: Profilato d'acciaio	0,7	1,0	$\text{tg}20^\circ = 0,36$
Tubo d'acciaio chiuso	1,0	2,0	
Calcestruzzo prefabbricato	1,0	2,0	$\text{tg}(3\phi/4)$
Calcestruzzo gettato in opera	1,0	3,0	
Trivellato	0,5	0,4	$\text{tg}\phi$
Trivellato-pressato con elica continua	0,7	0,9	$\text{tg}\phi$

coefficiente empirico k (v. tabella accanto) necessari per il calcolo della resistenza allo scorrimento all'interfaccia laterale palo-terreno con il criterio di Coulomb:

$$s = a + \sigma_h \cdot \mu$$

dove "a" è un termine di tipo coesivo (*adesione*).

In **condizioni drenate** (l'adesione può essere nulla o positiva) si ha $\sigma_h = \sigma'_h = k \cdot \sigma'_{vz}$ dove σ'_{vz} è la tensione effettiva litostatica verticale alla profondità z e k è il coefficiente empirico di cui sopra che tiene conto del fatto che la tensione verticale effettivamente agente nell'intorno del palo non è una tensione principale e differisce da quella litostatica. In **condizioni non drenate** si assume che l'adesione sia pari ad un'aliquota α della coesione non drenata e che μ sia nullo e quindi:

$$s = a = \alpha \cdot c_u \quad \alpha \leq 1$$

Tipo di palo	Valori di c_u (kPa)	Valori di α
Battuto	$c_u \leq 25$	1,0
	$25 < c_u < 70$	$1 - 0,011(c_u - 25)$
	$c_u \geq 70$	0,5
Trivellato	$c_u \leq 25$	0,7
	$25 < c_u < 70$	$0,7 - 0,008(c_u - 25)$
	$c_u \geq 70$	0,35

Il coefficiente α può essere calcolato con il bottone sulla base delle formule di cui alla tabella accanto (Viggiani Carlo,

Fondazioni, CUEN, 1993) in funzione del tipo di palo (battuto o trivellato) e del valore di c_u , fatto salvo che l'utente può inserire valori differenti.

Tipo di palo	Materiale	c_u (kPa)	α	$\alpha c_{u,max}$ (kPa)
Infisso (senza asportazione di terreno)	Calcestruzzo	≤ 25	1	120
		25 - 50	0,85	
		50 - 75	0,65	
		> 75	0,50	
	Acciaio	≤ 25	1	100
		25 - 50	0,80	
50 - 75		0,65		
> 75		0,50		
Trivellato (con asportazione di terreno)	Calcestruzzo	≤ 25	0,90	100
		25 - 50	0,80	
		50 - 75	0,60	
		> 75	0,40	

L'Associazione Geotecnica Italiana suggerisce per il coefficiente α i valori indicati nella tabella accanto.

Nel caso di micropali calcolati con il metodo di Bustamante e Doix deve essere inserita, per ogni verticale di indagine e per ogni strato, la *resistenza unitaria o tensione tangenziale per attrito laterale* q_s . Allo scopo possono essere utilizzati i seguenti grafici e tabelle, degli stessi autori, che danno i valori di tale parametro in funzione della resistenza del terreno espressa dal valore della pressione limite della prova pressiométrica o dalla resistenza alla penetrazione ricavata con prove SPT:

Terreno	Tipo di iniezione	
	IRS	IGU
Da ghiaia a sabbia limosa	SG1	SG2
Limo e argilla	AL1	AL2
Marna, calcare marnoso, calcare tenero fratturato	MC1	MC2
Roccia alterata e/o fratturata	$\geq R1$	$\geq R2$

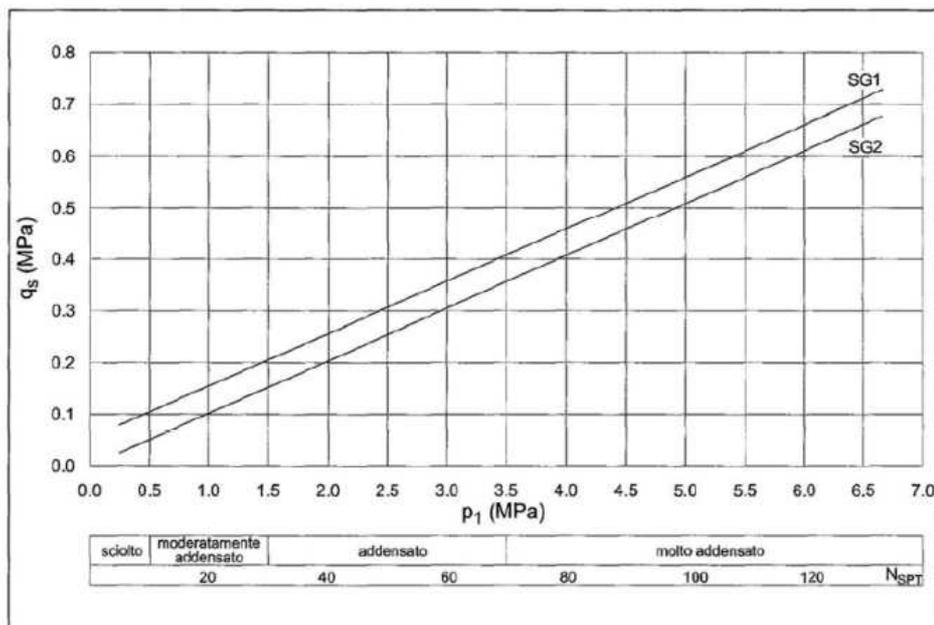


Figura 3-3: Resistenza unitaria limite per terreni incoerenti (AGI, AICAP, Ancoraggio nei Terreni e nelle Rocce, 2012).

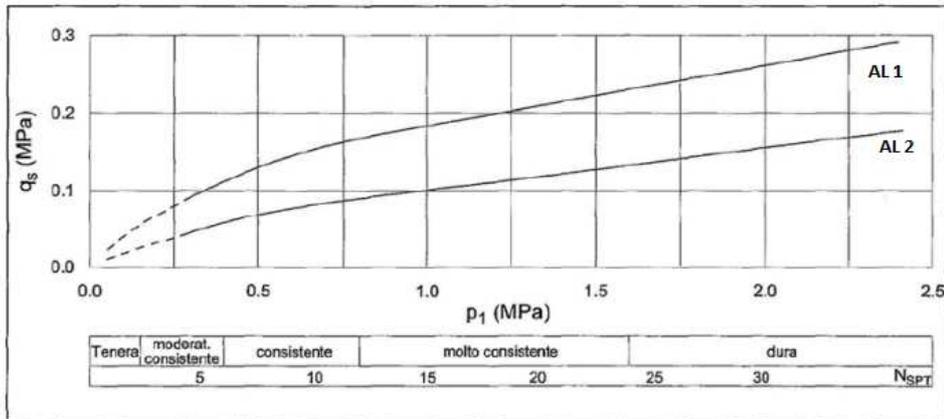
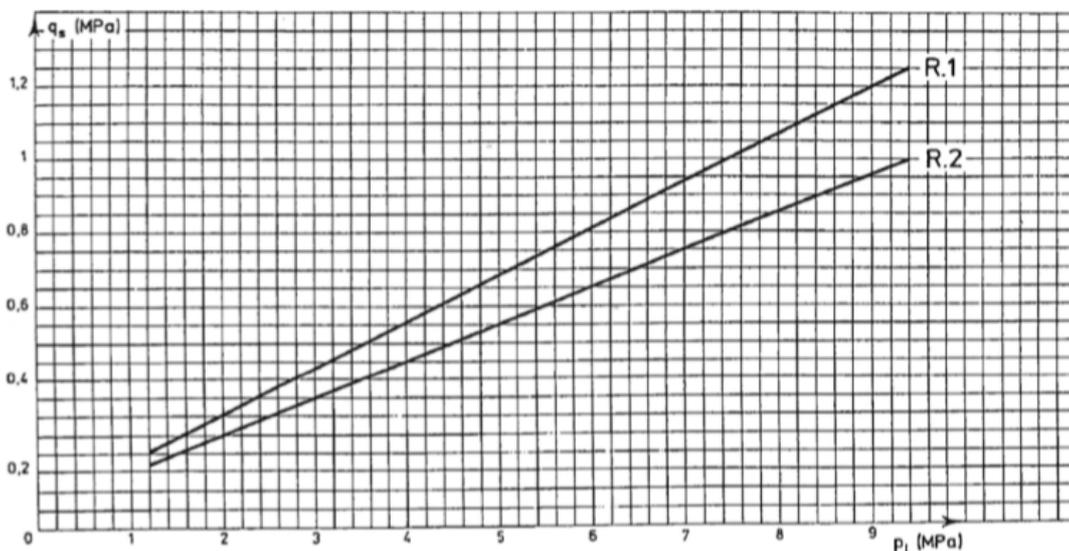
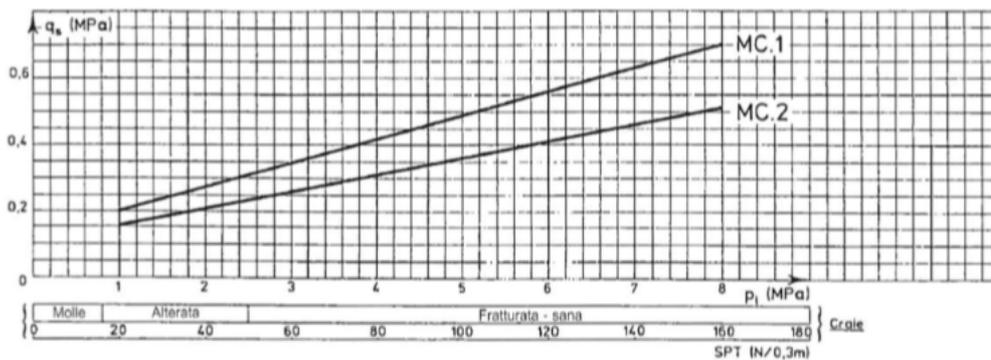


Figura 3-4: Resistenza unitaria limite per terreni a grana fine (AGI, AICAP, Ancoraggio nei Terreni e nelle Rocce, 2012).



6.3 Terreno modello Winkler

Per il calcolo strutturale del palo di fondazione occorre inserire i valori della costante di sottofondo orizzontale o di Winkler che caratterizza gli strati dei terreni di fondazione.

COEFFICIENTI DI REAZIONE ORIZZONTALE DEL TERRENO O DI WINKLER

formula binomia $K_s = A_s + B_s \cdot z^n$ $z = \text{ sistema di riferimento locale terreni}$

	As (N/cmc)	Bs (N/cmc)	n
Strato 1	4,97304	12,14474	1
Strato 2	4,97304	12,14474	1
Strato 3	0,13232	1,68058	1
Strato 4			
Strato 5			
Strato 6			

Calcolo con formula di Bowles (1982)

Annulla

Salva e chiudi

Il software consente di inserire i parametri per il calcolo del modulo di reazione orizzontale k_s del terreno mediante la seguente formula binomia:

$$k_s = A_s + B_s \cdot z^n$$

dove:

A_s = costante (con la

profondità)

B_s = coefficiente che tiene conto della variazione di profondità

z = profondità (sistema di riferimento locale per i terreni)

n = valore dell'esponente variabile generalmente tra 0,5 e 1²

Ponendo, per esempio, $B_s=0$ si assume il modulo di reazione costante con la profondità, assunzione valida per i terreni argillosi sovra-consolidati. Ponendo $n=1$ e $B_s \neq 0$ si ammette invece la variazione lineare di k_s con la profondità (es. modello di Reese & Matlock 1956). In genere in terreni incoerenti e terreni argillosi normalmente consolidati si assume un andamento crescente con la profondità mentre nei terreni coesivi sovra-consolidati si assume k_s costante.

Nel caso di k_s costante ($A_s \neq 0$, $B_s=0$) o lineare ($A_s=0$, $B_s=n_h/D \neq 0$, $n=1$) con la profondità, utili indicazioni nella scelta dei parametri sono contenute in letteratura. Nel primo caso il coefficiente A_s si può determinare con la seguente espressione:

$$A_s = k_1 \cdot \frac{b}{1,5 \cdot D}$$

dove k_1 è dato dalla seguente tabella e $b=30$ cm è il diametro della piastra standard con la quale si effettuano le prove di carico che danno luogo ai valori di k_1 indicati in tabella (D diametro del palo in cm):

Valori tipici di k_1 (N/cm³) per terreni coesivi

Consistenza compatta ($c_u=50 \div 100$ kPa)	Consistenza molto compatta ($c_u=100 \div 200$ kPa)	Consistenza dura ($c_u > 200$ kPa)
18 ÷ 35	35 ÷ 70	> 70
15	50	100

Broms (1964) ha suggerito di correlare il valore di k_h alla coesione non drenata secondo l'espressione $A_s = (170 \div 800) \cdot \frac{c_u}{D}$. Davisson (1970), più cautelativamente,

ha suggerito $A_s = 67 \cdot \frac{c_u}{D}$

² È da preferire il valore 0,5 in quanto è risaputo che il valore di k_s è in qualche modo correlato al modulo elastico E dei terreni, che a sua volta, in accordo con Lambe e Withmann (1979), cresce secondo una legge legata alla profondità z in cui compare l'esponente 0,5.

Nel secondo caso, per quanto riguarda il coefficiente n_h per terreni incoerenti e terreni coesivi possono adottarsi i seguenti valori orientativi:

Valori orientativi di n_h (N/cm^3) per terreni incoerenti

	Addensamento sciolto	Addensamento medio	Addensamento denso
Sabbie non immerse in falde	2,5	7,5	20
Sabbie immerse in falde	1,5	5	12

Valori orientativi di n_h (N/cm^3) per terreni coesivi

Tipo di terreno	n_h	Fonte
Argilla normalmente consolidata	0,2÷3,5 0,3÷0,5	Reese, Matlock, 1956 Davisson, Prakash, 1963
Argilla organica normalmente consolidata	0,1 0,1÷0,8	Peck, Davisson, 1970 Davisson, 1970
Torba	0,05 0,03÷0,1	Davisson, 1970 Wilson Hilts, 1967
Loess	8÷10	Bowles, 1968

Se, diversamente, si conosce il valore di k_s sulla base di formule di correlazione con i moduli elastici del terreno, possono stabilirsi i tre parametri richiesti (A_s , B_s e n) sulla base della formula di interpolazione che si vuole considerare. Se adempio la formula è del tipo $k_s = a \cdot \frac{E}{D}$, dove a è un coefficiente adimensionale, E un modulo elastico del

terreno e D il diametro del palo, si deve inserire nel pannello $A_s = a \cdot \frac{E}{D}$ e $B_s=0$, se E non varia con la profondità, altrimenti si considera la legge di variazione di E con la profondità nel termine $B_s z^n$.

Il bottone "Calcolo con formula di Bowles (1982)", infine, consente di calcolare i parametri della formula binomia mediante il metodo suggerito di Bowles (1982) basato sulla capacità portante dei terreni. Il metodo si basa sull'ipotesi che la portanza ultima del terreno si verifichi in corrispondenza di uno spostamento di un pollice (2,54 cm) e quindi

$$k_s = \frac{q_{ult}}{1''} = \frac{q_{ult}}{0,0254m} \cong 40 \cdot q_{ult}$$

Il modulo di reazione può quindi essere ottenuto moltiplicando la portanza ultima del generico strato per 40:

$$k_s = 40 \cdot (0,5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma + c \cdot N_c + q \cdot N_q)$$

Considerando i parametri geotecnici (c , ϕ , γ) di ogni strato, $B=1$ m e $q=\sigma_v=\gamma z$, si ottiene una espressione del tipo $k_s = A_s + B_s \cdot z$ per cui si ricavano i coefficienti A_s , B_s e $n=1$. Infatti risulta:

$$k_s = 40 \cdot (0,5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma + c \cdot N_c) + 40 \cdot \gamma \cdot N_q \cdot z^1$$

In *Pali.Az* si adottano le seguenti espressioni per il calcolo dei fattori del carico limite:

Pali.Az 3.0 (Ing. <i>Ciro Azzara</i>)	Manuale d'uso	Pag. 20 di 46
--	----------------------	---------------

$$N_q = k_p \cdot e^{\pi \cdot \text{tg} \varphi} \quad (\text{Prandtl 1921}) \quad N_c = \frac{N_q - 1}{\text{tg} \varphi} \quad (\text{Prandtl 1921}) \quad N_\gamma = 1,5 \cdot (N_q - 1) \cdot \text{tg} \varphi$$

(Hansen 1970)

con $k_p = \text{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$ coefficiente di spinta passiva.

Per $\varphi=0$ (condizioni non drenate) si assume $N_c = 2 + \pi = 5,14$, mentre dalle formule appena viste si ottiene $N_q = 1$ e $N_\gamma = 0$.

È opportuno sottolineare che le caratteristiche di sollecitazione e le pressioni indotte nel terreno non sono molto sensibili al valore del coefficiente di sottofondo perché la rigidità della struttura è solitamente almeno 10 o più volte la rigidità del terreno. Al contrario, gli spostamenti risultano abbastanza influenzati da k_s . Infatti l'andamento degli spostamenti varia pressoché linearmente con k_s , cosicché una corretta scelta di esso è determinante per una valutazione realistica degli spostamenti.

A rigore la costante di sottofondo k_s non dipende solo dal terreno ma anche dalle condizioni geometriche e meccaniche del problema, quali l'affondamento e la rigidità del palo, il suo grado di vincolo, il suo modo di deformarsi ecc. (problema di interazione). Come detto in precedenza, altre formule proposte in letteratura legano la costante di sottofondo al modulo elastico del terreno $k_s \propto \frac{E}{L}$ in cui L è l'affondamento del palo.

6.4 Palo

6.4.1 PALO IN C.A.

Per il calcolo strutturale dei pali di fondazione in cemento armato è necessario specificare la resistenza caratteristica del calcestruzzo R_{ck} e il tipo di acciaio³, nonché, se si procede agli SLU, i coefficienti parziali di sicurezza del calcestruzzo e dell'acciaio.

³ Tipi di acciaio previsti per il calcolo in base al DM1988+DM1996: **Fe B 22 k, Fe B 32 k, Fe B 38 k, Fe B 44 k**. Tipo di acciaio previsto per il calcolo in base al DM 2008 (NTC): **B450C**.

DATI MATERIALI PER LE VERIFICHE STRUTTURALI PALI IN C.A.

resistenza caratt. cubica del cls, R_{ck} (kg/cmq) **C20/25**

tipo di acciaio

calcola parametri **cancella dati**

<input type="text" value="306582"/>	modulo elastico longit. cls E_c (kg/cmq)
<input type="text" value="2100000"/>	modulo elastico longit. acciaio E_s (kg/cmq)
<input type="text" value="2500"/>	peso dell'unità di volume del cls armato (kg/mc)

VERIFICHE SEZIONI AGLI S.L.U.

Diagramma di calcolo tensione deformazione del calcestruzzo

parabola-rettangolo (preferibile)
 triangolo-rettangolo
 rettangolo o stress block

<input type="text" value="0,2"/>	deformazione ec_2 (%)	<input type="text" value="0,07"/>	deformazione ec_4 (%)
<input type="text" value="0,175"/>	deformazione ec_3 (%)	<input type="text" value="0,35"/>	deformazione di rottura (%)

coeff. parziale di sicurezza calcestruzzo

<input type="text" value="289,05"/>	resist. media a compress. cilindrica, f_{cm} (kg/cmq)
<input type="text" value="207,5"/>	resist. caratt. a compress. cilindrica, f_{ck} (kg/cmq)
<input type="text" value="117,58"/>	resist. di calcolo a compressione, f_{cd} (kg/cmq)
<input type="text" value="22,8"/>	resist. media a trazione, f_{ctm} (kg/cmq)
<input type="text" value="15,96"/>	resist. caratteristica a trazione, f_{ctk} (kg/cmq)
<input type="text" value="10,64"/>	resist. di calcolo a trazione, f_{ctd} (kg/cmq)

Diagramma di calcolo tensione-deformazione dell'acciaio

elastico-perfettamente plastico deformazione a rottura (%)
 bilineare con incrudimento rapporto di sovrarresistenza $k (>1)$

coeff. parziale di sicurezza acciaio

<input type="text" value="4500"/>	tensione caratt. di snervam. acciaio, f_{yk} (kg/cmq)
<input type="text" value="3913,04"/>	resistenza di calcolo acciaio, f_{yd} (kg/cmq)

VERIFICHE SEZIONI ALLE TENSIONI AMMISSIBILI

<input type="text"/>	tens. ammiss. di compressione nel cls (kg/cmq)
<input type="text"/>	tens. tang. ammiss. nel cls, τ_{c0} (kg/cmq)
<input type="text"/>	tens. tang. ammiss. nel cls, τ_{c1} (kg/cmq)
<input type="text"/>	tens. ammiss. acciaio (kg/cmq)

Annulla **Salva e chiudi**

Il bottone **Calcola parametri** consente di determinare i parametri relativi al calcestruzzo e all'acciaio in funzione della classe del calcestruzzo (R_{ck}), del tipo di acciaio e della normativa di riferimento prescelti. Resta comunque salva la possibilità per l'utente di modificare i dati calcolati in automatico.

6.4.2 MICROPALO (ANIMA RESISTENTE IN ACCIAIO) O PALO IN ACCIAIO

DATI MATERIALE PER LE VERIFICHE STRUTTURALI PARATE IN ACCIAIO

tipo di acciaio

valori normativa

<input type="text" value="210000"/>	modulo elastico longitudinale E (N/mmq)
<input type="text" value="0,3"/>	coefficiente di Poisson
<input type="text" value="78,5"/>	peso specifico dell'acciaio (kN/mc)

calcola parametri **cancella dati**

<input type="text" value="80769"/>	modulo elastico tangenziale G (N/mmq)
<input type="text" value="420"/>	tensione caratteristica di snervamento f_{yk} (N/mmq)
<input type="text" value="520"/>	tensione caratteristica di rottura f_{tk} (N/mmq)

Verifiche sezioni alle Tensioni Ammissibili

<input type="text"/>	tensione ammissibile (N/mmq)
----------------------	-------------------------------

Verifiche sezioni agli S.L.U. - coeff. parziali di sicurezza sul materiale

<input type="text" value="1,05"/>	Resistenza delle sezioni di classe 1-2-3-4
<input type="text" value="1,05"/>	Resistenza all'instabilità delle membrature
<input type="text" value="1,25"/>	Resistenza delle sezioni tese indebolite da fori

Annulla **Salva e chiudi**

Analogamente si procede per i micropali con l'anima in acciaio e per i pali in acciaio (tipo di acciaio: **S 235, S 275, S 355, S 420, S 460, generico**).

6.4.3 PALO IN MATERIALE

GENERICO

Materiale costituente il palo

<input type="text"/>	Peso dell'unità di volume (kg/mc)	<input type="text" value="2500"/>
<input type="text"/>	Modulo elastico longitudinale E (kg/cmq)	<input type="text" value="300000"/>

Annulla **Salva e chiudi**

Per i pali in materiale generico occorre inserire il peso dell'unità di volume e il modulo elastico longitudinale del materiale.

7 Menù CARICHI ESTERNI

7.1 Combinazioni di carico allo SLU

COMBINAZIONI DI CARICO ALLO S.LU CHE AGISCONO SULLA TESTA DEL PALO

Valori caratteristici (non amplificati)

Nome o num. combinaz.

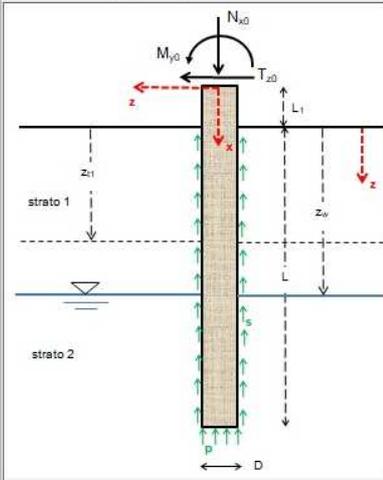
descriz/N°	permanenti G			variabili Q		
	Nx0	Tz0	My0	Nx0	Tz0	My0
1	200					

componente verticale Nx (kN)
componente orizzontale Tz (kN)
momento My (kN*m)

permanente G variabile Q

ez

Indicare valori positivi di N,T,M se concordati con i versi segnati in figura



Permette di inserire le combinazioni di carico (permanente e/o variabile) applicate in testa nelle loro componenti verticali (N_{x0}), orizzontale (T_{z0}) e momento (M_{y0}) ai fini delle verifiche allo SLU (carico limite assiale, carico limite trasversale e calcolo strutturale del palo).

In genere si inserisce la sola componente permanente del carico (caratteristiche di sollecitazione trasmesse dalla sovrastruttura: si veda capitolo 7.2.5. NTC). È bene precisare che quelli da inserire sono i valori caratteristici del carico.

Il verso positivo delle componenti è quello indicato in figura. Inserendo valori con segno negativo, il verso delle forze sarà opposto a quello segnato in figura.

Per ogni combinazione è necessario dare un identificativo (nome o numero). Qualora si vogliono eseguire le verifiche in assenza di azioni esterne applicate (in questo caso non si ottiene il coefficiente di sicurezza al carico limite, essendo mancante il carico esterno applicato), occorre definire una sola combinazione di carico a cui dare un nome qualunque (es. Comb1) e non inserire valori nelle celle delle componenti dei carichi.

7.2 Combinazioni di carico allo SLE

COMBINAZIONI DI CARICO ALLO S.L.E. CHE AGISCONO SULLA TESTA DEL PALO

Valori caratteristici (non amplificati)

Nome o num. combinaz.

descriz/N°	N _{x0}	T _{z0}	M _{y0}
1	50		

componente verticale N_x (kN)

componente orizzontale T_z (kN)

momento M_y (kN*m)

Indicare valori positivi di N, T, M se concordi con i versi segnati in figura

Permette di inserire le combinazioni di carico applicate in testa nelle loro componenti verticali (N_{x0}), orizzontale (T_{z0}) e momento (M_{y0}) ai fini delle verifiche allo SLE (calcolo cedimenti e spostamenti per tutti i tipi di palo, verifica a fessurazione e tensioni di esercizio per i pali in c.a.).

8 Armature

DATI PER IL CALCOLO DELLE ARMATURE PALI IN C.A.

Calcolo di progetto verifica

Armatura longitudinale a flessione

diametro tondini (mm)

Copriferro (cm)

Distanza minima tra le barre - interferro (cm)

interasse massimo tra le barre (cm)

minimo di armatura pari allo 0,3% dell'area del ds zona sismica: minimo di armatura pari all'1% dell'area del ds (zone dissipative a comportamento duttile)

Armatura perimetrale di confinamento o trasversale a taglio

diametro spirale o staffe (mm) staffe circolari singole staffe a spirale

angolo teta (°) di inclinazione delle fessure (tra 21,8° e 45°)

Per i **pali in C.A.** occorre fissare:

- il diametro dei tondini⁴ (armatura longitudinale a presso-flessione);
- il copriferro;
- l'interferro (distanza minima tra le superfici esterne dei tondini). Le barre di armatura saranno disposte in modo che la distanza tra loro non scenda mai al di sotto del valore dell'interferro;
- l'interasse massimo tra gli

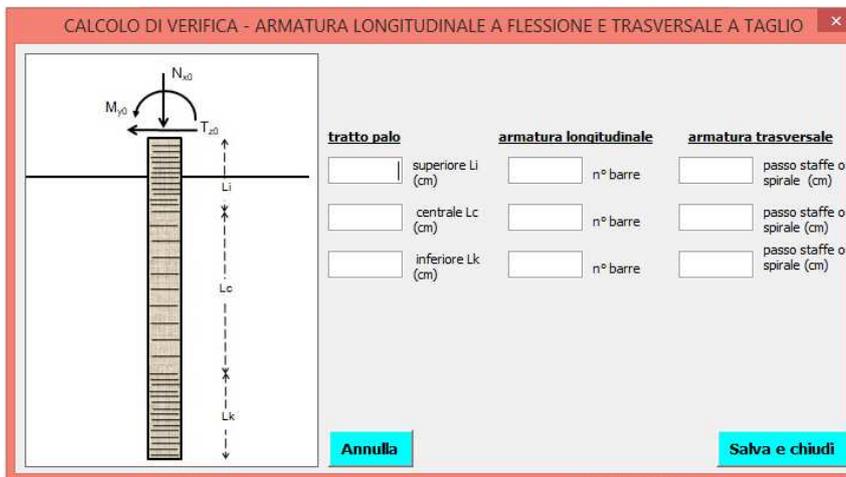
⁴ Le NTC (paragr. 7.4.6.2.1) impongono che in zona sismica si adotti un diametro non inferiore a 14 mm.

assi delle barre di armatura longitudinale;

- i minimi di armatura da adottare.

Inoltre, per l'armatura perimetrale di confinamento o trasversale a taglio occorre precisare il diametro della spirale o delle staffe circolari singole e l'angolo ϑ di inclinazione delle fessure nel calcolo a taglio.

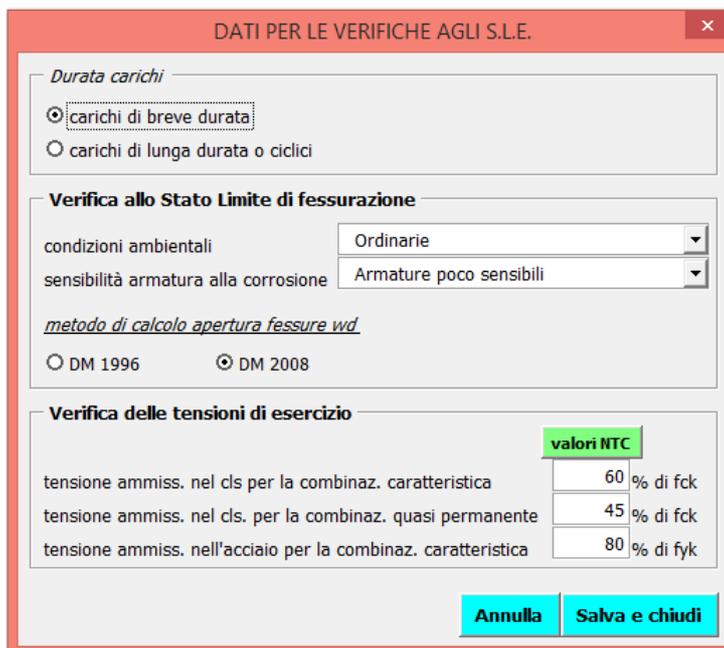
Il software consente anche il **calcolo di verifica delle armature**, utile quando si vuole verificare un palo esistente o quando, a seguito del calcolo di progetto, si vuole modificare l'armatura di calcolo.



Cliccando su "Inserisci/modifica armatura", si apre il pannello qui accanto in cui possono inserirsi o modificarsi il numero delle barre presenti nei vari tratti del palo (superiore, centrale e inferiore) e il

passo dell'armatura trasversale.

9 VERIFICHE S.L.E.



Per i pali in c.a. calcolati con le NTC occorre inserire i dati per le verifiche agli stati limite di esercizio di fessurazione e alle tensioni di esercizio.

Maggiori indicazioni inerenti i metodi di calcolo sono riportate nella Relazione di calcolo che correda il software.

Il bottone "valori NTC" consente di impostare le percentuali come da indicazioni delle NTC.

10 Menù IMPOSTAZIONI

10.1 Scelte di calcolo

SCELTE DI CALCOLO

Verifiche agli SLU di tipo geotecnico condotte in base a

Approccio 1 Approccio 2

Momento resistente o di plasticizzazione M_{yR} del palo ($kN*m$)

Peso dell'unità di volume dell'acqua (kN/mc) **imposta** 9,81

Micropalo: parametro alfa di espansione del diametro del foro di perforazione a seguito dell'iniezione 1,4

Calcolo strutturale - F.E.M.

Lunghezza media elemento finito (m) 0,5

Vincolo alla base del palo appoggio cedevole elasticamente

Analisi lineare Analisi non lineare

numero massimo di iterazioni 10

errore accettabile 0,001

Annulla **Salva e chiudi**

Permette di scegliere l'approccio progettuale (verifiche agli SLU di tipo geotecnico con le NTC 2008) e di impostare:

- per i pali in materiale generico: il momento resistente o di plasticizzazione del palo (per i pali in c.a. o in acciaio tale momento viene calcolato dal software in funzione delle armature necessarie per soddisfare le verifiche strutturali e degli altri parametri, quali le

caratteristiche dei materiali, la disposizione delle armature, lo sforzo normale agente ecc.);

- il peso dell'unità di volume dell'acqua;

- il parametro α per il calcolo del diametro espanso ($D_e = \alpha D$) nei micropali realizzati con iniezioni uniche o ripetute di cls o materiale similare (v. tabella a seguire):

Terreno	Valori del coefficiente α_d		Quantità minima di miscela consigliata V_s	Rapporto A/C
	IRS ($p_i \geq p_i$)	IGU ($p_i < p_i$)		
Ghiaia	1,8	1,3 ÷ 1,4	1,5 V_s	1,7 ÷ 2,4
Ghiaia sabbiosa	1,6 ÷ 1,8	1,2 ÷ 1,4	1,5 V_s	
Sabbia ghiaiosa	1,5 ÷ 1,6	1,2 ÷ 1,3	1,5 V_s	
Sabbia grossa	1,4 ÷ 1,5	1,1 ÷ 1,2	1,5 V_s	
Sabbia media	1,4 ÷ 1,5	1,1 ÷ 1,2	1,5 V_s	
Sabbia fine	1,4 ÷ 1,5	1,1 ÷ 1,2	1,5 V_s	
Sabbia limosa	1,4 ÷ 1,5	1,5 ÷ 2,0	IRS: (1,5 ÷ 2) V_s ; IGU: 1,5 V_s	
Limo	1,4 ÷ 1,6	1,1 ÷ 1,2	IRS: 2 V_s ; IGU: 1,5 V_s	1,7 ÷ 2,4
Argilla	1,8 ÷ 2,0	1,2	IRS: (2,5 ÷ 3) V_s ; IGU: (1,5 ÷ 2) V_s	
Marna	1,8	1,1 ÷ 1,2	(1,5 ÷ 2) V_s per strati compatti	1,7 ÷ 2,4
Calcarei marnosi	1,8	1,1 ÷ 1,2	(2 ÷ 6) V_s o più per strati fratturati	
Calcarei alterati o fratturati	1,8	1,1 ÷ 1,2	(2 ÷ 6) V_s o più per strati poco fratturati	
Roccia alterata e/o fratturata	1,2	1,1	2 V_s o più per strati fratturati	1,7 ÷ 2,4
IRS: iniezione ad alta pressione a più stadi e ripetuta IGU: iniezione a bassa pressione in unica soluzione p_i : pressione limite dalla prova pressiometrica Menard p : pressione di iniezione			$V_s = L_f D_s^2 / 4$ L_f : lunghezza della fondazione D_s : diametro reale della fondazione	
Nota: nella tabella sono riportati i valori teorici della quantità in volume della miscela di iniezione nelle diverse condizioni operative ed il rapporto acqua cemento ottimale (da Bustamante e Doix, 1985)				

Per il calcolo strutturale del palo viene usato il metodo agli elementi finiti (FEM) per il quale occorre precisare la lunghezza media dell'elemento finito in cui suddividere il

palo e il vincolo alla base del palo (“appoggio fisso” o “appoggio cedevole elasticamente”).

Con l’analisi FEM lineare le molle che modellano il terreno sono a comportamento elastico lineare. Nel caso di analisi-non lineare, più aderente al comportamento reale del terreno, le molle che modellano il terreno a destra e a sinistra del palo, e che rappresentano la reazione che il terreno oppone ai movimenti del palo, sono a comportamento elastico-perfettamente plastico: a riposo sono soggette a una precompressione iniziale data dalla spinta a riposo del terreno e sotto movimento raggiungono per decompressione il valore della spinta attiva e per compressione il valore della spinta passiva, arrivando quindi, superati certi limiti, a plasticizzazione.

Per i parametri “numero massimo di iterazioni” e “errore accettabile” possono essere lasciati i valori di default (rispettivamente 10 e 0,001).

10.2 Coefficienti parziali e di sicurezza

COEFFICIENTI PARZIALI SULLE AZIONI, SUI MATERIALI E SULLE RESISTENZE - COEFFICIENTI DI ...

Coeff. parziali per le azioni (A)			Coeff. parziali per i parametri geotecnici (M)				
	A1	A2	M1	M2			
imposta valori NTC							
carichi permanenti	favorevole	1	1				
	sfavorevole	1,3	1				
carichi variabile	favorevole	0	0				
	sfavorevole	1,5	1,3				
Coeff. parziali resistenze caratteristiche (R)							
imposta valori NTC	R1	R2 pali battuti	R2 pali trivellati	R2 pali elica continua	R3 pali battuti	R3 pali trivellati	R3 pali elica continua
Resistenza alla base palo	1	1,45	1,7	1,6	1,15	1,35	1,3
Resistenza laterale in compressione	1	1,45		1,15			
Resistenza laterale in trazione	1	1,6		1,25			
Resistenza alle azioni trasversali	1	1,6		1,3			
Coefficienti di sicurezza verifiche							
imposta valori DM 1988							
Carico limite assiale di compressione	2,5						
Carico limite assiale di trazione	2,5						
Carico limite trasversale	2,5						

In questo pannello si possono modificare, per specifiche esigenze dell’utente, i coefficienti parziali previsti dalla normativa di riferimento.

In genere non occorre nessuna modifica di tali coefficienti,

essendo i valori definiti dalla normativa prescelta.

11 CALCOLO

Finite la fase di input è possibile avviare il calcolo premendo il relativo pulsante. Il calcolo si può ripetere tutte le volte che si vuole, ad es. variando singoli parametri di input.

Durante la fase di calcolo il programma controlla la compatibilità geometrica dei dati introdotti segnalando eventuali errori che comportano l’interruzione del calcolo. Si precisa comunque che il programma si limita a verificare le incongruenze geometriche che non permettano l’elaborazione; non segnala eventuali errori del progettista sulle caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali, né altri tipi di errori.

In certi casi di calcolo non lineare con il metodo agli elementi finiti con mesh molto fitta, i tempi di calcolo possono essere relativamente alti (dell'ordine di qualche minuto), soprattutto se si tratta di pali in c.a. di cui si chiede anche il calcolo delle armature (che vengono effettuate in tutte le sezioni in corrispondenza dei nodi della mesh). Per ridurre i tempi di calcolo si può aumentare la lunghezza media degli elementi finiti e/o scegliere il calcolo lineare e/o il materiale generico (quando non necessario il calcolo delle armature).

Le metodologie e le teorie di calcolo implementate nel software sono riportate nella **Relazione di calcolo** che corredata il software.

12 OUTPUT (menù VISUALIZZA)

L'applicativo fornisce i seguenti risultati riportati nel **Tabulato di calcolo**:

- a) **Dati palo** (perimetro sezione, area della sezione trasversale, volume, peso, rapporto L/D)
- b) **Calcolo strutturale del palo (verifiche SLU) con il FEM:**
 - caratteristiche di sollecitazione N, T, M nei nodi della struttura;
 - reazioni vincolari e pressioni di contatto (interazione) terreno-palo;
 - verifica delle condizioni di equilibrio del palo (equazione alla traslazione orizzontale, alla traslazione verticale e alla rotazione attorno alla testa del palo);
 - spostamenti nei nodi della struttura (spostamenti orizzontali, verticali e rotazioni sezioni);
- c) **Carico limite per carichi assiali (verifiche SLU):**
 - Azione di progetto;
 - Resistenza di progetto;
 - esito verifica;
- d) **Carico limite per carichi orizzontali (verifiche SLU):**
 - Azione di progetto;
 - Resistenza di progetto;
 - esito verifica;
- e) **calcolo/verifica delle sezioni in c.a. o acciaio:**
 - calcolo/verifica armatura a presso-flessione;
 - calcolo/verifica armatura a taglio;
- f) **Verifiche SLE**

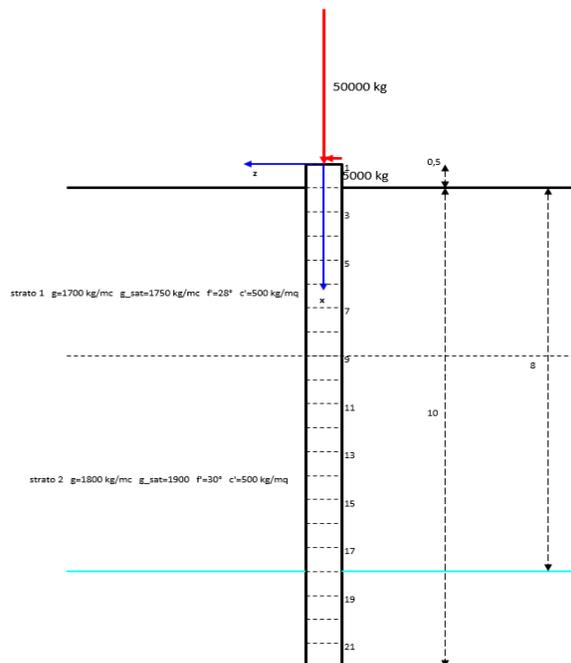
- Spostamenti e cedimenti (per tutti i tipo di palo);
 - Verifica alla fessurazione e alle tensioni di esercizio (per i pali in c.a.).
- g) per i pali in c.a. o micropali: **disegni esecutivi**, esportabili in **file dxf**
- h) **Computo metrico** dei materiali da costruzione.

I risultati di cui alle lettere b), c), d), e), vengono riportati per ogni combinazione di carico SLU. Analogamente i risultati di cui alla lettera f) vengono riportati per ogni combinazione di carico SLE calcolata.

L'esito negativo delle verifiche di stabilità e/o strutturali viene messo in risalto con carattere grassetto e colore rosso. Pertanto se nel tabulato di calcolo non risultano scritte di colore rosso significa che tutte le verifiche sono soddisfatte.

Dal menù VISUALIZZA possono essere visualizzati:

1. il **Tabulato di calcolo**;
2. il **disegno** palo-terreno di fondazione, con indicazione anche dei carichi applicati in testa al palo e della stratigrafia del terreno di fondazione:



3. la **deformata** del palo sotto i carichi allo SLE (la deformata è amplificata);
4. le **sollecitazioni** sforzo normale, taglio e momento flettente lungo il palo di fondazione sotto i carichi allo SLU e i diagrammi delle **pressioni di contatto palo-terreni** (interazione);
5. le **sollecitazioni** taglio e momento lungo il palo di fondazione in condizione di carico limite per azioni orizzontali (teoria di Broms);
6. i disegni esecutivi per i pali in c.a. o micropali, anche in file dxf

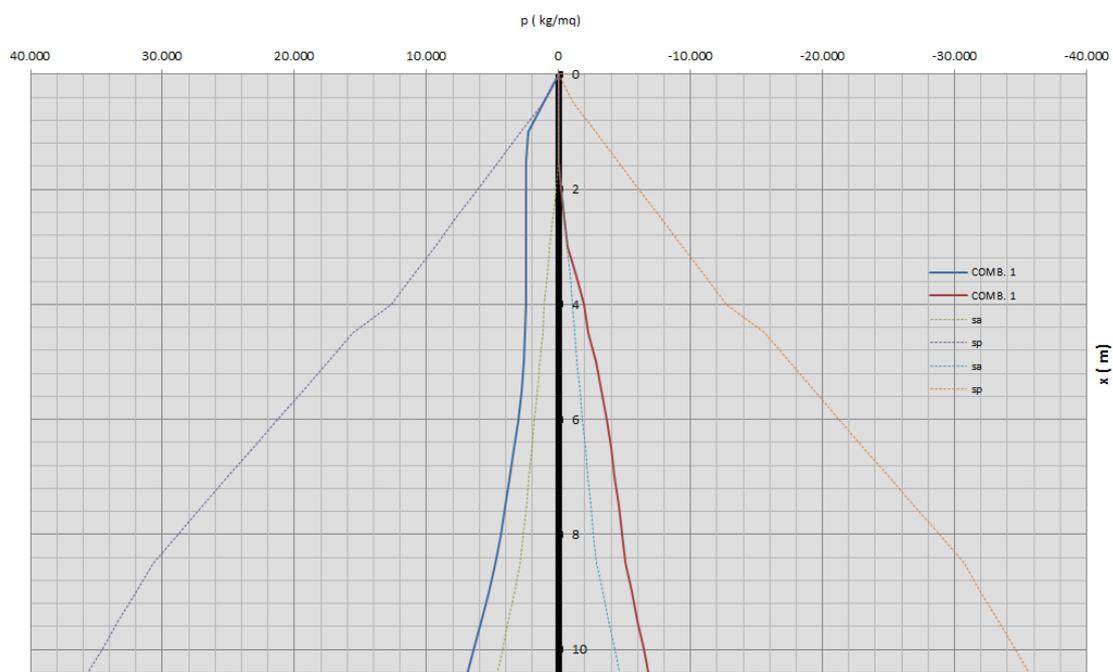


7. la **Relazione di calcolo**, in formato .doc modificabile, contenente anche le teorie ed i metodi implementati in *Pali.Az*, a cui allegare il Tabulato di calcolo. Il progettista/tecnico apporterà alla Relazione di calcolo le modifiche e le integrazioni dipendenti dal caso in studio, con riferimento alle parti evidenziate in giallo e laddove ritenuto necessario.

Tutti i disegni e i grafici restituiti dal software sono stampabili.

Il diagramma delle pressioni di contatto palo-terreni con l'analisi non-lineare è molto indicativo in quanto consente di verificare graficamente le molle plasticizzate. Dal grafico si può vedere il contributo che ogni molla espleta all'equilibrio (risorse mobilitate) e valutare l'entità delle risorse ancora disponibili prima di arrivare a rottura per spinta passiva. Nelle zone di terreno dove si è raggiunto il valore di spinta passiva (linea inclinata tratteggiata più esterna) non possono essere mobilitate ulteriori risorse per l'equilibrio. Le linee tratteggiate più interne rappresentano i diagrammi delle spinte attive. In qualunque nodo è quindi immediato verificare, sia a destra che a sinistra, se è agente in equilibrio la spinta attiva, passiva o intermedia. Si può notare in quali zone non si è ancora raggiunta la condizione di rottura per spinta passiva e quindi in tali zone il terreno dispone ancora di una riserva di resistenza mobilitabile per l'equilibrio.

DIAGRAMMA PRESSIONI DI CONTATTO PALO-TERRENO



13 LICENZA D'USO E RESTRIZIONI

L'autore conferisce licenza d'uso dell'applicativo, ma rimane titolare sia dello stesso che della relativa documentazione. L'uso è consentito **su un singolo computer** e, pertanto, non potrà essere utilizzato in rete, venduto, dato in locazione o in comodato ad un altro utente, né essere decodificato o decompilato, adattato o modificato, senza previo consenso scritto dell'autore.

L'utente non potrà rimuovere o alterare il nome dell'applicativo o altre indicazioni di riserva di diritti apposti o inseriti nel programma. Non è consentito l'inserimento in pacchetti destinati all'editoria o alla vendita senza la preventiva autorizzazione scritta dell'autore.

L'autore si riserva di apportare modifiche al software e alla documentazione a corredo senza preavviso.

Per potere utilizzare l'applicativo è indispensabile che l'utente disponga ed abbia già installato sul proprio computer il programma Excel® della Microsoft, non fornito dall'autore e senza il quale questo software non può essere utilizzato.

L'autore garantisce che l'applicativo funziona in conformità con il presente manuale d'uso e che esso non contiene virus.

L'uso dell'applicativo è subordinato alla conoscenza dei problemi ingegneristici di che tratta (si presume che l'uso dell'applicativo avvenga da parte di persone qualificate). È stato curato in gran parte il controllo dei dati inseriti.

Pali.Az 3.0 <i>(Ing. Ciro Azzara)</i>	Manuale d'uso	Pag. 31 di 46
---	----------------------	---------------

La verifica dell'idoneità, dell'uso e della gestione dell'applicativo sono responsabilità esclusiva dell'utente. L'autore non garantisce che le funzioni contenute nell'applicativo siano idonee a soddisfare le esigenze dell'utente, né garantisce che i difetti riscontrati nell'applicativo vengano corretti. Non garantisce altresì circa i danni od i benefici ottenuti dalla utilizzazione del software.

L'autore è espressamente sollevato da ogni responsabilità per qualsiasi danno, diretto od indiretto, di ogni genere e specie derivante dall'uso del software, compreso, tra l'altro, quello improprio, erroneo o fraudolento. L'intero rischio circa la qualità e le prestazioni dell'applicativo è a carico dell'utente ed i risultati devono essere verificati personalmente.

In nessun caso il limite di responsabilità a carico dell'autore potrà superare l'importo per l'acquisto dell'applicativo.

Per tutto quanto sopra non indicato, il presente contratto è regolato dalle leggi sul copyright, sul diritto d'autore e dalle altre leggi nazionali applicabili. Per qualsiasi controversia fra le parti sarà competente in via esclusiva il Foro di Palermo.

APPENDICE 1 – Valori indicativi proprietà fisico-meccaniche terreni

Valori indicativi del peso dell'unità di volume (espressi in kg/m³)

Terreno	γ
Ghiaia asciutta	1800-2000
Ghiaia umida	1900-2100
Sabbia asciutta compatta	1700-2000
Sabbia umida compatta	1900-2100
Sabbia asciutta sciolta	1500-1800
Sabbia umida sciolta	1600-1900
Argilla sabbiosa	1800-2200
Argilla dura	2000-2100
Argilla semisolida	1900-1950
Argilla molle	1800-1850

Valori indicativi dell'angolo di resistenza al taglio (espressi in °)

Terreno	ϕ'
Ghiaia compatta	35
Ghiaia sciolta	33-35
Sabbia compatta	35-45
Sabbia sciolta	25-35
Marna sabbiosa	22-29
Marna grassa	16-22
Argilla grassa	5-30
Argilla sabbiosa	16-28
Limo	20-27

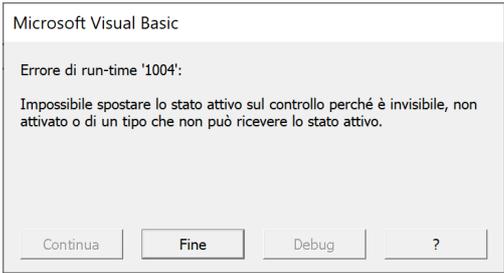
Valori indicativi della coesione drenata (espressi in kg/m²)

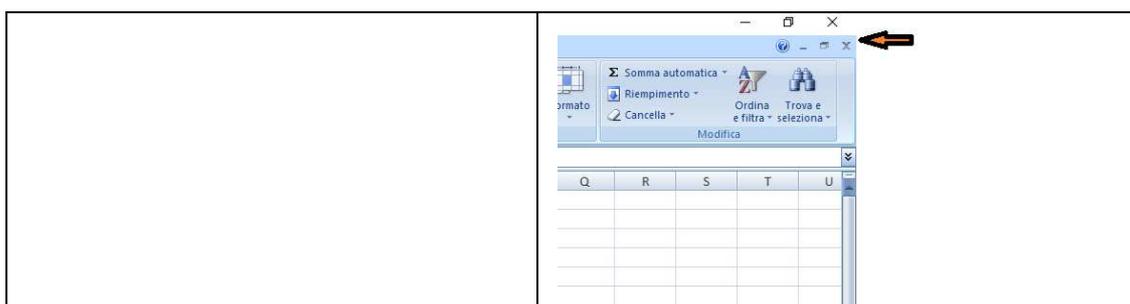
Terreno	c
Argilla sabbiosa	2000
Argilla molle	1000
Argilla plastica	2500
Argilla semisolida	5000
Argilla solida	10000
Argilla tenace	2000-10000
Limo compatto	1000

Valori indicativi della costante di Winkler (espressi in kg/cm³)

Terreno	k_w
Sabbia sciolta	0,5-1,60
Sabbia mediamente compatta	1-8
Sabbia compatta	6,5-13
Sabbia argillosa mediamente compatta	2,5-5
Sabbia limosa mediamente compatta	2,5-5
Sabbia e ghiaia compatta	10-30
Argilla	1,2-10

APPENDICE 2 – Gestione errori e requisiti di sistema

Tipo di errore	Soluzione
Non vengono calcolati alcuni parametri - errore di run-time 13 (<i>Tipo non corrispondente</i>)	<p>E' necessario verificare che usate, da sistema operativo, come separatore decimale la virgola e come separatore di migliaia il punto. Se è attiva l'impostazione inversa si può generare questo tipo di errore. Per verificare i separatori andare in Opzioni Internazionali e della lingua del Pannello di controllo di Windows.</p> <p>Se il problema persiste, aprire Excel (nelle versioni precedenti alla 2007 cercare il menù Opzioni), fare clic sul pulsante Microsoft Office  (in alto a sinistra), quindi su Opzioni di Excel. In Opzioni di modifica nella categoria Impostazioni avanzate selezionare la casella di controllo Utilizza separatori di sistema.</p>
Non si apre la Relazione di calcolo dal menù Visualizza	<p>Controllare che il modello (file .doc) della relazione di calcolo sia presente nella stessa cartella che contiene il software e che abbia il nome di "Relazione di calcolo Pali.Az".</p> <p>Se il problema persiste, esso può dipendere dalla versione e dai componenti installati del pacchetto Office di Microsoft nel pc dell'utente.</p> <p>In ogni caso la Relazione di calcolo che si genera premendo nel relativo link del software è la stessa di quella in formato ".doc" che viene inviata all'utente al momento dell'acquisto. Pertanto, anche se non si apre dal link del software <i>Pali.Az</i>, si può lo stesso utilizzarla accedendo direttamente al file Word.</p>
<p>Messaggio di errore 1004</p> 	<p>Questo tipo di errore si può verificare alla prima installazione. In genere basta chiudere e riaprire il file.</p> <p>Controllare anche se gli identificativi delle colonne dei fogli di Excel sono rappresentati da numeri. Se è così, occorre ripristinare la configurazione di default in cui le colonne sono identificate con le lettere A, B, C, (File>Opzioni>Formule> togliere la spunta in <i>Stile di riferimento R1C1</i>).</p>
Alla chiusura del software viene richiesta una password di Visual Basic	<p>La password non va inserita e si deve cliccare sul bottone chiudi per diverse volte consecutive.</p> <p>Per evitare la richiesta di password si provi a chiudere prima il file e poi Excel (con riferimento alle due X in alto a destra, cliccare prima sulla X inferiore e poi su quella superiore):</p>



Requisiti di sistema

Microsoft Excel® 2019, 2016, 2013, 2010, 2007, 2003, 2000, 1997 o Office 365 con Excel, o versioni successive.

Microsoft Windows® 10, 8.1, 8, Windows 7, Vista, XP SP3, Server 2008, Server 2003, o versioni successive. Su sistema operativo **Apple macOS** è necessaria una virtual machine (per esempio *BootCamp* o *Desktop Parallels*) che consenta di eseguire Windows e Microsoft Excel

256 MB RAM (Raccomandati: 512 MB RAM o più)

Hard Disk: almeno 100 MB di spazio libero.

APPENDICE 3 – Novità ultime versioni del software

Versione 2.0

- aggiornamento alle **NTC 2018** e alla relativa **Circolare 2019**
- **terreno stratificato**
- nei terreni a grana fina, verifica anche a lungo termine in condizioni drenate
- carico applicato in testa al palo avente componente anche variabile, oltre che permanente
- relazione di calcolo in formato “.doc” modificabile

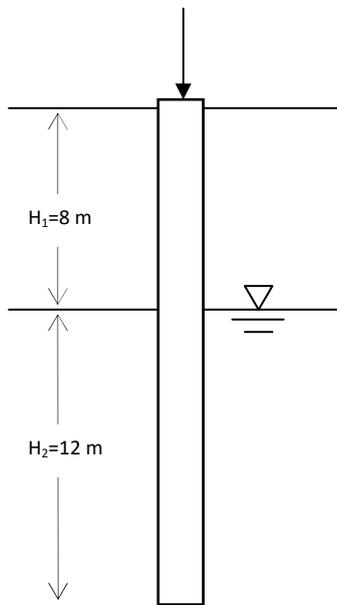
Versione 3.0

- **micropali** (anima resistente in profilato di acciaio) e **pali in acciaio**
- coesistenza di terreni in condizioni non drenate e in condizioni drenate (ad esempio terreno a grana grossa che poggia su terreno di argilloso saturo)
- **metodo Bustamante e Doix** per il calcolo carico limite assiale dei micropali
- distinzione input per le **combinazioni di carico allo SLU** (anche più di una) e le **combinazioni di carico allo SLE** (anche più di una). Prima si poteva inserire una sola combinazione di carico
- vincolo verticale alla base del palo cedevole elasticamente (**calcolo dei cedimenti verticali**)
- calcolo agli elementi finiti con **analisi non-lineare** (molle del terreno, presenti sia a destra che a sinistra del palo, di **tipo elastico-perfettamente plastico**, soggette a riposo a una precompressione iniziale data dalla spinta a riposo del terreno e che raggiungono per decompressione il valore della spinta attiva e per compressione il valore della spinta passiva, arrivando quindi, superati certi limiti, a plasticizzazione)
- **calcolo di verifica** delle armature dei pali in c.a. (pali esistenti o di cui si vuole modificare l'armatura di calcolo)
- **verifiche allo SLE (fessurazione e tensioni di esercizio)** nei pali in C.A.
- **disegno esecutivo pali in c.a. e micropali**, anche in **dxf**
- **computo metrico** dei materiali
- **Manuale di Validazione** del software

APPENDICE 4 – Esempi svolti

1) PALO CIRCOLARE IN C.A. TRIVELLATO IN TERRENO OMOGENEO INCOERENTE CON PRESENZA DI FALDA

Calcolare il carico limite, per azioni assiali di compressione, del seguente palo di fondazione in cemento armato trivellato in terreno sabbioso (diametro palo=0,8 m):



Le caratteristiche del terreno omogeneo ($N_{str}=1$) di fondazione sono (una sola verticale di indagine):

- ✓ peso dell'unità di volume = 1.800 kg/mc
- ✓ peso saturo dell'unità di volume = 2.000 kg/mc
- ✓ angolo di resistenza al taglio = 30°
- ✓ coesione drenata = 0 kg/mq
- ✓ adesione = 0 kg/mq
- ✓ coefficiente μ di attrito fra palo e terreno = 0,58
- ✓ coefficiente empirico $k = 1$
- ✓ costante di Winkler (costante con la profondità) $k_h=A_s=10 \text{ kg/cm}^3$ ($B_s=0 \text{ kg/cm}^3$)

Materiale costituente il palo:

- ✓ calcestruzzo classe $R_{ck} = 250 \text{ kg/cm}^2$
- ✓ peso dell'unità di volume C.A. = 2.500 kg/mc
- ✓ acciaio Fe B 38 k

Completano i parametri di input:

- ✓ normativa di riferimento: DM 11/03/1988;
- ✓ palo libero di ruotare in testa;
- ✓ una combinazione di carico SLU (valori nulli di N, T e M)
- ✓ barre di acciaio = diametro 16 mm;

Pali.Az 3.0 <i>(Ing. Ciro Azzara)</i>	Manuale d'uso	Pag. 37 di 46
---	----------------------	---------------

- ✓ copriferro = 3 cm;
- ✓ interferro minimo = 4 cm;
- ✓ interasse massimo tra le barre longitudinali a flessione = 40 cm;
- ✓ calcolo di progetto delle armature
- ✓ diametro armatura trasversale a taglio = 8 mm
- ✓ staffe a spirale
- ✓ angolo di inclinazione fessure per rottura a taglio $\theta=45^\circ$
- ✓ peso dell'unità di volume dell'acqua = 1.000 kg/m³
- ✓ lunghezza media elemento finito = 90 cm
- ✓ vincolo alla base del palo: appoggio fisso
- ✓ analisi lineare

Fatte le scelte di progetto è possibile eseguire il calcolo del palo per mezzo di *Pali.Az*.

I principali risultati forniti dal software sono i seguenti.

DATI PALO

perimetro sezione = 251,33 cm
 area sezione = 5026,55 cmq
 volume palo = 10,05 mc
 peso del palo $W_p = 25.132,74$ kg
 rapporto $L/D = 25$

CARICO LIMITE PER CARICHI ASSIALI

Azione di progetto

$E_d = N \cdot 0 + W_p = 25.132,74$ kg

Resistenza di progetto

Verticale di indagine n° 1 ()

Parametri geotecnici di progetto

coesione di calcolo = 0 kg/mq

angolo di resistenza al taglio di calcolo = 30°

Resistenza alla punta

fattore N_q (Berezantzev) = 19,39

fattore $N_c = 31,86$

tensione litostatica verticale totale alla profondità L $s_{VL} = 3,84$ kg/cm²

pressione neutra alla profondità L $u_L = 1,20$ kg/cm²

tensione litostatica verticale efficace alla profondità L $s'_{VL} = 2,64$ kg/cm²

Resistenza unitaria alla punta $p = 51,20$ kg/cm²

Resistenza alla punta $P_{max} = 257.369,41$ kg

Resistenza laterale

Resistenza laterale $S_{max} = 440.808,17$ kg

Resistenza alla punta e laterale

Resistenza alla punta $P_{max} = 257.369,41$ kg

Resistenza laterale $S_{max} = 440.808,17$ kg

Carico limite per carichi assiali di compressione

$Q_{lim} = P_{max} + S_{max} = 698.177,58$ kg

Carico limite di sfilamento per carichi assiali di trazione

$Q_{limt} = S_{max} = 440.808,17$ kg

Verifica al carico limite per carichi assiali di compressione

coeff. di sicurezza (non minore di 2,5) = 27,78

CARICO LIMITE PER CARICHI TRASVERSALI

Momento resistente o di plasticizzazione del palo $M_{yR} = 27.971,05 \text{ kg} \cdot \text{m}$

Azione di progetto

$E_d = T_{y0} = 0,00 \text{ kg}$

Resistenza di progetto

Verticale di indagine n° 1 ()

angolo di resistenza al taglio di calcolo = 30°

coefficiente di spinta passiva $K_p = 3$

reazione del terreno alla profondità L $p(L) = 259.200,00 \text{ kg/m}$

Meccanismo di rottura di "palo lungo"

profondità f in cui si forma la cerniera plastica = 186,38 cm

Carico limite trasversale $T_{lim} = 22.510,86 \text{ kg}$

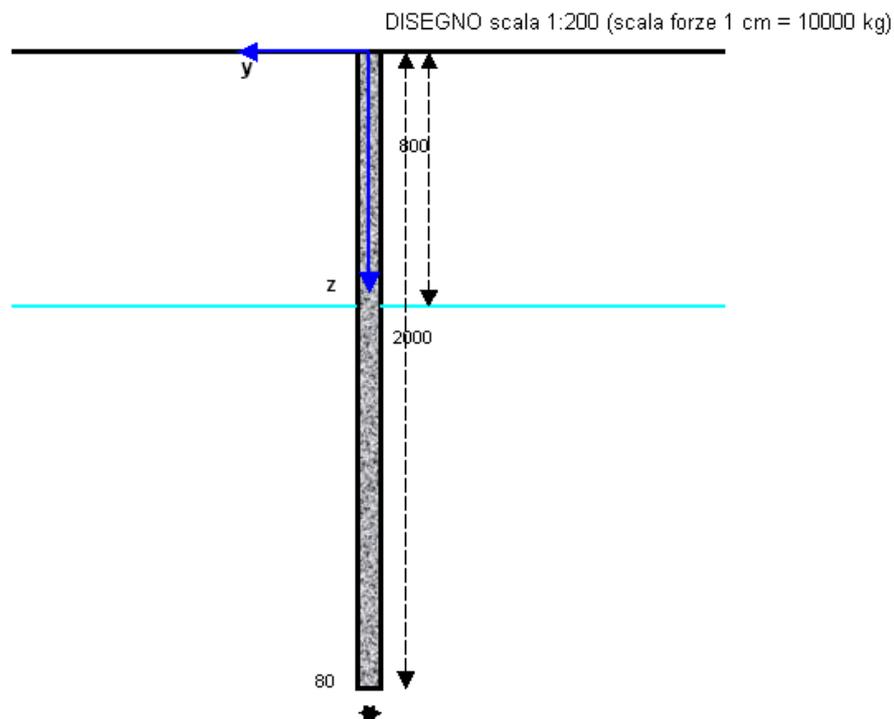
Carico limite trasversale

$T_{lim} = 22.510,86 \text{ kg}$

Verifica al carico limite per carichi trasversali

VERIFICA OK

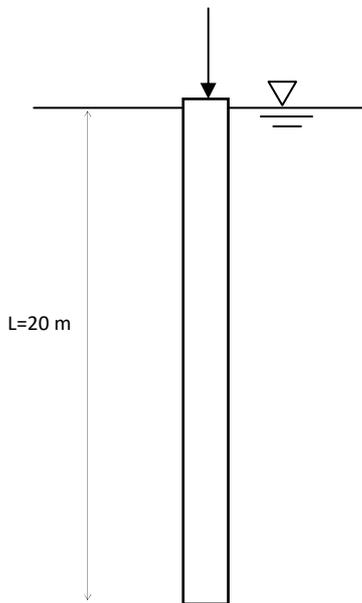
Di seguito si riporta il disegno del palo-terreno restituito dal software.



Nell'esempio visto, nel caso in cui il terreno è completamente saturo (falda al livello di campagna, $z_w=0$) il carico limite assiale si riduce da 698 a 486 tonn. Se invece la falda è assente il carico limite assiale aumenta fino a 876 tonn.

2) PALO CIRCOLARE IN C.A. IN ARGILLA OMOGENEA

Calcolare il carico limite, per azioni assiali di compressione, del seguente palo di fondazione in cemento armato trivellato in terreno argilloso saturo (diametro palo = 0,8 m):



Le caratteristiche del terreno (omogeneo) di fondazione sono (una sola verticale di indagine):

- ✓ peso dell'unità di volume = 1.800 kg/mc
- ✓ peso saturo dell'unità di volume = 2.000 kg/mc
- ✓ angolo di resistenza al taglio drenato = 25°
- ✓ coesione drenata = 1.000 kg/mq
- ✓ coesione non drenata = 10.000 kg/mq
- ✓ adesione=0 kg/mq; coefficiente μ di attrito fra palo e terreno=0,58; coefficiente empirico $k = 1$
- ✓ coefficiente alfa = 0,5
- ✓ costante di Winkler (costante con la profondità) $k_h = 10\text{ kg/cm}^3$.

Materiale costituente il palo:

- ✓ calcestruzzo classe $R_{ck} = 250\text{ kg/cm}^2$
- ✓ peso dell'unità di volume C.A. = 2.500 kg/mc
- ✓ acciaio Fe B 38 k

Completano i parametri di input:

- ✓ normativa di riferimento: DM 11/03/1988;
- ✓ palo libero di ruotare in testa;
- ✓ una combinazione di carico SLU (valori nulli di N, T e M)
- ✓ barre di acciaio = diametro 16 mm;
- ✓ copriferro = 3 cm;
- ✓ interfero minimo = 4 cm;

Pali.Az 3.0 <i>(Ing. Ciro Azzara)</i>	Manuale d'uso	Pag. 40 di 46
---	----------------------	---------------

- ✓ interasse massimo tra le barre longitudinali a flessione = 40 cm;
- ✓ calcolo di progetto delle armature
- ✓ diametro armatura trasversale a taglio = 8 mm
- ✓ staffe a spirale
- ✓ angolo di inclinazione fessure per rottura a taglio $\theta=45^\circ$
- ✓ peso dell'unità di volume dell'acqua = 1.000 kg/m³
- ✓ lunghezza media elemento finito = 90 cm
- ✓ vincolo alla base del palo: appoggio fisso
- ✓ analisi lineare.

Fatte le scelte di progetto è possibile eseguire il calcolo del palo per mezzo di *Pali.Az*.
I risultati forniti dal software sul carico limite assiale sono i seguenti:

CARICO LIMITE PER CARICHI ASSIALI

VERIFICA A BREVE TERMINE IN CONDIZIONI NON DRENATE

Azione di progetto

$E_d = N_x0 + W_p = 25.132,74 \text{ kg}$

Resistenza di progetto

Verticale di indagine n° 1 ()

Parametri geotecnici di progetto

coesione di calcolo = 10000 kg/mq

angolo di resistenza al taglio di calcolo = 0°

Resistenza alla punta

fattore $N_q = 1$

fattore $N_c = 9$

tensione litostatica verticale totale alla profondità L $s_{VL} = 4,00 \text{ kg/cm}^2$

Resistenza unitaria alla punta $p = 13,00 \text{ kg/cm}^2$

Resistenza alla punta $P_{max} = 65.345,13 \text{ kg}$

Resistenza laterale

Resistenza laterale $S_{max} = 251.327,41 \text{ kg}$

Resistenza alla punta e laterale

Resistenza alla punta $P_{max} = 65.345,13 \text{ kg}$

Resistenza laterale $S_{max} = 251.327,41 \text{ kg}$

Carico limite per carichi assiali di compressione

$Q_{lim} = P_{max} + S_{max} = 316.672,54 \text{ kg}$

Carico limite di sfilamento per carichi assiali di trazione

$Q_{limt} = S_{max} = 251.327,41 \text{ kg}$

Verifica al carico limite per carichi assiali di compressione

coeff. di sicurezza (non minore di 2,5) = 12,6

VERIFICA A LUNGO TERMINE IN CONDIZIONI DRENATE

Azione di progetto

$E_d = N_x0g + N_x0q + W_p = 25.132,74 \text{ kg}$

Resistenza di progetto

Verticale di indagine n° 1 ()

Parametri geotecnici di progetto

coesione, $c_d = 1000 \text{ kg/m}^2$

angolo di resistenza al taglio, $F_{i_d} = 25^\circ$

Resistenza alla punta

Pali.Az 3.0 (Ing. Ciro Azzara)	Manuale d'uso	Pag. 41 di 46
--	----------------------	---------------

fattore N_q (Berezantzev), $N_q=7,35$

fattore $N_c=13,62$

tensione litostatica verticale totale alla profondità L , $sVL=40.000,00$ kg/mq

pressione neutra alla profondità L , $uL=20.000,00$ kg/mq

tensione litostatica verticale efficace alla profondità L , $s'VL=20.000,00$ kg/mq

Resistenza unitaria alla punta, $p=16,07$ kg/cmq

Resistenza alla punta, $P_{max}=80.759,74$ kg

Resistenza laterale

Resistenza laterale, $S_{max}=291.539,80$ kg

Resistenza alla punta e laterale

Resistenza alla punta, $P_{max}=80.759,74$ kg

Resistenza laterale, $S_{max}=291.539,80$ kg

Carico limite per carichi assiali di compressione

$Q_{lim}=P_{max}+S_{max}=372.299,54$ kg

Carico limite di sfilamento per carichi assiali di trazione

$Q_{limt}=S_{max}=291.539,80$ kg

Verifica al carico limite per carichi assiali di compressione

Verifica OK

coeff. di sicurezza (non minore di 2,5), $Eta=Q_{lim}/Ed=14,81$

3) PALO INCASTRATO IN SOMMITÀ SOGGETTO A CARICO TRASVERSALE IN TERRENO A GRANA FINA

Calcolare il carico limite per azioni orizzontali del seguente palo di fondazione in cemento armato trivellato in terreno argilloso saturo omogeneo (diametro palo = 1,0 m), effettuando la verifica a carico limite in base alle NTC 2008 (forza orizzontale applicata pari a 600 kN).

Calcolare altresì lo spostamento massimo del palo (spostamento ammissibile 2 cm).

Le caratteristiche del terreno di fondazione sono (una sola verticale di indagine):

- ✓ peso dell'unità di volume = 18 kN/m³
- ✓ peso saturo dell'unità di volume = 20 kN/m³
- ✓ angolo di resistenza al taglio in condizioni drenate = 25°
- ✓ coesione drenata = 10 kPa = 10 kN/m²
- ✓ coesione non drenata = 100 kPa = 100 kN/m²
- ✓ adesione= 0 kg/mq; coefficiente μ di attrito fra palo e terreno= $0,58$; coefficiente empirico $k = 1$
- ✓ coefficiente alfa = $0,7$
- ✓ costante di Winkler (costante con la profondità) $k_h = 6.700$ kN/m³ = $6,7$ N/cm³.

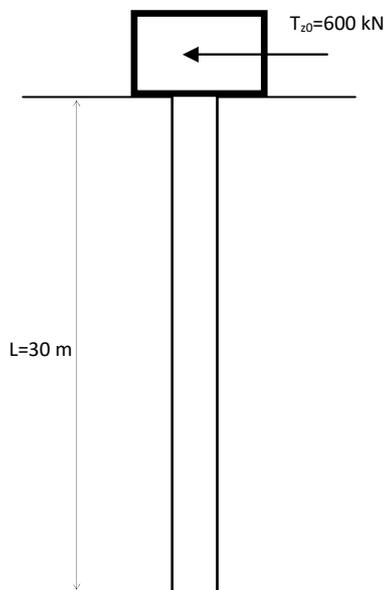
Materiale costituente il palo:

- ✓ calcestruzzo classe $R_{ck} = 25$ N/mm²
- ✓ acciaio B450C

Completano i parametri di input:

- ✓ palo a rotazione in testa impedita

- ✓ barre di acciaio = diametro 26 mm
- ✓ copriferro = 3 cm
- ✓ interferro minimo = 4 cm
- ✓ interasse massimo tra le barre longitudinali a flessione = 40 cm
- ✓ diametro armatura trasversale a taglio = 8 mm
- ✓ staffe a spirale
- ✓ angolo di inclinazione fessure per rottura a taglio $\theta=45^\circ$
- ✓ Approccio 1
- ✓ peso dell'unità di volume dell'acqua = 1.000 kg/m^3
- ✓ lunghezza media elemento finito = 1,0 m
- ✓ vincolo alla base del palo: appoggio fisso
- ✓ analisi lineare.



I risultati forniti dal software sono i seguenti:

A) Verifica a breve termine in condizioni non drenate

CARICO LIMITE PER CARICHI TRASVERSALI

Momento resistente o di plasticizzazione del palo, $M_{yR}=1.279,21 \text{ kN}\cdot\text{m}$

APPROCCIO 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)

Azione di progetto

$E_d=gG_s\cdot T_{z0}+gQ_s\cdot T_{z0q}=780,00 \text{ kN}$

Resistenza di progetto

Verticale di indagine n° 1 ()

coesione non drenata di progetto, $C_d=100 \text{ kN/mq}$

reazione del sottosuolo, $p=900,00 \text{ kN/m}$

Meccanismo di rottura di "palo lungo"

lunghezza $f=1,32 \text{ m}$

Carico limite trasversale, $T_{lim}=1.185,28 \text{ kN}$

Pali.Az 3.0 (Ing. Ciro Azzara)	Manuale d'uso	Pag. 43 di 46
--	----------------------	---------------

Carico limite trasversale di progetto

valore medio, $T_{lim_med}=1.185,28$ kN

valore minimo, $T_{lim_min}=1.185,28$ kN

fattore di correlazione $\chi_{i3}=1,7$

fattore di correlazione $\chi_{i4}=1,7$

Carico limite trasversale (valore caratteristico), $T_{lim_k}=697,23$ kN

Carico limite trasversale di progetto, $T_{lim_d}=697,23$ kN

Verifica al carico limite per carichi trasversali

Non verifica: l'azione di progetto supera la resistenza di progetto

APPROCCIO 1 - Combinazione 2 (A2+M1+R2)

Azione di progetto

$E_d=gG_s*Tz0g+gQ_s*Tz0q=600,00$ kN

Resistenza di progetto

Verticale di indagine n° 1 ()

coesione non drenata di progetto, $C_d=100$ kN/mq

reazione del sottosuolo, $p=900,00$ kN/m

Meccanismo di rottura di "palo lungo"

lunghezza $f=1,32$ m

Carico limite trasversale, $T_{lim}=1.185,28$ kN

Carico limite trasversale di progetto

valore medio, $T_{lim_med}=1.185,28$ kN

valore minimo, $T_{lim_min}=1.185,28$ kN

fattore di correlazione $\chi_{i3}=1,7$

fattore di correlazione $\chi_{i4}=1,7$

Carico limite trasversale (valore caratteristico), $T_{lim_k}=697,23$ kN

Carico limite trasversale di progetto, $T_{lim_d}=435,77$ kN

Verifica al carico limite per carichi trasversali

Non verifica: l'azione di progetto supera la resistenza di progetto

B) Verifica a lungo termine in condizioni drenate

CARICO LIMITE PER CARICHI TRASVERSALI

Momento resistente o di plasticizzazione del palo, $M_{yR}=1.279,21$ kN*m

APPROCCIO 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)

Azione di progetto

$E_d=gG_s*Tz0g+gQ_s*Tz0q=780,00$ kN

Resistenza di progetto

Verticale di indagine n° 1 ()

angolo di resistenza al taglio di progetto, $F_{i_d}=25^\circ$

coefficiente di spinta passiva, $K_p=2,463913$

reazione orizzontale del terreno alla profondità L, $p(L)=3.991,54$ kN/m

Meccanismo di rottura di "palo lungo"

profondità f in cui si forma la seconda cerniera plastica, $f=3,86$ m

Pali.Az 3.0 (Ing. <i>Ciro Azzara</i>)	Manuale d'uso	Pag. 44 di 46
--	----------------------	---------------

Carico limite trasversale, $T_{lim}=993,20$ kN

Carico limite trasversale di progetto

valore medio, $T_{lim_med}=993,20$ kN

valore minimo, $T_{lim_min}=993,20$ kN

fattore di correlazione $\chi_{s3}=1,7$

fattore di correlazione $\chi_{s4}=1,7$

Carico limite trasversale (valore caratteristico), $T_{lim_k}=584,24$ kN

Carico limite trasversale di progetto, $T_{lim_d}=584,24$ kN

Verifica al carico limite per carichi trasversali

Non verifica: l'azione di progetto supera la resistenza di progetto

APPROCCIO 1 - Combinazione 2 (A2+M1+R2)

Azione di progetto

$E_d = gG_s * T_{z0g} + gQ_s * T_{z0q} = 600,00$ kN

Resistenza di progetto

Verticale di indagine n° 1 ()

angolo di resistenza al taglio di progetto, $F_{i_d}=25^\circ$

coefficiente di spinta passiva, $K_p=2,463913$

reazione orizzontale del terreno alla profondità L, $p(L)=3.991,54$ kN/m

Meccanismo di rottura di "palo lungo"

profondità f in cui si forma la seconda cerniera plastica, $f=3,86$ m

Carico limite trasversale, $T_{lim}=993,20$ kN

Carico limite trasversale di progetto

valore medio, $T_{lim_med}=993,20$ kN

valore minimo, $T_{lim_min}=993,20$ kN

fattore di correlazione $\chi_{s3}=1,7$

fattore di correlazione $\chi_{s4}=1,7$

Carico limite trasversale (valore caratteristico), $T_{lim_k}=584,24$ kN

Carico limite trasversale di progetto, $T_{lim_d}=365,15$ kN

Verifica al carico limite per carichi trasversali

Non verifica: l'azione di progetto supera la resistenza di progetto

Il carico limite trasversale in quest'ultima condizione è pari a 993,20 kN. La rottura a carico limite orizzontale avviene con il meccanismo di "palo lungo" con formazione di due cerniere plastiche, alla sezione di incastro ed alla sezione a profondità $z_c = f + 1,5 D = 3,86 + 1,5 \cdot 5 = 11,56$ m. La verifica a carico limite non risulta soddisfatta in presenza dei fattori di correlazione χ_{si} (tengono conto della numerosità delle verticali di indagini): ove questi fattori non venissero considerati (valori pari all'unità) la verifica risulterebbe soddisfatta.

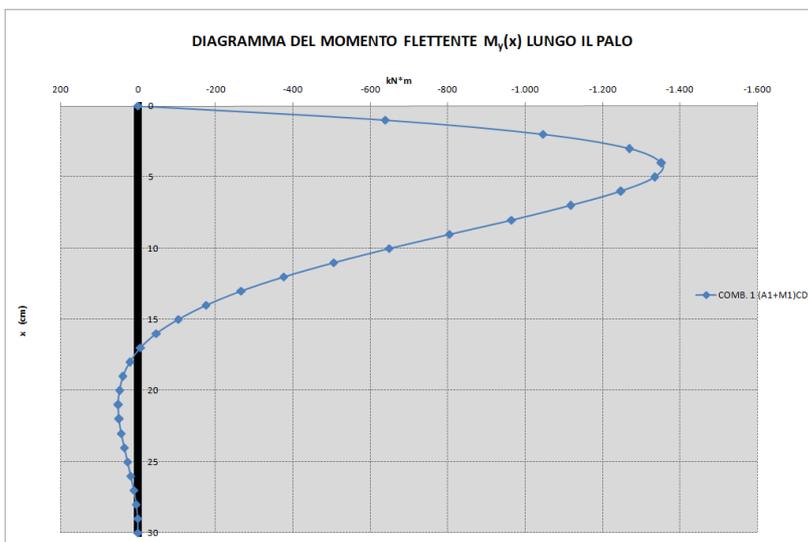
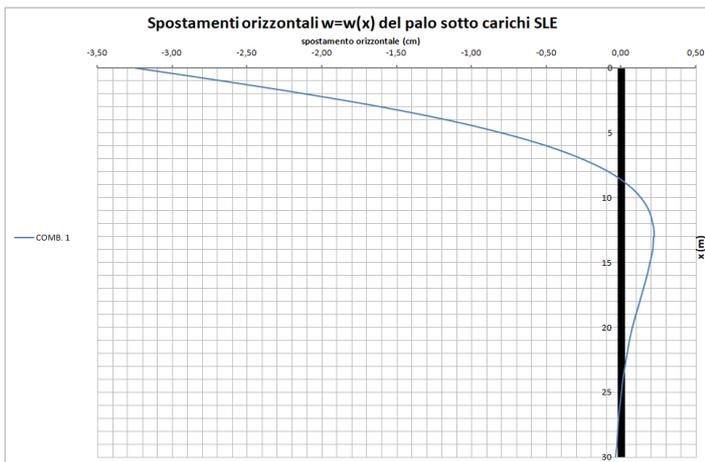
SPOSTAMENTI NODALI (calcolo FEM)

w = spostamento orizzontale (lungo l'asse globale X, coincidente con l'asse locale z)

u = spostamento verticale (lungo l'asse globale Y, coincidente con l'asse locale x)

sez./nodo	x (m)	w (cm)	u (cm)	rot. (rad)
1	0	-3,25	0,04	-0,0059
2	1	-2,66	0,04	-0,0058
3	2	-2,11	0,04	-0,0053
4	3	-1,6	0,04	-0,0047
5	4	-1,16	0,04	-0,004
6	5	-0,8	0,04	-0,0033
7	6	-0,5	0,04	-0,0027
8	7	-0,26	0,04	-0,0021
9	8	-0,08	0,03	-0,0015
10	9	0,05	0,03	-0,0011

Lo spostamento massimo orizzontale del palo è pari a 3,25 cm, superiore al valore ammissibile, per cui la verifica a SLE (Stato Limite di Esercizio) non risulta soddisfatta.



Bigliografia

- [1] Cestelli Guidi C. (1975) – *Geotecnica e Tecnica delle Fondazioni* – Hoepli, Milano
- [2] Croce A. (1980) – *Appunti di Geotecnica* – L'Ateneo, Napoli
- [3] Jappelli R. (1984) – *Corso di Geotecnica, Tavole sinottiche* - Università di Palermo
- [4] Viggiani C. (1996) - *Fondazioni*. CUEN, Napoli
- [5] D.M. 11/03/1988 – *Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione;*
- [6] Circolare Min. LL.PP. 24/09/1988, n. 30483 – *Legge 2 febbraio 1974 – D.M. 11 marzo 1988. Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione. Istruzioni per l'applicazione;*
- [7] D.M. 11/02/1992 – *Norme tecniche per l'esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche*
- [8] D.M. 14/01/2008 – *Norme tecniche per le costruzioni (NTC)*
- [9] Circolare 02/02/2009, n. 617 – *Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008*
- [10] D.M. 17/01/2018 – *Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"*
- [11] Circ. 21/01/2019, n. 7 C.S.LL.PP. – *Istruzioni per l'applicazione dell'"Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 17 gennaio 2018.*

Data revisione Manuale d'uso: **Gennaio 2022**