

5 IL DIMENSIONAMENTO SPEDITIVO DELLE PALIFICATE IN PARETE DOPPIA

5.1 VERIFICHE STATICHE (ESTERNE)

In quanto opere di sostegno, oltre che di consolidamento, le palificate in legname a doppia parete devono assolvere a funzioni statiche, fintanto che non si afferma in maniera adeguata lo sviluppo degli apparati radicali del materiale vivo messo a dimora all'atto della costruzione della struttura.

Perciò la progettazione di questo tipo di intervento di ingegneria naturalistica non può prescindere da una adeguata verifica del comportamento statico dell'opera, riferito alla spinta del terreno retrostante a cui essa è sottoposta.

Le verifiche statiche necessarie sono:

- La verifica a ribaltamento
- La verifica a scorrimento

Non si ritiene necessaria la verifica allo schiacciamento in quanto i materiali impiegati nella realizzazione sono prevalentemente naturali e il più delle volte non dissimili da quelli costituenti il terreno su cui la palificata viene costruita.

Per semplificazione dei calcoli, ai fini della verifica si ammette che:

1. Il paramento posteriore della struttura sia verticale. In realtà le modalità realizzative conducono ad una inclinazione superiore, da cui l'ipotesi risulta essere a favore di stabilità e quindi cautelativa per quanto riguarda il comportamento statico a ribaltamento.
2. La struttura viene considerata come un corpo rigido (ipotesi cautelativa), anche se in realtà è in grado di deformarsi parzialmente, assorbendo cedimenti differenziali del terreno retrostante.
3. Nella verifica a ribaltamento non si tiene conto dell'inclinazione del piano di appoggio (sempre in contropendenza, con angolo di 10°-15°), ipotesi anch'essa cautelativa.

Simboli utilizzati:

γ_p = peso volumico della palificata

r = coefficiente di attrito terreno-struttura

ϑ = inclinazione del piano di appoggio della struttura (in contropendenza)

h = altezza della palificata

b = base della palificata

S_o = componente orizzontale della spinta del terreno

M_s = momento stabilizzante

M_r = momento ribaltante

5.1.1 Verifica a ribaltamento

Le forze che intervengono in detta verifica sono quelle orizzontali, che agiscono sulla struttura originando un momento ribaltante e quelle verticali che producono un momento stabilizzante, di segno opposto, che si contrappone al precedente. Le prime sono riconducibili essenzialmente alla componente orizzontale della spinta del terreno, convenzionalmente considerata applicata ad una altezza pari ad un terzo dell'altezza della palificata (proiezione del paramento posteriore sull'asse verticale), le seconde attribuibili al peso proprio della struttura, con braccio dell'asse di applicazione pari a metà della dimensione di base della palificata.

Si ha equilibrio al ribaltamento quando il rapporto tra il momento stabilizzante e quello ribaltante è pari a 1, ma per ragioni di maggior sicurezza si impone che la condizione minima di verifica a ribaltamento sia la seguente:

$$\frac{M_s}{M_r} = 1.5$$

e, in genere, si considera verificata la struttura se

$$\frac{M_s}{M_r} \geq 1.5$$

Scritta in forma esplicita la condizione di verifica è che:

$$\frac{bh\gamma_p \times \frac{b}{2}}{S_o \times \frac{h}{3}} \geq 1.5$$

5.1.2 Verifica a scorrimento

La stabilità a scorrimento è determinata dal rapporto tra le forze che tendono a produrre una traslazione orizzontale della struttura e quelle che si oppongono a tale movimento. Le prime sono riconducibili all'azione della componente orizzontale della spinta del terreno (tenuto conto dell'angolo di inclinazione del piano d'appoggio della palificata), che tende a traslare la struttura nel verso della componente orizzontale della spinta del terreno, e all'azione del peso della palificata che tende a produrre, nel verso opposto, una traslazione della struttura lungo il piano d'appoggio. Le seconde coincidono con le azioni di attrito che si sviluppano lungo il piano di appoggio.

Si ha equilibrio a scorrimento quando il rapporto tra le forze stabilizzanti e quelle destabilizzanti è pari ad 1, ma, per sicurezza si assume un coefficiente pari a 1.5, come per la verifica a ribaltamento.

In forma esplicita la condizione minima di verifica è:

$$\eta_R = \frac{rbh\gamma_p \cos \vartheta}{S_o \cos \vartheta - bh\gamma_p \sin \vartheta} = 1.5$$

e, in generale, si considera verificata a scorrimento la struttura se:

$$\eta_s = \frac{rbh\gamma_p \cos \vartheta}{S_o \cos \vartheta - bh\gamma_p \sin \vartheta} \geq 1.5$$

5.1.3 Considerazioni

E' frequente il caso che la struttura, data la natura dei materiali impiegati, soddisfi le condizioni di verifica a ribaltamento e non quelle a scorrimento.

In tal caso è opportuno vincolare al piano di appoggio la palificata con elementi verticali (in legno, ma preferibilmente in ferro o acciaio) quali piloti,... per garantire la tenuta anche a scorrimento.

Si consiglia comunque, in casi che richiedono una ulteriore sicurezza, l'impiego di un coefficiente di sicurezza pari a 1.8, tanto per la verifica a ribaltamento che per quella a scorrimento.

5.2 **VERIFICHE INTERNE**

Le verifiche interne che si ritengono indispensabili al fine di garantire una adeguata funzionalità dell'opera, anche nel periodo immediatamente successivo alla realizzazione, sono le seguenti:

1. La verifica a flessione dei correnti interni
2. La verifica al taglio dei correnti in prossimità delle chiodature

La prima permette di dimensionare il diametro dei correnti interni e l'interasse tra i traversi in maniera che gli elementi longitudinali non cedano a causa delle sollecitazioni di flessione prodotte dalla spinta del terreno retrostante, la seconda riguarda il corretto dimensionamento della sezione dei correnti in modo che resistano opportunamente alle sollecitazioni di taglio in prossimità dei vincoli, ovvero delle chiodature corrente-traverso.

Le grandezze che intervengono in queste verifiche sono:

- Gli sforzi ammissibili di flessione e taglio caratteristici dell'essenza impiegata

- La spinta del terreno, che genera il momento flettente e la sollecitazione di taglio
- Il diametro del corrente (per cui si assume sezione circolare) che caratterizza il modulo resistente e la resistenza al taglio
- L'interasse tra i traversi, che interviene nella determinazione del momento flettente

Ci si limita qui a ricordare i carichi di rottura e le sollecitazioni medie ammissibili (carichi di sicurezza) per la flessione ed il taglio (ortogonale alle fibre) delle principali essenze che possono essere impiegate nella realizzazione di palificate in parete doppia.

Essenza	Carico di Rottura		Carico di Sicurezza	
	Flessione (N/cm ²)	Taglio (N/cm ²)	Flessione (N/cm ²)	Taglio (N/cm ²)
Larice	5500	420	1000	500
Abete rosso	6500	500	900	400
Pini	3400	500	900	400
Castagno	6100	420	900	350
Robinia	7000	580	800	400

5.2.1 Verifica a flessione dei correnti interni

Simboli utilizzati:

σ_{\max} = sollecitazione massima a flessione (N/cm²)

σ_{am} = Sollecitazione ammissibile a flessione (N/cm²)

D = diametro del corrente (cm)

d = interasse tra i traversi (cm)

W = modulo resistente (cm^3)

M = momento flettente

S = spinta del terreno

La sollecitazione a flessione che il terreno esercita sul corrente interno dipende dalla spinta del terreno. Il dimensionamento avviene considerando la spinta massima della terra, considerata quale carico distribuito sull'intera lunghezza del corrente (tra due traversi successivi). La spinta genera un momento flettente il cui valore massimo dipende dal tipo di chiodatura che vincola correnti e traversi.

Infatti per chiodature di tipo "passante" il corrente potrà essere assimilato ad una trave incastrata agli estremi, mentre per chiodature di tipo "tangenziale" sarà assimilato ad una trave appoggiata agli estremi.

Il momento flettente è contrastato dal modulo resistente della sezione del corrente, assunta circolare, in funzione del diametro della medesima.

Il rapporto tra momento flettente e modulo resistente è la sollecitazione di flessione corrispondente a quella spinta e per quel diametro, che deve essere confrontata con la sollecitazione massima ammissibile per l'essenza considerata.

La condizione di verifica è la seguente:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} \leq \sigma_{am}$$

dove:

$$M_{\max} = \frac{Sd}{8} \quad \text{nel caso di chiodatura tangenziale}$$

$$M_{\max} = \frac{Sd}{12} \quad \text{nel caso di chiodatura passante}$$

$$W = \frac{\pi D^3}{32}$$

La condizione in forma esplicita è dunque:

$$\frac{32Sd}{8\pi D^3} = \frac{4Sd}{\pi D^3} \leq \sigma_{am} \quad \text{per chiodature di tipo tangenziale}$$

$$\frac{32Sd}{12\pi D^3} = \frac{8Sd}{3\pi D^3} \leq \sigma_{am} \quad \text{per chiodature di tipo passante}$$

5.2.2 Verifica al taglio

Simboli utilizzati:

τ_{max} = sollecitazione massima a flessione (N/cm²)

τ_{am} = Sollecitazione ammissibile a flessione (N/cm²)

D = diametro del corrente (cm)

S = spinta del terreno

La sollecitazione a taglio che il terreno esercita sul corrente interno in corrispondenza dei vincoli dipende dalla spinta del terreno. Il dimensionamento avviene considerando la spinta massima della terra. La reazione di taglio dipende dalla sezione del corrente e quindi dal tipo di chiodatura che vincola correnti e traversi.

Infatti, a parità di diametro, per chiodature di tipo “passante” la sezione resistente sarà pari alla metà di quella relativa a chiodature di tipo “tangenziale”.

La condizione di verifica è la seguente:

$\alpha \frac{S}{A} = \tau_{\max} \leq \tau_{am}$ dove S/A è la reazione di taglio media sulla sezione A ed α il coefficiente prefisso per sezioni circolari (pari a $4/3$), quindi, esplicitando l'area in funzione del diametro:

$$\frac{4}{3} \times \frac{S}{0.5 \frac{\pi}{4} D^2} \leq \tau_{am} \quad \text{per chiodature di tipo "passante"}$$

$$\frac{4}{3} \times \frac{S}{\frac{\pi}{4} D^2} \leq \tau_{am} \quad \text{per chiodature di tipo "tangenziale"}$$

5.3 TABELLE PER IL DIMENSIONAMENTO SPEDITIVO

5.3.1 Dimensionamento alle condizioni di minima verifica esterna

Simboli utilizzati:

γ_p = peso volumico della palificata

r = coefficiente di attrito terreno-struttura

ϑ = inclinazione del piano di appoggio della struttura (in contropendenza)

h = altezza della palificata

b = base della palificata

S_o = componente orizzontale della spinta del terreno

M_s = momento stabilizzante

M_r = momento ribaltante

Per un dimensionamento speditivo della palificata in parete doppia è possibile costruire un grafico che riassume in maniera sinottica le caratteristiche della struttura che soddisfano la condizione minima di verifica al ribaltamento ed a scorrimento.

Il coefficiente minimo di verifica, cautelativo ai fini della stabilità, è normalmente pari a 1.5, tanto per il ribaltamento quanto per lo scorrimento.

In seguito a quanto già esposto si osserva che la condizione minima di verifica a ribaltamento è la seguente:

$$\frac{M_s}{M_r} = 1.5 \quad \text{in cui}$$

$$M_s = bh\gamma_p \times \frac{b}{2} = b^2 \frac{h\gamma_p}{2} \quad \text{e} \quad M_r = S_o \frac{h}{3}$$

da cui si ottiene, sviluppando e semplificando, che:

$$b = \sqrt{\frac{S_o}{\gamma_p}}$$

La dimensione della base, ai fini della verifica a ribaltamento, non dipende dall'altezza della struttura, ma solo dall'entità della componente orizzontale della spinta e dal peso volumico della palificata.

Graficamente il luogo geometrico dei valori calcolati di "b" ha espressione:

$$b = mS_o^{0.5}$$

con coefficiente $m = f(\gamma_p) = \sqrt{\frac{1}{\gamma_p}}$

Procedendo allo stesso modo per la condizione minima di verifica allo scorrimento è:

$$\frac{rbh\gamma_p \cos \vartheta}{S_o \cos \vartheta - bh \sin \vartheta} = 1.5$$

da cui, esplicitando "b" si ottiene:

$$b = \frac{1.5S_o \cos \vartheta}{h\gamma_p(r \cos \vartheta + 1.5 \sin \vartheta)}$$

che evidenzia come la dimensione della base della palificata, per la verifica a scorrimento, sia funzione dell'altezza della struttura, oltre che dell'attrito terreno-palificata, della inclinazione del piano di appoggio e del peso volumico della palificata.

E' dunque possibile, per diversi valori dell'altezza della struttura, ottenere, in funzione della componente orizzontale della spinta del terreno, i valori di "b" che soddisfano la condizione minima di verifica allo scorrimento.

Per ogni altezza si ottiene una retta di equazione $b = aS_o$ in cui il coefficiente angolare

$a = f(\vartheta, \gamma_p, r, h)$ è:

$$a = \frac{1.5 \cos \vartheta}{h\gamma_p(r \cos \vartheta + 1.5 \sin \vartheta)}$$

5.3.2 Dimensionamento alle condizioni di minima verifica interna

Simboli utilizzati:

$D =$ diametro del corrente interno

$d =$ interasse tra i traversi

$\sigma_{am} =$ sollecitazione ammissibile a flessione

$\tau_{am} =$ sollecitazione ammissibile al taglio

$S =$ spinta del terreno

Potrebbe risultare comodo disporre di tabelle per il dimensionamento speditivo delle palificate in parete doppia, al fine di poter assegnare opportune dimensioni ai correnti e all'interasse tra i traversi, nota la spinta indicativa del terreno. Ciò consentirebbe anche di poter scegliere, in via preliminare, la tipologia di chiodatura da adottare, nonché di

effettuare delle valutazioni economiche di massima, prima di procedere con le necessarie verifiche di stabilità esterne ed interne.

Da quanto detto a proposito delle verifiche interne emerge la possibilità di porre in relazione, determinata l'essenza da impiegare, e quindi le sollecitazioni ammissibili a flessione e taglio, la spinta della terra con il diametro dei correnti in maniera che sia verificata la condizione minima di verifica a flessione e a taglio dei correnti interni, a seconda della tipologia di chiodatura (passante o tangenziale) adottata.

Per quanto riguarda la sollecitazione a flessione, dalle relazioni già esposte, deriva che:

$$D = \sqrt[3]{\frac{32Sd}{8\pi\sigma_{am}}} \quad \text{verifica la relazione } \sigma_{\max} = \sigma_{am} \quad \text{per chiodature di tipo tangenziale}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{32Sd}{12\pi\sigma_{am}}} \quad \text{verifica la relazione } \sigma_{\max} = \sigma_{am} \quad \text{per chiodature di tipo passante}$$

ed è quindi possibile individuare, per i diversi valori dell'interasse "d" tra i traversi, il luogo geometrico dei punti che soddisfano la condizione minima di verifica a flessione con il minimo diametro.

Ponendo in grafico i valori ricavati del diametro in funzione della spinta, si ottengono, per i diversi valori di "d" curve di espressione:

$$D = aS^{0.3333}$$

in cui il coefficiente $a = f(d, \sigma_{am})$ vale:

$$a = \sqrt[3]{\frac{32d}{8\pi\sigma_{am}}} \quad \text{e} \quad a = \sqrt[3]{\frac{32d}{12\pi\sigma_{am}}} \quad \text{rispettivamente per chiodature tangenziali e passanti}$$

I punti giacenti al di sotto della curva rappresentano relazioni diametro-spinta non verificate a flessione, mentre quelli giacenti al di sopra corrispondono a relazioni verificate.

Allo stesso modo, per quanto concerne le sollecitazioni di taglio si ha che le relazioni di verifica in condizioni minime ($\tau_{\max} = \tau_{am}$) sono le seguenti:

$$D = \sqrt{\frac{16S}{3\pi\tau_{am}}} \text{ per chiodature di tipo tangenziale}$$

$$D = \sqrt{\frac{32S}{3\pi\tau_{am}}} \text{ per chiodature di tipo passante}$$

ed è quindi possibile individuare il luogo geometrico dei punti che soddisfano la condizione minima di verifica a taglio con il minimo diametro.

Si ricorda che, contrariamente a quanto avviene per la sollecitazione a flessione, non influisce sulla verifica a taglio l'interasse tra i traversi.

Ponendo in grafico i valori ricavati del diametro in funzione della spinta, si ottiene, per la sollecitazione massima ammissibile, la curva di espressione:

$$D = bS^{0.5}$$

in cui il coefficiente $b = f(\tau_{am})$ vale

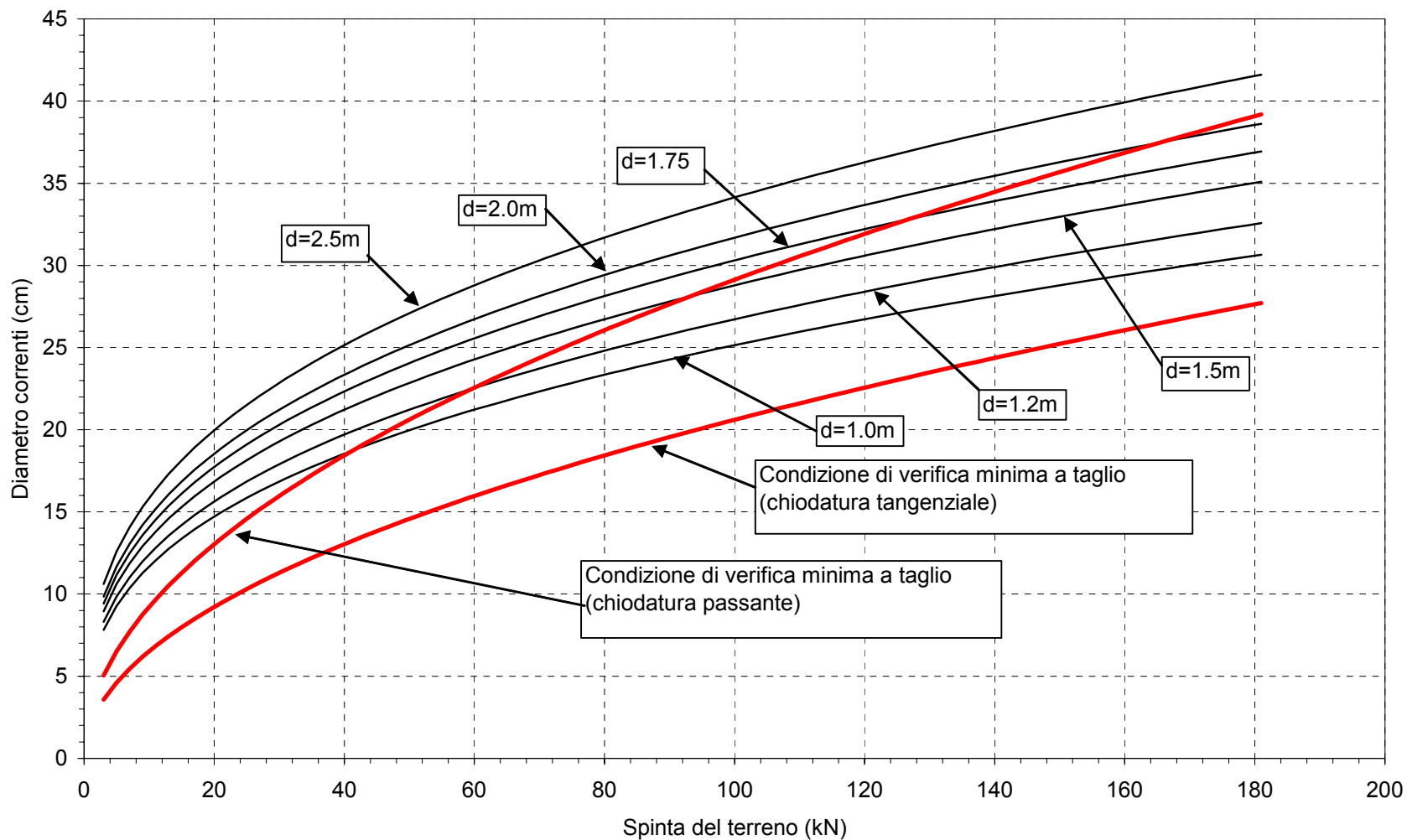
$$b = \sqrt{\frac{16}{3\pi\tau_{am}}} \text{ e } b = \sqrt{\frac{32}{3\pi\tau_{am}}} \text{ rispettivamente per chiodatura tangenziale e passante}$$

I punti giacenti al di sotto della curva rappresentano relazioni diametro-spinta non verificate a taglio, mentre quelli giacenti al di sopra corrispondono a relazioni verificate.

Di seguito si riportano alcune delle tabelle contenenti le relazioni diametro-spinta sopra descritte.

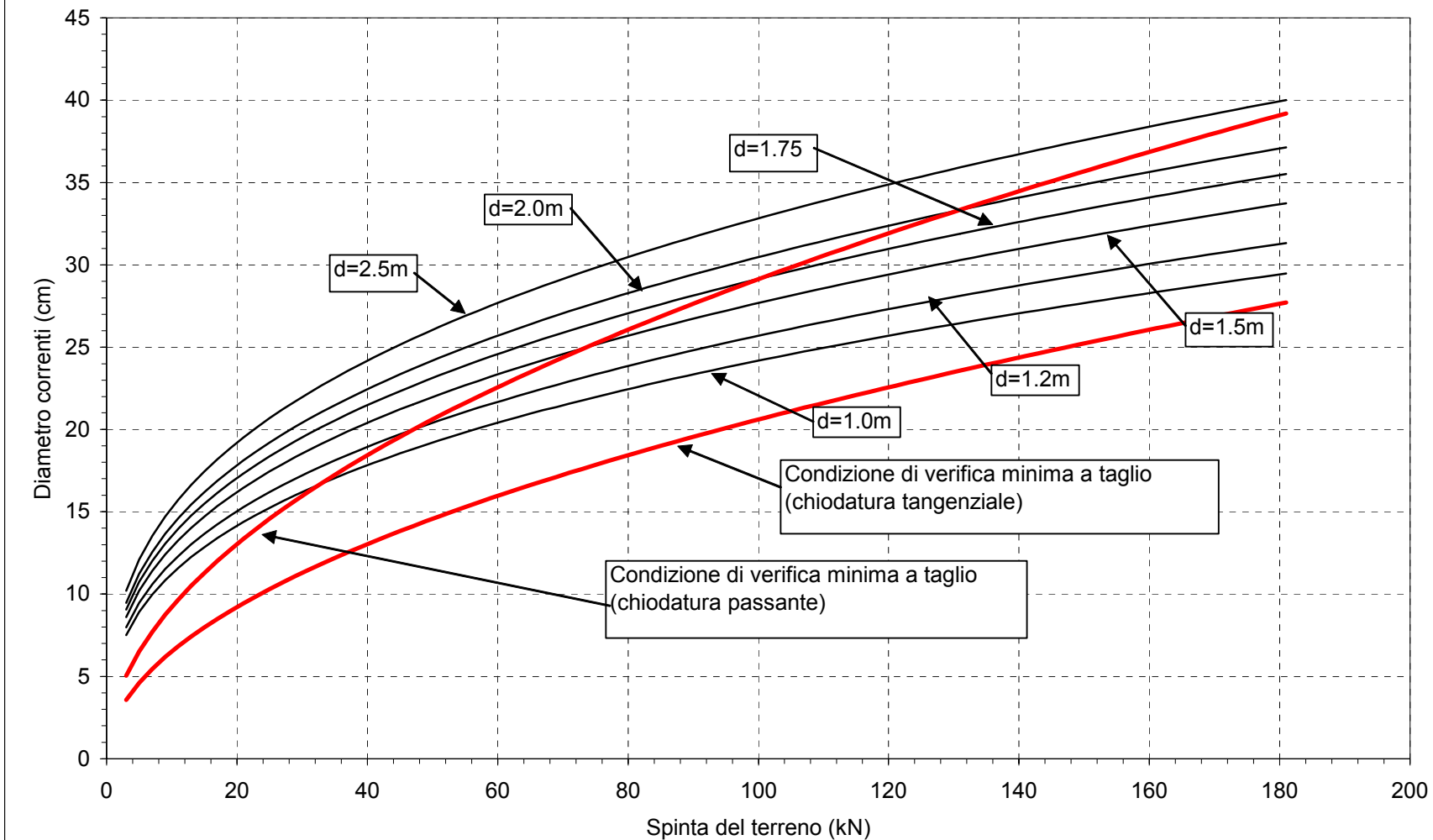
CURVE DI MINIMA VERIFICA INTERNA

Essenza: Robinia $\sigma_{amm. a flessione} = 800 \text{ N/cm}^2$ $\sigma_{amm. a taglio} = 400 \text{ N/cm}^2$



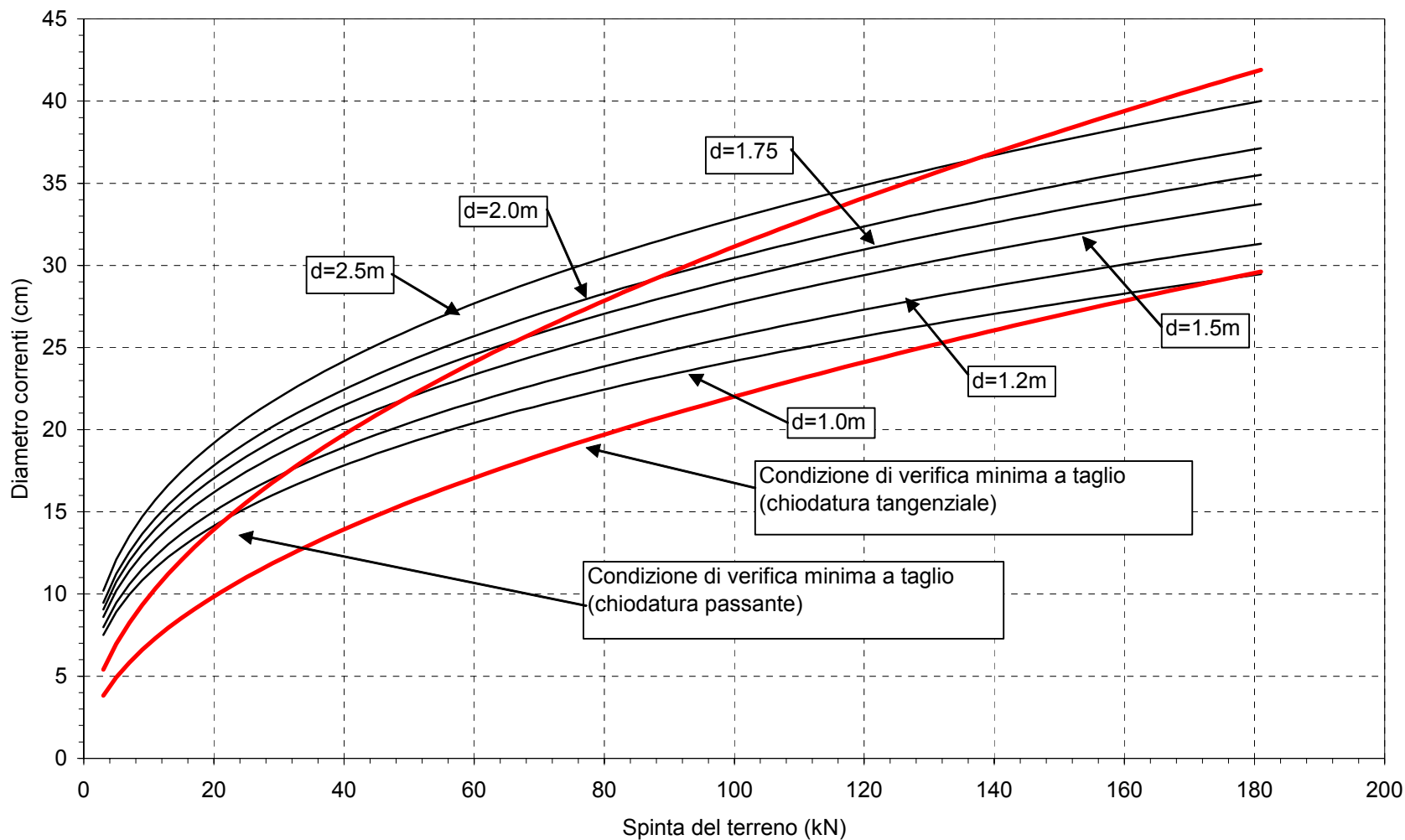
CURVE DI MINIMA VERIFICA INTERNA

Essenza: Abete $\sigma_{amm. a flessione} = 900 \text{ N/cm}^2$ $\sigma_{amm. a taglio} = 400 \text{ N/cm}^2$



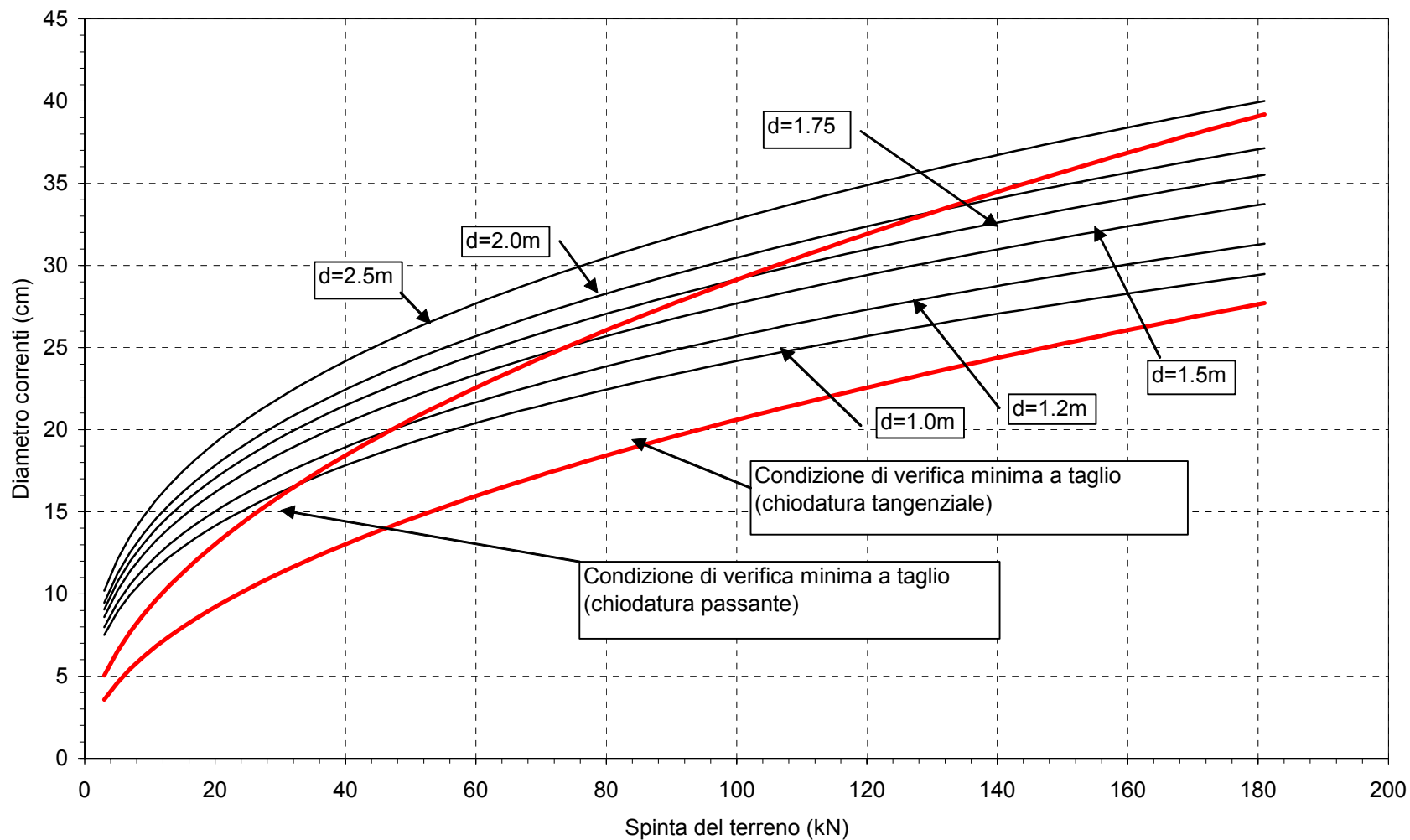
CURVE DI MINIMA VERIFICA INTERNA

Essenza: Castagno $\sigma_{amm. a flessione} = 900 \text{ N/cm}^2$ $\sigma_{amm. a taglio} = 350 \text{ N/cm}^2$



CURVE DI MINIMA VERIFICA INTERNA

Essenza: pini sigma amm. a flessione = 900 N/cm² sigma amm. a taglio = 400 N/cm²



CURVE DI MINIMA VERIFICA INTERNA

Essenza: larice sigma amm. a flessione = 1000 N/cm² sigma amm. a taglio = 500 N/cm²

