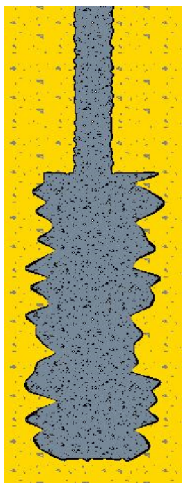
CDM DOLMEN CALCOLO STRUTTURALE E GEOTECNICO

# IS microPali



# MANUALE UTENTE

# *Indice:*


**1. RICHIAMI TEORICI 3**

***1.1. Normative 3***

***1.2. Letteratura 3***

***1.3. Classificazione in base alle tecniche esecutive (FHWA NHI-05-039) 3***
1.3.1. Tipo A, gettato senza eccesso di pressione 3
1.3.2. Tipo B, malta pressurizzata durante l'estrazione del rivestimento (palo Radice) 4
1.3.3. Tipo C, iniezione di malta con l'uso di valvole una sola volta (IGU) 4
1.3.4. Tipo D, iniezione di malta con l'uso di valvole multiple volte (IRS o Tubfix) 4

**1.4. Calcolo della portata laterale 7**
1.4.1. Spinta orizzontale a riposo: formula per pali di grande diametro 7
1.4.2. Spinta orizzontale a riposo mediata con la spinta idrostatica 7
1.4.3. Spinta orizzontale incrementata dalla pressione di iniezione 8
1.4.4. Mobilitazione di parte della resistenza passiva del terreno 8
1.4.5. Metodi basati su prove SPT 8
1.4.6. Micropali soggetti a trazione 10
1.4.7. Tabelle per la valutazione diretta 10
1.4.8. Contributo del fusto alla portata laterale 13

**1.5. Calcolo della portata della punta 14**

**1.6. Stima del cedimento indotto dal carico 14**

**1.7. Combinazioni di calcolo per la capacità portante 15**
1.7.1. Calcolo senza coefficienti 15
1.7.2. Calcolo con coefficienti 15

**1.8. Instabilità (carico di punta) 16**

**2. UTILIZZO DEL PROGRAMMA 17**

**2.1. Simboli e unità di misura 17**

**2.2. Input 17**
2.2.1. Pannello grafico 18
2.2.2. Pannello Dati 19
2.2.3. Pannello Parametri di calcolo 20
2.2.4. Pannello Cedimenti 21
2.2.5. Pannello risultati 22

**2.3. Diagramma di flusso riassuntivo del programma 23**




CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it

# 1. RICHIAMI TEORICI

## 1.1. Normative

Essendo i micropali una tecnologia costruttiva relativamente giovane, non esiste un riferimento globale che ne inquadri completamente i vari aspetti di progetto e verifica. Per la realizzazione di questo programma si sono quindi usate diverse normative e articoli reperiti in letteratura.
Il riferimento normativo più autorevole, per quanto riguarda i micropali, è la norma americana FHWA NHI-05-039. Ad essa si è fatto riferimento per la classificazione e il suggerimento di alcuni parametri progettuali.
La norma spagnola redatta dal Ministero dello Sviluppo ("*Guìa para el proyecto y la ejecutiòn de micropilotes en obras de carratera*", 2005) suggerisce una procedura di calcolo legata alla pressione di iniezione del micropalo.
La DIN 1054 si limita a suggerire alcuni parametri progettuali.
La NTC08 non prevede specificamente la tipologia micropalo: tutte le combinazioni di calcolo (e relativi coefficienti) sono quindi ricondotte a quelle per pali, nel capitolo 6 '*Progettazione Geotecnica*'.

## 1.2. Letteratura

Il principale riferimento è il testo *'I Micropali: tecniche di progetto e verifica'* , A. Mammino. Oltre a suggerire scelte progettuali originali dell'autore, contiene materiale utile raccolto in letteratura.
Il testo *'Fondazioni'*, R. Lancellotta, J. Calavera è stato consultato per applicare la formulazione per pali al caso dei micropali quando questo fosse possibile.
Il testo 'Ground Control and Improvement', P. Xanathakos, W. Abramson, A.Bruce, contiene un capitolo interamente dedicato ai micropali: in particolare figurano le metodologie di calcolo sviluppate da Littlejohn e da Suzuki, così come prove di carico e casi studio specificatamente per i micropali
L'articolo *'Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés'*, M. Bustamante e B. Doix contiene una procedura di calcolo originale per micropali: poiché è stata sviluppata sulla base di risultati sperimentali e validata nel corso del tempo, si consiglia di assumerla come risultato di riferimento.
L'articolo *'La curva carico-cedimenti specializzata per micropali valvolati: riflessioni su un caso di studio'*, M. Franceschini, F. Fiorelli suggerisce una specializzazione del metodo di Randolph & Wroth per la stima del cedimento del singolo micropalo.
Di interesse è anche il lavoro di A. Jaubertou, *'Bored Micropiles, Franch practice'* che descrive lo stato dell'arte sia per la progettazione che per l'esecuzione di micropali.

## 1.3. Classificazione in base alle tecniche esecutive (FHWA NHI-05-039)

La perforazione del foro può avvenire con diverse tecniche: se si sostiene lo scavo con un fluido, è raccomandata l'esecuzione con circolazione diretta.

### 1.3.1. Tipo A, gettato senza eccesso di pressione

Il foro può essere non rivestito, rivestito temporaneamente o permanentemente (il tubolare svolgerà funzione di rinforzo del micropalo completato).
La malta (tipicamente con rapporto a/c tra 0,45 e 0,5 se solo cemento, o fino a 0,6 se proporzione sabbia cemento tra 1:1 e 2:1) viene messa in opera dal fondo del foro, riempendolo senza applicare nessuna pressione supplementare, utilizzando un tubo convogliatore. Il getto viene interrotto quando malta della stessa qualità di quella posta in opera esce liberamente dalla testa del foro.


CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it

### 1.3.2. Tipo B, malta pressurizzata durante l'estrazione del rivestimento (palo Radice)

Il foro deve essere necessariamente rivestito: dopo la prima fase di getto, eseguita come per il tipo A, si applica una testa a tenuta al rivestimento e si immette aria compressa per pressurizzare la malta e forzare il calcestruzzo contro il terreno. La pressione è tipicamente nel range 0,5 MPa - 1 MPa. La massima pressione può essere stimata come 20 kPa per metro in caso di terreni sciolti e 40 kPa per metro in caso di terreni densi.
Il rivestimento può essere parzialmente sfilato prima dell'iniezione per ancorare il micropalo solo agli strati competenti.

### 1.3.3. Tipo C, iniezione di malta con l'uso di valvole una sola volta (IGU)

Di solito il foro è rivestito temporaneamente o non rivestito.
La malta (tipicamente con rapporto a/c tra 0,5 e 0,75 per garantire una buona fluidità) è applicata in un primo momento come per il tipo A. Pochi minuti dopo questa prima fase, tramite valvole di non ritorno viene iniettata malta in pressione, permettendo di formare delle sbulbature. La pressione di iniezione è maggiore di 1 MPa.

### 1.3.4. Tipo D, iniezione di malta con l'uso di valvole multiple volte (IRS o Tubfix)

Questo tipo di micropalo riesce a garantire le portate più significative. Nella prima fase la malta viene posta in opera come per il tipo A. Per la fase di iniezione, le imprese hanno sviluppato diverse tecniche esecutive, attrezzando il foro in vari modi. In ogni caso c'è la presenza di un rinforzo e di valvole di non ritorno, tramite cui viene iniettata malta in pressione (tipicamente con rapporto a/c tra 0,5 e 0,75 per garantire una buona fluidità). L'iniezione avviene qualche ora dopo la prima fase di getto ed è caratterizzata da pressioni molto alte (da 2 MPa a 8MPa), affinché il calcestruzzo primario si rompa e si formino le sbulbature. Questa operazione viene ripetuta diverse volte, tante quante necessarie per raggiungere l'ancoraggio del micropalo, attendendo 24 ore tra le diverse iniezioni.
Un riassunto di quanto detto è presentato in Tabella 1, una rappresentazione schematica in Figura 1.


CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it

Tabella 1 Dettagli della classificazione in base alla metodologia di messa in opera

| Tipo di micropalo e metodologia di getto | Sottotipo | Rivestimento | Rinforzo | Messa in opera |
|---|---|---|---|---|
| TIPO A<br>Getto senza eccesso di pressione | A1 | Temporaneo o assente | Nessuno, barre, piccola gabbia o tubolare | Cemento e sabbia o cemento pompati senza eccesso di pressione dal fondo del foro mantenendo il tubo convogliatore sempre annegato nella malta precedentemente gettata |
| | A2 | Permanente, sull'intera lunghezza del foro | Il rivestimento stesso | |
| | A3 | Permanente, solo sulla parte superiore del foro | Il rivestimento stesso nella parte superiore, barre o tubolare nella parte inferiore | |
| TIPO B<br>Pressurizzato grazie al rivestimento durante la sua rimozione | B1 | Temporaneo | Barre o tubolare | Prima fase: cemento posto in opera come per micropalo A.<br>Seconda fase: tramite testa a tenuta applicata al rivestimento è applicata una pressione (fino a 1 Mpa). Contemporaneamente il rivestimento viene sfilato (parzialmente o del tutto) |
| | B2 | Permanente, solo sulla parte superiore del foro | Il rivestimento stesso | |
| | B3 | Permanente, solo sulla parte superiore del foro | Il rivestimento stesso nella parte superiore, barre o tubolare nella parte inferiore | |
| TIPO C<br>Dopo la prima fase di getto, iniezione in pressione una sola volta, globalmente | C1 | Temporaneo o assente | Barre o tubolare | Prima fase: cemento posto in opera come per micropalo A.<br>Seconda fase: circa un quarto d'ora dopo la prima fase, iniezione ad almeno 1 Mpa di ulteriore malta tramite valvole di non ritorno con cui si è attrezzato preventivamente il foro (diverse tecniche) |
| TIPO D<br>Dopo la prima fase di getto, iniezione in pressione multiple volte | D1 | Temporaneo o assente | Barre o tubolare | Prima fase: cemento posto in opera come per micropalo A.<br>Seconda fase: diverse ore dopo la prima fase, iniezione ad almeno 2 Mpa di ulteriore malta, tramite valvole di non ritorno con cui si è attrezzato preventivamente il foro (diverse tecniche). La seconda fase viene ripetuta diverse volte, attendendo 24 ore tra le iniezioni |
| | D2 | Permanente su tutto il foro (raro), tubo per iniezione secondaria fuori dal rivestimento | Il rivestimento stesso | |
| | D3 | Permanente, solo sulla parte superiore del foro | Il rivestimento stesso nella parte superiore, barre o tubolare nella parte inferiore | |



CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it

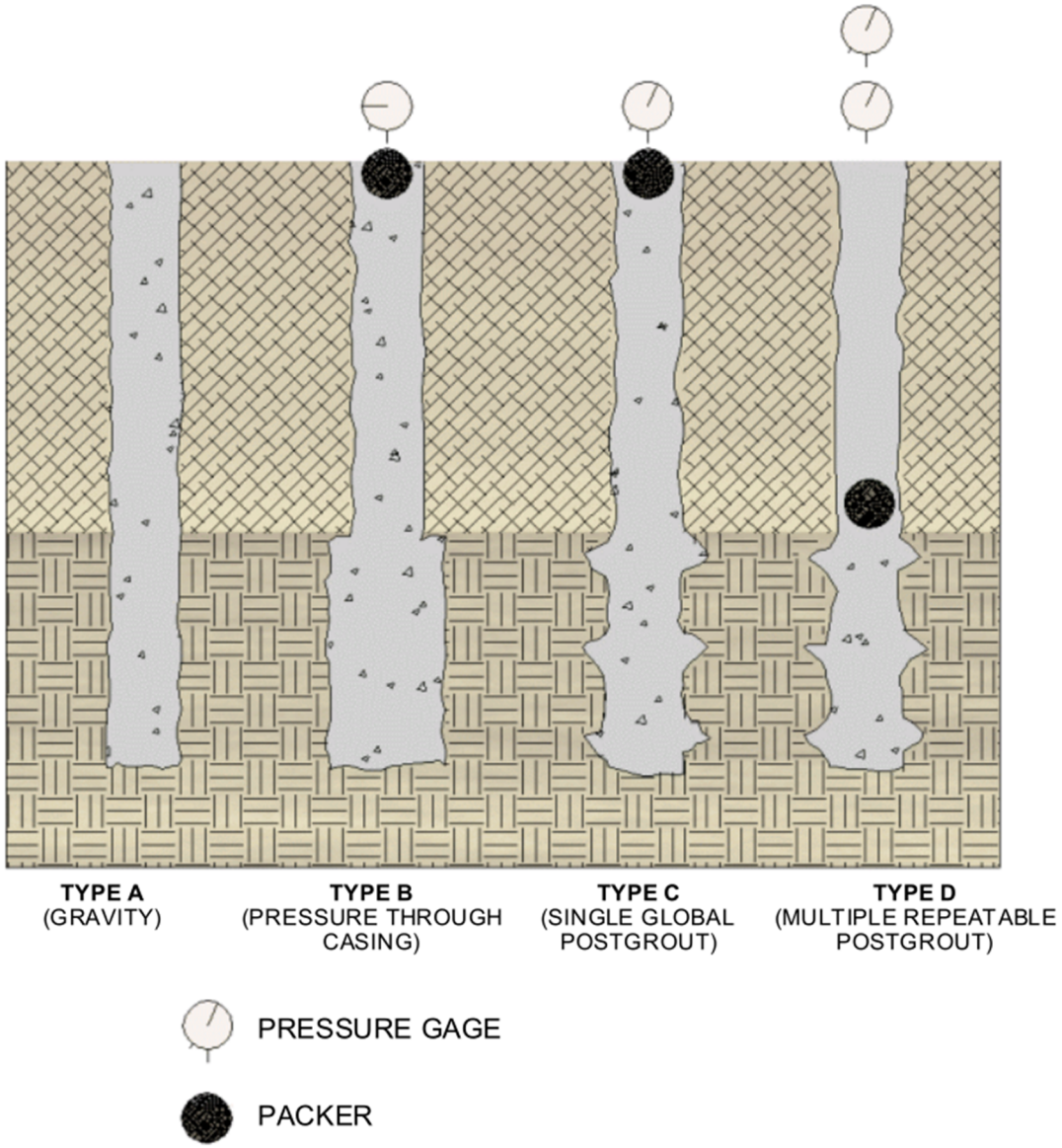



Figura 1 Tipologie di micropalo, immagine tratta da FHWA NHI-05-039.



CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it

## 1.4. Calcolo della portata laterale

I micropali trasferiscono il carico essenzialmente per attrito laterale: in primo luogo l'area ridotta della punta non permette di considerarla come elemento portante; in secondo luogo per mobilitarne la portata bisognerebbe avere un cedimento significativamente maggiore di quello che tipicamente si manifesta nel micropalo. L'area laterale è molto maggiore e la relativa portata viene mobilitata per cedimenti molto ridotti.
In caso di micropali che manifestano un bulbo (B C D), cautelativamente la portata laterale viene calcolata solo considerando il contributo dato dal bulbo stesso.
Per quanto riguarda i micropali di tipo A, la portata laterale viene calcolata considerando il contributo lungo tutto il fusto.
Il micropalo viene quindi suddiviso in elementi finiti; su ciascuno (i-esimo) viene calcolata la portata laterale come

$$Q_i = \pi \cdot d \cdot l_i \cdot \tau_i$$

In cui $\tau_i$ è la tensione limite di contatto bulbo-terreno, $l_i$ la lunghezza dell'elemento e d il diametro del micropalo. La portata totale sarà data dalla somma di tutti gli n (numero di elementi finiti in cui è stato suddiviso il micropalo) contributi.

$$Q = \sum_{i=1}^{n} Q_i$$

Concettualmente, ogni metodo si limita a fornire una stima della tensione limite $\tau_i$.
Dato che i micropali sono una tipologia costruttiva relativamente giovane, non è disponibile un inquadramento teorico completo che prenda in considerazione le diverse tipologie di micropalo e le modalità di esecuzione. Si sono qui raccolti i contributi più significativi, raccomandando al progettista di confrontare i risultati con prove di carico in sito e con valori di tensione limite di contatto bulbo-terreno suggeriti in letteratura e qui riportati.
Infine, poiché l'effettiva portata di un micropalo dipende fortemente dalla messa in opera in cantiere, per ottenere portate consistenti con i valori calcolati il lavoro deve essere eseguito a regola d'arte.

Si è scelto di assumere l'angolo di attrito calcestruzzo-terreno pari all'angolo di resistenza al taglio in virtù delle metodologie costruttive.

### 1.4.1. Spinta orizzontale a riposo: formula per pali di grande diametro

*Nel programma metodo 'Formula palo di grande diametro'*

Il valore di tensione limite laterale, nel caso di pali di grande diametro, viene stimato come (Burland 1973, Kulhawy 1983, Kulhawy 1991)

$$\tau = K_0 \cdot \sigma'_z \cdot tan\varphi + c$$

In cui $K_0$ è il coefficiente di spinta a riposo e la coesione c viene usualmente impostata a 0 a favore di sicurezza.
Stimando la portata in questo modo si è sicuri del valore minimo che il micropalo è sicuramente in grado di trasferire al terreno.

### 1.4.2. Spinta orizzontale a riposo mediata con la spinta idrostatica

*Nel programma metodo 'Fleming'*


CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it

Alcuni autori (Fleming et. Al, 1985) suggeriscono di mediare la spinta orizzontale a riposo con il valore della tensione idrostatica per simulare l'effetto dello scavo.

$$\tau = \frac{1 + K_0}{2} \cdot \sigma'_z \cdot tan\varphi$$

### 1.4.3. Spinta orizzontale incrementata dalla pressione di iniezione

*Nel programma metodo 'Norma spagnola'*

La normativa spagnola (2005) suggerisce di considerare direttamente la pressione di iniezione della malta.

$$\tau = \frac{c}{F} + \sigma'_H \cdot \frac{tg\varphi}{F}$$

F è un coefficiente che vale 1,5 per fondazioni nuove e 1,2 per fondazioni esistenti (nel programma è assunto 1,5 e non è modificabile dall'utente)
Se la quota a cui si calcola la spinta è a meno di 5m dal piano campagna la pressione di iniezione non viene considerata perché sposterebbe il terreno senza mobilitare nessuna resistenza maggiore.

$$\sigma'_H = K_0 \cdot \sigma'_z$$

Viceversa, se la quota a cui si calcola la spinta è a più di 5m dal piano campagna, si può stimare l'incremento di spinta dovuto alla pressione di iniezione.

$$\sigma'_H = K_0 \cdot \sigma'_z + \frac{p_i}{3}$$

Questa procedura di calcolo, per le ipotesi fatte, è abilitata solo per micropali B C e D.

### 1.4.4. Mobilitazione di parte della resistenza passiva del terreno

*Nel programma metodo 'Mammino'*

Mammino suggerisce di interpretare l'incremento di portata dovuto alla pressione di iniezione come mobilitazione di una parte della resistenza passiva, dovuta allo spostamento del terreno a causa della malta iniettata. In particolare l'Autore consiglia di assumere un coefficiente di spinta pari a un terzo di quello relativo alla resistenza passiva.

$$\tau = \sigma_h \cdot \frac{1}{3} \cdot K_p \cdot tg\varphi$$

Questa procedura di calcolo, per le ipotesi fatte, è abilitata solo per micropali B C e D.

### 1.4.5. Metodi basati su prove SPT

L'inserimento di una prova SPT, per micropali B C e D, abilita automaticamente il calcolo con tre metodologie: le prime due (Suzuki, 1972 e Littlejohn, 1970) fanno riferimento a valori registrati per ancoraggi in roccia; in particolare, sono leggi ottenute sperimentalmente utilizzando penetrometri diversi dallo standard (in grado di penetrare rispettivamente graniti fratturati e gesso), riportati poi tramite correzioni a valori NSPT. Dato che sono leggi estrapolate ad un contesto diverso da quello per cui sono state ricavate, si consiglia di utilizzarle solo se si ha un numero di colpi estremamente alto, altrimenti si incorre in una sovrastima della portata del micropalo.


CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it

Per quanto riguarda la terza metodologia, Bustamante et Doix, 1985, si consiglia di assumerla come riferimento, in quanto è la più utilizzata e collaudata per il calcolo della portata di micropali sbulbati e di ancoraggi iniettati (le due tipologie sono assimilabili).

#### 1.4.5.1. Suzuki

*Nel programma metodo 'Suzuki'*
Ricavata per ancoraggi in graniti fratturati ed estrapolata a prova SPT

$$\tau = 0.007 \cdot N + 0.12\ [MPa]$$

N= numero di colpi risultato della prova SPT

#### 1.4.5.2. Littlejohn

*Nel programma metodo 'Littlejohn'*
Ricavata per ancoraggi in gesso ed estrapolata a prova SPT

$$\tau = 0.01 \cdot N\ [MPa]$$

N= numero di colpi risultato della prova SPT

#### 1.4.5.3. Bustamante et Doix

*Nel programma metodo 'Bustamante et Doix'*

A causa delle pressioni di iniezione del microcalcestruzzo si forma un bulbo di diametro maggiore del diametro di perforazione.

- Per terreni attritivi

Iniezione IRS $d_{bulbo} = 1.5 \cdot d_{perforazione}$
Iniezione IGU $d_{bulbo} = 1.15 \cdot d_{perforazione}$
Per ottenere tale diametro è consigliato iniettare una quantità minima di miscela pari a:

$$V = 1.5 \cdot \frac{\pi \cdot d_{bulbo}}{4} \cdot l_{bulbo}$$

Dove $d_{bulbo}$ e $l_{bulbo}$ sono rispettivamente il diametro e la lunghezza del bulbo.
Si può stimare la tensione limite laterale come

$$\tau = \frac{NSPT}{20} * 100\ [kPa]$$

- Per terreni argillosi

Iniezione IRS $d_{bulbo} = 1.5 \cdot d_{perforazione}$
Iniezione IGU $d_{bulbo} = 1.2 \cdot d_{perforazione}$
Per ottenere tale diametro è consigliato iniettare una quantità minima di miscela pari a:
Iniezione IRS $V = (2.5 \div 3) \cdot \frac{\pi \cdot d_{bulbo}}{4} \cdot l_{bulbo}$
Iniezione IGU $V = (1.5 \div 2) \cdot \frac{\pi \cdot d_{bulbo}}{4} \cdot l_{bulbo}$

Dove $d_{bulbo}$ e $l_{bulbo}$ sono rispettivamente il diametro e la lunghezza del bulbo.
Si può stimare la tensione limite laterale come


CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it

$$\tau = \left(0.095 + 0.085 \cdot \frac{NSPT}{15}\right) \cdot 1000\ [kPa]$$

- Per terreni marnosi

Iniezione IRS $d_{bulbo} = 1.5 \cdot d_{perforazione}$

Iniezione IGU $d_{bulbo} = 1.15 \cdot d_{perforazione}$

Per ottenere tale diametro è consigliato iniettare una quantità minima di miscela pari a:

$$V = (1.5 \div 2) \cdot \frac{\pi \cdot d_{bulbo}}{4} \cdot l_{bulbo}$$

Dove $d_{bulbo}$ e $l_{bulbo}$ sono rispettivamente il diametro e la lunghezza del bulbo.
Si può stimare la tensione limite laterale come

$$\tau = \left(0.133 + 0.067 \cdot \frac{NSPT}{15}\right) \cdot 1000\ [kPa]$$

Le equazioni sopra riportate, ottenute sperimentalmente, rappresentano l'interpolazione dei risultati sperimentali ottenuti da Bustamante e Doix

### 1.4.6. Micropali soggetti a trazione

*Nel programma metodo 'Schneebeli'*

Questo metodo è stato proposto da Schneebeli per tiranti e può essere esteso ai micropali sotto alcune ipotesi restrittive:

- sono ancorati in materiale fortemente attritivo, di tipo granulare
- sono in trazione
- sono stati iniettati ad elevata pressione

In tal caso la tensione limite di contatto calcestruzzo-terreno può essere stimata come

$$\tau = \tan\left(45° - \frac{\varphi}{2}\right) \cdot \sin\varphi \cdot \frac{1 + e^{2 \cdot \pi \cdot \tan\varphi}}{2} \cdot \sigma_z$$

### 1.4.7. Tabelle per la valutazione diretta

*Nel programma metodo 'Tensione limite definita dall'utente'*

Il valore di tensione limite di contatto calcestruzzo-terreno può essere inserita direttamente dall'utente: questa scelta può essere molto efficace se si ha già esperienza con un particolare tipo di terreno.
Alcuni valori di riferimento, espressi in funzione della tipologia qualitativa del materiale, sono stati reperiti in letteratura e qui riportati (le tabelle sono direttamente richiamabili all'interno del programma per una rapida consultazione).


CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it

Tabella 2 Valori di tensione laterale limite, micropali A, FHWA, 2005

| MATERIALE | Valori consigliati di tensione limite laterale (kPa) |
|---|---|
| **Limo e argilla** (inclusioni sabbiose) Tenero, mediamente plastico | 35-70 |
| **Limo e argilla** (inclusioni sabbiose) Consistente, da denso a molto denso | 50-120 |
| **Sabbia** (inclusioni limose) Fine, da sciolta a mediamente densa | 70-145 |
| **Sabbia** (inclusioni limose, ghiaiose) Grossolana, da mediamente a molto densa | 95-215 |
| **Ghiaia** (inclusioni sabbiose) Da mediamente a molto densa | 95-265 |
| **Tilliti glaciali** Da mediamente a molto dense, cementate | 95-190 |

Tabella 3 Valori di tensione laterale limite, micropali B, FHWA, 2005

| MATERIALE | Valori consigliati di tensione limite laterale (kPa) |
|---|---|
| **Limo e argilla** (inclusioni sabbiose) Tenero, mediamente plastico | 35-95 |
| **Limo e argilla** (inclusioni sabbiose) Consistente, da denso a molto denso | 70-190 |
| **Sabbia** (inclusioni limose) Fine, da sciolta a mediamente densa | 70-190 |
| **Sabbia** (inclusioni limose, ghiaiose) Grossolana, da mediamente a molto densa | 120-360 |
| **Ghiaia** (inclusioni sabbiose) Da mediamente a molto densa | 120-360 |
| **Tilliti glaciali** Da mediamente a molto dense, cementate | 95-310 |

Tabella 4 Valori di tensione laterale limite, micropali B, suggeriti da Lizzi, 1985

| Materiale | Valori consigliati di tensione limite laterale (kPa) |
|---|---|
| Terreno molle | 50 |
| Terreno sciolto | 100 |
| Terreno mediamente compatto | 150 |
| Terreno molto compatto, ghiaie e sabbie | 200 |



CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it

Tabella 5 Valori di tensione laterale limite, micropali C, FHWA, 2005

| MATERIALE | Valori consigliati di tensione limite laterale (kPa) |
|---|---|
| **Limo e argilla** (inclusioni sabbiose) Tenero, mediamente plastico | 50-120 |
| **Limo e argilla** (inclusioni sabbiose) Consistente, da denso a molto denso | 95-190 |
| **Sabbia** (inclusioni limose) Fine, da sciolta a mediamente densa | 95-190 |
| **Sabbia** (inclusioni limose, ghiaiose) Grossolana, da mediamente a molto densa | 145-360 |
| **Ghiaia** (inclusioni sabbiose) Da mediamente a molto densa | 145-360 |
| **Tilliti glaciali** Da mediamente a molto dense, cementate | 120-310 |

Tabella 6 Valori di tensione laterale limite, micropali D, FHWA, 2005

| MATERIALE | Valori consigliati di tensione limite laterale (kPa) |
|---|---|
| **Limo e argilla** (inclusioni sabbiose) Tenero, mediamente plastico | 50-145 |
| **Limo e argilla** (inclusioni sabbiose) Consistente, da denso a molto denso | 95-190 |
| **Sabbia** (inclusioni limose) Fine, da sciolta a mediamente densa | 95-240 |
| **Sabbia** (inclusioni limose, ghiaiose) Grossolana, da mediamente a molto densa | 145-385 |
| **Ghiaia** (inclusioni sabbiose) Da mediamente a molto densa | 145-385 |
| **Tilliti glaciali** Da mediamente a molto dense, cementate | 120-335 |



CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it

Tabella 7 DIN V 1054-100, 2003

| Materiale | Valori consigliati di tensione limite laterale (kPa) |
|---|---|
| Ghiaia [1] | 200 |
| Sabbia e ghiaia sabbiosa [1] | 150 |
| Terreni coesivi [2] | 100 |
| [1] Per una resistenza alla punta di una prova CPT $q_{ck}$>10 MPa | |
| [2] Per un indice di consistenza IC ≈ 1 e $C_{uk}$>100kPa | |

Tabella 8 Ulteriore set di valori, tratti dalla FHWA DP-68-1 R, 1999

| Rock | | Cohesive Soil | | Cohesionless Soil | |
|---|---|---|---|---|---|
| Rock type | Average ultimate bond stress (MPa) | Anchor type | Average ultimate bond stress (MPa) | Anchor type | Average ultimate bond stress (MPa) |
| Granite and basalt | 1.7 - 3.1 | Gravity-grouted anchors (straight shaft) | 0.03 - 0.07 | Gravity-grouted anchors (straight shaft) | 0.07 - 0.14 |
| Dolomitic limestone | 1.4 - 2.1 | Pressure-grouted anchors (straight shaft) | | Pressure-grouted anchors (straight shaft) | |
| Soft limestone | 1.0 - 1.4 | • Soft silty clay | 0.03 - 0.07 | • Fine-med. sand, med. dense – dense | 0.08 - 0.38 |
| Slates and hard shales | 0.8 - 1.4 | • Silty clay | 0.03 - 0.07 | • Med.–coarse sand (w/gravel), med. dense | 0.11 - 0.66 |
| Soft shales | 0.2 - 0.8 | • Stiff clay, med. to high plasticity | 0.03 - 0.10 | • Med.–coarse sand (w/gravel), dense - very dense | 0.25 - 0.97 |
| Sandstones | 0.8 - 1.7 | • Very stiff clay, med. to high plasticity | 0.07 - 0.17 | • Silty sands | 0.17 - 0.41 |
| Weathered Sandstones | 0.7 - 0.8 | • Stiff clay, med. plasticity | 0.10 - 0.25 | • Dense glacial till | 0.30 - 0.52 |
| Chalk | 0.2 - 1.1 | • Very stiff clay, med. plasticity | 0.14 - 0.35 | • Sandy gravel, med. dense-dense | 0.21 - 1.38 |
| Weathered Marl | 0.15 - 0.25 | • Very stiff sandy silt, med. plasticity | 0.28 - 0.38 | • Sandy gravel, dense-very dense | 0.28 - 1.38 |
| Concrete | 1.4 - 2.8 | | | | |

## 1.4.8. Contributo del fusto alla portata laterale

Di default il programma trascura il contributo del fusto alla portata laterale. Abilitandone il calcolo, il fusto del micropalo viene suddiviso in elementi finiti; su ciascuno (i-esimo) viene calcolata la portata laterale come

$$Q_i = \pi \cdot d \cdot l_i \cdot \tau_i$$

In cui $\tau_i$ è la tensione limite di contatto bulbo-terreno, $l_i$ la lunghezza dell'elemento e d il diametro del micropalo. La portata totale sarà data dalla somma di tutti gli n (numero di elementi finiti in cui è stato suddiviso il micropalo) contributi.

$$Q = \sum_{i=1}^{n} Q_i$$

La tensione di contatto viene conservativamente stimata con la formulazione per pali di grande diametro

$$\tau = K_0 \cdot \sigma'_z \cdot tan\varphi + c$$



CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it

## 1.5. Calcolo della portata della punta

Il programma, di default, non calcola la portata della punta e si sconsiglia, in generale, di considerarla. Tuttavia se si è assolutamente certi della formazione della base del bulbo (i packer per iniezione solitamente sono posizionati ad almeno 50 cm dalla punta, la formazione del bulbo dipende dalle tecnologie usate ) e si è certi che la resistenza della punta venga mobilitata con i cedimenti previsti, è possibile considerarne il contributo, indicando al programma se considerare il diametro del fusto o dello sbulbo.

Se il terreno ha comportamento coesivo la portata è calcolata con riferimento alle condizioni non drenate in termini di tensioni totali

$$Q_b = (S_u \cdot N_c + \sigma_{v0}) \cdot A_b$$

Si assume $N_c = 9$ e la resistenza al taglio non drenata è stimata con la formula di Koustsoftas e Ladd in cui OCR=1 (il programma fa sempre riferimento alla condizione normalconsolidata)

$$S_u = \sigma'_{v0}(0.22 \pm 0.03) \cdot OCR^{0.8}$$

Se il terreno è non coesivo la portata è calcolata con la formula di Meyerhof se è disponibile il valore NSPT per lo strato in cui è attestata la punta

$$Q_b = 0.4 \cdot NSPT \cdot A_b$$

oppure a partire dall'angolo di resistenza al taglio come

$$Q_b = N_q \cdot \sigma'_{v0} \cdot A_b$$

In cui $N_q$ è calcolato con la formula di Prandtl

$$N_q = \frac{1 + \operatorname{sen} \varphi}{1 - \operatorname{sen} \varphi} \cdot e^{\pi \cdot \tan \varphi}$$

In letteratura spesso viene suggerito di non effettuare direttamente il calcolo della resistenza della punta (tra cui Mammino, 1994), ma di stimarla forfettariamente pari al 15% della portata laterale; Nel programma è possibile scegliere quale tra le due soluzioni adottare.
Si raccomanda comunque di valutare con cautela se attivare il calcolo della portata alla punta.

## 1.6. Stima del cedimento indotto dal carico

Franceschini e Fiorelli (2012, Il Geologo 88) hanno presentato un caso studio sui micropali valvolati. Gli Autori, avendo a disposizione una caratterizzazione meccanica del terreno estremamente precisa basata su prove CPT, CPTu, MASW e una prova di carico a rottura su un micropalo, hanno suggerito una procedura basata sul calcolo dei cedimenti alla Randolph e Wroth specializzata al caso di micropali, considerando come rappresentativo del terreno il modulo elastico G alla mezzeria del bulbo, che, grazie alle molte prove, è stato stimato correttamente; questa scelta parte dal presupposto che la quota maggiore di portata laterale sia imputabile al bulbo stesso, che quindi governerà anche il cedimento del micropalo. Si ricorda che la teoria di Randolph e Wroth fa riferimento ad un palo immerso in un semispazio omogeneo elastico lineare. Se da un lato fornisce una soluzione rapida, la sua bontà dipende totalmente dalla scelta del modulo di taglio da parte del progettista.


CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it

Il programma fornisce uno strumento per stimare G a partire dal numero di colpi della prova SPT e dal peso specifico del terreno con equazioni sperimentali proposte in letteratura:

Muzzi (1984) per sabbie $V_s = 80.6 \cdot N^{0.3\ 3}\ [m/s]$
Dikmen (2009) per argille $V_s = 44 \cdot N^{0.48}\ [m/s]$

$$G = \rho \cdot V_s^{\ 2}$$

Il coefficiente di Poisson ν può essere reperito direttamente in letteratura.

Generalmente, con questo approccio lineare, si riscontrano dei cedimenti molto modesti. Questo non deve sorprendere il progettista, in quanto il micropalo necessita di spostamenti ridotti per mobilitare la resistenza in esercizio.
Diverso ragionamento per il micropalo portato a rottura: in tal caso un metodo elastico lineare non è sufficiente per determinare il cedimento e bisogna utilizzare modelli più complessi e, in ogni caso, fare riferimento a una prova di carico.
Per avere stime del cedimento ragionevoli si raccomanda quindi di inserire valori del carico lontani da quello ultimo.

## 1.7. Combinazioni di calcolo per la capacità portante

### 1.7.1. Calcolo senza coefficienti

Se è selezionata questa opzione, il programma non applica nessun coefficiente di sicurezza e restituisce le portate calcolate esattamente con le formule descritte nel punto 1.5.

### 1.7.2. Calcolo con coefficienti

Per le verifiche dei pali di fondazione soggetti a carichi assiali (paragrafo 6.4.3.1.1), si fa riferimento ai due approcci, in cui alle combinazioni sono applicati i coefficienti riportati in tabella 6.4.II.

**Tabella 6.4.II** – *Coefficienti parziali $\gamma_R$ da applicare alle resistenze caratteristiche.*

| Resistenza | Simbolo | Pali infissi | | | Pali trivellati | | | Pali ad elica continua | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\gamma_R$ | (R1) | (R2) | (R3) | (R1) | (R2) | (R3) | (R1) | (R2) | (R3) |
| Base | $\gamma_b$ | 1,0 | 1,45 | 1,15 | 1,0 | 1,7 | 1,35 | 1,0 | 1,6 | 1,3 |
| Laterale in compressione | $\gamma_s$ | 1,0 | 1,45 | 1,15 | 1,0 | 1,45 | 1,15 | 1,0 | 1,45 | 1,15 |
| Totale (*) | $\gamma_t$ | 1,0 | 1,45 | 1,15 | 1,0 | 1,6 | 1,30 | 1,0 | 1,55 | 1,25 |
| Laterale in trazione | $\gamma_{st}$ | 1,0 | 1,6 | 1,25 | 1,0 | 1,6 | 1,25 | 1,0 | 1,6 | 1,25 |

(*) da applicare alle resistenze caratteristiche dedotte dai risultati di prove di carico di progetto.

La NTC impone anche un coefficiente di sicurezza funzione del numero di verticali indagate per ricavare i parametri meccanici del terreno, riportato in tabella 6.4.IV.

**Tabella 6.4.IV** – *Fattori di correlazione ξ per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali indagate.*

| Numero di verticali indagate | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 | ≥ 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\xi_3$ | 1,70 | 1,65 | 1,60 | 1,55 | 1,50 | 1,45 | 1,40 |
| $\xi_4$ | 1,70 | 1,55 | 1,48 | 1,42 | 1,34 | 1,28 | 1,21 |

Il programma assume che sia stata eseguita una sola verticale di indagine.


CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it

I coefficienti non sono modificabili dall'utente.
Il valore del carico assiale inserito, sia per la condizione 'Calcolo senza coefficienti' che 'Calcolo con coefficienti', non viene modificato da nessun coefficiente, ed è cura dell'utente inserire un valore che sia appropriato per le verifiche che vuole effettuare.

## 1.8. Instabilità (carico di punta)

Nella maggior parte dei casi (terreni almeno discreti, pali di normali dimensioni) non esistono pericoli di instabilità. La verifica di instabilità del palo immerso nel terreno acquista importanza essenzialmente quando si ha a che fare con la tipologia strutturale dei micropali.
Secondo la trattazione di Timoshenko e Gere (ripresa dall'Ing. Mascardi, Rivista Italiana di Geotecnica, anno II, n° 4, 1968), il carico critico di un'asta immersa in suolo elastico è dato dalla seguente relazione:

$$P_k = \frac{E \cdot J \cdot \pi^2}{L^2}\left(m^2 + \frac{\beta \cdot L^4}{m^2 \cdot \pi^4 \cdot E \cdot J}\right)$$

E = modulo di elasticità longitudinale dell'asta
J = momento di inerzia della sezione trasversale dell'asta
L = lunghezza dell'asta
B = reazione del terreno per unità di lunghezza e di spostamento laterale
m = numero di semionde della deformata sinusoidale dovuta al carico di punta m

Il valore minimo del carico critico, ottenuto differenziandone l'espressione rispetto ad m, è dato dall'espressione:

$$P_k = 2 \cdot \sqrt{\beta \cdot E \cdot J}$$

La verifica ad instabilità risulta superata se il carico verticale applicato al palo sarà minore del carico critico diviso per un opportuno coefficiente di sicurezza:

$$\frac{P_k}{c_r} \geq N$$

dove per $c_r$ si suggerisce di adottare un valore non minore di 10.


CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it

# 2. Utilizzo del programma

## 2.1. Simboli e unità di misura

Le unità di misura da utilizzare nel programma sono sempre indicate accanto al punto in cui deve essere inserito un numero e non possono essere modificate dall'utente.
I simboli principali per il micropalo sono:

- $D_p$ diametro di perforazione del foro
- $D_e$ diametro esterno del tubolare metallico
- $D_i$ diametro interno del tubolare metallico
- $P_i$ pressione di iniezione della malta

I simboli principali per il terreno sono:

- h altezza dello strato
- $\gamma$ peso dell'unità di volume di terreno
- $\phi$ angolo d'attrito del terreno
- c coesione del terreno
- NSPT numero di colpi di una prova SPT (tale valore viene assunto costante sullo strato)
- Winkler coefficiente di reazione di Winkler, serve solo per il calcolo di instabilità
- G modulo di taglio del terreno
- $\nu$ coefficiente di Poisson del terreno

## 2.2. Input

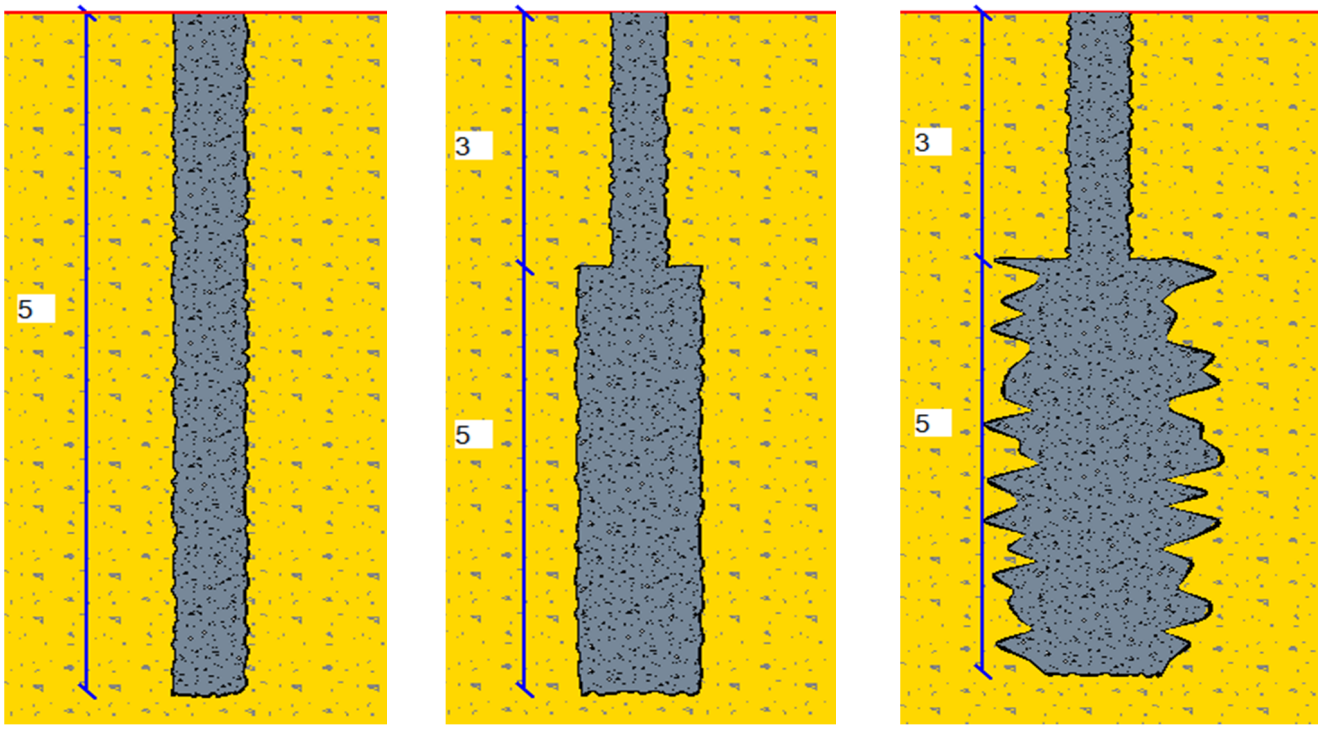


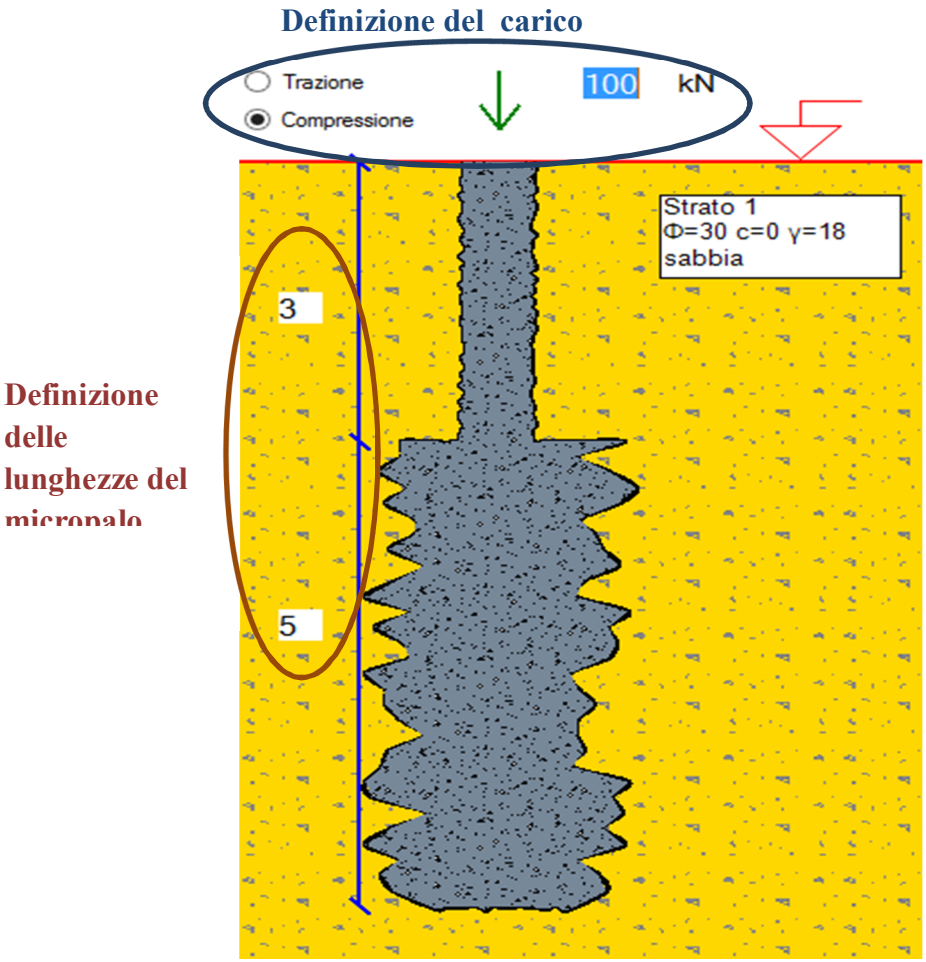

Figura 2 Tipologie di micropalo. Da sinistra verso destra: A; B; C e D sono rappresentati allo stesso modo

L'interfaccia è estremamente intuitiva e tutti i parametri specificati al paragrafo precedente sono facilmente rintracciabili nelle varie schede del programma.
Si raccomanda di fare attenzione al separatore decimale (punto o virgola): il programma legge automaticamente quello impostato a livello di sistema.


CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it

Le diverse tipologie di micropalo elencate nel paragrafo 1.3 vengono schematicamente rappresentate come in Figura 2. Le sbulbature sono solo rappresentate qualitativamente; il diametro del bulbo, in questa rappresentazione, non discende da alcuno calcolo e non è in scala con il resto del disegno.
Esso viene poi stimato in funzione della prova SPT in fase di calcolo, se presente, ed è utilizzato solo per calcolare il valore delle portate.

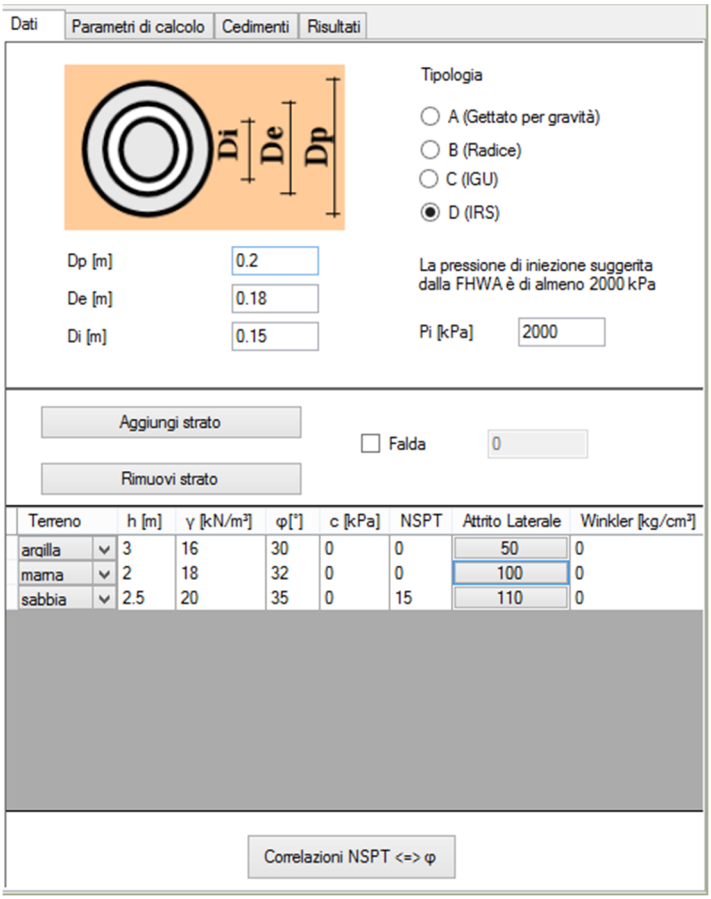
### 2.2.1. Pannello grafico




Le lunghezza del micropalo vengono inserite direttamente accanto alla linea di quota. Il disegno automaticamente si aggiorna con il valore inserito.
Il carico viene inserito, specificando se di trazione o di compressione per evitare confusioni di segno, nella cella accanto alla freccia.


CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it

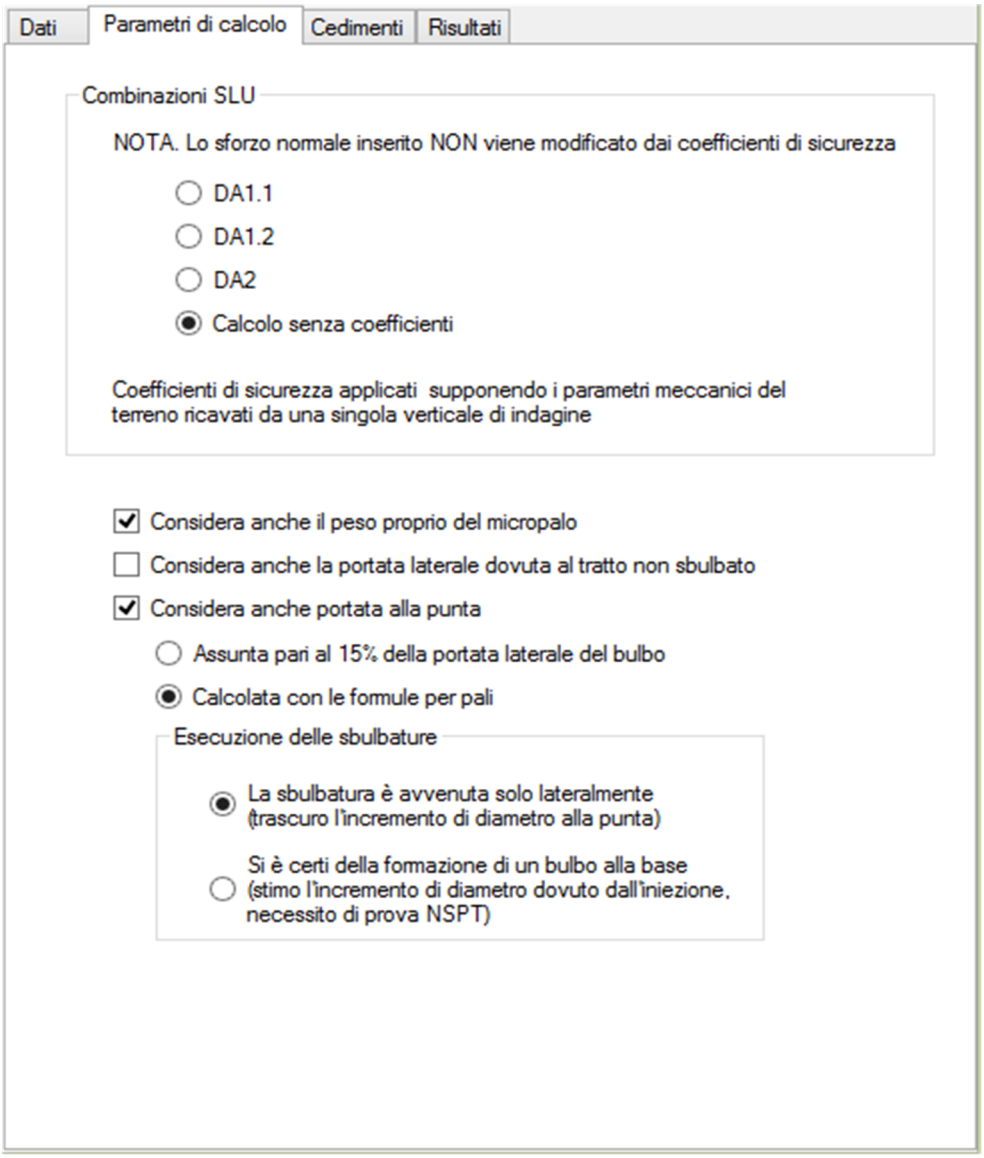
### 2.2.2. Pannello Dati




Pannello per la definizione delle caratteristiche del micropalo e della stratigrafia.
Le caratteristiche del micropalo sono inseribili in maniera immediata.
Per attivare la falda cliccare sul comando "Falda" specificando la quota, in metri, a cui si trova (il piano campagna è a quota zero).
Cliccando sul tasto "Aggiungi strato" il programma inserisce nella tabella uno strato. Questo strato è collocato in fondo alla stratigrafia. Il tasto "Rimuovi strato" rimuove gli strati, uno alla volta, a partire dal basso verso l'alto.
Nella prima colonna è possibile scegliere un tipo di terreno tra sabbia, argilla e marna.
Cliccando su una cella della colonna "Attrito laterale" il programma fa comparire delle tabelle con valori consigliati di tensione ultima di contatto bulbo – terreno; l'utente può liberamente inserire un valore a suo giudizio consistente con la propria stratigrafia.
La colonna "Winkler" serve solo per la verifica dell'instabilità dell'equilibrio di punta (di solito sempre superata, a meno che il micropalo attraversi ampi strati meccanicamente scadenti).
Il tasto "Correlazioni NSPT <=> ϕ" riporta alcune correlazioni empiriche riportate da Bowles, Fondazioni (2004).


CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it

### 2.2.3. Pannello Parametri di calcolo



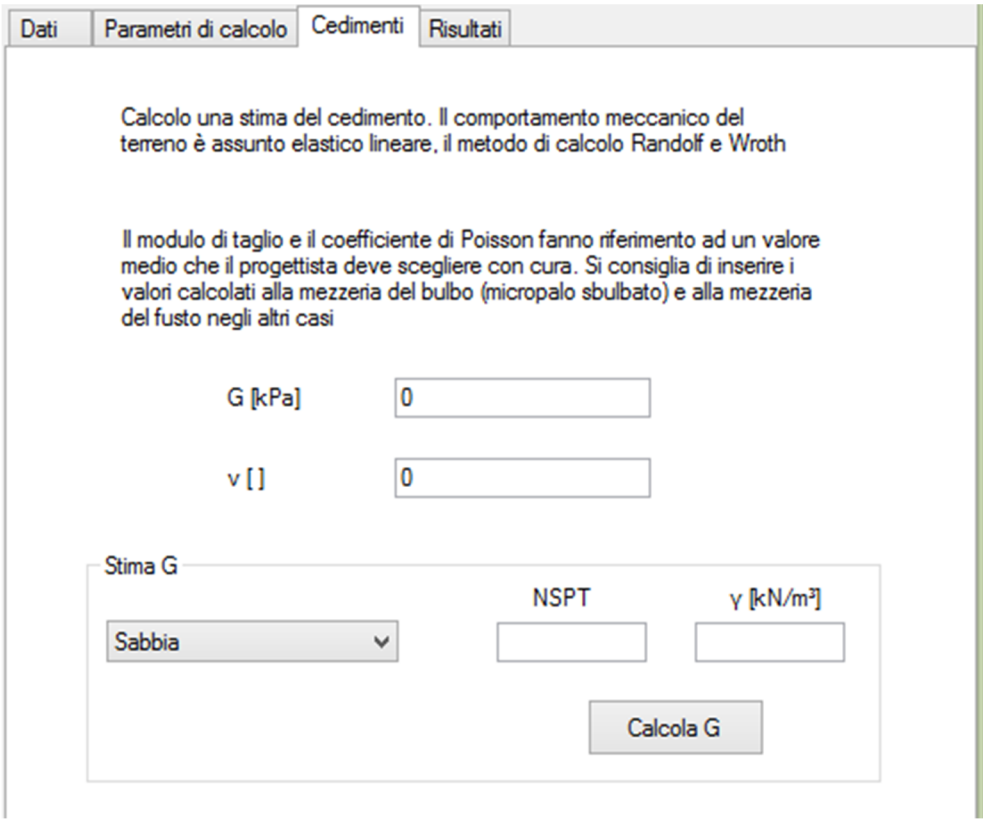

Nel pannello "Parametri di calcolo" si possono impostare:

- le combinazioni allo SLU per capacità portante del micropalo
- il calcolo automatico del peso proprio del micropalo
- il calcolo della portata laterale del tratto non sbulbato limitatamente a micropali di tipo B C D
- il calcolo della portata alla punta (disabilitato se il carico è di trazione)
    - forfettariamente
    - con la formulazione per pali, in cui si può scegliere il diametro di calcolo

  si richiama quanto detto precedentemente: di solito è opportuno lasciare disabilitato questo contributo


CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it

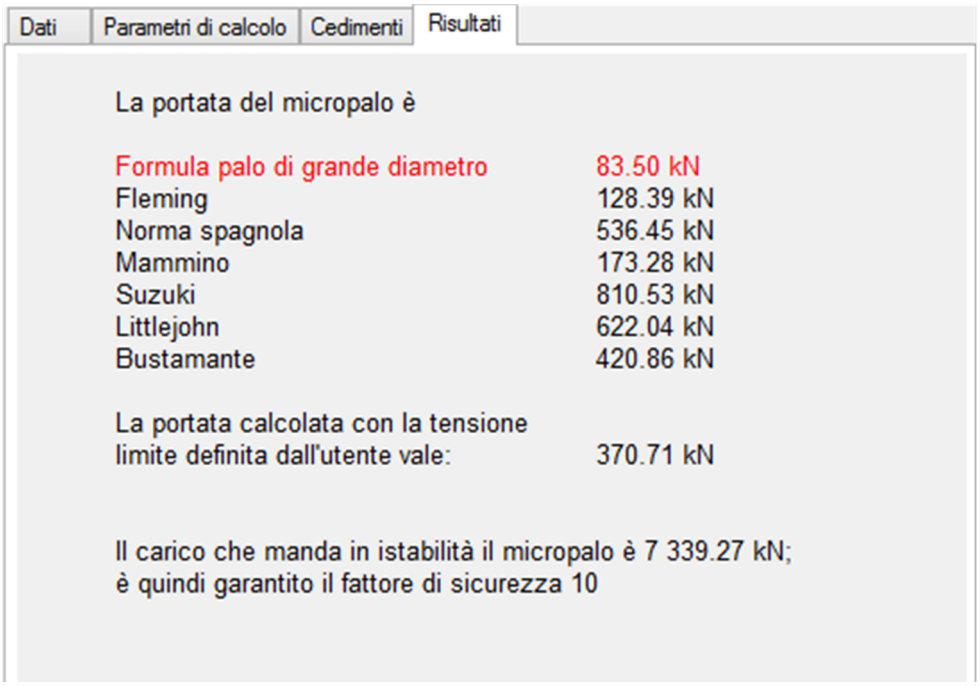
### 2.2.4. Pannello Cedimenti




Se si vuole stimare il cedimento inserire modulo di taglio e coefficiente di Poisson.
Una stima di G è ottenibile inserendo un valore di NSPT e uno di γ, con le equazioni empiriche già enunciate nel capitolo di teoria.


CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it

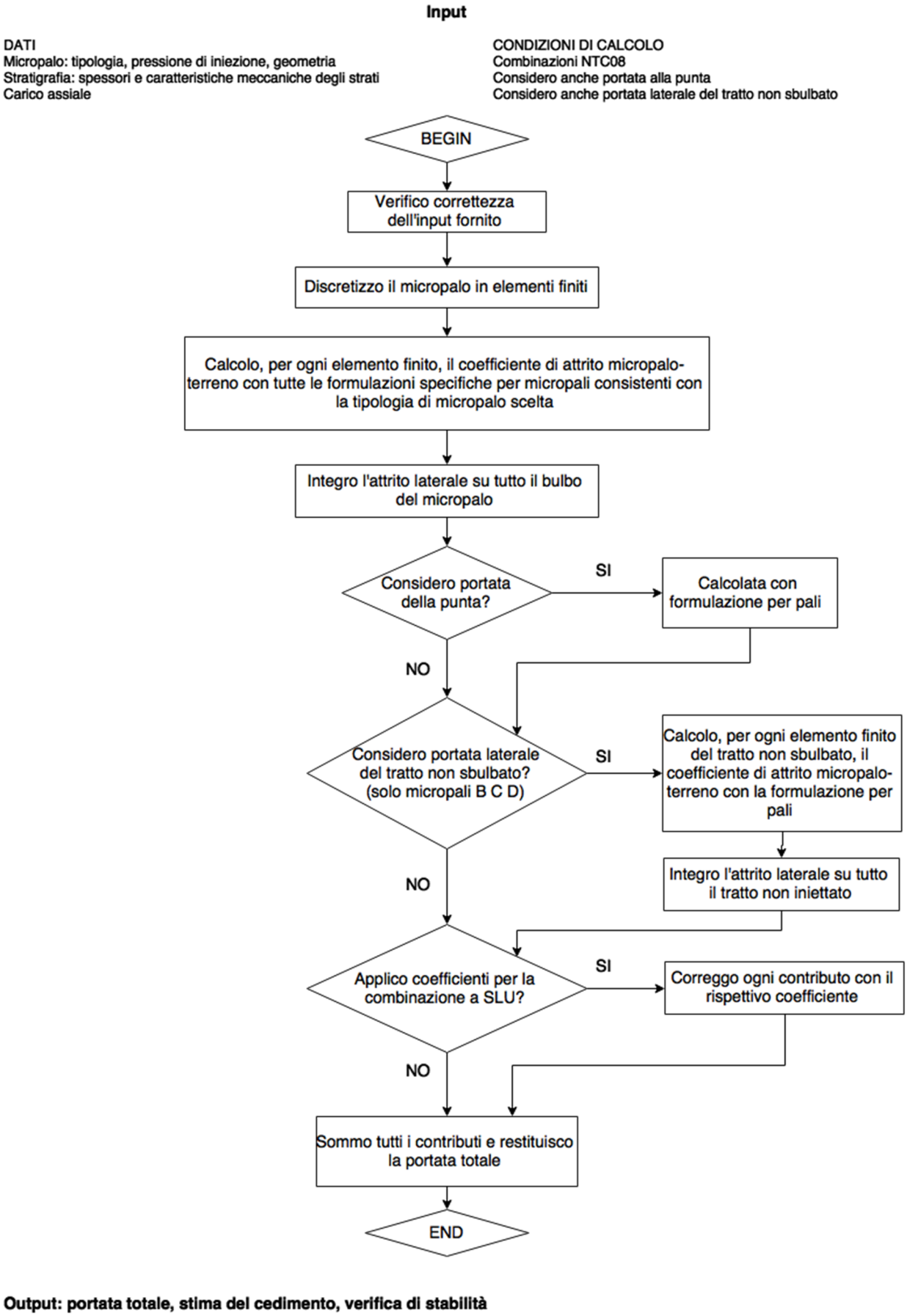
### 2.2.5. Pannello risultati




Attivando il pannello Risultati viene automaticamente eseguito il calcolo. Vengono riportati i calcoli di tutte le portate compatibili con l'input definito dell'utente. In rosso vengono evidenziati i valori che sono inferiori al carico definito in input.
Si ricorda che la portata calcolata come "Formula palo di grande diametro" è il valore più piccolo che ci si possa aspettare, assumerlo come riferimento sarebbe eccessivamente conservativo.


CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it

## 2.3. Diagramma di flusso riassuntivo del programma






CDM DOLMEN e omnia IS srl - Via Drovetti 9/F, 10138 Torino
Tel. 011.4470755 - Fax 011.4348458 - www.cdmdolmen.it - dolmen@cdmdolmen.it