

Validazione del codice di calcolo

Informativa sull'affidabilità dei codici di calcolo D.M. 17-01-2018 paragrafo 10.2.

Sono stati forniti degli esempi di calcolo, in allegato a questo documento, al fine di verificare la validità delle procedure di calcolo ed effettuare le procedure di controllo con altri strumenti di calcolo.

I software **GeoStru** sono dotati di sistemi di controllo dei dati di input e di output molto sofisticati i quali sono in grado di rilevare errori gravi tali da non consentire le corrette elaborazioni.

PARATIE/SPW

Versione: 2021/2022

1 – Individuazione dei campi di impiego del programma	3
2 – Descrizioni delle basi teoriche e sperimentazione del programma	3
2.1 - Calcolo della spinta attiva con Coulomb.	3
2.2 - Calcolo della spinta attiva con Rankine.	4
2.3 - Calcolo della spinta attiva con Mononobe & Okabe	4
2.4 - Effetto dovuto alla coesione	4
2.5 - Carico uniforme sul terrapieno.	5
2.6 - Spinta attiva in condizioni sismiche	5
2.7 - Spinta idrostatica	6
2.8 - Resistenza passiva	6
3 – Carico limite verticale pali.	7
3.1 - Portanza di punta Metodo di Berezantzev	7
3.1 – Resistenza del fusto	7
4 – Stima profondità di infissione e Calcolo delle sollecitazioni	8
4.1 – Metodo dell’equilibrio limite (LEM)	8
4.1.a - Paratia a sbalzo: calcolo della profondità d’infissione limite	8
4.1.b- Coefficiente di sicurezza sulla resistenza passiva	9
4.1.c - Paratia tirantata ad estremo libero: calcolo della profondità d’infissione limite	9
4.1.d - Coefficiente di sicurezza sulle resistenze passive	9
4.1.e - Paratia tirantata ad estremo fisso: calcolo della profondità d’infissione limite	9
4.2 - Metodo ad elementi finiti (FEM)	10
4.2.a - Calcolo del modulo di rigidezza Ks del terreno	10
4.2.b - Tiranti	11
4.2.c - Sifonamento	11
5 – Verifica delle sezioni e calcolo armature	11
6 – Esempi di calcolo	13
6.1 – Ex. 13.2- Pag. 196 Collaselli [FILE: F. COLLESELLI M.SORANZO_ Pag 196 Ex. 13.2.spw]	13
6.2 – Ex. 13.3 - Pag. 198 Collaselli [FILE: F. COLLESELLI M.SORANZO_ Pag 199 Ex. 13.3.spw]	13
6.3 – Ex. 13.1 - Bowles [FILE: Bowles Ex. 13.1 Pag. 649.spw]	13
Conclusioni	14

1 – Individuazione dei campi di impiego del programma.

Paratie/SPW è un programma per l'analisi di paratie a sbalzo o ancorate. Esegue il calcolo geotecnico utilizzando, a scelta dell'utente, le teorie di Coulomb, Rankine, Mononobe ed Okabe e Caquot-Kerisel ed effettua tutte le verifiche prescritte dalla normativa vigente, tra cui quella di stabilità globale, anche in condizioni sismiche.

Il calcolo strutturale esegue il dimensionamento delle armature agli stati limiti ultimi (SLU).

2 – Descrizioni delle basi teoriche e sperimentazione del programma.

2.1 - Calcolo della spinta attiva con Coulomb.

Il calcolo della spinta attiva con il metodo di Coulomb è basato sullo studio dell'equilibrio limite globale del sistema formato dalla parete e dal prisma di terreno omogeneo retrostante l'opera e coinvolto nella rottura nell'ipotesi di parete ruvida.

Per terreno omogeneo ed asciutto il diagramma delle pressioni si presenta lineare con distribuzione:

$$P_t = k_a \cdot \gamma_t \cdot z$$

La spinta S_t è applicata ad $1/3 H$ di valore

$$S_t = \frac{1}{2} k_a \cdot \gamma_t \cdot H^2$$

Avendo indicato con:

$$k_a = \frac{\sin^2(\phi + \beta)}{\sin^2 \beta \times \sin(\beta - \delta) \times \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \times \sin(\phi - \varepsilon)}{\sin(\beta - \delta) \times \sin(\beta + \varepsilon)}} \right]^2}$$

Valori limite di k_a :

$\delta < (\beta - \phi - \varepsilon)$ secondo Muller-Breslau

γ_t = Peso unità di volume del terreno;

β = Inclinazione della parete interna rispetto al piano orizzontale passante per il piede;

ϕ = Angolo di resistenza al taglio del terreno;

δ = Angolo di attrito terra-muro;

ε = Inclinazione del piano campagna rispetto al piano orizzontale, positiva se antioraria;

H = Altezza della parete.

2.2 - Calcolo della spinta attiva con Rankine

Se $\varepsilon = \delta = 0$ e $\beta = 90^\circ$ (parete verticale liscia e terrapieno con superficie orizzontale) la spinta St si semplifica nella forma:

$$k_a = \frac{\gamma \cdot H^2}{2} \frac{(1 - \sin \phi)}{(1 + \sin \phi)} = \frac{\gamma \cdot H^2}{2} \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right)$$

che coincide con l'equazione di Rankine per il calcolo della spinta attiva del terreno con terrapieno orizzontale. In effetti Rankine adottò le stesse ipotesi fatte da Coulomb, ad eccezione del fatto che trascurò l'attrito terra-muro e la presenza di coesione. Nella sua formulazione generale l'espressione di k_a di Rankine si presenta come segue:

$$k_a = \cos \varepsilon \frac{\sqrt{\cos^2 \varepsilon - \cos^2 \phi}}{\sqrt{\cos^2 \varepsilon - \cos^2 \phi}}$$

2.2.2 - Calcolo della spinta attiva con Mononobe & Okabe

Il calcolo della spinta attiva con il metodo di Mononobe & Okabe riguarda la valutazione della spinta in condizioni sismiche con il metodo pseudo-statico. Esso è basato sullo studio dell'equilibrio limite globale del sistema formato da opera e prisma di terreno omogeneo retrostante l'opera e coinvolto nella rottura in una configurazione fittizia di calcolo nella quale l'angolo di inclinazione del piano campagna rispetto al piano orizzontale, e l'angolo \cdot di inclinazione della parete interna rispetto al piano orizzontale passante per il piede, vengono aumentati di una quantità θ :

$$\tan \theta = \frac{k_h}{(1 \pm k_v)}$$

con k_h coefficiente sismico orizzontale e k_v verticale.

2.4 - Effetto dovuto alla coesione

La coesione induce delle pressioni negative costanti pari a:

$$P_c = -2 \cdot c \cdot \sqrt{k_a}$$

on essendo possibile stabilire a priori quale sia il decremento indotto nella spinta per effetto della coesione, è stata calcolata un'altezza critica Z_c come segue:

$$Z_c = \frac{2 \cdot c}{\gamma} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_a}} - \frac{Q \cdot \frac{\sin \beta}{\sin(\beta + \varepsilon)}}{\gamma}$$

dove

Q = Carico agente sul terrapieno;

Se $Z_c < 0$ è possibile sovrapporre direttamente gli effetti, con decremento pari a:

$$S_c = P_c \cdot H$$

con punto di applicazione pari a $H/2$.

2.5 - Carico uniforme sul terrapieno

Un carico Q , uniformemente distribuito sul piano campagna induce delle pressioni costanti pari a:

$$P_c = k_a \cdot Q \cdot \frac{\sin\beta}{\sin(\beta + \varepsilon)}$$

Per integrazione, una spinta pari a S_q :

$$S_c = k_a \cdot Q \cdot H \cdot \frac{\sin\beta}{\sin(\beta + \varepsilon)}$$

Con punto di applicazione ad $H/2$, avendo indicato con K_a il coefficiente di spinta attiva secondo Muller-Breslau.

2.6 - Spinta attiva in condizioni sismiche

In presenza di sisma la forza di calcolo esercitata dal terrapieno sull'opera è data da:

$$E_d = \frac{1}{2} \gamma \cdot (1 \pm k_v) \cdot KH^2 + E_{ws} + E_{wd}$$

Dove:

H	Altezza muro;
k_v	Coefficiente sismico verticale;
γ	Peso per unità di volume del terreno;
K	Coefficienti di spinta attiva totale (statico + dinamico);
E_{ws}	Spinta idrostatica dell'acqua;
E_{wd}	Spinta idrodinamica.

Per terreni impermeabili la spinta idrodinamica $E_{wd} = 0$, ma viene effettuata una correzione sulla valutazione dell'angolo θ della formula di Mononobe & Okabe così come di seguito:

$$\tan \theta = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w} - \frac{k_h}{(1 \mp k_v)}$$

Nei terreni ad elevata permeabilità in condizioni dinamiche continua a valere la correzione di cui sopra, ma la spinta idrodinamica assume la seguente espressione:

$$E_{wd} = \frac{7}{12} k_h \gamma_w H^2$$

Con H' altezza del livello di falda misurato a partire dalla base del muro.

2.7 - Spinta idrostatica

La falda con superficie distante H_w dalla base della parete induce delle pressioni idrostatiche normali che alla profondità z , sono espresse come segue:

$$P_w(z) = \gamma_w \cdot z$$

Con risultante pari a:

$$S_w = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot H^2$$

La spinta del terreno immerso si ottiene sostituendo γ_t con $\gamma't$ ($\gamma't = \gamma_{\text{saturo}} - \gamma_w$), peso efficace del materiale immerso in acqua.

2.8 - Resistenza passiva

Per terreno omogeneo il diagramma delle pressioni risulta lineare del tipo:

$$P_t = K_p \cdot \gamma_t \cdot z$$

per integrazione si ottiene la spinta passiva:

$$S_p = \frac{1}{2} \cdot \gamma_t \cdot H^2 \cdot K_p$$

Avendo indicato con:

$$K_p = \frac{\sin^2(\varphi + \beta)}{\sin^2\beta \cdot \sin(\beta - \delta) \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\delta + \varphi) \cdot \sin(\varphi + \varepsilon)}{\sin(\beta - \delta) \cdot \sin(\beta - \varepsilon)}} \right]^2}$$

(Muller-Breslau) con valori limiti di δ pari a:

$$\delta < \beta - \varphi - \varepsilon$$

L'espressione di K_p secondo la formulazione di Rankine assume la seguente forma:

$$K_p = \frac{\cos\varepsilon + \sqrt{\cos^2\varepsilon - \cos^2\varphi}}{\cos\varepsilon - \sqrt{\cos^2\varepsilon - \cos^2\varphi}}$$

3 - Carico limite verticale pali

Il carico limite verticale è stato calcolato con le formule statiche, che esprimono il medesimo in funzione della geometria del palo, delle caratteristiche del terreno e dell'interfaccia palo-terreno.

3.1 - Portanza di punta Metodo di Berezantzev

Fondamentalmente Berezantzev fa riferimento ad una superficie di scorrimento "alla Terzaghi" che si arresta sul piano di posa (punta del palo); tuttavia egli considera che il cilindro di terreno coassiale al palo ed avente diametro pari all'estensione in sezione della superficie di scorrimento, sia in parte "sostenuto" per azione tangenziale dal rimanente terreno lungo la superficie laterale. Ne consegue un valore della pressione alla base inferiore a γD , e tanto minore quanto più questo "effetto silo" è marcato, cioè quanto più grande è il rapporto D/B ; di ciò tiene conto il coefficiente N_q , che quindi è funzione decrescente di D/B . La resistenza unitaria Q_p alla punta, per il caso di terreno dotato di attrito (φ) e di coesione (c), è data dall'espressione:

$$Q_c = c \cdot N_c + \gamma \cdot L \cdot N_q$$

Avendo indicato con:

γ peso unità di volume del terreno;

L lunghezza del palo;

N_c e N_q sono i fattori di capacità portante già comprensivi dell'effetto forma (circolare);

3.1- Resistenza del fusto

Il metodo utilizzato per il calcolo della capacità portante laterale è il metodo α , proposto da Tomlinson (1971); la resistenza laterale viene calcolata nel seguente modo:

$$Q_c = (\alpha c + \sigma K \tan \delta) \cdot A_l \cdot f_w$$

A_l = superficie laterale del palo;

f_w = fattore di correzione legato alla tronco-conicità del palo

c = valore medio della coesione (o della resistenza a taglio in condizioni non drenate); σ = pressione verticale efficace del terreno;

K = coefficiente di spinta orizzontale, dipendente dalla tecnologia di esecuzione del palo.

4 – Stima profondità di infissione e Calcolo delle sollecitazioni

4.1 - Metodo dell'equilibrio limite (LEM)

Il metodo dell'equilibrio limite consiste nel ricercare soluzioni, al problema di verifica o di progetto, che siano compatibili con il solo aspetto statico del problema. In sostanza si ragiona in termini di equilibrio di un corpo rigido, senza preoccuparsi della congruenza cinematica degli spostamenti. I principali schemi di calcolo cui si farà riferimento sono i seguenti:

1. Paratia a sbalzo;
2. Paratia tirantata ad estremo libero;
3. Paratia tirantata ad estremo fisso;

4.1.a - Paratia a sbalzo: calcolo della profondità d'infissione limite

Per paratia non tirantata, la stabilità è assicurata dalla resistenza passiva del terreno che si trova a valle della stessa; dall'equilibrio dei momenti rispetto al centro di rotazione si ottiene:

$$S_m \cdot B_m - R_v \cdot B_v = 0$$

Dove i simboli hanno il seguente significato:

S_m = componente orizzontale della spinta attiva;

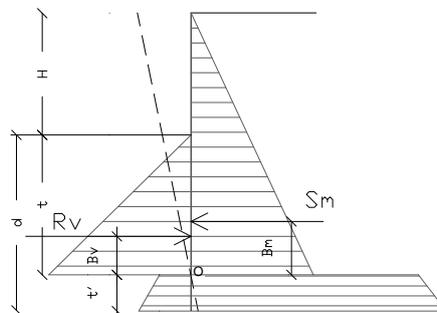
B_m = braccio di S_m rispetto ad O centro di rotazione;

R_v = componente orizzontale della resistenza passiva;

B_v = braccio di R_v rispetto ad O centro di rotazione;

ogni termine risulta funzione di t dove t è la profondità del centro di rotazione rispetto al piano di riferimento di valle (piano campagna a valle). La lunghezza necessaria per assicurare l'equilibrio alla traslazione orizzontale si ottiene aumentando t come segue:

$$t' = a \cdot t \quad d = t \cdot (1 + a) \quad \text{dove } a = 0.2 \text{ (Metododi Blum)}$$



Schema di riferimento per il calcolo dell'equilibrio della paratia

4.1.b - Coefficiente di sicurezza sulla resistenza passiva

La lunghezza d'infissione d come sopra determinata è relativa alla condizione limite di incipiente collasso, tramite un coefficiente F . E' possibile introdurre un margine di sicurezza sulle resistenze passive; la riduzione si effettua come segue:

$$S_m \cdot B_m - \frac{R_v}{F} \cdot B_v = 0$$

4.1.c - Paratia tirantata ad estremo libero: calcolo della profondità d'infissione limite

La stabilità dell'opera è assicurata anche dai tiranti ancorati sulla paratia. Per utilizzare lo schema di calcolo ad estremo libero, la paratia deve essere sufficientemente corta e rigida. La lunghezza di infissione, sarà determinata imponendo l'equilibrio alla rotazione sull'origine del tirante:

$$S_m \cdot (H + t - B_m - t_m) - R_v \cdot (H + t - B_v - t_m) = 0$$

Dove i simboli hanno il seguente significato:

S_m = componente orizzontale spinta attiva;

H = altezza terreno da sostenere;

t = profondità di infissione calcolata;

B_m = braccio di S_m rispetto alla base della paratia;

P_m = ordinata del punto di applicazione del tirante a monte;

R_v = componente orizzontale della resistenza passiva;

B_v = braccio di R_v .

Noto t , si determinano S_m ed R_v ed il relativo sforzo del tirante.

4.1.d - Coefficiente di sicurezza F sulle resistenze passive

La lunghezza d'infissione sarà ulteriormente aumentata per avere margine di sicurezza in condizioni di esercizio tramite il coefficiente di sicurezza F :

$$S_m \cdot (H + t - B_m - t_m) - \frac{R_v}{F} \cdot (H + t - B_v - t_m) = 0$$

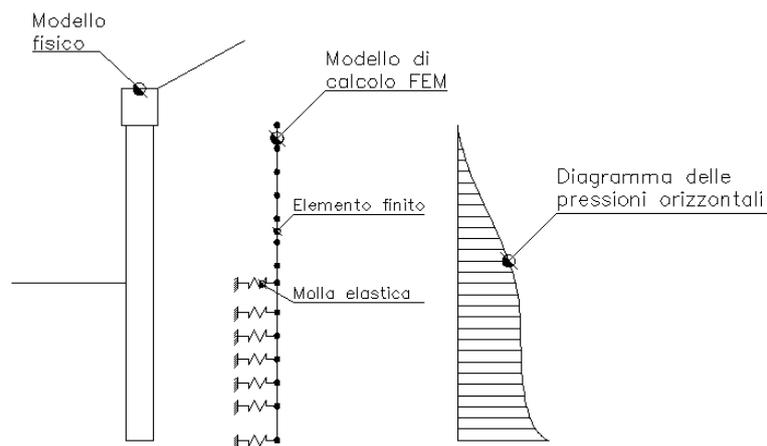
4.1.e - Paratia tirantata ad estremo fisso: calcolo della profondità d'infissione limite

Se la sezione più profonda della paratia non trasla e non ruota può essere assimilata ad un incastro, in tal caso la paratia si definisce ad estremo fisso. Un procedimento elaborato da BLUM consente di ricavare la profondità d'infissione ($t+t'$), imponendo le condizioni cinematiche di

spostamenti nulli alla base dell'opera ed al punto di applicazione del tirante, e le condizioni statiche di momento e taglio nullo alla base della paratia. Si perviene ad una equazione di 5° grado in (t+t') che può essere risolta in modo agevole.

4.2 Metodo degli elementi finiti (FEM)

Il metodo degli elementi finiti è il metodo che più di tutti si fonda su basi teoriche solide e razionali. Di fatto tutto il metodo presuppone che il problema sia affrontato tenendo in conto sia l'aspetto statico (e quindi l'equilibrio del problema, sia l'aspetto cinematico (e quindi la congruenza degli spostamenti o meglio delle deformazioni). In questo approccio la paratia è modellata come un insieme di travi, con vincolo di continuità tra loro (elementi beam), vincolate al terreno mediante molle elastiche, la cui rigidezza è valutata in funzione delle proprietà elastiche del terreno. Nella figura che segue è mostrato schematicamente il modello utilizzato per l'analisi ad elementi finiti:



Schematizzazione della paratia ad elementi finiti

Vari aspetti hanno importanza centrale in questo metodo di calcolo. Si riportano nel seguito gli aspetti essenziali.

4.2.a - Calcolo del modulo di rigidezza K_s del terreno

Come già detto in precedenza, il terreno viene schematizzato con delle molle di rigidezza K_s applicate sui nodi dei conci compresi tra il nodo di fondo scavo e l'estremità di infissione. La stima della rigidezza K_s è stata effettuata sulla base della capacità portante delle fondazioni secondo la seguente formula:

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

Dove i simboli hanno il seguente significato

A_s = costante, calcolata come segue

$$A_s = C \times (c \times N_c + 0.5 \times \gamma \times B \times N_\gamma)$$

B_s = coefficiente funzione della profondità $B_s = C \times \gamma \times N_q$

Z = Profondità in esame

C = 40 nel sistema internazionale SI

$$n = \pi \times \tan \varphi$$

$$N_q = \exp[n \times (\tan^2(45^\circ + \varphi/2))]$$

$$N_c = (N_q - 1) \times \cot \varphi$$

$$N_\gamma = 1.5 \times (N_q - 1) \times \tan \varphi$$

4.2.b - Tiranti

I tiranti vengono schematizzati come elementi elastici, con sezione trasversale di area pari ad A modulo di elasticità E e lunghezza L. Per un tratto di paratia di larghezza unitaria, l'azione dei tiranti inclinati di un angolo β vale:

$$F = \frac{A \cdot E}{S \cdot L} \cdot \cos(\beta)$$

4.2.c - Sifonamento

Il sifonamento è un fenomeno che in una fase iniziale si localizza al piede della paratia, e poi rapidamente si estende nell'intorno del volume resistente. Si verifica quando, per una elevata pressione idrodinamica o di infiltrazione, si annullano le pressioni passive efficaci, con la conseguente perdita di resistenza del terreno. Si assume di norma un fattore di sicurezza $F_{sif} = 3.5-4$

Indicando con:

i_c = Gradiente Idraulico critico;

i_e = Gradiente Idraulico in condizioni di esercizio;

Il margine di sicurezza è definito come rapporto tra i_c ed i_e , se $i_e < i_c$ la paratia è stabile.

5 - Verifica delle sezioni e calcolo armature

Il calcolo delle armature e le verifiche a presso-flessione e taglio della paratia soggetta alle sollecitazioni N, M e T, si effettua per tutte le sezioni di calcolo. Le sollecitazioni sono ottenute come prodotto tra le sollecitazioni ottenute con un calcolo a metro lineare e l'interasse tra i pali (o larghezza dei setti se la paratia è costituita da setto):

$$N_d = N' \cdot i; M = M' \cdot i; T_d = T' \cdot i$$

Dove M' , M , T rappresentano il momento il taglio e lo sforzo normale relativi ad una striscia unitaria di calcolo mentre i è l'interasse tra i pali per paratia costituita da pali o micropali (o larghezza setti per paratia costituita da setti).

Il semiprogetto della armature viene eseguito agli stati limiti ultimi secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008 ed Eurocodici.

6 – Esempi di calcolo

6.1 - Ex. 13.2 – Pag. 196 Collaselli [FILE: F. COLLESELLI M.SORANZO_ Pag 196 Ex. 13.2 .spw]

Calcolo profondità di infissione di una palancola in terreno incoerente, omogeneo caratterizzato da un angolo di resistenza al taglio $\phi' = 33^\circ$ e da un peso dell'unità di volume pari a 18 kN/m^3 . La paratia dovrà sostenere 5.5 m di sbancamento.

L'esempio oggetto di studio è stato realizzato al fine di dimostrare la validità del programma nel calcolo della profondità di infissione:

Profondità infissione Paratie/SPW = 4.52 m

Profondità Colleselli = 4.80 m

Scarto profondità infissione = (Profondità infissione Paratie/SPW - Profondità Colleselli) /

Profondità Colleselli = $(4.52 - 4.80) / 4.80 = - 5.8\%*$

*** Colleselli ha aumentato a favore delle sicurezza la profondità di calcolo del 20%. Paratie no, la profondità calcolata garantisce le condizioni di equilibrio.**

6.2 - Ex. 13.3–Pag. 198 Collaselli [FILE: F. COLLESELLI M.SORANZO_ Pag 199 Ex13.3.spw]

Calcolo profondità di infissione di una palancola in terreno coesivo, omogeneo caratterizzato da una coesione non drenata da 8.75 kPa, angolo di resistenza al taglio $\phi = 0^\circ$, peso unità di volume saturo pari a 18 kN/m^3 . La paratia dovrà sostenere 4 m di sbancamento.

L'esempio oggetto di studio è stato realizzato al fine di dimostrare la validità del programma nel calcolo della profondità di infissione in condizioni non drenate.

Profondità infissione Paratie/SPW = 4.75 m

Profondità Colleselli = 4.60 m

Scarto Profondità infissione = (Profondità infissione Paratie/SPW - Profondità Colleselli) /

Profondità Colleselli = $(4.75 - 4.60) / 4.60 = 3\%$

6.3 - Ex. 13.1 – Pag. 649 Bowles [FILE: Bowles Ex. 13.1 Pag. 649.spw]

Analisi di una palancola in terreno incoerente caratterizzato da: 1° strato $\phi' = 30^\circ$ $\gamma = 16.49 \text{ kN/m}^3$ di spessore 2.40 m, 2° strato $\phi' = 30^\circ$ $\gamma' = 10.37 \text{ kN/m}^3$ di spessore 6.60 m. La paratia dovrà sostenere uno scavo di 9 m. Sul piano campagna agisce un sovraccarico uniformemente distribuito di 23.94 kPa. La paratia sarà ancorata con tiranti di lunghezza libera pari a 9 metri, armati con acciaio del diametro di 50 mm, posti a 1.20 m di profondità ed interasse di 1.80 m. La sezione della paratia è del tipo PZ287 con modulo elastico di 200000 Mpa.

L'esempio oggetto di studio è stato realizzato al fine di dimostrare la validità del programma nel calcolo ad elementi finiti non lineare di: profondità di infissione, momento massimo, tiro sul tirante.

Profondità infissione Paratie/SPW = 4.2 m

Profondità Bowles = 4.2 m

Scarto Prof. di infissione = (Profondità infissione Paratie/SPW - Profondità Bowles) / Profondità Bowles = (4.2-4.2)/4.2 = **0%**

Momento massimo Paratie/SPW = 212.90 kNm

Momento massimo Bowles = 210.33 kNm

Scarto momento massimo = (M. max Paratie/SPW - M. max Bowles) / M. max Bowles
= (212.90-210)/210 = + **1.38%**

Tiro Paratie/SPW = 194 kN

Tiro Bowles = 190 kN

Scarto Tiro = (Tiro Paratie/SPW - Tiro Bowles) / Tiro Bowles = (194-190)/190 = + **2.1%**

7 - Conclusioni

Si evidenzia, dai test effettuati, l'affidabilità del software in oggetto. Si riscontrano scarti minimi dovuti alle elaborazioni numeriche.