

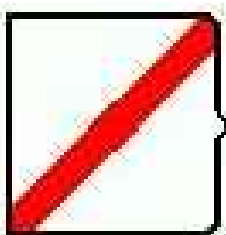


COMUNE di STIO

PROVINCIA DI SALERNO



PSR CAMPANIA A 2007-2013
Misura 125



PROGETTO ESECUTIVO

Lavori di sistemazione e messa in sicurezza della strada comunale
"Oliceto - Chiusa in Fratti"

Data: Aprile 2015

Prot. n°:

Committente:

Amministrazione Comunale di Stio

Progetto:

U.T.C.
geom. Stefano Trotta

Consulente alla progettazione:

geol. Emilio Vitale

Responsabile del procedimento:

Tavola:

Relazione di calcolo della
palificata vita e doppia

Disegno n°: Scala:

5

Documenti di proprietà dell'Amministrazione
Comunale di Stio

Diritti tutelati a termine di legge

RELAZIONE DI CALCOLO – PALIFICATA VIVA A DOPPIA PARETE

Introduzione

La palificata viva a doppia parete permette la stabilizzazione della scarpata (intervento strutturale con aumento delle forze resistenti) o il contenimento di volumi di terreno garantendo allo stesso tempo una mitigazione dell'impatto ambientale.

Ai fini della progettazione devono valere i principi statici e costruttivi delle opere di sostegno a gravità con particolare riferimento, secondo quanto stabilito dal D.M. 11/03/1988, alla **verifica di stabilità esterna** (schiacciamento del terreno di fondazione, ribaltamento, scivolamento lungo il piano di base) e alla **verifica globale** dell'insieme struttura terreno.

Questo tipo di struttura, essendo un' alternativa ad un'opera a gravità di tipo tradizionale, rende necessarie le verifiche statiche sopra descritte tali da confermare la stabilità nel periodo transitorio, durante il quale non si può fare affidamento sul contributo delle piante medesime (verifica a breve termine).

Il deterioramento nel tempo (marcescenza) della struttura in pali di castagno presuppone che i parametri di stabilità del manufatto vengano riferiti ad un paramento esterno assimilabile ad una pendice ben vegetata (ormai va trascurato l'effetto dei pali in legno) e ad un terreno con buone caratteristiche di attrito (verifica a lungo termine).

Pertanto di seguito si procede ad entrambe le verifiche, così da assicurare la stabilità della scarpata a monte della strada sia a breve che a lungo termine

Normativa di riferimento

Per le verifiche **si fa riferimento alla seguente normativa:**

-D.M. 11/03/1988;

Si fa presente che nel breve periodo la condizione di carico sismico è stata trascurata in quanto si è ritenuto che la probabilità di accadimento dell'evento in tale periodo sia così bassa da non commettere un errore apprezzabile.

Verifica a breve termine

Come già descritto, si effettuano le stesse verifiche delle opere di sostegno a gravità secondo quanto prescritto dal D.M. 11/03/1988 non tenendo conto dell'incremento per effetto del sisma come stabilito dall'OPCM 3274 (analisi pseudo-statica);

Di seguito si è proceduto ad effettuare ciascuna verifica separatamente, seguendo lo schema di forze riportato nella *fig. 0* sottostante :

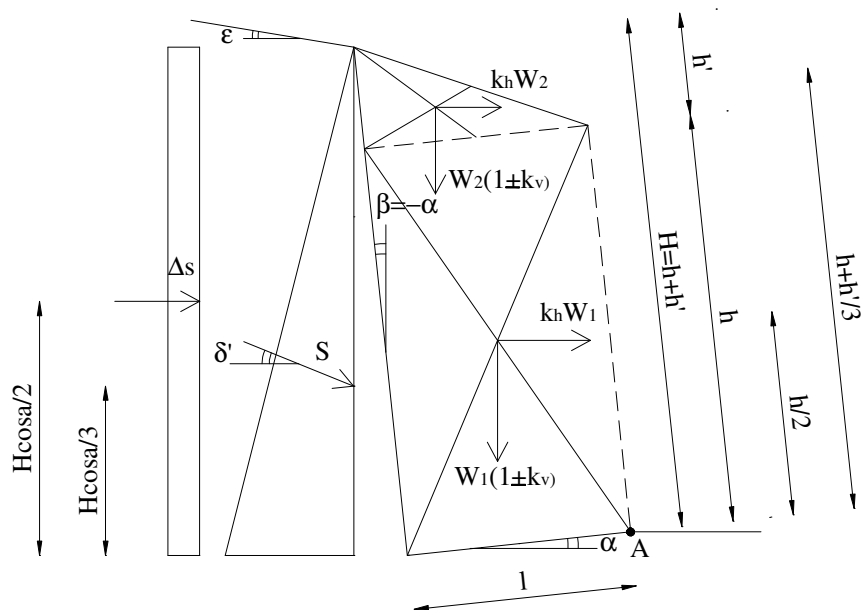


Fig. 0 -Schema delle azioni in gioco per le verifiche di stabilità

Prima di tutto è indispensabile determinare le azioni in gioco, quindi la forza peso della palificata viva a doppia parete (W_1 e W_2) e la spinta del terrapieno S , mentre l'effetto benefico della coesione ΔS si considera a parte in quanto avente una distribuzione di tensioni differente; nei calcoli di seguito effettuati si fa riferimento alla fascia di un metro.

-Peso della palificata:

$$\text{Palificata trasversale} \Rightarrow P_{\text{trav}} = \gamma_{\text{legno}} \left(\frac{\pi \phi_{\text{legno}}^2}{4} \right) n_{\text{pali, trav}} (2/i)$$

$$\text{Palificata longitudinale} \Rightarrow P_{\text{long}} = \gamma_{\text{legno}} \left(\frac{\pi \phi_{\text{legno}}^2}{4} \right) 2 n_{\text{pali, long}}$$

$$\text{Terreno di riempimento} \Rightarrow P_{\text{riemp}} = \gamma_{\text{riemp}} \left(hl - \frac{(P_{\text{trav}} + P_{\text{long}})}{\gamma_{\text{legno}}} \right)$$

$$\text{Peso complessivo elemento rettangolare} \Rightarrow W_1 = P_{\text{trav}} + P_{\text{long}} + P_{\text{riemp}}$$

$$\text{Peso complessivo elemento triangolare} \Rightarrow W_2 = \gamma_{\text{riemp}} lh'/2,$$

con il seguente significato dei simboli:

γ_{legno} => Peso specifico dei pali in castagno;

ϕ_{legno} => Diametro dei pali in castagno;

$n_{pali,trasv}$ => Numero dei pali trasversali presenti lungo l'altezza della palificata;

$n_{pali,long}$ => Numero dei pali longitudinali presenti lungo l'altezza della palificata;

γ_{riemp} => Peso specifico del terreno di riempimento della palificata;

i => Interasse dei pali in legno disposti in senso trasversale.

-Spinta del terreno

A tal fine, seguendo quanto riportato nel D.M. 11/03/1988, si può considerare il blocco rigido della palificata in grado di slittare, pertanto ci si può mettere nelle condizioni ultime e valutare la spinta di terreno in condizioni attive secondo la formula di Mononobe-Okabe:

$$k_a = \frac{\text{sen}^2(\pi/2 - \beta + \varphi)}{\cos^2 \beta \text{sen}(\pi/2 - \beta - \delta)(1 + \sqrt{B})^2},$$

essendo:

$$B = \frac{\text{sen}(\varphi + \delta)\text{sen}(\varphi - \varepsilon)}{\text{sen}(\pi/2 - \beta - \delta)\text{sen}(\pi/2 - \beta + \varepsilon)};$$

φ => Angolo di attrito interno del terrapieno;

δ => Angolo di attrito blocco di palificata – terrapieno;

e con il significato dei simboli rappresentati nello schema della *fig. 0*.

Si ottiene pertanto la seguente espressione della spinta (senza il contributo della coesione) per effetto di un diagramma triangolare delle tensioni:

$$S = 0,5k_a \gamma_{terr} (H \cos \alpha)^2 .$$

Invece, ai fini della valutazione del contributo della coesione, al solito si determina l'effetto benefico con andamento rettangolare delle tensioni in condizioni attive:

$$S_{coesione} = -2c\sqrt{k_a} H \cos \alpha .$$

Si riportano pertanto i valori numerici ottenuti, facendo osservare che a vantaggio di statica si considera nulla l'inclinazione α del blocco di palificata:

Dati caratteristiche geometriche :

h'[m]	h [m]	l [m]	ϵ [°]	α [°]	ϕ legno [cm]	num pali long	num pali trasv	interasse [m]
0,4	2	1,1	23	0	20	6	5	1,5

Dati derivati:

β [°]	H [m]
0	2,4

VALUTAZIONE PESI DELLA PALIFICATA:

Legni trasv [kg]	Legni long[kg]	Riempimento [kg]	W1 [kg]	W2 [kg]
161,27	263,89	3025,99	3451	418

VALUTAZIONE SPINTA TERRENI:

B	Ka	S [kg]	Scoesione [kg]
0,205486317	0,397079	2173	-302

VERIFICA A RIBALTAMENTO:

Dallo schema di *fig. 0* è possibile valutare i contributi delle azioni in gioco per i momenti stabilizzanti e ribaltanti intorno al punto A di ipotetica rotazione. Indicando pertanto con M_s il momento stabilizzante e con M_r il momento ribaltante, si ottengono le seguenti espressioni:

$$M_r = S \cos(\alpha + \delta) H \left(\frac{\cos^2 \alpha}{3} + \sin^2 \alpha \right) + \Delta S \cos \alpha H \left(\frac{\cos^2 \alpha}{2} + \sin^2 \alpha \right)$$

$$M_s = W_1 \left(\cos \alpha \frac{l}{2} \sin \alpha \frac{h}{2} \right) + W_2 \left(\cos \alpha \frac{2}{3} l + \sin \alpha \left(h + \frac{h'}{3} \right) \right) + S \sin(\alpha + \delta) \left(l + \frac{2}{3} H \cos \alpha \sin \alpha \right) + \Delta S \sin \alpha \left(l + \frac{H}{2} \cos \alpha \sin \alpha \right)$$

Pertanto è possibile effettuare la verifica a ribaltamento secondo quanto disposto dal D.M. 03/88:

$$\frac{M_s}{M_r} \geq 1,5.$$

Si riportano i risultati ottenuti nella seguente tabella:

Ms [kgm]	Mr [kgm]	Ms/Mr	Verifica
2205	1375	1,60	SI

VERIFICA A SCORRIMENTO:

Si verifica che il blocco rigido della palificata non deve traslare lungo il piano di scorrimento inclinato di α rispetto all'orizzontale; a tal fine si valutano le azioni che contribuiscono alla forza di scorrimento F_s e quelle che contribuiscono all'azione resistente F_r :

$$F_r = N \tan \delta + (W_1 + W_2) \sin \alpha$$

$$N = [(W_1 + W_2) \cos \alpha]$$

$$F_s = S \cos(\alpha + \delta) + \Delta S \cos \alpha$$

È pertanto possibile effettuare la verifica a scorrimento secondo quanto stabilito dal D.M. 03/88:

$$F_r / F_s \geq 1,3.$$

Si riportano i dati ottenuti nella seguente tabella:

Fr [kg]	Fs[kg]	Fr/Fs	Verifica
2512,66	1870,35	1,34	SI

VERIFICA A SCHIACCIAMENTO:

Infine bisogna verificare che le tensioni agenti nella sezione di contatto tra palificata e terreno siano inferiori della portanza del terreno stesso; a tal fine si valuta il momento agente nella sezione di contatto come differenza tra momento stabilizzante e momento ribaltante, quindi si valuta l'eccentricità e dello sforzo normale N agente sulla sezione:

$$e = \frac{M_s - M_r}{N}.$$

Pertanto, a seconda che si tratti di piccola a grande eccentricità, è possibile valutare la tensione massima di contatto agente sulla sezione in esame:

-Piccola eccentricità: $e \leq \frac{l}{6} \Rightarrow q = \frac{N}{100l} \left(1 + \frac{6e}{l}\right) [kg/cm^2]$

-Grande eccentricità: $\frac{l}{6} < e \leq \frac{l}{2} \Rightarrow q = \frac{2N}{3(l/2 - e)100} [kg/cm^2]$

No equilibrio: $e > l/2$

Indicando con q_s la portanza del terreno, è possibile effettuare la verifica a schiacciamento secondo la seguente espressione:

$$\frac{q_s}{q} \geq 2.$$

Si riportano di seguito i risultati ottenuti:

M [kgm]	N [kg]	e [cm]	eccentricità
829,37	3869,15	21,44	GRANDE

qs [kg/cmq]	q [kg/cmq]	qs/q	Verifica
2	0,77	2,60	SI

Infine, per quel che riguarda la verifica di stabilità del pendio, poiché rispetto alla situazione esistente si ha una piccola variazione dei pesi in esame costituita dal volume di legno che sostituisce quello di terreno, allora si ritiene che il coefficiente di stabilità del pendio non abbia nessuna variazione a breve termine visto che la diminuzione di peso è trascurabile e le caratteristiche meccaniche del terreno rimangono comunque invariate.

Verifica a lungo termine

VALUTAZIONE DELLE AZIONI IN GIOCO

La verifica fin qui proposta a breve termine, necessaria e fondamentale in sede di progetto, analizza le condizioni statiche valide immediatamente dopo la costruzione dell'opera, ma non considera che, essendo essa una struttura composta in parte da materiale vivo, le forze in gioco potranno variare nel tempo con l'accrescimento delle talee messe a dimora. Ad esempio si verifica un incremento di biomassa (ipogea ed epigea) ed una degradazione delle parti morte, che determina lo sviluppo di nuove forze con i relativi bracci e quindi variazioni nella condizione di equilibrio. Un'analisi di questa problematica è stata svolta da Preti e Cantini, i quali hanno analizzato la variazione del coefficiente di sicurezza; si sintetizza di seguito la metodologia seguita come esempio di analisi di stabilità a lungo termine al fine di dimostrare che i coefficienti di stabilità determinati a breve termine crescono negli anni se si esegue una attenta manutenzione.

Per calcolare la spinta del terreno a tergo della palificata, considerato non coerente, è stato utilizzato il metodo dello stato di equilibrio limite di Muller Breslau .

Per valutare il contributo delle piante, partendo dal modello per la valutazione dell'incremento di resistenza al taglio indotto dalla presenza di radici basato sull'equilibrio limite delle forze, è stata analizzata la variazione nel tempo del termine A_R/A , rapporto fra l'area occupata dalle radici (A_R) e quella della corrispondente sezione parallela alla superficie di terreno (A), ricavando una relazione praticamente lineare. Anche l'evapotraspirazione e l'effetto drenante dovuti alla presenza delle piante sono stati ipotizzati dipendenti dallo stesso termine (A_R/A).

Considerando separatamente: il peso della palificata, dato dalla somma del peso del legno morto che diminuisce nel tempo in funzione della degradazione del legname, oltre al peso del riempimento che rimane costante, l'aumento della biomassa epigea ed ipogea, la spinta dell'acqua (considerando varie altezze di falda a tergo della palificata) e la spinta del terreno a tergo della palificata, è stata valutata la variazione dei coefficienti di sicurezza nell'arco di 30 anni.

Per gli aspetti vegetali si è considerato che il materiale vivo utilizzato sia costituito da talee di lunghezza pari ad 1 m di *Salix purpurea* (salice rosso) in numero di 4 talee per metro lineare. Per questo tipo di pianta sono state ricavate le curve di crescita in altezza, larghezza della chioma, profondità dell'apparato radicale, volume della parte aerea (biomassa epigea) al fine di stimare il valore medio del termine A_R/A e come questo vari in funzione del volume di biomassa ipogea prodotta, secondo la relazione seguente:

$$A_R = n h V_R / H_R$$

dove n è il numero di talee che hanno effettivamente attecchito, V_R è il volume della parte ipogea di una talea (calcolata in base al rapporto col volume della biomassa epigea che si mantiene pari ad 1.5 per questa specie), H_R è la profondità raggiunta dall'apparato radicale, h l'altezza della palificata. I risultati ottenuti (*fig. 1*) evidenziano l'andamento lineare del termine col tempo e sono in accordo con misurazioni sperimentali effettuate.

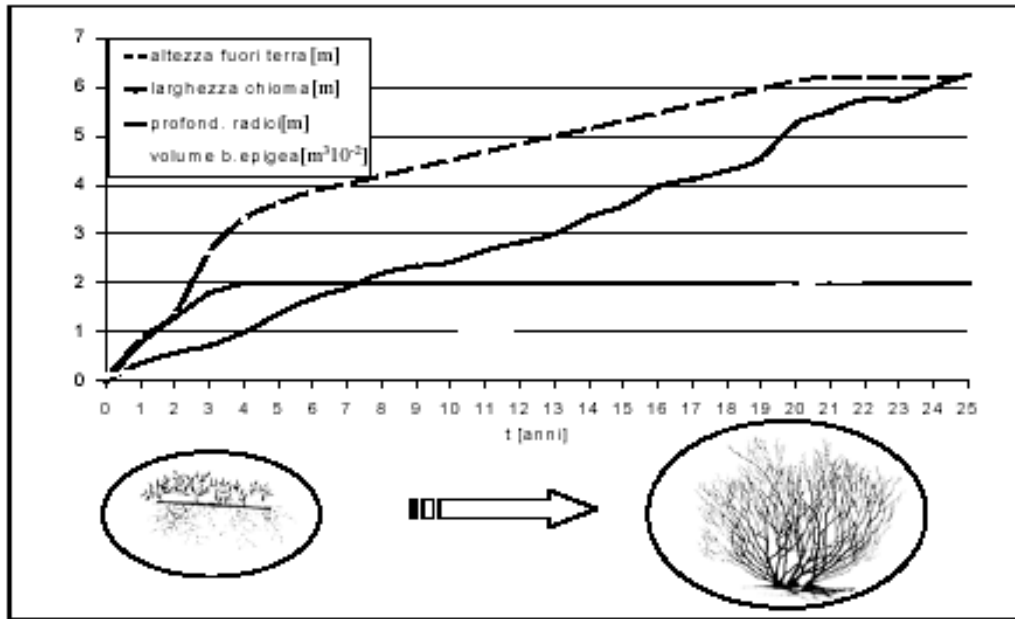


Fig. 1) - Curve di crescita per *Salix purpurea*

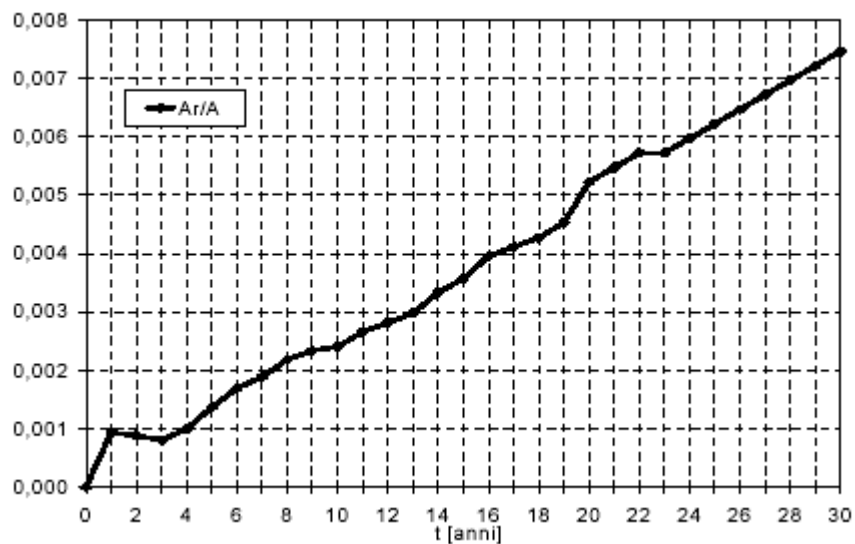


Fig. 1 b) - Frazione di sezione di terreno occupata dalle radici

Per la valutazione del peso proprio delle palificate vive, si è supposto che il volume del legname in castagno si riduca di un valore pari all'aumento del volume della biomassa epigea ed ipogea delle talee che si sviluppano all'interno della palificata; per il peso specifico delle talee di salice si è considerato un valore di 880 kg/m^3 . Per quanto riguarda invece gli altri valori, quali il peso specifico del terreno di riempimento, l'angolo di attrito interno e il valore della coesione, nonché tutti gli altri dati geometrici, si mantengono i valori riportati per la verifica a breve termine.

A causa del moto di filtrazione che si instaura attraverso la palificata, mediamente la pressione idrostatica del terreno a tergo diminuisce del 10-20%, ma con la presenza di talee vive si è ipotizzato che questa riduzione potesse essere maggiore, soprattutto perché la presenza di vegetale fa drenare il terreno consumando acqua per evapotraspirazione in grandi quantità.

Perciò è stato ipotizzato un andamento del coefficiente di riduzione della pressione idrostatica (c_{rt}) inversamente proporzionale alla frazione di sezione di terreno (A_R/A) occupata dalle radici, secondo la relazione seguente:

$$c_{rt}(t) = c_{rt}(0) (1 - (A_R/A))$$

cioè all'aumentare di A_R/A diminuisce la spinta dell'acqua presente nel terreno a monte sulla palificata da un valore iniziale assegnato ($c_{rt}(0)=0.75$), a causa della presenza di radici e per l'evapotraspirazione esercitata dalle talee di salice.

In definitiva, l'apparato radicale, sviluppandosi, reagisce come un blocco unico col corpo della palificata e quindi introduce un fattore stabilizzante nel calcolo dei momenti che risulta funzione della profondità delle radici, mentre la biomassa epigea, sviluppandosi, introduce un fattore destabilizzante per la palificata, che cresce in funzione dell'altezza della parte epigea.

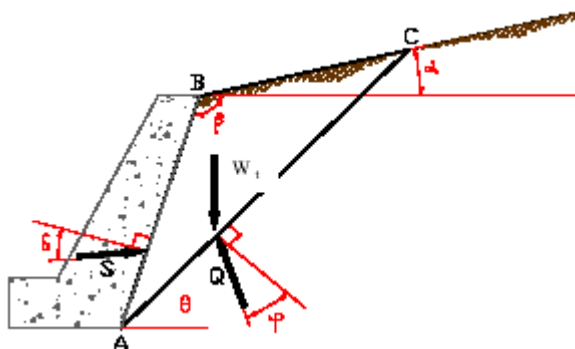


Fig. 2 - Sollecitazioni sul cuneo rigido di terra a monte di un'opera di sostegno

Ai fini della valutazione della spinta delle terre, essa è stata valutata mediante la teoria di Coulomb esplicitata analiticamente da Muller – Breslau; in particolare, prendendo in considerazione la spinta passiva, ovvero il valore massimo che può assumere l'azione laterale applicata al terreno, con riferimento alla *fig. 2* si ha che le componenti tangenziali alle superfici di scivolamento delle forze Q e S devono risultare in grado di contrastare il movimento verso l'alto (indotto dall'azione spingente della costruzione) del prisma di terreno, dunque il segno degli angoli φ e δ deve risultare opposto a quello illustrato.

Da quanto sopra, si ha che l'incremento di resistenza al taglio dipende interamente dalla resistenza a trazione media delle radici e dalla superficie occupata dalle stesse. Per quanto riguarda la resistenza a trazione delle radici, si può fare riferimento ai valori riportati in letteratura (tabella seguente):

Piante arboree e arbustive	Resistenza a trazione (Mpa)	Rapporto fra biomassa epigea e ipogea
<i>Salix purpurea</i>	36.0	1.5

Caratteristiche di Salix pupurea (Schiechl, 1991)

VERIFICHE DI STABILITÀ

Per le verifiche di stabilità, si sono considerate le seguenti condizioni:

- il peso della palificata, dato dalla somma del peso del legno morto che diminuisce nel tempo in funzione della degradazione del legname, più il peso del riempimento che aumenta, anche se molto poco, per l'aumento delle radici;
- l'aumento della biomassa epigea ed ipogea;
- la spinta dell'acqua presente nel terreno;
- la spinta del terreno a tergo della palificata.

Il fattore di sicurezza rispetto alla stabilità allo scorrimento sul piano di fondazione della palificata, è dato dalla seguente espressione:

$$F_s = \frac{N \tan \delta}{H}$$

dove N è la risultante delle forze verticali e quindi stabilizzanti (peso della palificata, dato dalla somma del peso del legno morto che diminuisce nel tempo in funzione della degradazione del legname, più il peso del riempimento che aumenta per l'aumento delle radici, e dal peso della biomassa ipogea ed epigea), mentre H è la risultante delle forze orizzontali (spinta del terreno a tergo della palificata e spinta dell'acqua presente nel terreno che tendono a diminuire nel tempo). Si è ottenuto per F_s l'andamento riportato in *fig. 3a*; come si può vedere dal grafico, il fattore di sicurezza allo scorrimento è superiore al valore di 1,34 calcolato nelle condizioni iniziali ed aumenta nel corso degli anni, anche per valori del coefficiente di attrito cautelativi (0,5): in particolare, si può osservare come il fattore di sicurezza arrivi ad incrementarsi rispetto al valore iniziale di circa il 12 %.

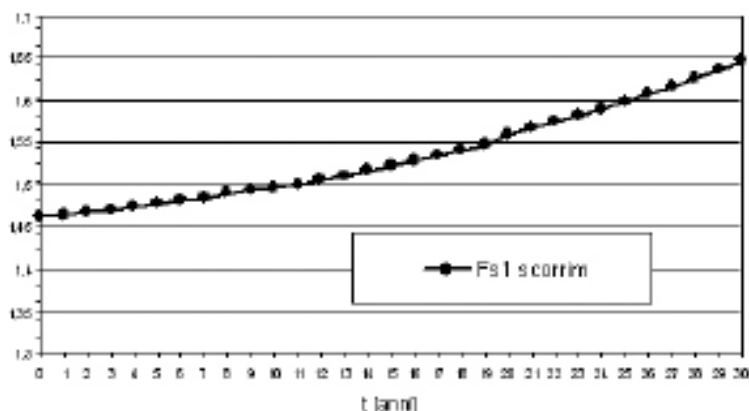


Fig. 3a) - Andamento nel tempo del fattore di sicurezza allo slittamento per una palificata viva

L'analisi del fattore di sicurezza allo scorrimento è poi stata effettuata in diverse condizioni di manutenzione della vegetazione per la stessa palificata:

- 2) con talee ed interventi, effettuati regolarmente, di potatura quasi totale della parte epigea di vegetazione che si sviluppa (F_{s2});
- 3) con talee ed interventi di diradamento effettuati regolarmente, cioè si elimina una parte (30%) dell'apparato epigeo della vegetazione (F_{s3}).

I risultati sono messi a confronto nel grafico di *fig. 3b*) dove si evidenzia come la potatura possa influire per una diminuzione del fattore di sicurezza solo fino a circa il 2,5 % rispetto al caso di assenza di manutenzione.

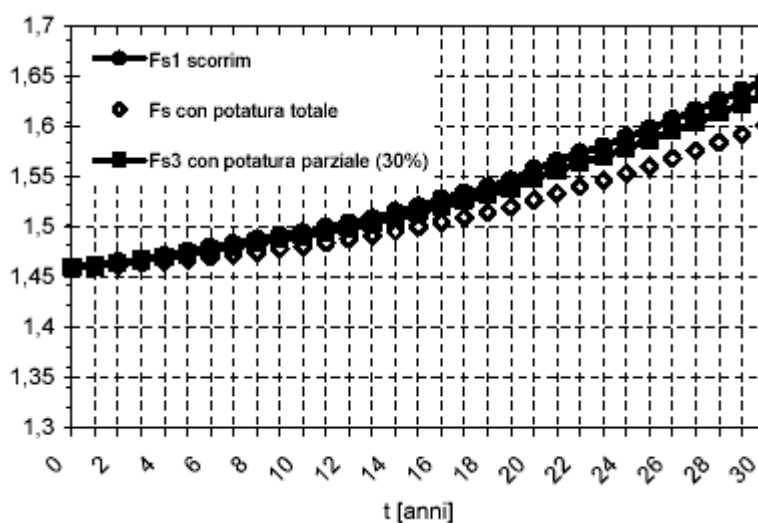


Fig. 3b) - Fattore di sicurezza allo slittamento per una palificata viva con manutenzioni

Invece, per quanto riguarda la verifica al ribaltamento, si sono ottenuti gli andamenti per il coefficiente di sicurezza al ribaltamento (C_s), stimato tramite la seguente relazione:

$$C_s = \frac{\sum \text{Momenti stabilizzanti}}{\sum \text{Momenti ribaltanti}}$$

Il coefficiente di sicurezza (C_s) parte nella condizione iniziale (quando le talee non si sono ancora sviluppate) da un valore calcolato di 1,60 (quindi la struttura composta da legname e riempimento è stabile) ma potrebbe anche tendere a non aumentare nel tempo (ad esempio, lo sviluppo della parte epigea crea un momento ribaltante per la palificata dovuto all'aumento del peso e, soprattutto, del braccio cui questo viene applicato, avendo la parte epigea uno sviluppo, in altezza molto maggiore dello sviluppo in profondità dell'apparato radicale).

Si è quindi studiato, anche in questo caso, l'andamento nel tempo del coefficiente di sicurezza al ribaltamento in condizioni diverse di vegetazione per la stessa palificata:

- 1) senza interventi;

- 2) con talee ed interventi, effettuati regolarmente, di potatura quasi totale della parte epigea divegetazione che si sviluppa (Cs_2);
- 3) con talee ed interventi di diradamento effettuati regolarmente, cioè si elimina una parte (60%) dell'apparato epigeo della vegetazione (Cs_3).

L'andamento Cs_2 è evidentemente un caso estremo che, comunque dimostra come la presenza delle radici riesca realmente ad annullare l'effetto del degradamento della struttura lignea iniziale (solo l'apparato radicale potrebbe sostituirsi alla struttura portante degradata).

Osservando le variazioni nel tempo nel caso Cs_3 , si osserva come la manutenzione (diradamenti, potature e recupero delle fallanze), se effettuata regolarmente, mantiene facilmente il coefficiente di sicurezza a ribaltamento sopra il valore iniziale.

Si evidenzia pertanto come, senza nessuna manutenzione, il fattore di sicurezza possa diminuire nel tempo rispetto al valore iniziale di un 10 % e come una potatura parziale possa riequilibrare la situazione, mentre con una potatura totale si riesca addirittura ad invertire la tendenza fornendo un aumento relativo dello stesso fino a oltre il 16 %.

Quindi, in definitiva la palificata viva a doppia parete è importante sia verificata nelle condizioni iniziali, come risulta ampiamente dalla relazione di calcolo in esame; la verifica a lungo termine viene anch'essa verificata senza effettuare alcun calcolo specifico se però è garantita la manutenzione periodica dell'opera di sostegno, così che i coefficienti di stabilità si mantengono nel tempo, anzi aumentano grazie all'apparato radicale che crescendo si sostituisce al legname in fase di marcescenza.

Il tecnico