



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale - DICEA

*Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
Curriculum Geotecnica*

Morena Gallina

**ANALISI NUMERICA DEL COMPORTAMENTO
DI PALI IN LEGNO LUNGHI
SOGGETTI A DEGRADO**

A.A. 2013-2014

Relatore: Prof. Ing. Simonetta Cola

Correlatore: Dott. Ing. Francesca Ceccato

Sommario

1	INTRODUZIONE.....	1
2	LE FONDAZIONI DEGLI EDIFICI STORICI	3
3	IL LEGNO	9
3.1	Generalità.....	9
3.2	Struttura.....	9
3.3	Principali caratteristiche	11
4	IL DEGRADO DEL LEGNO	15
4.1	Generalità.....	15
4.2	Fattori di degrado	15
4.2.1	Attacco degli organismi xilofagi.....	15
4.2.2	Funghi, muffe e batteri	17
4.3	Il degrado del legno immerso in acqua.....	19
5	STUDI SUL COMPORTAMENTO MECCANICO DELLE PALIFICATE SOGGETTE A DEGRADO.....	25
5.1	Ricerca sul palo singolo.....	32
5.2	Studio sul gruppo di pali	15
5.3	Osservazioni	36
6	COMPORTAMENTO DEI PALI IN FUNZIONE ALLA LORO LUNGHEZZA	37
6.1	Generalità.....	37
6.2	Modello numerico.....	37
6.2.1	Materiali.....	39
6.2.2	Carico	41
6.2.3	Degrado.....	42
6.2.4	Procedura di calcolo.....	44
6.3	Risultati	45
6.3.1	Cedimenti e accorciamento del palo	45

6.3.2 Confronto accorciamenti pali.....	50
6.3.3 Analisi delle forze agenti sull'interfaccia palo-terreno.....	51
6.3.3.1 Fenomeno dell'attrito negativo	57
7 COMPORTAMENTO DEI PALI IN FUNZIONE DEL TERRENO	61
7.1 Generalità.....	61
7.2 Parametri terreni	61
7.3 Carico	61
7.4 Risultati	63
7.3.1 Cedimenti e accorciamento del palo	63
7.4.2 Analisi delle forze agenti sull'interfaccia palo-terreno.....	65
8 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	71
8.1 Conclusioni.....	71
8.2 Parametri terreni	61
APPENDICE A (Tabelle di calcolo relative ai pali in funzione della loro lunghezza)	73
APPENDICE B (Tabelle di calcolo relative ai pali in funzione del tipo di suolo).....	79
Bibliografia.....	89

1 INTRODUZIONE

Molti edifici storici delle città europee sorgenti su pianure alluvionali, tra cui Amsterdam, Stoccolma e Venezia, sono fondati su pali lignei. In passato c'era la ferma convinzione che il legno completamente sommerso non fosse soggetto a degrado.

Negli ultimi anni però, in seguito a delle ricerche mirate a confermare questa convinzione, è emerso l'esatto contrario: il legno degrada anche in condizioni anossiche, quindi è grande l'incertezza sulle condizioni di salute dei pali di fondazione che sono stati realizzati in tutta Europa nei secoli scorsi.

Rilievi svolti durante interventi di consolidamento delle fondazioni di alcuni campanili Veneziani ha rilevato un pessimo stato di conservazione del legno, destando preoccupazione per la sicurezza degli edifici storici della città. Il Consorzio per le Ricerche sulla LAGuna di Venezia (CORILA) e la Regione Veneto hanno finanziato, nel 2011 e 2012, un progetto multidisciplinare volto allo studio delle dinamiche del degrado delle fondazioni lignee, il loro comportamento meccanico nel tempo e le conseguenze sulla struttura in elevato. Si tratta di una delle prime ricerche sul comportamento meccanico delle palificate lignee soggette a degrado ed ha dimostrato come le tipiche fondazioni veneziane, costituite da pali corti infissi molto vicini tra loro, risentano relativamente poco del degrado del legno.

Questo progetto di tesi collega queste ricerche considerando anche diverse caratteristiche geometriche, in particolare vengono approfonditi aspetti quali l'effetto della lunghezza dei pali e delle caratteristiche meccaniche del terreno sul comportamento a lungo termine delle fondazioni lignee soggette a degrado del materiale.

2 LE FONDAZIONI DEGLI EDIFICI STORICI

Qualsiasi opera di ingegneria civile appoggia, o è inserita, nel terreno. Le fondazioni dunque esistono da quando esistono le costruzioni civili, ma la loro progettazione, fino al 1800, aveva solo carattere empirico ed intuitivo, soprattutto a causa della difficoltà di indagare sulla natura dei terreni e della mancanza dei moderni materiali da costruzione.

Il più importante sviluppo delle tecniche si ebbe in epoca Romana, con l'introduzione del calcestruzzo pozzolanico e con la formalizzazione di regole empiriche del buon costruire. Da allora, si sono succeduti molti stili architettonici, ma la tecnica e la tecnologia nella realizzazione, pur con particolarità locali, non ha avuto sostanziali progressi.

Se il terreno al piano di fondazione risultava particolarmente molle e cedevole, si tentava di migliorarne le proprietà, inserendovi a forza delle pietre, o appoggiando sul fondo scavo lastre di pietra. In generale, in questi terreni, le fondazioni erano costituite da strati di grosse pietre o laterizi, che si allargavano con la profondità ed erano appoggiati su un tavolato multistrato di assi di legno o su travetti di legno o strati sovrapposti ortogonali e/o su pali di legno. Talvolta la ghiaia e le pietre erano contenute lateralmente da una cassaforma di legno e cementate con un po' di calce.

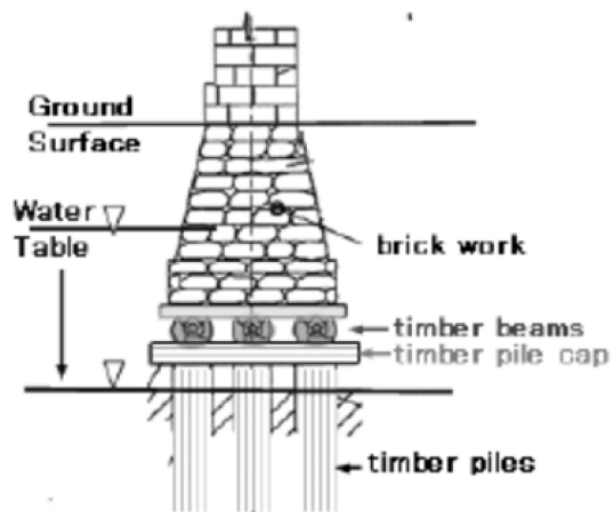


Figura 2.1: Schema di antica fondazione su pali in legno (Iwasaki e Tsatsanifos, 2006)

Nelle città lungo i fiumi, sulla costa o in laguna, dove il livello della falda è molto prossimo al piano campagna, non esistendo tecniche di abbattimento del livello di falda, si utilizzavano

pali in legno corti, molto ravvicinati, allo scopo di costipare il terreno di fondazione e trasferire il carico a strati più profondi e consistenti.

A lungo, negli edifici di tutta Europa, le fondazioni furono realizzate, salvo rare occasioni, con le tecniche appena esposte, sostanziali differenze si ebbero solo con l'introduzione del calcestruzzo armato e con le nuove tecnologie di infissione dei pali. Lo sviluppo tecnologico e teorico dell'ultimo secolo hanno portato ad una nuova concezione, molto più rigorosa, del sistema di fondazione delle strutture.

Nonostante il campo delle fondazioni oggi sia ben inquadrato in schemi teorici e progettuali affidabili, e lo sviluppo non si sia fermato, non va dimenticato lo studio degli antichi sistemi di fondazione, se non altro per salvaguardarne l'efficienza statica e quindi preservare i beni storici.

In particolare, a Venezia, vista la scarsa capacità portante dei terreni superficiali e l'ambiente molto aggressivo, la costruzione delle fondazioni è stata soggetta a vincoli, facendo assumere all'architettura veneziana delle caratteristiche particolari rispetto alle tecniche tradizionali.

Inizialmente le strutture erano prevalentemente lignee, poi la tecnica è andata via via affinandosi, adottando strutture murarie e lignee funzionali e durature; col passare del tempo la tecnica costruttiva è rimasta sostanzialmente invariata, perché gli elementi di cui disponevano i costruttori erano rimasti gli stessi.

I tipi di fondazione e costruzione sono piuttosto semplici, e anche gli edifici più importanti hanno fondazioni e muri prospicienti i canali costituite con zatteroni o con palificate.

La parte superficiale, nota come *zatterone* in legname è una sorta di fondazione diretta formata da tavolati lignei a più strati realizzati con tavole o travi di spessori crescenti, chiamati madieri, in funzione del carico che dovevano sopportare, posti a 2-3 m di profondità sotto il piano campagna, al di sopra del quale poggiano i plinti e le murature di pietrame fino a raggiungere il piano di pavimentazione.

La parte profonda invece è una palificata lignea formata da paletti corti di legno (larice, rovere, ontano, olmo) di 10-20 cm di diametro e lunghi 1,5-3 m, infissi nel terreno.



Figura 2.2: tipica fondazione Veneziana
mattoni

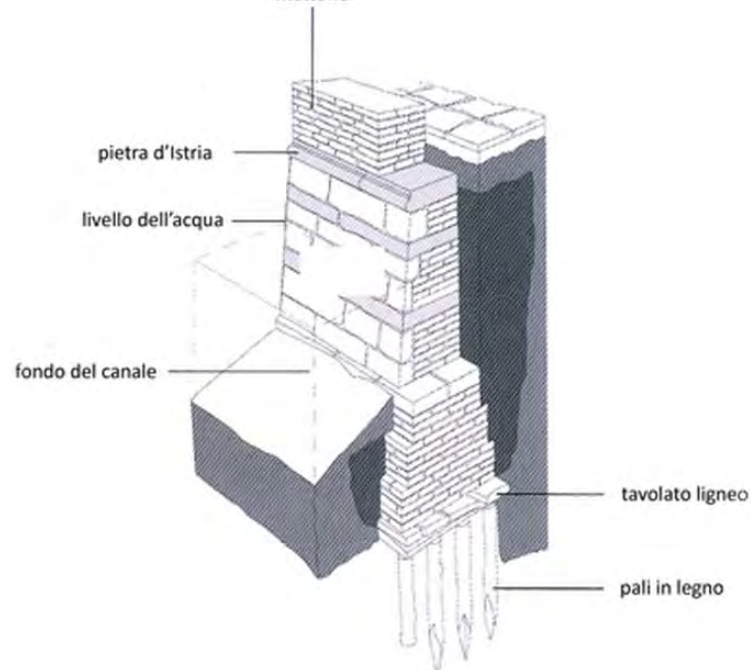


Figura 2.3 : Schema fondazione tipica Veneziana (Corila)

I pali hanno dimensioni tali da non raggiungere strati profondi resistenti essendo il loro effetto sostanzialmente quello di migliorare il terreno creando una zona costipata su cui fondare il basamento delle colonne o dei muri portanti.

Venezia è costantemente interessata da un rapido deterioramento, che ha richiesto un gran numero di interventi di restauro che hanno interessato una grande varietà di aspetti che caratterizzano la bellezza della città.

Fino al secolo scorso si era convinti che le fondazioni veneziane fondassero su uno strato di argilla essiccata e sovraconsolidata (caranto), con buone capacità portanti, ma negli ultimi decenni la classificazione ed il confronto tra le numerose campagne geotecniche realizzate

hanno dimostrato l'eterogeneità dello strato di caranto, che è presente in poco più di metà del sottosuolo lagunare.

Le fondazioni degli edifici veneziani oltre a non raggiungere gli strati portanti, differivano, come si è già detto, passando dai muri perimetrali a quelli interni. Questi metodi costruttivi hanno provocato notevoli cedimenti differenziali determinando l'inclinazione e l'abbassamento degli impalcati dei solai, le cui travi, legate agli estremi dai tiranti metallici, hanno trascinato nel loro movimento i muri di facciata, producendo deformazioni e fessurazioni nelle murature; inoltre l'abbassamento lento ma continuo del sottosuolo veneziano ha aggravato evidentemente le condizioni.

Le fondazioni su pali di legno sono molto diffuse anche in Europa, in particolare nei paesi nordici. Si hanno dati in merito alle prime applicazioni risalenti al diciannovesimo, ventesimo secolo: un esempio è il parlamento di Stoccolma, costruito nell'ultimo decennio del 1800, che poggia su 1500 pali; di recente è stata stimata una vita utile residua per l'edificio di massimo un centinaio d'anni.

Si hanno a disposizione molti dati riguardanti le fondazioni Olandesi. Il terreno torboso olandese è troppo soffice per poter sopportare edifici pesanti: questo non era un problema finché gli edifici erano piccoli e costituiti da legno, ma con l'ingrandirsi delle strutture, e con l'introduzione della pietra come materiale da costruzione, si rese necessario fondare le strutture su pali in legno.

Da indagini condotte, si può affermare che già all'inizio del quattordicesimo secolo, ad Amsterdam, erano utilizzati dei tronchi, posti orizzontalmente, come struttura di fondazione; successivamente, si installarono pali lunghi circa 1 metro, molto vicini tra loro, per aumentare le caratteristiche del terreno. In seguito si ricorse a pali più lunghi (circa 6 m) e grossi, disposti regolarmente, e non prima dell'inizio del sedicesimo secolo si installarono pali lunghi battuti attraverso gli strati torbosi, fino a raggiungere lo strato stabile sabbioso.



Figura 2.4 : Tipica fondazione a pali accoppiati di Amsterdam (Klassen et al., 2012)

La profondità dello stato sabbioso era variabile, e quindi, in base a questa, variava la lunghezza dei pali, ad esempio ad Amsterdam erano lunghi 10÷12 m, a Rotterdam 18 m ed infine a Haarlem appena 2÷6 m.

Confrontando quanto visto sulle fondazioni Veneziane con quelle del resto d'Europa, appare evidente come siano diverse le strutture, soprattutto confrontando la lunghezza dei pali: quelle veneziane raggiungono appena qualche metro e sono composte da pali installati così fitti da generare un notevole miglioramento delle caratteristiche del terreno, mentre quelle europee sono composte da pali più lunghi, che lavorano effettivamente come fondazioni profonde.

3 IL LEGNO

3.1 Generalità

Il legno è il materiale naturale ricavato dai fusti delle piante, in particolare dagli alberi per cui svolge funzione strutturale, viste le ottime caratteristiche di robustezza e resistenza.

Fin dall'antichità è un materiale ampiamente sfruttato, infatti, oltre ad essere facilmente reperibile, è destinato ad un'ampia varietà di utilizzi: nell'edilizia come materiale da costruzione, nell'industria del mobile, nella produzione della carta e come combustibile.

Nella botanica gli alberi sono classificati come teneri e duri. I legni teneri (gimnosperme) sono quelli derivati dalle conifere, mentre quelli duri (angiosperme) dalle latifoglie. Questa distinzione deriva dalla nomenclatura inglese che definisce le conifere "softwood" e le latifoglie "hardwood", e può, a volte, essere fuorviante perché possiamo trovare legni duri più teneri di quelli definiti teneri, e viceversa.

Il legno proveniente da specie differenti ha diverso colore, diversa densità e diverse caratteristiche della venatura; queste differenze, unite ai differenti tassi di crescita genera differenze sia in qualità che in valore.

I nemici naturali del legno sono funghi e insetti, che possono generare severo degrado delle funzionalità.

3.2 Struttura

La macrostruttura di un albero è caratterizzata da diversi strati, ognuno del quale ha una propria funzione.

Sezionando un tronco possiamo distinguere sei zone diverse:

La corteccia è per il tronco una sorta di guscio, serve per proteggere le parti vitali della pianta (la corteccia è fisiologicamente morta) dagli agenti esterni. Il libro è uno strato che contiene i vasi che permettono la circolazione della linfa conducendo il nutrimento.

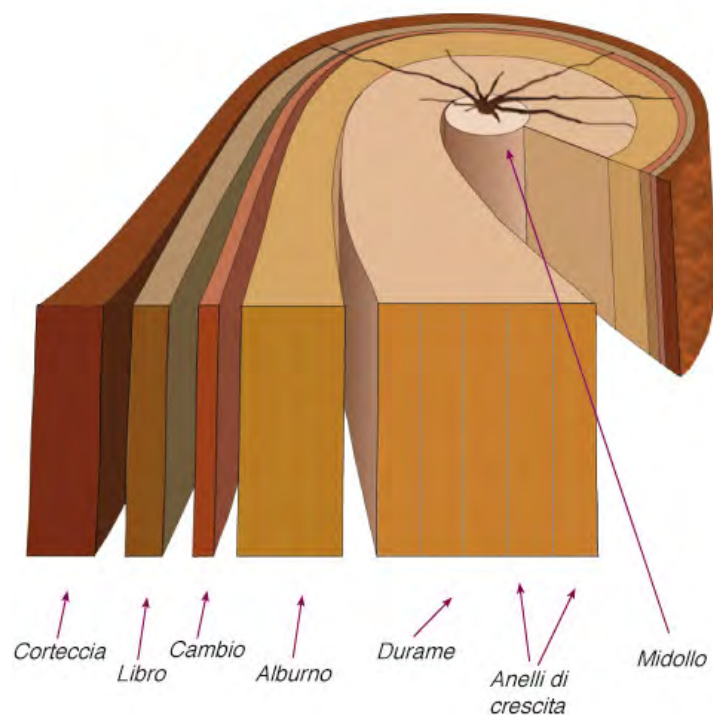
Il cambio è uno strato sottile di tessuto dal quale ogni anno si formano gli anelli di accrescimento.

L'alburno è il nuovo anello in formazione. L'alburno fresco è sempre molto chiaro, a volte

quasi bianco e contiene le cellule dell'albero in crescita: tutto il legno è stato alburno. La sua funzione è quella di trasportare l'acqua dalle radici sino alle foglie, e più la chioma dell'albero è folta, maggiore è il volume dell'alburno necessario; per questo, gli alberi che crescono in spazi aperti (e quindi hanno più luce per le foglie) hanno l'anello dell'alburno più ampio rispetto a quelli che crescono in una fitta foresta. Man mano che l'albero cresce e aumenta di diametro, la parte più interna cessa di funzionare perché le cellule muoiono andando a creare il durame. Con gli anni la crescita dell'albero rallenta, e quindi lo spessore degli anelli esterni diminuisce.

Il durame è la parte più interna, più scuro e più resistente dell'alburno (che di anno in anno diventa, a sua volta, durame), è anche la parte commercialmente più pregiata perché essendo la parte più vecchia della pianta è più stabile e meno soggetta all'attacco di parassiti.

La parte centrale del tronco è il midollo ed è generalmente molto simile al durame, sebbene spesso più spugnosa.



Gli alberi formano anelli di accrescimento secondo un ritmo periodico legato all'attività vegetativa, che ha il suo massimo tra primavera e tardo estate. Lo spessore di ogni anello dipende dall'entità dell'accrescimento che è funzione delle condizioni climatiche.

Le cellule primaverili sono meno dense e più chiare, mentre quelle autunnali sono dense e più scure: è così immediato individuare il passaggio tra un anello e il successivo ad occhio nudo.

La composizione chimica di tali cellule è sostanzialmente la stessa per ogni tipo di legno, ed è caratterizzata dalla presenza di cellulosa, emicellulosa e lignina.

La loro struttura è simile a quella di un materiale composito ed è costituita da fibre di cellulosa trattenute da una matrice di lignina ed emicellulosa. Le microfibrille sono le principali responsabili delle caratteristiche meccaniche del materiale; l'emicellulosa e la lignina consentono la trasmissione degli sforzi tra le microfibrille e conferiscono rigidità al materiale.

3.3 Principali caratteristiche

Il principio fondamentale è che il legno è anisotropo nei confronti di tutte le proprietà meccaniche, che quindi variano con la direzione considerata.

Inoltre non è lecito attribuire ad un materiale non omogeneo quale il legno caratteristiche costanti o quasi; pertanto i valori di resistenza considerati devono essere intesi come "dati medi" indicativi.

Le proprietà meccaniche di uno stesso provino di legno variano in funzione della temperatura, della presenza di difetti e soprattutto della sua umidità.

Ad un aumento di temperatura corrisponde una diminuzione di resistenza del legno; anche la durata dell'esposizione alle alte temperature danneggia il materiale: a 200° C si ha peggioramento delle caratteristiche meccaniche dopo pochi minuti, a causa del degradamento chimico di alcuni costituenti della parete cellulare, ma già a partire da 65° C si possono avere effetti negativi permanenti in seguito a lunghe esposizioni.

Le variazioni più sensibili, si ottengono al variare dell'umidità. Al momento del taglio il legno contiene i fluidi vitali necessari, che possono raggiungere anche il 200% del proprio peso secco; in seguito il materiale cede acqua fino a raggiungere l'equilibrio con l'umidità dell'ambiente in cui si trova. L'acqua presente nel legno è di due tipi: una parte detta acqua di saturazione è nella parete cellulare, l'altra parte è invece libera nella cavità dei tessuti ed è

detta acqua di imbibizione. Con l'essiccamento si perde prima l'acqua di imbibizione, fino a raggiungere il punto di saturazione delle fibre, che si aggira attorno al 30% (valore compreso tra 25% e 40%), e durante il quale il legno non subisce significative variazioni; in seguito, proseguendo l'essiccamento, si perde l'acqua di saturazione, che essendo all'interno delle pareti delle cellule, permette un ritiro dimensionale, e quindi un aumento della densità e della resistenza meccanica.

L'umidità del legno non rimane costante nemmeno dopo l'essiccamento, ma dipende dall'umidità dell'ambiente in cui è messo in opera; questo significa che saranno possibili variazioni di umidità e quindi dimensionali e di caratteristiche meccaniche anche dopo la posa in opera.

Per un legno in un ambiente a 25° con umidità del 65% si assume un'umidità del 12%.

Umidità %	Stato del legno
40 ÷ 200	legno allo stato fresco (appena tagliato)
30 ÷ 35	punto di saturazione (al di sotto del quali inizia il ritiro)
< 18	legno al sicuro dai funghi
15	umidità commerciale (stagionatura all'aria aperta)
12	umidità normale (a 25° con umidità del 65%)
9 ÷ 12	umidità tecnica (essiccamento artificiale)
0	legno anidro

Essendo il legno un materiale complesso, il ritiro dimensionale è diverso lungo le tre direzioni principali: è di scarsa entità in direzione longitudinale, mentre può essere elevato in direzione trasversale.

Un altro aspetto importante che può modificare le caratteristiche meccaniche del legno, è la presenza di difetti, macroscopici o microscopici. Questi possono derivare da accrescimento

non ottimale della pianta (fusto incurvato, accrescimento eccentrico del midollo, cipollature, fessurazioni...), nodi o essere causati da agenti atmosferici, da insetti, funghi o incendi.

Tutte queste variabili (temperatura, umidità, difetti) unite all'igroscopicità del legno (scambio continuo fra molecole di acqua e di aria per equilibrarsi continuamente con l'ambiente esterno) , portano a valori di resistenza molto variabili e, in generale, poco significativi, anche perché le misure vengono effettuate su provini esenti da difetti.

A causa della sua struttura chimica il legno ha un comportamento visco-elastico, per cui la deformazione varia nel tempo quando il materiale è sottoposto a carico costante.

In definitiva, i principali fattori che influenzano la resistenza meccanica del legno sono: la massa volumica, il contenuto di umidità, la direzione della sollecitazione e la presenza di difetti. Mediamente un incremento dell'1% di umidità comporta una perdita del 4-5% della resistenza a compressione; la rimozione dell'acqua invece aumenta la massa volumica e quindi la resistenza a compressione. All'aumentare della temperatura poi, diminuiscono tutte le proprietà meccaniche del legno, fatta eccezione per la resilienza che invece aumenta al crescere della temperatura.

In generale il legno ha una buona resistenza a compressione e a trazione (quest'ultima risulta almeno doppia della prima) se la forza agisce in direzione delle fibre, longitudinalmente quindi; se invece la forza agisce trasversalmente presenta una buona resistenza a flessione. I valori di queste resistenze sono molto variabili, in funzione del tipo di legno, degli sforzi applicati e , come detto prima, dai cambiamenti di umidità e temperatura.

4 IL DEGRADO DEL LEGNO

4.1 Generalità

Fino a pochi anni fa si riteneva che il legno completamente immerso in acqua potesse resistere indefinitamente e che non subisse particolari forme di degrado. Infatti gli agenti del degrado biotico più aggressivi, quali insetti, funghi, batteri, ecc, non trovano un ambiente idoneo al loro sviluppo.

Recentemente però, alcuni studi effettuati hanno evidenziato una situazione alquanto diversa, in particolare, a partire dagli anni '90 sono emersi gravi problemi di degrado dei pali di fondazione in Olanda causati da attacchi batterici (Klassen et al., 2008).

Dal 2000 la Soprintendenza di Venezia ha attuato un programma di tutela e conservazione dei campanili, nel quale rientrano gli interventi eseguiti sul campanile dei Frari e su quello di S. Stefano, e che hanno confermato le condizioni di degrado degli elementi lignei costituenti la fondazione. Si è quindi deciso di prelevare dei campioni di legno e di terreno, su questi e su altri edifici, su cui sono state eseguite le prime analisi chimico-fisiche e meccaniche che hanno evidenziato livelli di degrado più o meno significativi in funzione del tipo di legno.

Si può quindi affermare che il legno in condizione di costante imbibizione e di sostanziale anossia venga spesso degradato dai batteri anaerobi; ad ogni modo, non va trascurata la condizione di giacitura che, a seconda delle caratteristiche del terreno (permeabilità, presenza di ossigeno disciolto, ecc) possono indurre il degrado attraverso reazioni di idrolisi (quando sono presenti altri nutrienti, come l'azoto), oltre al dilavamento degli estratti idrosolubili.

4.2 Fattori di degrado

4.2.1 Attacco degli organismi xilofagi

I fattori di degrado più conosciuti, perché anche più visibili, sono gli animali, chiamati organismi xilofagi.

Gli xilofagi sono organismi che si nutrono di legno, scavando gallerie che intaccano la struttura lignea, indebolendo quindi la resistenza meccanica ma soprattutto aumentando la porzione di legno attaccabile da muffe e batteri.

I principali organismi xilofagi sono molluschi Bivalvi e crostacei Isopodi ed Anfipodi. Tra i molluschi bivalvi perforatori di legni vivi e costruzioni lignee più diffusi nella laguna di Venezia ricordiamo le Tereдини; scavano gallerie nel legno e le rivestono di tubi calcarei all'interno dei quali il mollusco alloggia. La perforazione del substrato avviene grazie al movimento delle valve dentellate che, sospinte dal piede, producono l'effetto di una raspa. Questi animali fanno sporgere una struttura tubiforme, detta sifone, all'ingresso delle gallerie al fine di regolare gli scambi gassosi ed integrare la nutrizione con una variabile componente planctonica. Le tereдини si riproducono attraverso larve che si fissano al legno e iniziano la perforazione producendo un piccolo foro. La perforazione, dopo una breve fase longitudinale, si sviluppa lungo sezioni trasversali. Dato che il foro d'entrata rimane delle stesse dimensioni, un legno colonizzato dalle tereдини può apparire esternamente quasi integro, o con minime perforazioni, risultando al contrario internamente pesantemente degradato.

Le caratteristiche ambientali influenzano nettamente le capacità di sopravvivenza e sviluppo di questi animali. Temperatura e salinità sono i fattori che condizionano primariamente le tereдини, che possono vivere e riprodursi esclusivamente, all'interno di precisi range di questi valori. L'ampiezza ed i valori di questi range sono tuttavia sensibilmente diversi da specie a specie, che quindi presentano habitat preferenziali talvolta sensibilmente diversi.

Questo è il motivo principale per cui pali della stessa essenza arborea e dello stesso spessore possono presentare durata molto diversa (anche dieci volte inferiore) in acque dolci o fortemente dissalate o anossiche, rispetto a quelli collocati in ambienti di laguna aperta o affini alle aree marine.

Rimane da sottolineare che un'altra variabile legata alla velocità dell'attacco dei legni è la temperatura dell'acqua. Durante l'inverno, alle temperature raggiunte in ambienti lagunari, ad esempio, questi molluschi rallentano l'attività di scavo fino a cessare di alimentarsi, raggiungendo invece il massimo della loro attività durante il periodo estivo.

Si tratta di animali molto piccoli (2 – 5 mm) che scavano piccole gallerie nelle zone superficiali del legno concentrando la loro azione nel piano mesolitorale (zona di marea). La densità di infestazione è tuttavia spesso tale da interessare completamente la superficie del legno che appare pertanto esternamente spugnoso, leggero e friabile.

Avendo comunque la necessità di ossigeno, questi organismi non riescono ad attaccare l'ambiente anossico quale è quello delle fondazioni.



Figura 4.2.1.1: Esempio di degrado causato da organismi Xilofagi

4.2.2 Funghi, muffe e batteri

Il fattore scatenante, vero catalizzatore del fenomeno di erosione dei legni in ambiente lagunare e marino, è dovuto alla sinergica azione di muffe e batteri unite all'azione, talvolta velocissima, di insetti.

Funghi e batteri hanno un ciclo vitale che può essere diviso in 3 fasi:

- Fase vivente in cui si ha la crescita attiva e la riproduzione;
- Fase dormiente in cui non si ha nessuna crescita né riproduzione; questa fase ha una durata sconosciuta: può essere di decenni come di millenni;
- Morte

L'attacco microbico inizia quando la pianta è ancora in vita, ma disponendo di una propria protezione enzimatica il fenomeno è controllato; dopo il taglio l'attacco è incrementato nell'area di stoccaggio, nella segheria e in sito dopo essere stato messo in opera; questo è dovuto agli elementi dormienti esistenti già nell'albero e a nuovi organismi che si incontrano durante le lavorazioni successive che sono liberi di agire in assenza della protezione enzimatica.

I batteri sono in grado di degradare la cellulosa, la sostanza che conferisce solidità alle pareti cellulari dei vegetali, trasformandola in sostanze più facilmente attaccabili da organismi

superiori. Tale azione può essere svolta da batteri diversi sia in ambiente aerobico, come in legni esposti all'acqua, che in ambiente anaerobico, come in substrati infossati nel sedimento. L'attacco batterico è comunque lento e poco aggressivo, tanto più in ambiente anaerobico. Questo è il motivo per cui la porzione di legno immersa in sedimenti asfittici rimane sostanzialmente inalterata per anni e spesso per secoli. Molto frequentemente la testa dei pali si trova in una condizione di oscillazione tra una condizione aerobica e una anaerobica: quando è nella prima l'acqua esce dal legno e i vuoti si riempiono d'aria molto rapidamente generando un rapido degrado; quando poi si ritorna in condizioni anaerobiche i pori tornano a riempirsi d'acqua molto lentamente, e mai fino a saturazione completa: le condizioni del palo permangono aerobiche finché i microrganismi non esauriscono completamente l'ossigeno rimasto.

Anche alcuni funghi possono concorrere alla degradazione del legno. In presenza di forti tenori di acqua, come nel legno immerso o fortemente imbevuto, e in ambiente aerobico, diverse muffe sono in grado di attaccare e degradare cellulosa e lignina. Anche in questo caso tuttavia l'azione è lenta e relativamente superficiale, ma può essere notevolmente aumentata dall'azione di organismi superiori che attaccando in profondità il legno ne aumentano la superficie aggredibile dalle stesse muffe, quali gli invertebrati xilofagi.

Gran parte dei funghi e batteri hanno il loro massimo accrescimento a temperatura compatibile con quella del corpo umano 33°-38° C, ma non vi sono ancora molte analisi sul rapporto tra degrado da microrganismi e temperatura. Si osserva che la velocità di degrado del legno per opera dei funghi aumenta sopra i 19° C, mentre l'attività batterica aumenta considerevolmente tra i 15° e i 22° C.

I terreni inorganici e l'acqua sono generalmente sterili, però i pali sono in genere immersi in aree con importanti strati di terreno organico e i liquami della città forniscono nutrimento ai microbi presenti nei pali. I prodotti di scarto dell'attività microbica sono acidi, e moltiplicandosi fanno rallentare l'attività dei microbi, però la malta e il cemento, che spesso si trovano sopra ai pali, con la loro caratteristica basica, neutralizzano il prodotto dei microbi stessi, favorendone l'attività.

L'azione di batteri e funghi facilita il successivo attacco dei legni da parte di organismi superiori quali i perforatori che a loro volta amplificano enormemente le superfici aggredibili dai batteri e dalle muffe.

4.3 Il degrado del legno immerso in acqua

Nel legno immerso in acqua il degrado procede essenzialmente a carico della frazione polisaccarida strutturale, mentre la quantità di lignina resta sostanzialmente costante.

La lignina, infatti, subisce principalmente attacchi enzimatici da parte di funghi, ed è essenziale la presenza di ossigeno. Le condizioni di totale imbibizione sono quindi sfavorevoli al degrado di questa frazione polimerica.

La cellulosa possiede una struttura abbastanza compatta da rendere difficile l'attacco da parte dei reagenti chimici, ma l'acqua e altri solventi polari provocano un rigonfiamento della struttura tale da favorire reazioni d'idrolisi e ossidazione. L'idrolisi della cellulosa avviene principalmente per attacco degli acidi, ma è stato documentato anche un degrado da parte delle basi alle alte temperature. L'idrolisi può inoltre essere facilitata da precedenti reazioni di ossidazione. Non sono state documentate, a oggi, reazioni di degrado di tipo chimico della cellulosa nelle condizioni normali di giacitura del legno nel terreno, seppure qualche ricercatore ipotizzi che questo fenomeno possa manifestarsi in presenza di ioni ferro.

Attualmente il meccanismo di degrado, a carico della cellulosa, maggiormente documentato è l'attacco enzimatico da parte di funghi e batteri: questi organismi possiedono enzimi idrolitici capaci di causare l'idrolisi della cellulosa, in modo simile all'attacco chimico, ma con la sostanziale differenza che l'azione degli enzimi resta localizzata in zone ristrette e provoca una forte perdita di tenacità della fibra.

Il legame fra il rapporto cellulosa/lignina e le proprietà meccaniche è, molto probabilmente, di tipo non lineare, infatti la maggior parte della perdita di resistenza avviene nelle prime fasi di degrado dei polisaccaridi strutturali.

Il legno imbibito peggiora le proprie caratteristiche meccaniche anzitutto per l'aumento del contenuto d'acqua e successivamente per il degrado chimico-biologico operato da agenti chimici e da microrganismi a danno dei polisaccaridi strutturali.

I pali lignei delle fondazioni storiche si trovano immersi nel fango: l'acqua ha grandissima influenza, come già detto, sulle proprietà meccaniche del materiale, mentre il terreno aumenta il quantitativo di ceneri, e quindi il peso, ma non i moduli elastici e la resistenza.

Non si conosce una legge di variazione che legghi le proprietà meccaniche al degrado fisico, chimico e biologico del legno, si tenta tuttavia di ipotizzare un andamento verosimile dei parametri in gioco nel tempo.

La valutazione del degrado del legno avviene con analisi chimico-fisiche, misurando:

- densità basale (BD), cioè il rapporto tra la massa anidra del legno ed il volume allo stato di massimo rigonfiamento, che può anche essere riferito alla densità basale media del legno della stessa specie non degradato, in modo da ottenere un rapporto percentuale denominato Densità Basale Residua (DBR %);
- MWC (Maximum Water Content %) che è calcolato come rapporto percentuale tra il peso dell'acqua contenuta nel campione allo stato di massima imbibizione (peso del legno imbibito peso del legno anidro) ed il peso dello stesso campione allo stato anidro.
- Quantità di cellulosa e polisaccaridi strutturali, comunemente detti olocellulosa (H);
- Quantità di emicellulosa e lignina (L);
- Quantità di ceneri, cioè sali, ossidi e altri composti inorganici che il sedimento, permeando nelle cellule vegetali, deposita.

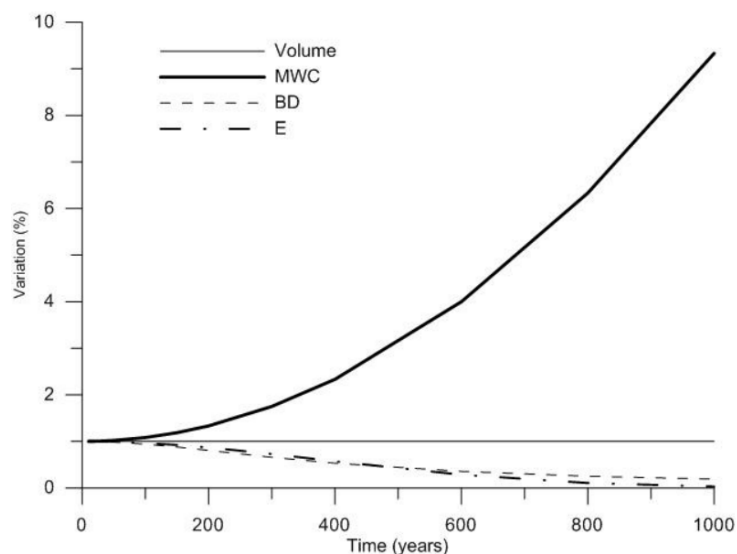


Figura 4.4.1.1: Ipotesi di variazione delle proprietà fisiche caratteristiche nel tempo rispetto al valore del legno non degradato (Ceccato et al.,2012)

Il palo viene infisso nel terreno e si trova sotto il livello di falda, quindi la sua umidità aumenta rapidamente, il volume aumenta leggermente in una prima fase, ma superato il 30% circa di umidità, non varia più (se il legno si trovasse allo stato fresco, nel momento dell'immersione, allora questa fase verrebbe saltata).

Finché persistono le condizioni aerobiche, il materiale viene attaccato principalmente da funghi da carie soffice, il degrado interessa solo una piccola parte esterna dell'elemento, indicativamente un centimetro circa. Il processo di deterioramento realizzato dai funghi è molto più rapido di quello che avviene per opera dei batteri, fortunatamente le condizioni anossiche vengono raggiunte abbastanza velocemente, rallentando enormemente il processo di degrado.

Con cinetiche piuttosto lente si verifica il deterioramento fisico-chimico dei polisaccaridi strutturali, ad opera di batteri anaerobi.

Col procedere del degrado e in condizioni di imbibizione, il volume occupato da queste macromolecole viene sostituito dall'acqua, per cui si ha una riduzione della densità basale del materiale e un aumento dell'umidità, fenomeno che abbatte le caratteristiche meccaniche del legno. Tale processo può avvenire solo se la pressione non è eccessiva, altrimenti l'acqua filtrerebbe via dal legno degradato, che si compatterebbe. Non è semplice definire quale sia il limite di pressione, tuttavia si può osservare che manufatti in legno archeologico imbibito, ad esempio imbarcazioni romane rinvenute sotto il livello di falda, mantengono perfettamente la loro forma originaria, mentre restano sommersi, anche se fortemente degradati (con contenuti d'acqua anche vicini al 1000%). Questa forma originaria viene persa se l'acqua evapora in condizioni incontrollate causando il collasso delle cellule vegetali.

Nozioni scientifiche elementari insegnano che esistono reperti lignei completamente pietrificati, ma il fenomeno non può verificarsi nelle fondazioni: la pietrificazione del legno è un processo di mineralizzazione che avviene per sostituzione del carbonio con il silicio. Le antiche foreste che furono sepolte dalle ceneri delle eruzioni vulcaniche, si trovarono nelle condizioni anossiche, di alte pressioni e temperature e in un terreno con abbondante concentrazione di silicio, che rendono possibile questo processo della durata di milioni di anni.

Bisogna poi chiarire come proceda il degrado del singolo elemento ligneo: dall'alto verso il basso, dall'esterno all'interno?

Esistono diverse evidenze sperimentali (Klassen et al.,2012, Lionello, 2008) che mostrano come il degrado del legno imbibito proceda dagli strati più esterni verso quelli più interni, normalmente meglio conservati.

Non ci sono elementi che permettano di avanzare ipotesi sull'andamento del degrado con la profondità, si può solo osservare, che, nei pali la cui testa si trova nella zona di oscillazione della falda, lo stato di conservazione migliora verso il basso. Questo andamento è spiegabile con il fatto che l'attacco da parte di microrganismi è favorito dalla presenza di ossigeno libero, il quale è presente in quantità maggiore in prossimità della superficie della falda freatica.

Tentiamo ora di ipotizzare schematicamente cosa può accadere a un elemento di una palificata lignea nel tempo. Supponiamo che il degrado avanzi dall'esterno verso l'interno del palo e sia uniforme sulla lunghezza.

Subito dopo l'infissione, finché c'è ossigeno, la parte esterna del palo può essere aggredita dai funghi, tuttavia le proprietà meccaniche sono ancora buone: il modulo elastico e la resistenza a compressione diminuiscono solo per effetto dell'imbibizione e la distribuzione delle tensioni si può considerare uniforme eccetto una piccola zona esterna degradata.

È verosimile pensare che le condizioni anossiche si stabiliscano nell'ordine di alcune settimane o mesi, dopo di che la velocità del degrado diminuisce drasticamente: i batteri anaerobi agiscono molto lentamente e solo dopo diverse decine o centinaia d'anni la consistenza raggiungerà condizioni critiche.

Supponendo che il degrado proceda dall'esterno verso l'interno dell'elemento, per congruenza, la parte interna, più rigida, sarà soggetta ad una tensione maggiore rispetto alla zona più degradata, meno rigida e anche meno resistente. La distribuzione delle tensioni verticali non è più uniforme, la legge con cui esse si ridistribuiscono dipende dalla legge di variazione del modulo elastico longitudinale in direzione radiale $E_L(r)$.

È ovvio che anche il terreno interviene in questo processo: il carico della fondazione si ripartisce, in funzione delle rigidità, sui pali e sul terreno, poiché varia, mediamente, il

modulo degli elementi lignei, si dovrà avere anche una redistribuzione delle tensioni fra pali e terreno, oltre che all'interno del palo stesso.

L'infissione dei pali produce da subito un miglioramento del terreno incluso fra gli elementi, perché provoca spostamenti plastici e un effetto di confinamento che lo rendono più rigido. I pali che sono ben più rigidi dei terreni, a parità di cedimento verticale, assorbiranno un'aliquota maggiore del carico.

Con il deterioramento dei pali la rigidezza media dell'elemento diminuisce, quindi, per congruenza, aumenterà la tensione sul terreno e la fondazione sperimenterà nuovi cedimenti. Quando la consistenza del legno sarà critica, è presumibile che non ci sia una significativa differenza di rigidezza rispetto al terreno e la distribuzione degli sforzi torni uniforme, a questo punto il comportamento della palificata è assimilabile a quello di una fondazione diretta.

Si tenga presente che, nella redistribuzione degli sforzi all'interno della fondazione, quando si parla di rigidezza del palo, non bisogna pensare al modulo di Young, perché quando l'elemento viene caricato verticalmente il suo cedimento dipende dal rapporto con il terreno circostante: l'equilibrio è assicurato da sforzi tangenziali lungo la superficie laterale e da sforzi normali alla base, quindi entrano in gioco entrambe le rigidezze associate a questi tipi di deformazioni. Si potrebbe fare riferimento, senza errori eccessivi, al modulo di Young ipotizzando che i pali poggino su uno strato rigido e le tensioni tangenziali siano nulle.

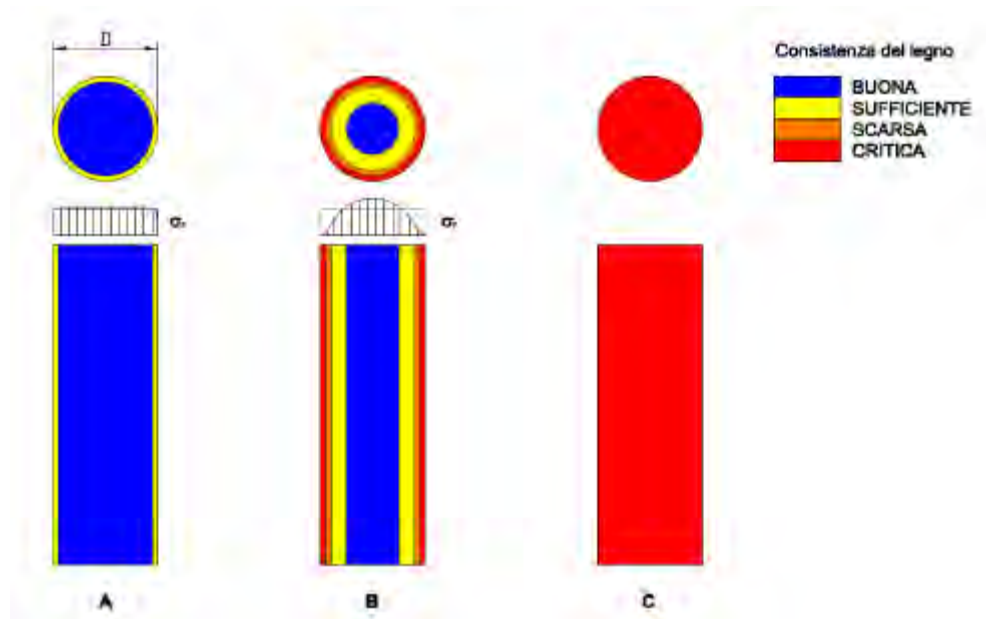


Figura 4.4.2.1: Modello concettuale di degrado del singolo palo:

A) palo alcune settimane dopo l'infissione: E_L e $\sigma_{c,max}$ sono ancora buone, solo la parte esterna potrebbe essere degradata da funghi;

B) dopo vari decenni il degrado ad opera dei batteri anaerobi avanza verso l'interno, al diminuire della consistenza del legno precipita il modulo e la tensione di compressione si ridistribuisce all'interno dell'elemento;

C) dopo secoli il degrado è molto avanzato, i polisaccaridi strutturali sono completamente distrutti, rigidità e resistenza sono minime.

(Ceccato, 2011)

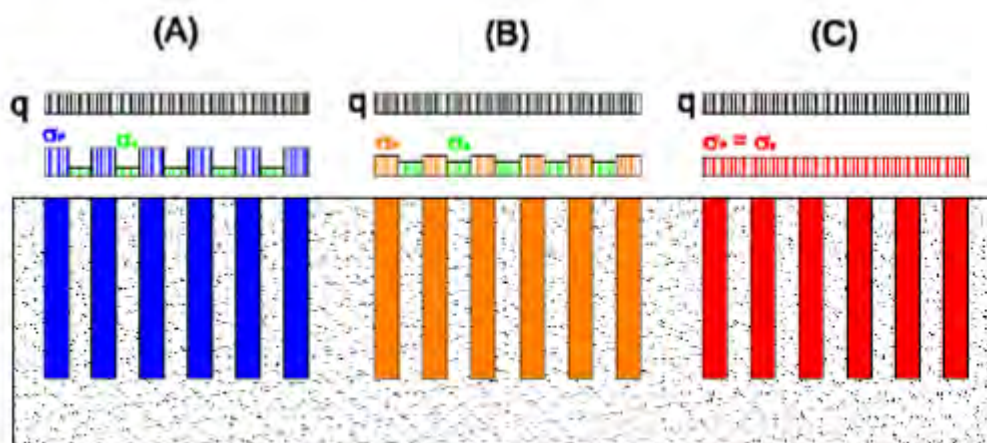


Figura 4.4.2.2: Ridistribuzione degli sforzi fra pali e terreno col procedere del degrado:

A) legno in buone condizioni: buona parte del carico della fondazione viene assorbito dai pali;

B) parziale degrado dei pali dopo vari decenni dall'infissione: il carico si ridistribuisce aumentando la compressione sul terreno;

C) consistenza critica del legno, le cui proprietà diventano simili a quelle del terreno.

(Ceccato, 2011)

5 STUDI SUL COMPORTAMENTO MECCANICO DELLE PALIFICATE SOGGETTE A DEGRADO

In seguito alla recente scoperta che alcuni batteri possano causare degrado anche in assenza di ossigeno sono partite una lunga serie di analisi ed osservazioni.

Molti sono gli studi sul legno degradato e sui parametri fisici e chimici (Klassen et al., 2012, Macchioni et al., 2013), ma sono molto limitati quelli sul comportamento meccanico delle fondazioni lignee, di fatto esiste solo lo studio in corso presso l'Università di Padova (Ceccato e Simonini, 2013).

Nello studio di Klassen et al., 2012, è emersa inoltre una grave velocità di degrado: 0,13 mm/anno per l'abete rosso, 0,25 mm/anno per il pino, anche se sono stati osservati valori estremamente bassi in altri casi. Questo significa che considerando un palo di diametro di 150-200 mm, la sua sezione sarà interamente deteriorata in 7-8 centinaia d'anni.

Si è quindi temuto per la condizione di degrado degli elementi posti in opera da decine e centinaia di anni, e si sono quindi realizzati degli studi specifici per accertarne la sicurezza.

A Venezia, in seguito a degli interventi eseguiti sulle chiese di Santo Stefano e di Santa Maria dei Frari per un miglioramento del terreno a seguito di cedimenti verificatisi, sono stati rilevati delle serie condizioni di degrado negli elementi lignei di fondazione (Gottardi et al., 2008), ed è quindi stata estesa la ricerca sulle condizioni di conservazione delle fondazioni a tutti gli interventi di restauro previsti, allargando notevolmente i dati a disposizione.

I risultati relativi allo stato di conservazione del materiale legnosocampionato nel corso delle indagini hanno destato viva preoccupazione riguardo allo stato complessivo dei sistemi di fondazione degli edifici.

5.1 Ricerca sul palo singolo

Presso l'università tecnica di Graz (Austria), è stato condotto uno studio numerico sullo studio dell'effetto del degrado del legno sul palo singolo (Köeppl 2012)

Il degrado è stato simulato in due modi differenti: degrado dell'intera sezione trasversale del palo e degrado della sola interfaccia tra il palo e il suolo adiacente. Quest'ultimo simula una fase iniziale di degrado in cui solo un sottile strato di materiale viene severamente degradato dai batteri.

Queste analisi sul comportamento del palo singolo vengono prese come riferimento per il presente studio, pertanto si ritiene fondamentale darne una descrizione dettagliata in questo paragrafo. Le dimensioni e i parametri usati da Köeppl (2012) non riflettono un specifico progetto, ma le dimensioni sono comunque basate su quelle delle tipiche fondazioni storiche veneziane.

Nello studio sono stati considerati diversi terreni, uno a comportamento rigido e uno molle.

La geometria del palo prevede $L=3\text{ m}$ e $d=20\text{ cm}$, mentre la distanza assiale tra i pali è assunta di 50 cm ; il modello è assunto largo 25 cm e alto 5 m , $1,5\text{ m}$ al di sotto del piede del palo per analizzare il terreno influenzato dal palo stesso.

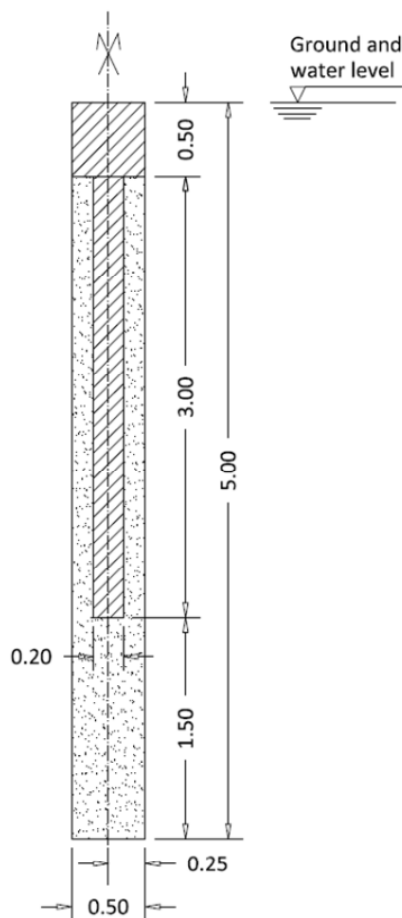


Figura 5.1.1.1: Modello di palo singolo, dimensioni in metri (Köeppl, 2012)

Nel calcolo 2D, il modello è stato assunto come assialsimmetrico, con l'asse di simmetria coincidente con il limite sinistro, le condizioni di vincolo sono state assunte come standard, cioè per i limiti verticali sono impediti gli spostamenti orizzontali ($u_x=0$), mentre per il limite orizzontale sono impediti tutti gli spostamenti ($u_x=u_y=0$).

L'interfaccia, che è uno strumento per simulare il comportamento al contatto fra palo e suolo, è stata disposta lungo la lunghezza del palo e alla sua base.

Per il legno hanno utilizzato un elemento non poroso, e per descrivere il comportamento del materiale un modello lineare elastico.

Per lo zatterone, si è assunto che non subisca grave degrado, e quindi i suoi parametri rimarranno costanti nel tempo.

Per quanto riguarda il degrado, non è disponibile un modello per il degrado dei pali in legno di Venezia; sono disponibili osservazioni sui pali esistenti ottenute dove sono state condotte delle indagini, ma sono comunque insufficienti per creare un modello per prevedere l'andamento delle proprietà meccaniche nel tempo, o per stabilire l'attuale stato di conservazione.

I parametri dei materiali sono riportati in tabella 5.1.1.1 e 5.1.1.2 per il legno di zatterone e palo e 5.1.1.3 e 5.1.1.4 per i due tipi di suolo considerati:

Parametro	u.d.m.	Descrizione	Valore
γ	[KN/m ³]	peso specifico	25
ν	[-]	modulo di Poisson	0,2
E	[MN/m ²]	modulo di Young	30000

Tabella 5.1.1.1: Parametri zatterone

Parametro	u.d.m.	Descrizione	Valore
γ	[KN/m ³]	peso specifico	8
ϕ'	[°]	angolo di attrito	0

C_0'	[KN/m ²]	resistenza a compressione INIZIALE	7 000
Ψ	[°]	angolo di dilatanza	0
ν	[-]	modulo di Poisson	0,4
E_0'	[MN/m ²]	modulo di Young INIZIALE	7 000

Tabella 5.1.1.2: Parametri palo

Parametro	u.d.m.	Descrizione	Valore
$\gamma_{\text{unsat}}=\gamma_{\text{sat}}$	[KN/m ³]	peso specifico (non saturo, saturo)	19
ϕ'	[°]	angolo di attrito	30
c'	[KN/m ²]	resistenza a compressione	7
Ψ	[°]	angolo di dilatanza	0
ν	[-]	modulo di Poisson	0,3
E'	[MN/m ²]	modulo di Young	30

Tabella 5.1.1.3: Parametri SOIL1

Parametro	u.d.m.	Descrizione	Valore
$\gamma_{\text{unsat}}=\gamma_{\text{sat}}$	[KN/m ³]	peso specifico (non saturo, saturo)	19
ϕ'	[°]	angolo di attrito	22
c'	[KN/m ²]	resistenza a compressione	0
Ψ	[°]	angolo di dilatanza	0
ν	[-]	modulo di Poisson	0,3
E'	[MN/m ²]	modulo di Young	3

Tabella 5.1.1.4: Parametri SOIL2

Si sono allora provate due vie per simulare il degrado e per individuare quella più aderente alla realtà: nella prima si riducono i parametri del palo, nella seconda invece quelli dell'interfaccia.

Per ogni metodo seguito è stata fatta un'analisi graduale, cioè un calcolo continuo in cui ogni fase di degrado parte dalla fine della fase precedente (metodo A) e un'analisi singola, in cui ogni singolo gradino di degrado parte dalla fase iniziale, indipendentemente dalla fase precedente (metodo B):

FASE	N° FASE	INIZIA DALLA FASE N°	DESCRIZIONE
Fase iniziale	0	N/A	K0-procedure
Attivazione palo e piastra	1	0	Attivazione del palo con i parametri iniziali e della piastra
Carico	2	1	Applicazione 200 kPa sopra alla piastra
Degrado palo 1/10	3	2	Cambio materiale del palo per simulare il degrado
Degrado palo 1/100	4	3	Ulteriore diminuzione dei parametri del palo
Degrado palo 1/100	5	4	Ulteriore diminuzione dei parametri del palo

Tabella 5.1.1.5: Fasi di calcolo per l'analisi graduale

FASE	N° FASE	INIZIA DALLA FASE N°	DESCRIZIONE
Fase iniziale	0	N/A	K0-procedure
Attivazione palo e piastra	1	0	Attivazione del palo con i parametri iniziali e della piastra
Carico	2	1	Applicazione 200 kPa sopra alla piastra

Degrado palo 1/10	3	0	Installazione del palo con minore rigidezza e/o resistenza e attivazione della piastra
Carico	4	3	Applicazione 200 kPa sopra alla piastra
Degrado palo 1/100	5	0	Installazione del palo con minore rigidezza e/o resistenza e attivazione della piastra
Carico	6	5	Applicazione 200 kPa sopra alla piastra
Degrado palo 1/100	7	0	Installazione del palo con minore rigidezza e/o resistenza e attivazione della piastra
Carico	8	7	Applicazione 200 kPa sopra alla piastra

Tabella 5.1.1.6: Fasi di calcolo per l'analisi singola

E per ognuna delle analisi appena viste si sono fatti variare:

- sia E che c
- solo E
- solo c.

Risultati:

Nell'analisi in cui degrada il palo, con il metodo A (riduzione graduale) le tensioni vengono ridistribuite dalla testa del palo al suolo sotto lo zatterone; l'effetto della redistribuzione delle tensioni, fa sì che la tensione nel palo risulti maggiore rispetto al metodo B (riduzione singola), e anche il bulbo delle pressioni risulta più grande con il metodo graduale (A).

Le differenze fra i metodi A e B sono evidenti con il SOIL1, mentre nel caso del SOIL2 l'effetto della storia tensionale è molto piccolo. La ragione per cui si verifica questo è perché la rigidezza relativa, cioè il rapporto tra la rigidezza del palo e quella del terreno $k_{rel} = E_{palo}/E_{terr}$, per il soil1 è 233, mentre per il soil2 è 2333, nello stato non degradato. Grazie alle buone caratteristiche meccaniche del soil1, con il metodo B, le tensioni trasferite alla testa del palo risultano significativamente ridotte già al gradino di degrado di 1/10.

Nonostante le differenze sull'effetto della storia tensionale, si è osservato che per entrambi i terreni i sistemi mostrano lo stesso comportamento durante il degrado graduale. Questo è

dato dal fatto che nel metodo A le modifiche alla rigidità relativa non hanno una grande influenza nei risultati. L'importanza maggiore è della resistenza del palo.

Il confronto fra i due metodi di degrado mostra un comportamento molto diverso: durante il degrado del palo, il palo stesso è indebolito sopra la sezione trasversale, quindi la resistenza, laterale e di base, del palo diminuiscono mentre quella della zatterone cresce. Questo indica un'inversione del comportamento del carico a lungo termine, che significa che alla fine delle osservazioni lo zatterone trasmette la maggior porzione del carico. Durante il degrado dell'interfaccia comunque, la resistenza di base del palo è aumentata e pertanto la capacità portante del palo rimane predominante comparata con quella dello zatterone, fino all'ultimo gradino di degrado.

I diversi comportamenti dei modelli sono stati osservati con lo sviluppo dei cedimenti: all'inizio dell'analisi di degrado del palo, i cedimenti della testa del palo sono dovuti alle elevate tensioni nelle vicinanze del palo. Con l'avanzare del degrado, le tensioni nel terreno adiacente il palo e nel palo stesso crescono; contemporaneamente, le tensioni nell'impronta del palo diminuiscono.

I cedimenti della testa del palo alla fine delle osservazioni sono principalmente dovute all'accorciamento elastico e a quello plastico del palo stesso, e in piccola parte alle tensioni nel bulbo di pressione al piede della fondazione. Nel caso del degrado dell'interfaccia comunque, le tensioni iniziali nel bulbo di pressioni sono cresciute, come il livello di sforzo in questa area è cresciuto con il degrado dell'interfaccia.

Durante il degrado dell'interfaccia, il livello di sforzo nel piede della fondazione e conseguentemente la resistenza alla base crescono allo stesso modo per entrambi i terreni. Inoltre, per soil1 e soil2 le curve della resistenza alla testa dei pali e per la resistenza dello zatterone mostrano la stessa tendenza.

Per il soil2 però, la resistenza del palo diminuisce prima, a causa del decadimento prematuro della resistenza laterale. Questo contrasta con i risultati del degrado del palo, dove la resistenza laterale per i due suoli descriveva praticamente lo stesso andamento. Come per il caso del degrado del palo i cedimenti sono dell'ordine di 10 volte maggiori nel soil2 rispetto al soil1.

Visti i risultati simili, si sono chiesti se i risultati fossero influenzati dalle dimensioni del modello. E' stato quindi condotta un'analisi con un modello più grande usando soil2, ed è emerso che l'influenza delle dimensioni è trascurabile. Ad ogni modo, i cedimenti mostrano un notevole aumento.

5.2 Studi sul gruppo di pali

Lo studio sul gruppo di pali è iniziato con le indagini sullo stato di conservazione delle fondazioni degli edifici veneziani, che sono state condotte in occasione degli interventi sui campanili di Santo Stefano e di Santa Maria Gloriosa dei Frari nel 2003. In seguito, con il progetto di ricerca su "il sistema delle fondazioni lignee a Venezia, valutazione del comportamento chimico-fisico e microbiologico", affrontato dal CORILA (Consorzio per il Coordinamento delle Ricerche sul Sistema Lagunare di Venezia), sono stati indagati i cantieri di Rio Ca' di Dio e Rio dell'Acqua Dolce, nell'isola di San Felice, e di Rio San Martino nell'omonima isola, in cui la società Insula S.p.A. stava realizzando interventi di manutenzione e restauro, nell'ambito del "Progetto integrato rii".

Con questi studi è stato definito un protocollo di campionamento affidabile e sono stati scelti parametri significativi per la diagnosi complessiva dello stato di conservazione del materiale legnoso.

Il progetto è stato promosso per indagare e descrivere gli effetti del degrado del comportamento meccanico del singolo palo e delle palificate con il decorso dei cedimenti nel tempo delle palificate stesse e, conseguentemente, sulle murature perimetrali dei fabbricati storici Veneziani.

A tale scopo si è impiegato un approccio numerico, nel quale la fondazione e il terreno circostante sono stati modellati ricorrendo ad un codice agli elementi finiti (Plaxis 8.2), nel quale il terreno coesivo tenero è descritto ricorrendo ad un legame costitutivo in grado di simulare il comportamento viscoso a lungo termine, e il legno con un legame elastico isotropo e perfettamente plastico, i cui parametri significativi variano nel tempo per effetto del degrado del legno.

Da una valutazione combinata dei parametri fisico-chimici del legno, discende una stima accurata dello stato di conservazione del materiale, ma nulla di certo si può dire sulle sue

caratteristiche meccaniche residue. Non essendo nota una legge di variazione che legghi le proprietà meccaniche al tempo, si è tentato di ipotizzare un andamento verosimile dei parametri in gioco (vedi Figura 3.6.1).

Il sottosuolo della laguna di Venezia presenta una grande varietà e alternanza di strati: in genere, sotto ad un terreno di riporto di spessore di 1÷4 m si trovano strati di 2÷5 m di terreno argilloso e argilloso-limoso con caratteristiche di resistenza piuttosto basse, spesso con sostanze organiche; al di sotto si ha alternanza di strati di sabbia fine, limi sabbiosi ed argillosi, argille limose. Comunque, frequentemente, a profondità variabile 5÷15 m si trovano strati caratterizzati da proprietà meccaniche discrete, e in alcune zone, tra 1 e 5 m di profondità è presente uno strato di argilla limosa fortemente sovra consolidata, localmente noto come *caranto*.

Questi terreni, in particolare quelli superficiali, sono molto compressibili e caratterizzati da un indice dei vuoti particolarmente alto.

Nello studio della palificata nei secoli, non si è potuto dunque trascurare l'effetto del cedimento secondario, che in questi materiali risulta particolarmente elevato: si è scelto quindi di utilizzare il modello Soft Soil Creep, capace di tener conto dell'effetto del tempo sulla risposta del terreno.

E' stata considerata una palificata tipo (Figura 5.1.1) su un terreno omogeneo molto compressibile composto da un'argilla molle normalconsolidata (parametri di input utilizzati calibrati sugli standard veneziani).

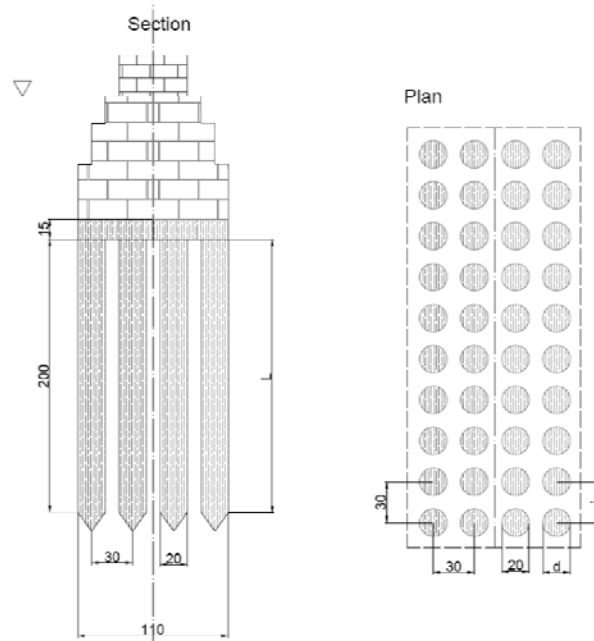


Figura 5.2.1: Palificata tipo

Le fasi del calcolo hanno tentato di simulare, in modo semplificato, le fasi della costruzione e si è poi applicato il carico di 200 KPa sulla palificata, che rappresentano lo sforzo sulla muratura soprastante.

E' stato rilevato come, per un moderato livello di degrado ($\xi = E/E_0 = c/c_0 > 2\%$) non succeda quasi nulla: il palo trasferisce i carichi agli strati profondi e gli unici spostamenti misurati siano solo conseguenza del creep; per degrado severo ($\xi < 1\%$) il terreno risulta seriamente sollecitato e si misurano cedimenti addizionali (Figura 5.2.2)

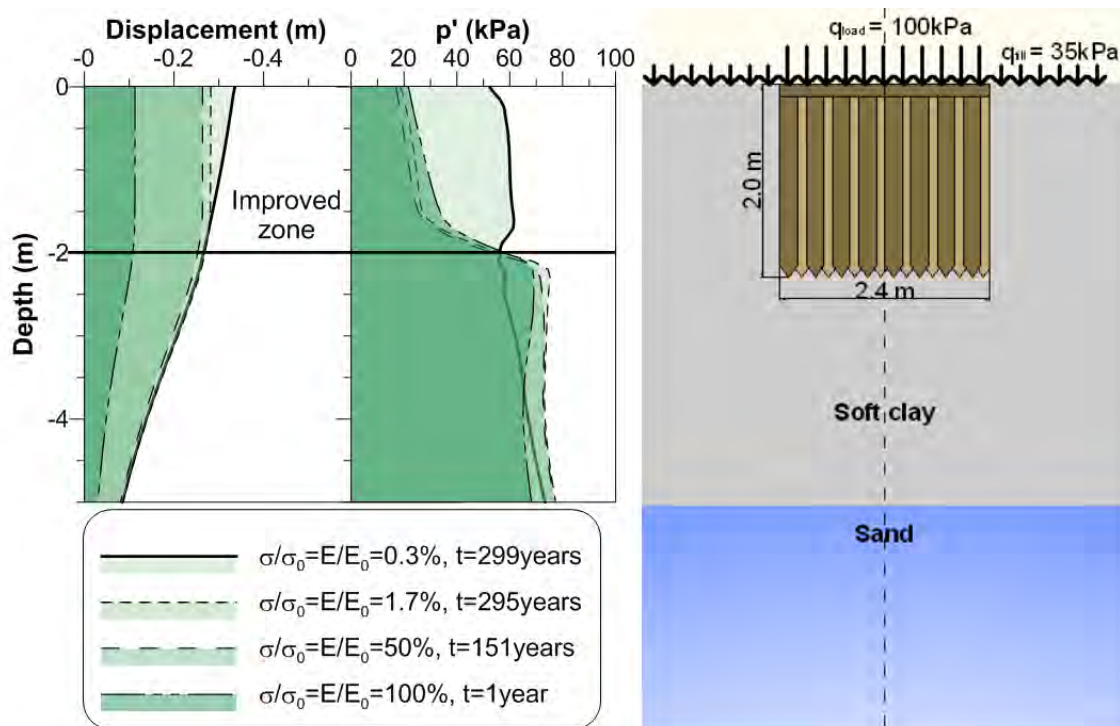


Figura 5.2.2 : Tensione efficace media (p') a spostamenti verticali in funzione della profondità per alcuni valori di $E/E_0 = \sigma / \sigma_0$.

Dalle osservazioni dei cedimenti si è quindi riscontrato che la fondazione continua ad assolvere la sua funzione, e gli spostamenti sono prevalentemente dovuti al comportamento viscoso, finchè il legno non ha totalmente perso le proprie caratteristiche meccaniche (Figura 5.1.3).

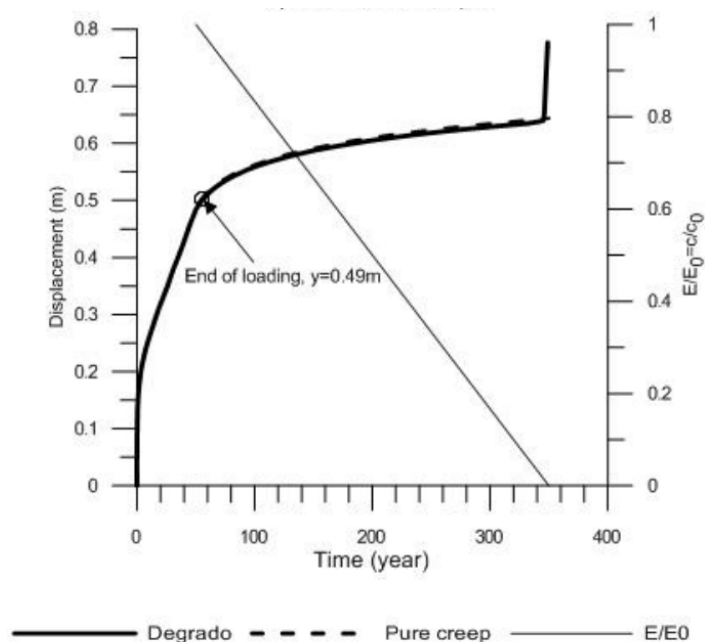


Figura 5.2.3: Andamento dei cedimenti e delle proprietà meccaniche nel tempo

Successivamente, sono stati presi in considerazione altri aspetti quali il rapporto tra la larghezza della fondazione e la lunghezza dei pali (B/L) e la presenza di uno strato resistente dove poggiare la punta dei pali, tuttavia si può dire che qualitativamente i risultati siano identici al caso appena illustrato.

In conclusione, le analisi numeriche hanno permesso di definire i fattori principali che caratterizzano il comportamento della fondazione nel tempo; in particolare è emersa l'importanza degli effetti di compressione secondaria, mentre sembra che il degrado del legno causi un decisivo incremento degli spostamenti solo quando il materiale ha completamente perso le proprie caratteristiche meccaniche. In altre parole pare che il legno possa assolvere alla propria funzione di miglioramento del terreno fino a livelli di degrado molto seri.

Il Soft Soil Creep model permette di considerare il comportamento viscoso del terreno, ma rende la risposta molto sensibile alla storia di carico della fondazione che, in generale, non è nota.

5.3 Osservazioni

Dall'insieme delle ricerche precedenti, si è scelto di utilizzare il modello di palo singolo, in quanto da' una buona idea sul comportamento del palo che lavora nel mezzo di un gruppo di pali. Attraverso la ridotta dimensione radiale, che rappresenta il ridotto interasse fra i pali, è possibile simulare il tipico comportamento delle palificate, cioè minori cedimenti relativi tra palo e suolo corrispondenti ad una minore tensione tangenziale comparata con un palo isolato, non soggetto all'effetto di gruppo dei pali.

Per quanto riguarda il degrado, si è scelto di utilizzare il modello in cui degrada l'intera sezione del palo: se il degrado dell'interfaccia rappresenta il metodo più attendibile per modellare il degrado iniziale del legno, perché la parte esterna del legno è la più vulnerabile e la prima ad essere attaccata dai batteri, con il passare del tempo poi, anche la parte interna viene attaccata, anche se l'attacco non sarà uniforme dall'esterno all'interno. Per semplificare i problemi, il degrado viene allora spalmato sull'intera sezione trasversale del palo.

6 COMPORTAMENTO DEI PALI IN FUNZIONE ALLA LORO LUNGHEZZA

6.1 Generalità

Dalle ricerche precedenti è emerso che gli edifici storici di Venezia sembrano non avere sostanziali problemi direttamente correlabili al degrado dei pali lignei, mentre non è emersa la stessa situazione nei pali europei, in particolare in quelli olandesi.

In questo capitolo si cerca di capire se la diversa geometria delle fondazioni possa essere la fonte di un comportamento meccanico così diverso in risposta al degrado del materiale.

Con riferimento allo studio di C. Köepl, in cui simulava il degrado in due differenti modi, uno in cui degradava il palo, e il secondo in cui degradava l'interfaccia, si è scelto di usare il primo metodo, visti i risultati precedentemente ottenuti.

In questo capitolo vedremo cosa cambia al variare della lunghezza del palo, mantenendo costanti tutte le altre dimensioni geometriche e i parametri dei materiali.

6.2 Modello numerico

I calcoli numerici dell'elaborato sono eseguiti mediante il programma Plaxis ad elementi finiti; il modello 2D è stato generato con Plaxis versione 9.0.

Le dimensioni e i parametri dei materiali utilizzati non si riferiscono ad un caso specifico, sono state prese arbitrariamente, e poi fatte variare (la lunghezza) per ottenere un ampio range di comportamenti.

Il palo ha lunghezza iniziale pari a $L=2\text{m}$, e poi varia diventando $L=3\text{m}$, $L=5\text{m}$, $L=7\text{m}$ e $L=10\text{m}$; il diametro rimane fisso $d=20\text{cm}$. La distanza assiale tra i pali è assunta di 50cm .

Sopra al palo è presente uno zatterone in legno alto 50cm .

Il modello è scelto come assialsimmetrico e quindi ha larghezza pari alla metà dell'interasse tra i pali, e lunghezza pari alla somma della lunghezza del palo più la profondità del terreno influenzata:

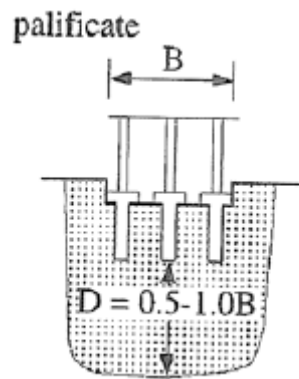


Figura 6.2.1 : Volume significativo di terreno per terreno omogeneo

Per il palo singolo si hanno indicazioni riguardo ad almeno 4 volte il diametro del palo; scegliamo quindi di mantenere 1,5 m di profondità al di sotto del palo. In definitiva la mesh sarà lunga rispettivamente 4, 5, 7, 9 e 11 m.

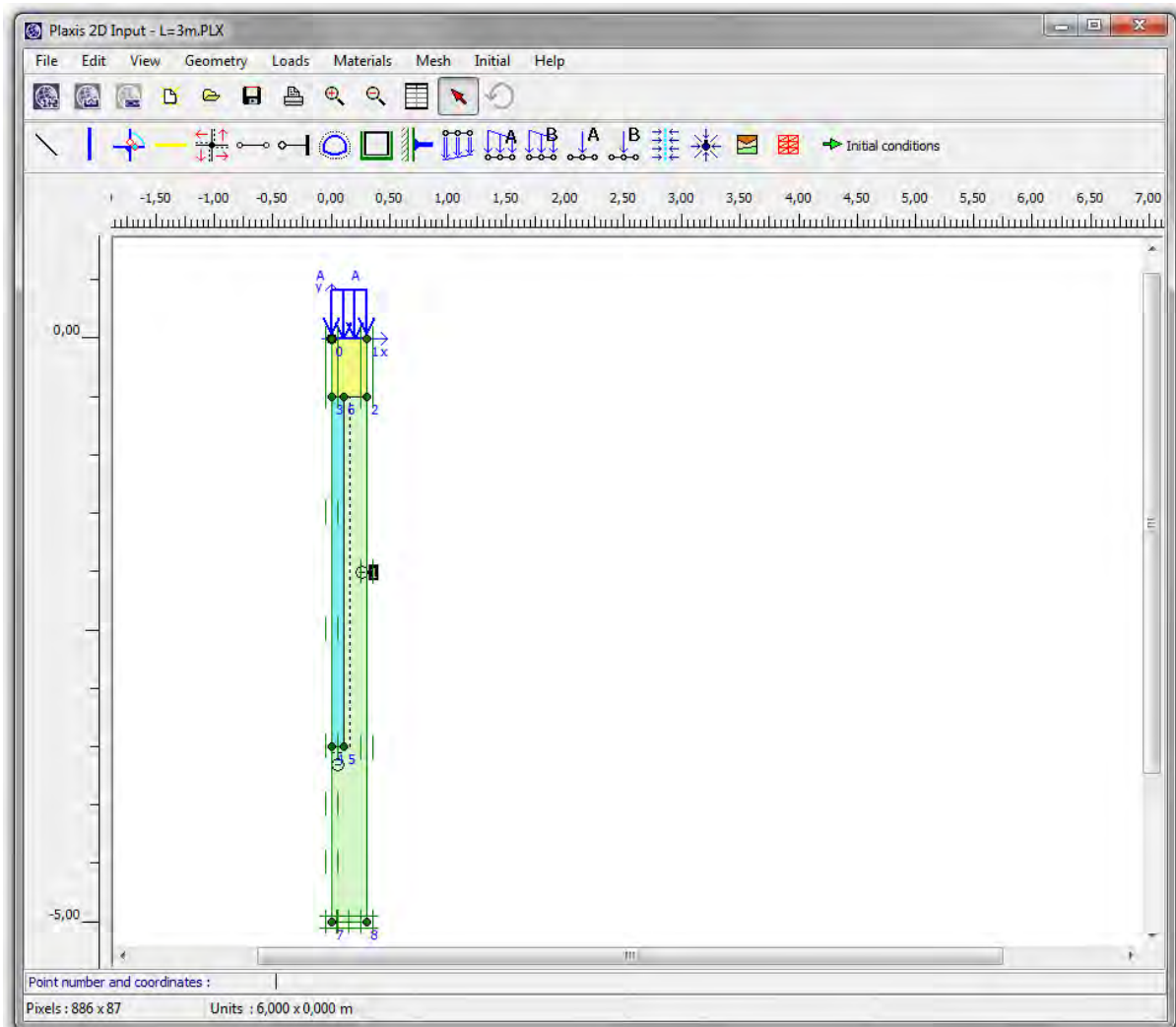


Figura 6.2.2: Modello Plaxis (esempio per $L=3m$)

Le condizioni al contorno scelte sono standard, cioè sul contorno verticale sono bloccati gli spostamenti orizzontali ($u_x=0$), mentre sul contorno orizzontale, cioè sulla base, sono bloccati tutti gli spostamenti ($u_x=u_y=0$).

Infine è stata introdotta l'interfaccia, nel confine tra palo e terreno, che ha la funzione di simulare l'interazione reciproca fra i due materiali; è situata lungo il perimetro del palo, cioè lungo il fusto e sulla base. Avendo scelto il modello di degrado in cui è solo il palo a peggiorare le sue condizioni, il parametro dell'interfaccia è stato mantenuto costante e pari a $R_{inter}=1$.

6.2.1 Materiali

Per il terreno si è scelto un materiale rigido e resistente, il modello costitutivo scelto è quello di Mohr-Coulomb e i suoi parametri sono riportati nella tabella seguente:

Parametro	u.d.m.	Descrizione	Valore
$\gamma_{unsat}=\gamma_{sat}$	[KN/m ³]	peso specifico (non saturo, saturo)	19
ϕ'	[°]	angolo di attrito	30
c'	[KN/m ²]	resistenza a compressione	7
ψ	[°]	angolo di dilatanza	0
ν	[-]	modulo di Poisson	0,3
E'	[MN/m ²]	modulo di Young	30

Tabella 5.2.1.1: Parametri del terreno

Per lo zatterone, elemento tipico nelle fondazioni Veneziane che è stato mantenuto anche in questa ricerca, per uniformità, al fine di poter paragonare i risultati con quelli delle ricerche precedenti, i parametri del legno sono:

Parametro	u.d.m.	Descrizione	Valore
γ	[KN/m ³]	peso specifico	25
ν	[-]	modulo di Poisson	0,2
E	[MN/m ²]	modulo di Young	30 000

Tabella 5.2.1.2: Parametri dello zatterone

Lo zatterone è definito come non poroso, e per descrivere il suo comportamento meccanico si è usato il modello costitutivo lineare elastico.

In generale si è assunto che lo zatterone non subisca degrado serio e quindi i suoi parametri rimangono costanti nel tempo durante l'analisi. Questa assunzione è ritenuta valida in seguito allo studio svolto nel lavoro di tesi di C. Köeppl (2012), durante il quale ha analizzato l'ipotesi che degradasse anche lo zatterone, ottenendo risultati ininfluenti.

Infine, per i pali di fondazione, allo stato iniziale, cioè prima che il degrado abbia inizio, si è assunto il materiale come non poroso e si è utilizzato il modello costitutivo di Mohr-Coulomb, con i seguenti parametri:

Parametro	u.d.m.	Descrizione	Valore
γ	[KN/m ³]	peso specifico	8
ϕ'	[°]	angolo di attrito	0
C_0'	[KN/m ²]	resistenza a compressione INIZIALE	7 000
ψ	[°]	angolo di dilatanza	0
ν	[-]	modulo di Poisson	0,4
E_0'	[MN/m ²]	modulo di Young INIZIALE	7 000

Tabella 5.2.1.3: Parametri dei pali di fondazione

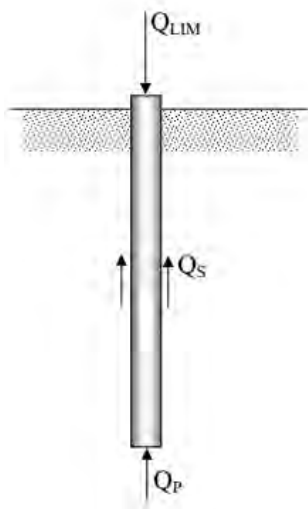
6.2.2 Carico

Al fine di ottenere dei risultati che siano confrontabili gli uni con gli altri, al variare della lunghezza del palo, è necessario che ognuno sia ugualmente sollecitato.

Per fare questo, decidiamo, cautelativamente, di adottare un coefficiente di sicurezza globale pari a 2.

Si procede calcolando la capacità portante del singolo palo mediante la formula:

$$Q_{lim} = Q_S + Q_P = q_s \cdot A_s + q_p \cdot A_p$$



Nella quale Q_S e Q_P sono rispettivamente la risultante delle tensioni di attrito e/o di aderenza, e la risultante delle tensioni di compressione alla base.

In particolare poi:

$$q_p = \sigma'_{v0,p} \cdot N_q$$

$$q_s = \sigma'_h \cdot \text{tg } \delta = k \cdot \sigma'_{v0} \cdot \text{tg } \phi' = (1 - \text{sen } \phi') \cdot \sigma'_{v0} \cdot \text{tg } \phi'$$

N_q è un valore desunto da un grafico, in funzione dell'angolo di attrito ϕ :

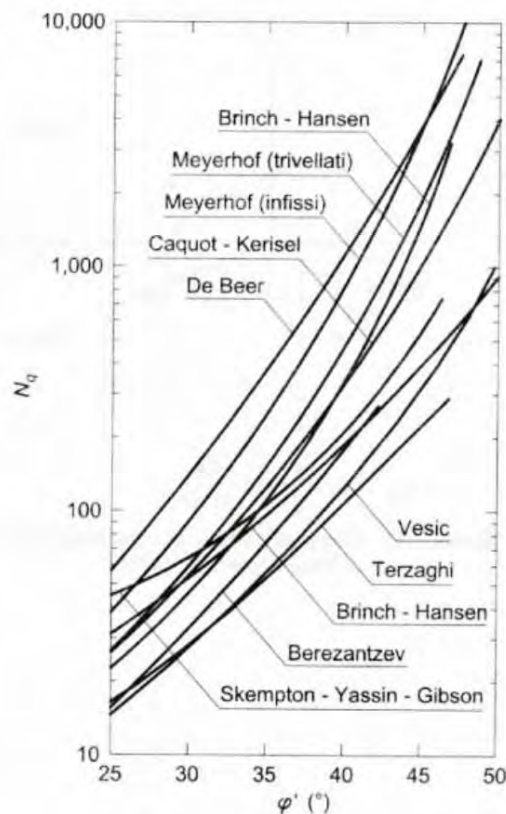


Figura 5.2.2.1: Valori di N_q

Il valore di σ'_{v0} è il valore della tensione verticale efficace media: essendo il palo immerso in un terreno omogeneo possiamo usare il valore della tensione alla profondità di $L/2$.

Le aree, come di consueto, sono:

$$A_p = \pi \cdot (d/2)^2$$

$$A_s = 2\pi \cdot (d/2) \cdot L$$

Una volta calcolato il carico limite, applichiamo il coefficiente di sicurezza scelto ($FS=2$), e individuiamo l'entità del carico che andrà a sollecitare il nostro palo (Q^*) (Tabella 5.2.2.1)

d	[m]	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
L	[m]	2,00	3,00	5,00	7,00	10,00
L_1 (zatterone)	[m]	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
γ'	[KN/m ³]	9,18	9,18	9,18	9,18	9,18
ϕ	[rad]	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
N_q	[-]	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00
q_p	[KN/m ²]	918,40	1285,76	2020,48	2755,20	3857,28
A_p	[m ²]	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Q_p	[KN]	28,85	40,39	63,48	86,56	121,18
q_s	[KN/m ²]	3,98	5,30	7,95	10,60	14,58
A_s	[m ²]	1,26	1,88	3,14	4,40	6,28
Q_s	[KN]	5,00	9,99	24,99	46,64	91,62
Q_{tot}	[KN]	33,85	50,39	88,46	133,20	212,80
Q^*	[KN]	16,92	25,19	44,23	66,60	106,40
q	[KN/m ²]	59,86	89,11	156,44	235,55	376,31
q scelto	[KN/m ²]	60	90	160	240	380

Tabella 5.2.2.1 : Calcolo carico pali

6.2.3 Degrado

Il degrado è simulato facendo degradare l'intero palo, ed in particolare si fanno diminuire la sua resistenza a compressione e il suo modulo di Young.

Lo zatterone, pur essendo composto da legno come il palo, viene considerato non degradato per tutto lo studio, perché da ricerche precedenti (Köeppl , 2012) si è visto che il suo degrado non influenza i risultati finali.

Inizialmente si erano considerati 8 gradini di degrado, che sono stati in seguito aumentati a 12 per affinare i risultati, e che corrispondono ai valori riportati nella tabella

Livello di degrado (ξ)	Parametro	U.d.m.	Valore
1	E	[KN/m ²]	7.000,00
	c	[KN/m ²]	700.000,00
1/1,25	E	[KN/m ²]	5.600,00
	c	[KN/m ²]	5.600.000,00
1/2	E	[KN/m ²]	3.500,00
	c	[KN/m ²]	3.500.000,00
1/4	E	[KN/m ²]	1.750,00
	c	[KN/m ²]	1.750.000,00
1/6,66	E	[KN/m ²]	1.050,00
	c	[KN/m ²]	1.050.000,00
1/10	E	[KN/m ²]	700,00
	c	[KN/m ²]	700.000,00
1/12	E	[KN/m ²]	583,33
	c	[KN/m ²]	583.333,30
1/15	E	[KN/m ²]	466,67
	c	[KN/m ²]	466.666,67
1/35	E	[KN/m ²]	200,00
	c	[KN/m ²]	200.000,00
1/50	E	[KN/m ²]	140,00
	c	[KN/m ²]	140.000,00
1/70	E	[KN/m ²]	100,00
	c	[KN/m ²]	100.000,00
1/100	E	[KN/m ²]	70,00
	c	[KN/m ²]	70.000,00
1/1000	E	[KN/m ²]	7,00
	c	[KN/m ²]	7.000,00

Tabella 6.2.3.1 : Valori di c ed E per ciascun gradino di degrado

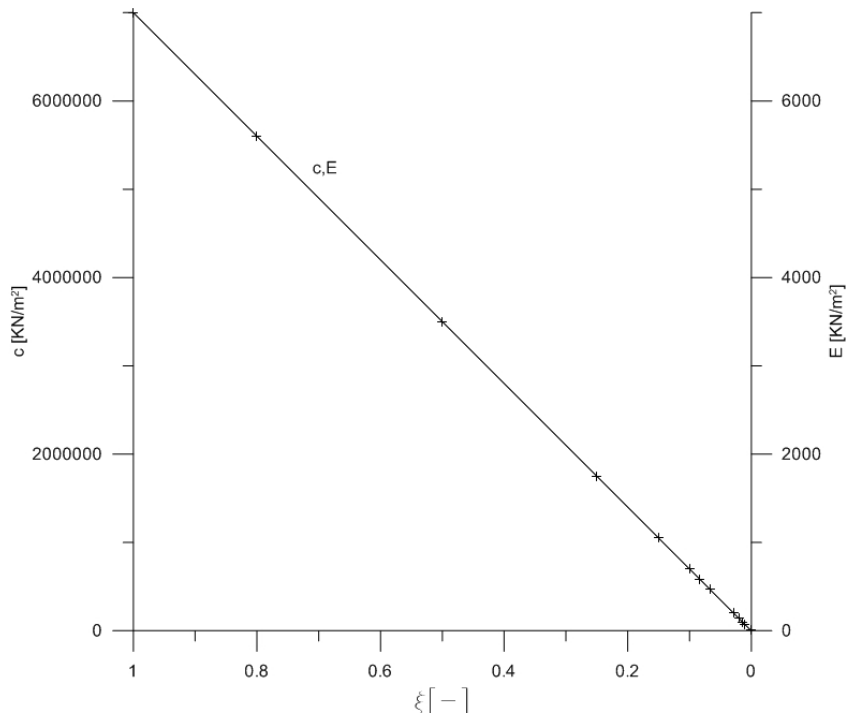


Figura 6.2.3.1 : Andamenti di c ed E al variare del livello di degrado

6.2.4 Procedura di calcolo

In assenza di relazioni certe tra parametri meccanici e tempo, si usa un semplice modello di diminuzione lineare di rigidezza e resistenza. Questo è sufficiente, perché il nostro obiettivo è di studiare l'effetto del decadimento dei parametri in generale, e non di eseguire un'analisi ritardata nel tempo.

Le misure dei moduli elastici di legni antichi non sono disponibili; tuttavia modulo di resistenza e ed elastico sono spesso proporzionali nel legno, quindi possiamo supporre che diminuiscano seguendo la stessa legge lineare:

$$\xi = \frac{E}{E_0} = \frac{\sigma_c}{\sigma_0}$$

Con:

- ξ : livello di degrado
- E₀ : modulo elastico legno fresco
- E_c : modulo elastico legno vecchio
- σ₀ : resistenza a compressione legno fresco
- σ_c : resistenza a compressione legno vecchio

Si noti che $\xi=1$ indica il legno in perfette condizioni di conservazione, e $\xi=0$ rappresenta una totale perdita delle proprietà meccaniche del legno; in altre parole, il livello di degrado aumenta con il diminuire di ξ .

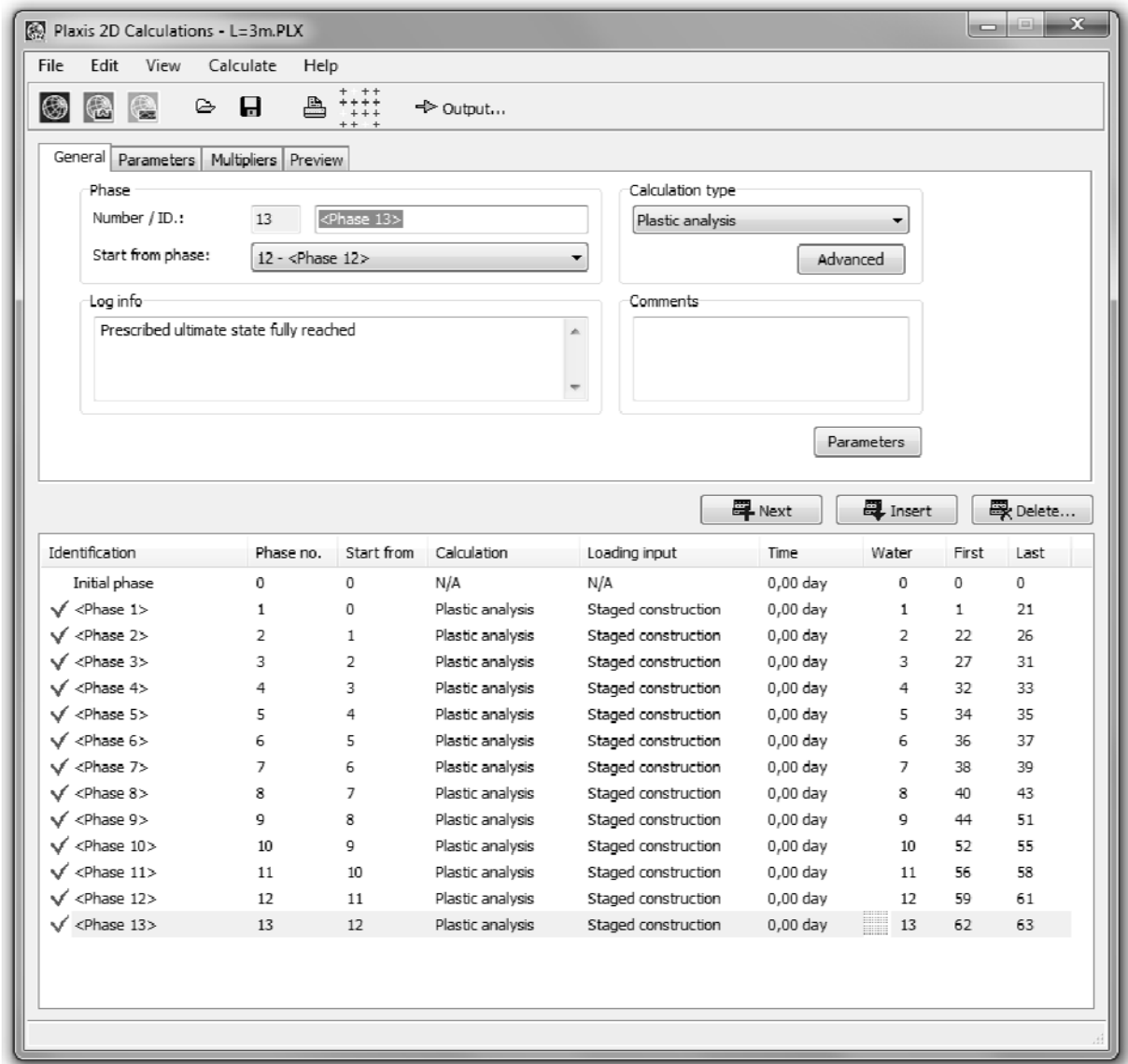


Figura 5.2.4.1: Fasi di calcolo

Nella prima fase il palo è nelle condizioni iniziali, poi, dalla fase 2 alla 13 il degrado cresce, facendo variare contemporaneamente sia la resistenza a compressione c che il modulo elastico E ; ogni fase parte dalla precedente: si esegue infatti un'analisi del degrado continua.

6.3 Risultati

6.3.1 Cedimenti e accorciamento del palo

I cedimenti u_y sono misurati in nodi nella mezzeria del palo, cioè sul bordo di simmetria del modello. Il punto A è posto sulla sommità dello zatterone, il punto B sulla testa del palo e il punto C sulla sua estremità inferiore.

I cedimenti del punto A e del punto B coincidono, e quindi considereremo solo quelli del punto superiore; confrontando questo cedimento con quello del punto C abbiamo indicazioni sull'accorciamento del palo.

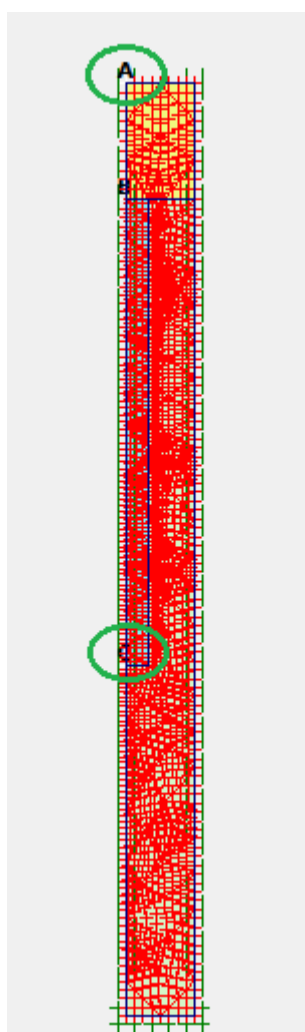


Figura 6.3.1.1 : Punti in cui viene misurato il cedimento

I valori dei cedimenti di A e di C, e il valore di accorciamento del palo al termine di ciascuna fase di degrado, per ciascuna lunghezza, sono riportati nell'Appendice A.

$$\text{accorciamento} = U_{y,C} - U_{y,A}$$

L=2m

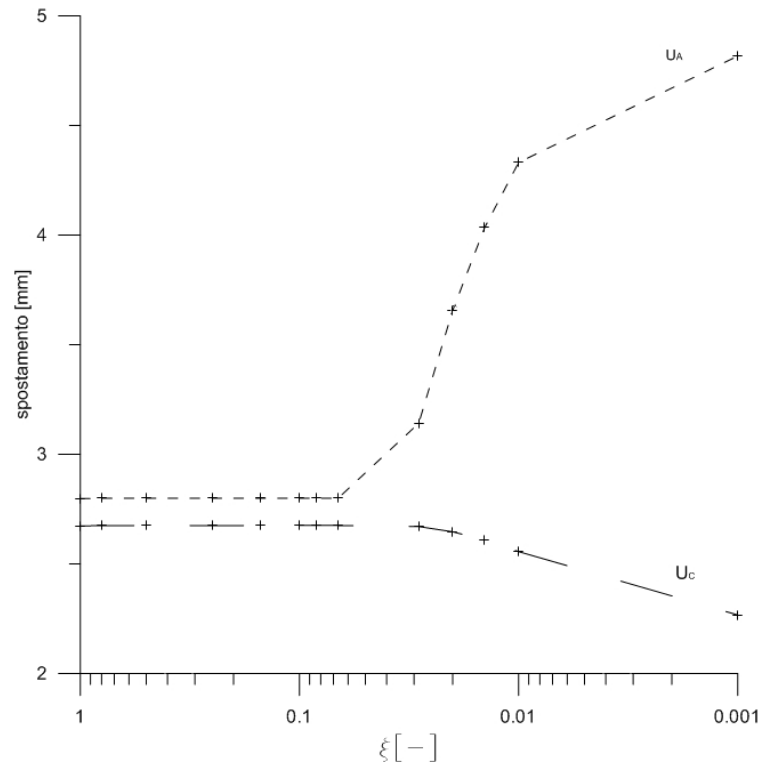


Figura 6.3.1.2: Andamento dei cedimenti dei punti A e C in funzione del degrado L=2m

L=3m

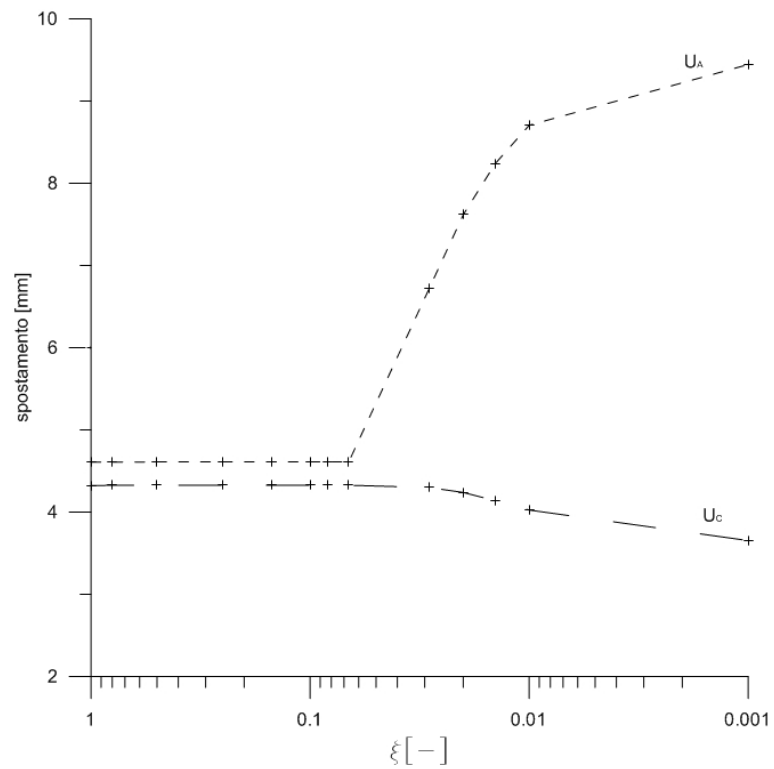


Figura 6.3.1.3: Andamento dei cedimenti dei punti A e C in funzione del degrado L=3m

L=5m

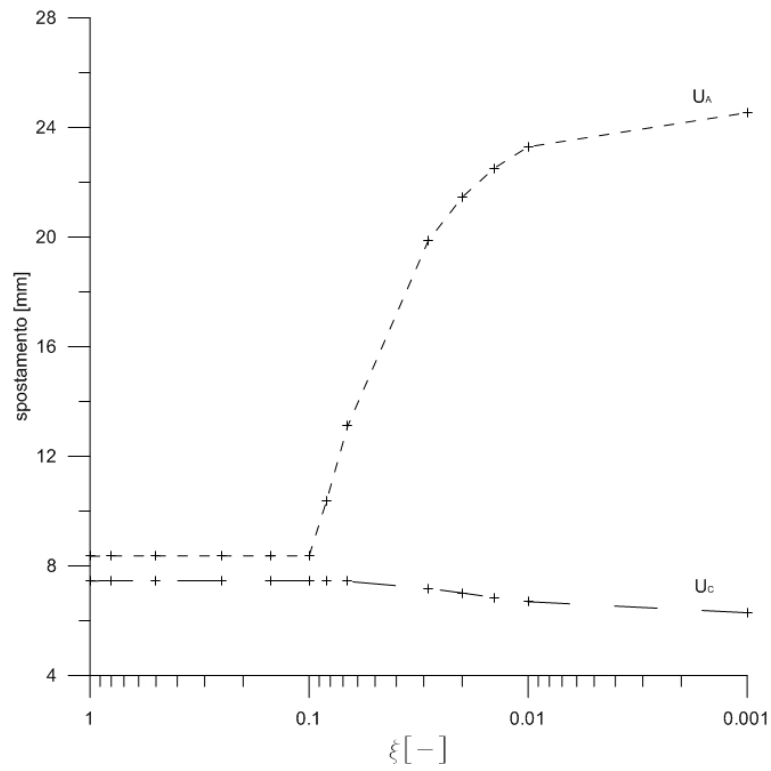


Figura 6.3.1.4: Andamento dei cedimenti dei punti A e C in funzione del degrado L=5m

L= 7 m

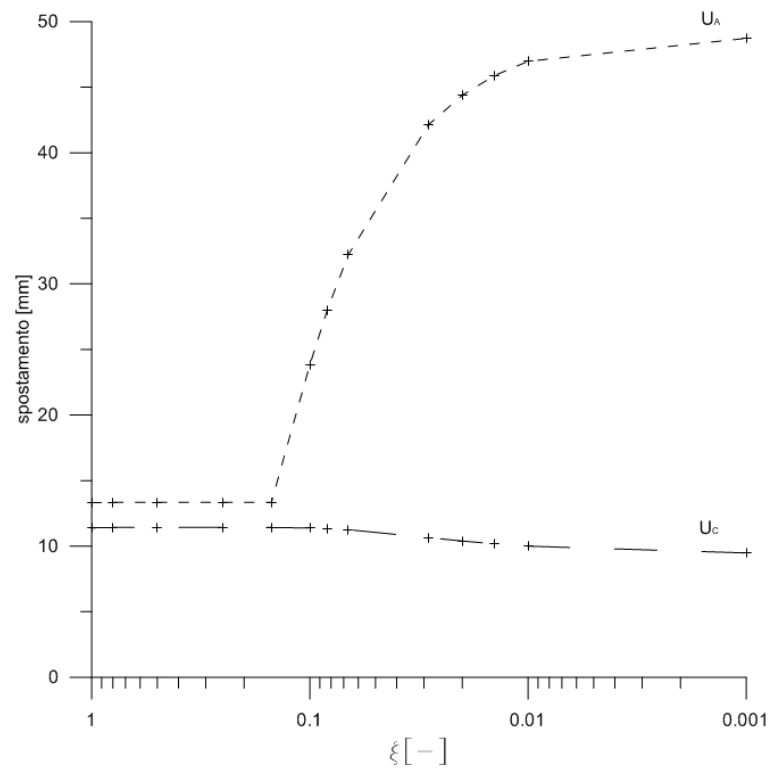


Figura 6.3.1.5: Andamento dei cedimenti dei punti A e C in funzione del degrado L=7m

L = 10 m

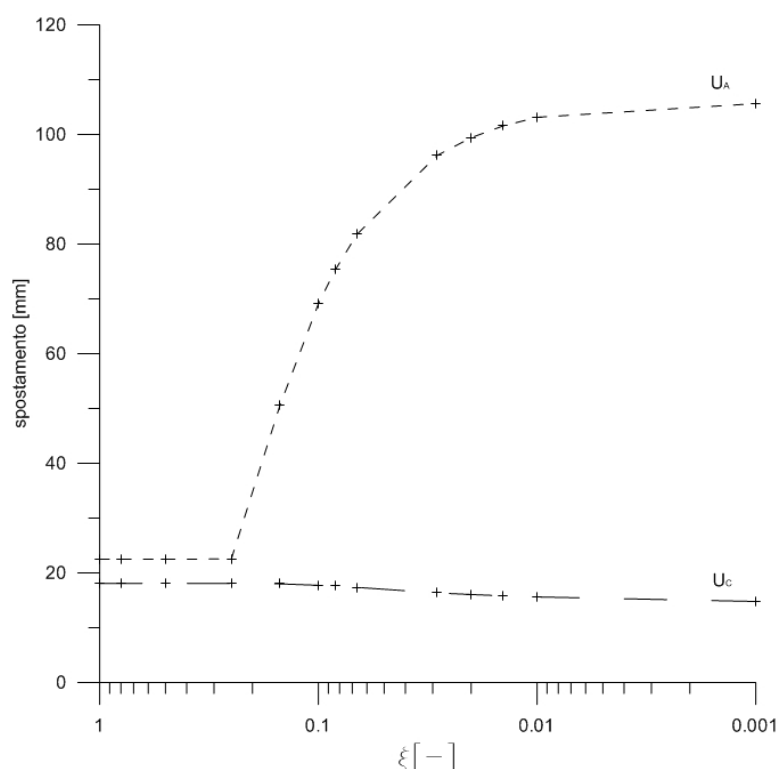


Figura 6.3.1.6: Andamento dei cedimenti dei punti A e C in funzione del degrado L=10m

Commenti

Qualitativamente gli andamenti dei cedimenti sono simili per le diverse lunghezze considerate: il cedimento alla testa del palo (u_A) resta costante fino ad un certo livello di degrado, che possiamo definire "critico", poi inizia rapidamente a crescere; il cedimento della punta (u_C), al contrario, diminuisce leggermente per livelli di degrado più severi di quello critico. Questo recupero dei cedimenti è dovuto allo scarico tensionale del materiale sotto la punta del palo per effetto della redistribuzione degli sforzi tra palo e terreno; infatti con l'aumentare del degrado diminuisce il carico trasmesso al palo e aumenta quello trasferito dalla piastra direttamente al terreno. Il rigonfiamento è poi enfatizzato dalla scelta del modello elastico lineare del terreno, che assume lo stesso modulo elastico per la fase di carico e per quella di scarico; tuttavia questo non è realistico in quanto è noto che il terreno ha una risposta molto più rigida in fase di scarico.

I valori del cedimento finale sono molto maggiori all'aumentare della lunghezza del palo: variano tra $u_{A,L=2m} \approx 3 \text{ mm}$ e $u_{A,L=10m} \approx 90 \text{ mm}$.

Inoltre, maggiore è la lunghezza del palo, e prima si osserva un rapido incremento degli spostamenti, cioè con un degrado minore: per $L=2\text{m}$ il degrado parte dopo l'ottava fase, cioè dopo un degrado di $1/15$, mentre per $L=10\text{m}$ dopo la seconda fase, con un degrado di $1/1,25$.

6.3.2 Confronto accorciamento pali

Abbiamo messo ora a confronto l'accorciamento dei pali in funzione del degrado:

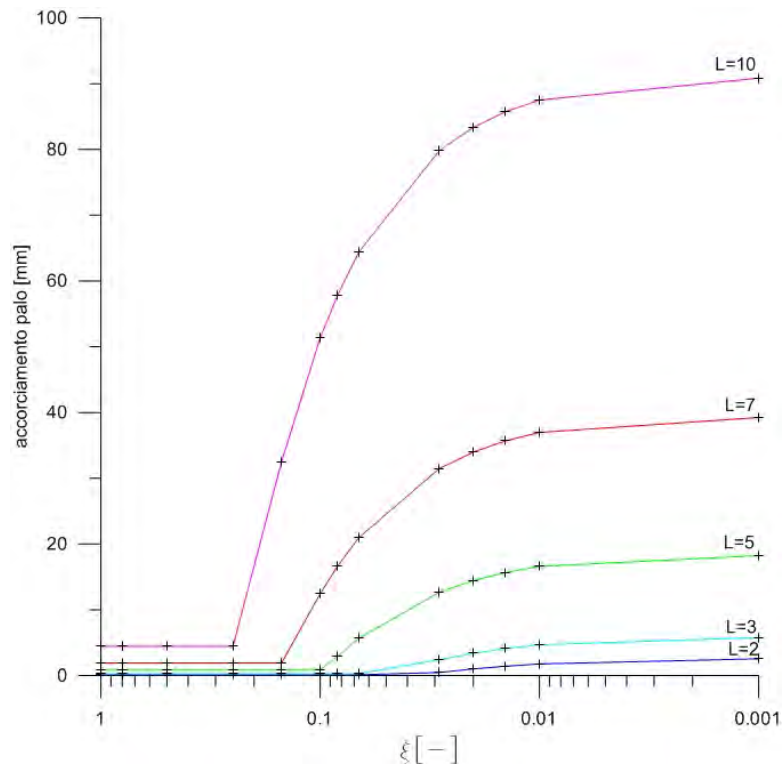


Figura 6.3.2.1: Confronto accorciamento pali all'aumentare del degrado

Analogamente per l'accorciamento relativo dei pali, ossia per l'accorciamento del palo diviso per la sua lunghezza, per adimensionalizzare, sempre in funzione del degrado:

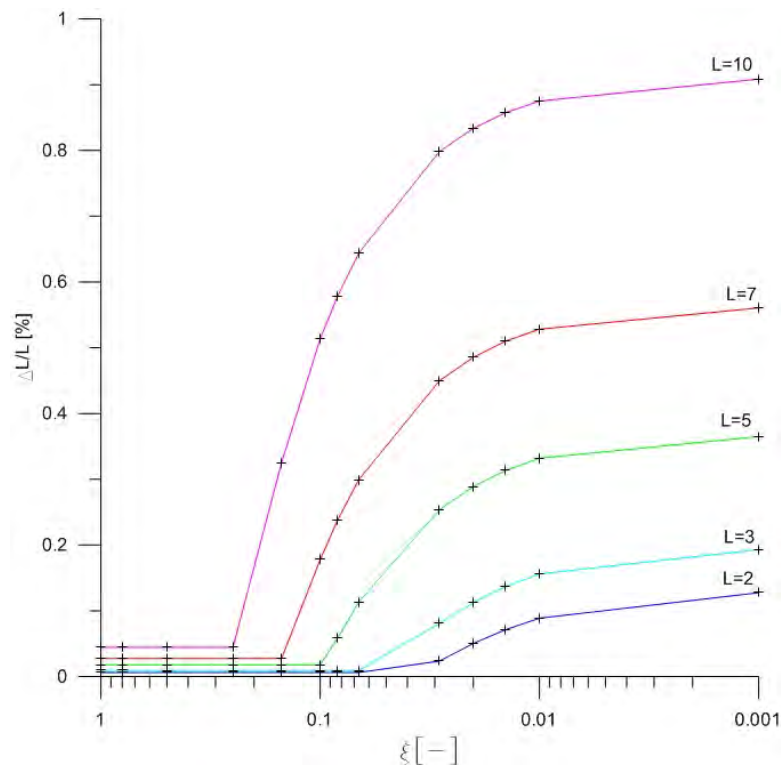


Figura 6.3.2.2: Confronto accorciamento relativo pali all'aumentare del degrado

Commenti

E' evidente che tutti i pali si accorcino pochi millimetri.

Maggiore è la lunghezza del palo e maggiore è l'accorciamento percentuale, infatti per L=10m si ha un accorciamento di poco inferiore all'1%, mentre per L=2m si supera di poco lo 0,1%.

Inoltre, maggiore è la lunghezza del palo, e prima inizia l'accorciamento, cioè quando il degrado è ancora nelle fasi iniziali.

6.3.3 Analisi delle forze agenti sull'interfaccia palo-terreno

La capacità portante, anche detta resistenza del palo, è data dalla sommatoria delle resistenze di base e laterale che in seguito indicheremo come F_{base} e $F_{laterale}$ rispettivamente.

Queste resistenze sono ottenute rispettivamente dall'integrazione delle tensioni normali agenti sulla base del palo rispetto all'area di base, per ottenere la resistenza di base, e delle

tensioni tangenziali agenti sulla lunghezza del palo, rispetto alla superficie laterale per quella laterale.

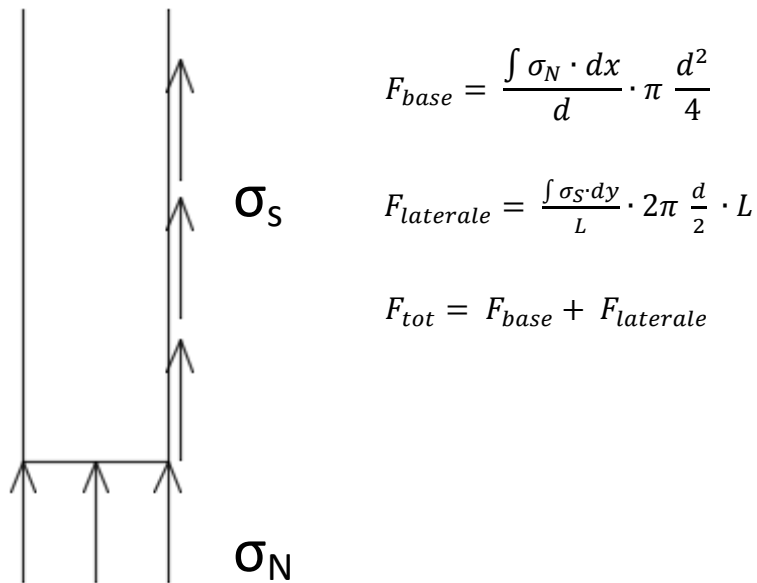


Figura 6.3.3.1: tensioni normali e tangenziali al palo

Le forze risultanti avranno segno positivo quando sono dirette secondo il sistema di riferimento adottato, e quindi quando hanno direzione come in Figura 6.3.3.1, negativo quando sono in direzione opposta.

I valori delle forze di base, laterale e totale, oltre alle forze relative, cioè le forze divise il carico limite massimo del sistema, per poter confrontarle adimensionalizzate, per ciascuna lunghezza, sono riportati nelle tabelle dell'Appendice A.

F_{base}-degrado

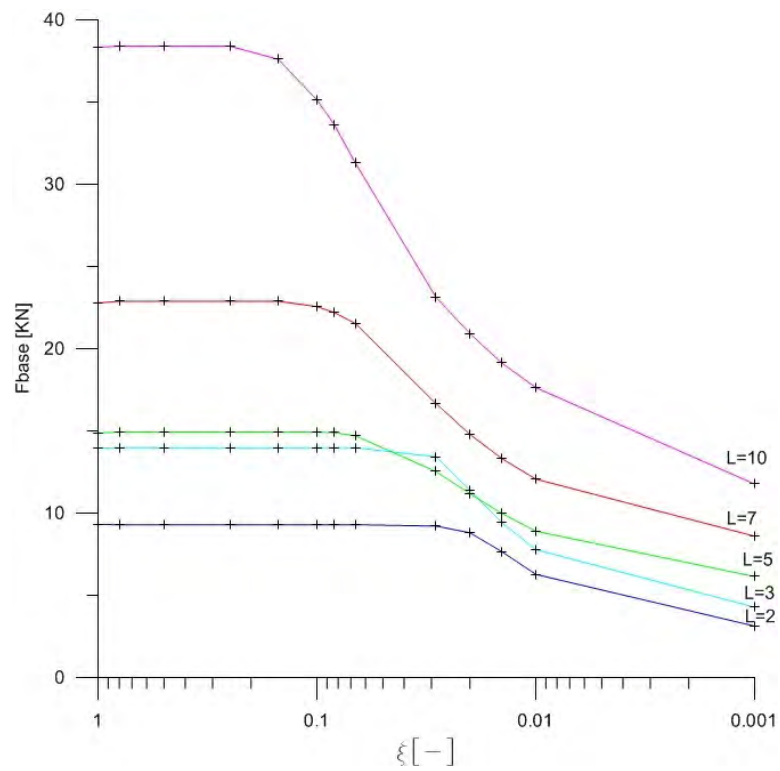


Immagine 6.3.3.1: Andamento F_{base} funzione del degrado per tutte le lunghezze

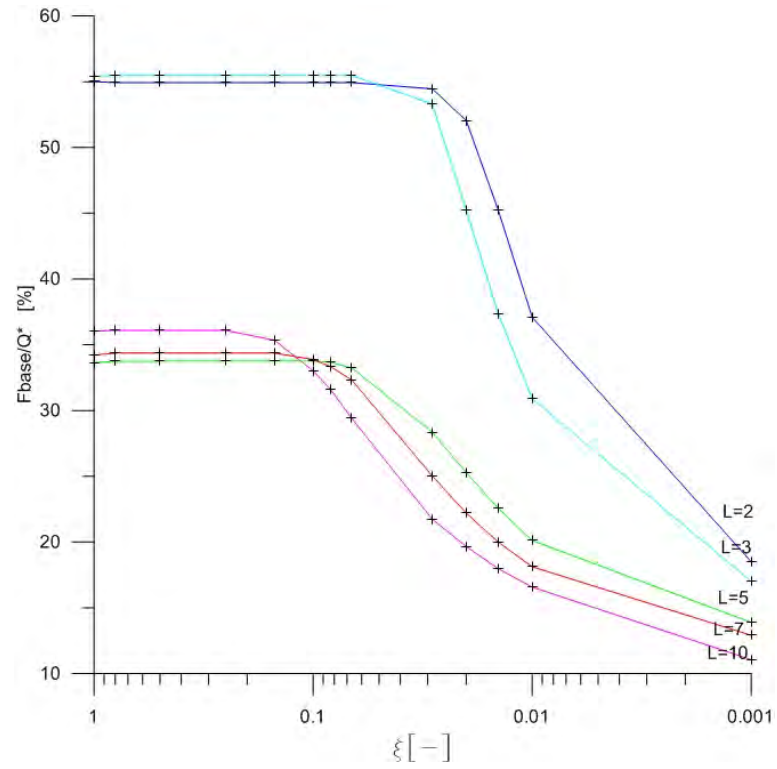


Immagine 6.3.3.2: Andamento F_{base} relativa funzione del degrado per tutte le lunghezze

Commenti

Si distingue un andamento costante fino ad un certo livello di degrado, per poi diminuire; questo livello di degrado “critico” è minore per i pali più lunghi e maggiore per quelli più corti.

Si nota un comportamento sostanzialmente diverso tra le due lunghezze minori $L=2\text{m}$ e $L=3\text{m}$ e tra le lunghezze maggiori 5, 7 e 10 m: nei primi la forza di base rappresenta circa il 70% del carico totale applicato, mentre per gli altri solo il 35%.

Questa differenza di comportamento è dovuta al fatto che i pali più corti risentono della piastra superficiale: le tensioni nel terreno sono maggiori, e di conseguenza è maggiore la resistenza.

$F_{\text{laterale-degrado}}$

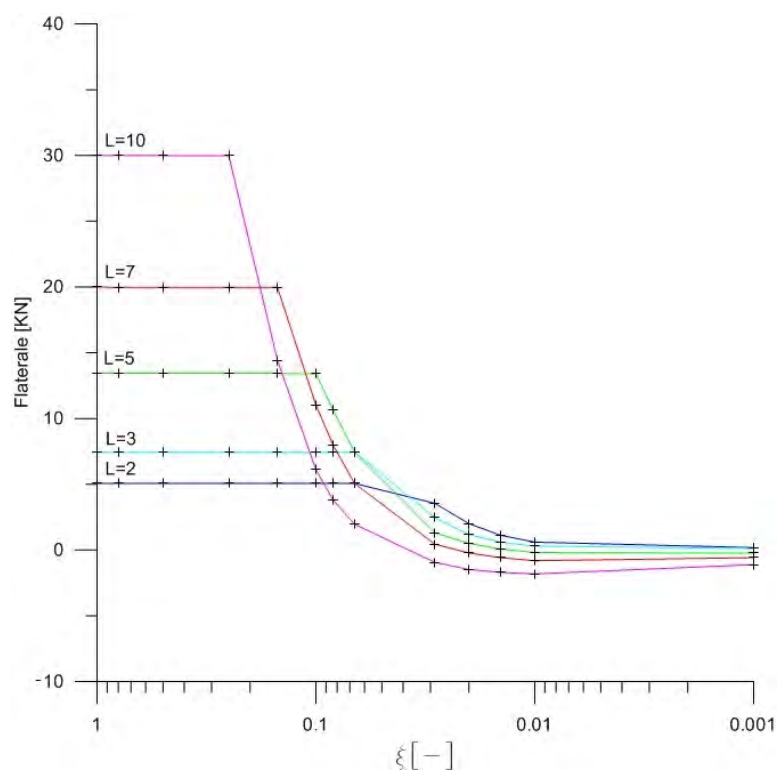


Immagine 6.3.3.3: Andamento F_{lat} funzione del degrado per tutte le lunghezze

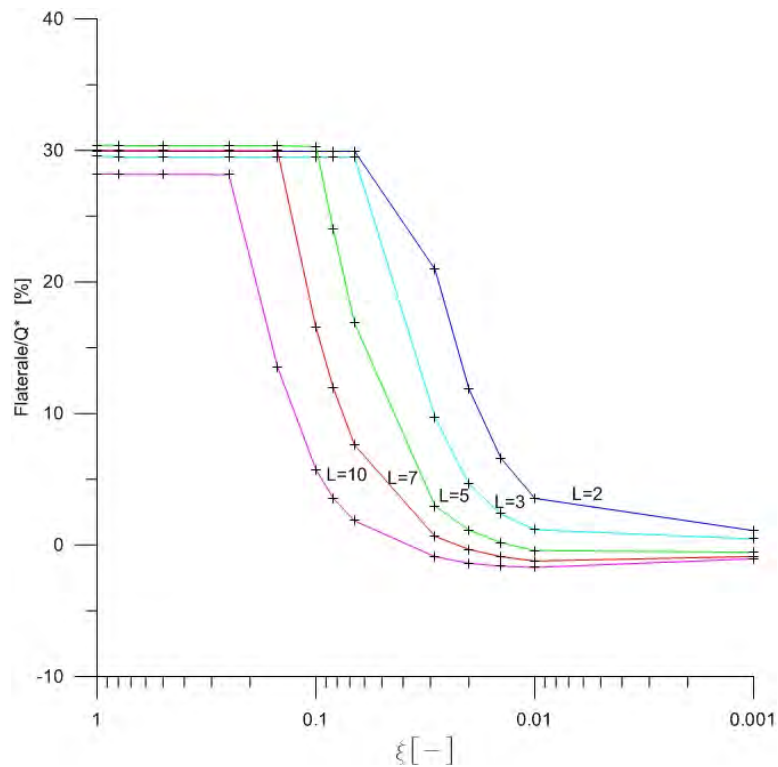


Immagine 6.3.3.4: Andamento F_{lat} relativa funzione del degrado per tutte le lunghezze

Commenti

All'aumentare della lunghezza del palo aumenta la diminuzione della forza laterale; fino ad un certo valore di degrado rimane costante per poi decrescere velocemente: questo valore, che chiamiamo degrado "critico", è minore maggiore è la lunghezza del palo.

La forza laterale iniziale è pari circa al 30% del carico totale applicato, e alla fine del degrado raggiunge circa lo zero in tutte i casi. Il carico trasmesso direttamente al terreno aumenta e questo cede assieme al palo: non c'è più spostamento relativo tra palo e terreno (γ), e quindi non c'è sviluppo di resistenza (τ), come visibile in figura 6.3.3.5.

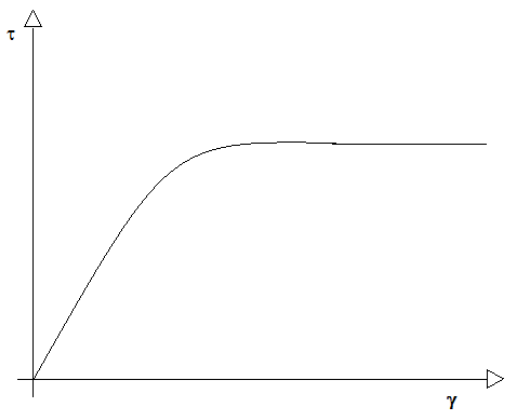


Immagine 6.3.3.5: Andamento resistenza laterale in funzione dello scorrimento relativo

F_{tot}-degrado

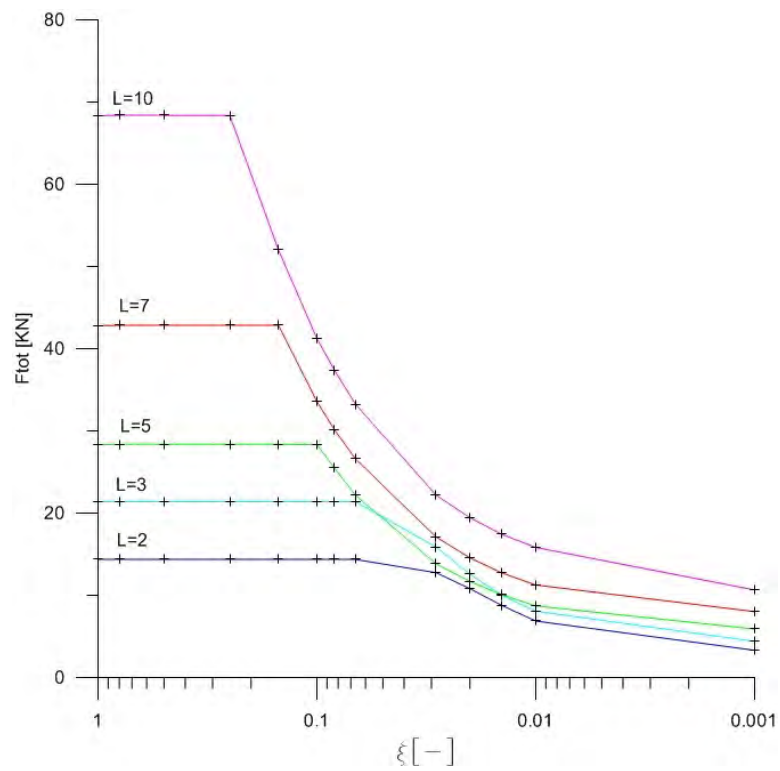


Immagine 6.3.3.6: Andamento F_{tot} funzione del degrado per tutte le lunghezze

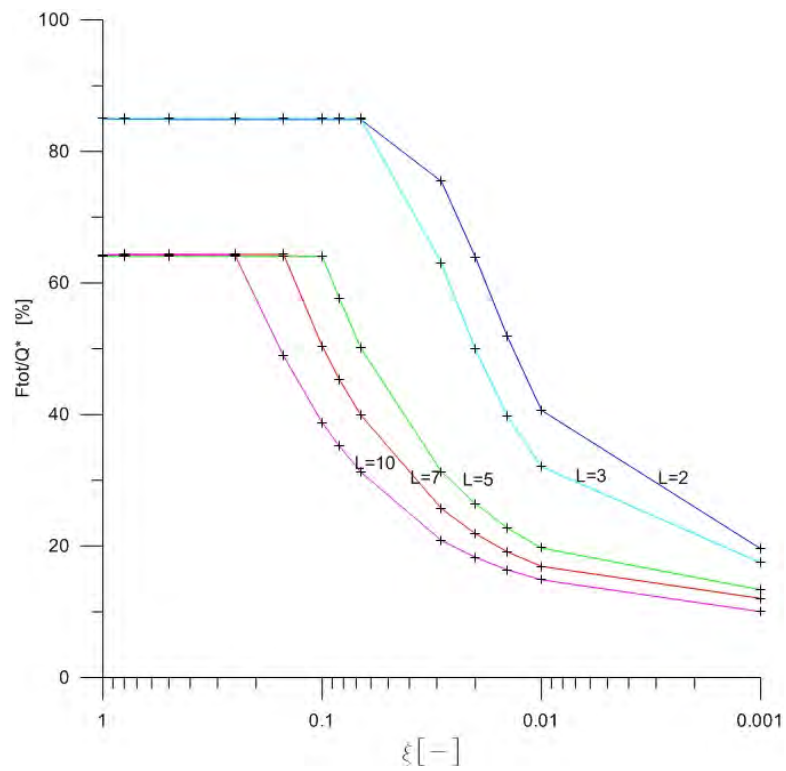


Immagine 6.3.3.7: Andamento F_{tot} relativa funzione del degrado per tutte le lunghezze

Commenti

La forza totale, come è noto, è proporzionale alla lunghezza del palo.

Quando la resistenza residua ($E/E_0 = \sigma/\sigma_0 = \xi$) scende sotto la soglia di “degrado critico” si osserva una forte diminuzione della forza totale.

Il comportamento è sostanzialmente diverso tra i primi due pali corti ($L=2m$ e $L=3m$) e gli altri più lunghi: per i primi la forza totale è circa l'85% del carico totale applicato, mentre per gli altri è circa il 65%. Questa differenza sostanziale è dovuta al fatto che nei pali più corti si risente dell'influenza della piastra superficiale: le tensioni nel terreno sono maggiori, e di conseguenza è maggiore la resistenza.

6.3.3.1 Fenomeno dell'attrito negativo

Un palo immerso in un terreno compressibile, che per una qualunque causa manifesta dei cedimenti, è soggetto ad un campo di sollecitazioni di taglio dirette verso il basso, che induce un cedimento del palo medesimo; questo effetto di trascinamento viene comunemente denominato attrito negativo.

Nell'ambito della profondità entro cui lo spostamento è maggiore di quello del palo, le forze di attrito determinano un carico aggiuntivo per il palo.

Nella figura 6.3.3.1.1 vengono schematicamente rappresentate le distribuzioni delle azioni e reazioni sul palo, per il caso di presenza di attrito negativo e quello di assenza.

Varie misure eseguite da Johannessen e Bjerrum, 1965, su pali di notevole lunghezza in acciaio, che attraversano uno strato di argilla cedevole, hanno mostrato che le forze dirette verso il basso possono essere talmente elevate da superare il carico ammissibile anche nel caso di pali con prevalente portata di punta. Nasce di conseguenza un cedimento ulteriore del palo che può rivelarsi incompatibile con la sovrastruttura; comunque ne deriva una riduzione del coefficiente di sicurezza previsto in sede progettuale.

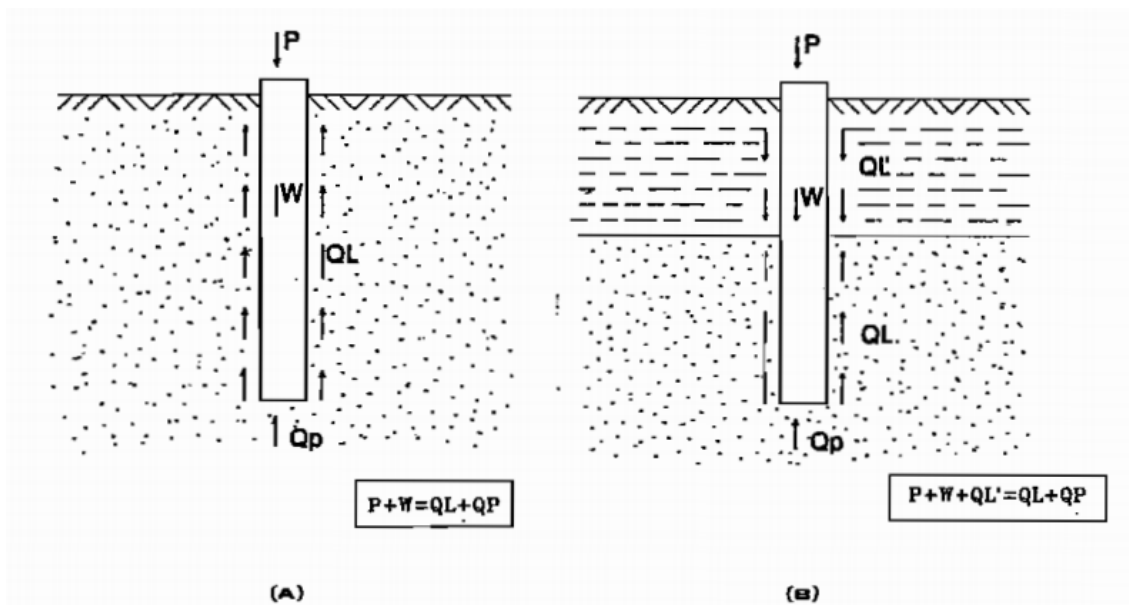


Figura 6.3.3.1.1: Azioni agenti sul palo in caso di attrito positivo A) e di attrito negativo B)

Tra le cause che provocano questo fenomeno si possono citare: l'abbassamento naturale di un deposito di argilla per effetto di modificate condizioni idrauliche al contorno (Endo et al., 1969); l'applicazione di un sovraccarico sul piano campagna; l'adozione di determinate tecnologie di esecuzione di pali battuti che possono comportare l'insorgere di sovrappressioni neutre (Fellenius e Broms, 1969).

Indipendentemente dalle cause, lo spostamento relativo tra palo e terreno, comporta l'insorgere di tensioni tangenziali che inducono sforzi di compressione sul palo stesso. In corrispondenza di una certa quota del palo, detta punto neutro (Terzaghi, 1943), si ha un'inversione nel segno delle tensioni tangenziali e conseguentemente, l'inversione dell'attrito da negativo a positivo.

Il diagramma degli sforzi di compressione, dapprima crescente, raggiunge un massimo in corrispondenza del punto neutro, ossia dove lo spostamento del palo uguaglia quello del terreno, quindi decresce.

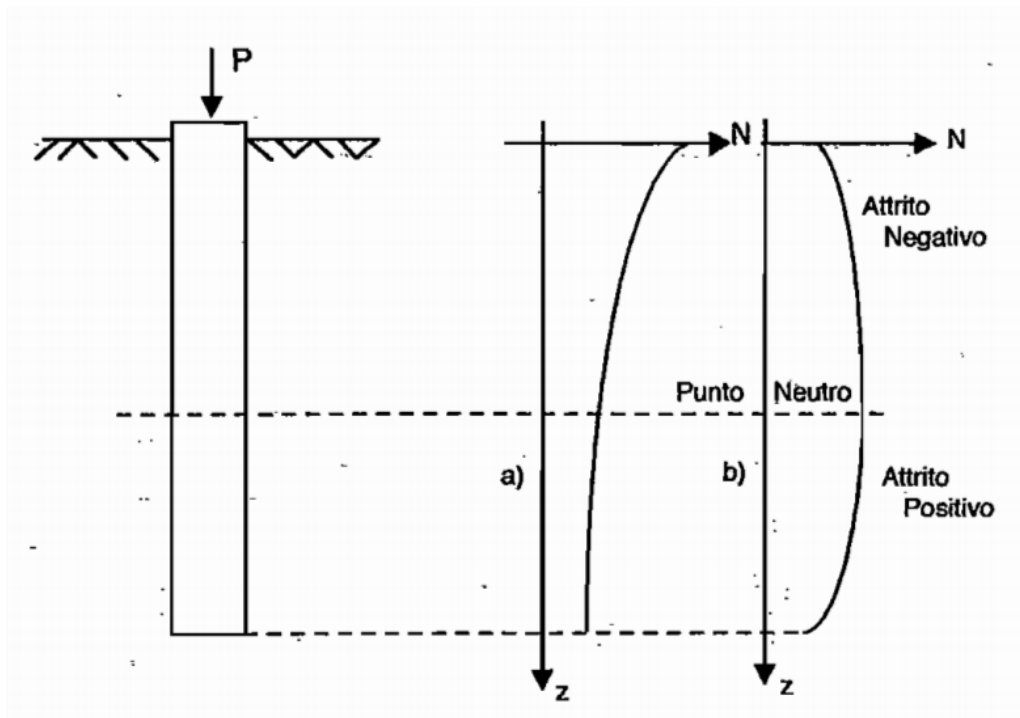


Figura 6.3.3.1.2 : Distribuzione del carico assiale lungo il palo; A) assenza di attrito negativo; B) presenza di attrito negativo

La situazione riportata in figura 6.3.3.1.1 non è di equilibrio stazionario; il fenomeno di consolidazione presenta un certo decorso nel tempo, pertanto anche la posizione del punto neutro è soggetta a variazioni, nel senso che al progredire della consolidazione si sposta via via verso il basso, fino a raggiungere una situazione di equilibrio alla fine della consolidazione.

Se il palo è poggiante su un substrato rigido, il punto neutro si abbassa gradualmente nel tempo, fino a posizionarsi quasi in prossimità della punta stessa del palo.

Al di sopra del punto neutro gli sforzi tangenziali mobilitati all'interfaccia palo-terreno provocano un incremento del carico applicato, al di sotto del punto neutro, rappresentano la resistenza del carico mobilitato lateralmente.

7 COMPORTAMENTO DEI PALI IN FUNZIONE DEL TERRENO

7.1 Generalità

Nel seguente capitolo si studia l'effetto dei parametri di resistenza e compressibilità del terreno nel comportamento del palo soggetto a degrado. Si è scelto di analizzare, con la stessa procedura operativa vista nel capitolo precedente, il palo lungo $L=5$ m, e di inserirlo in terreni con diversi valori di modulo elastico E e angolo di attrito ϕ .

7.2 Parametri terreni

Il terreno di riferimento (SOIL1) ha $E=30$ MN/m² e $\phi= 30^\circ$; i terreni che abbiamo deciso di mettere a confronto hanno i parametri riportati in tabella:

Terreno	Parametro	U.d.m.	Valore
SOIL1	E	[KN/m ²]	30000
	ϕ	[°]	30
SOIL3	E	[KN/m ²]	30000
	ϕ	[°]	27
SOIL4	E	[KN/m ²]	30000
	ϕ	[°]	33
SOIL5	E	[KN/m ²]	40000
	ϕ	[°]	30
SOIL6	E	[KN/m ²]	40000
	ϕ	[°]	27
SOIL7	E	[KN/m ²]	40000
	ϕ	[°]	33
SOIL8	E	[KN/m ²]	20000
	ϕ	[°]	30
SOIL9	E	[KN/m ²]	20000
	ϕ	[°]	27
SOIL10	E	[KN/m ²]	20000
	ϕ	[°]	33

Tabella 7.2.1: Parametri terreni considerati

7.3 Carico

Al variare dell'angolo di attrito ϕ , varia anche la capacità portante del palo, e di conseguenza il carico che si applica al modello; per ogni tipo di suolo si riporta in tabella il valore di q :

		SOIL1	SOIL3	SOIL4	SOIL5	SOIL6	SOIL7	SOIL8	SOIL9	SOIL10
d	[m]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
L	[m]	5	5	5	5	5	5	5	5	5
L1 _{zat}	[m]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
γ'	[KN/m ³]	9,184	9,184	9,184	9,184	9,184	9,184	9,184	9,184	9,184
ϕ	[rad]	0,524	0,471	0,576	0,524	0,471	0,576	0,524	0,471	0,576
N _q	[-]	40	38	42	40	38	42	40	38	42
q _b	[KN/m ²]	2020,5	1919,5	2121,5	2020,5	1919,5	2121,5	2020,5	1919,5	2121,5
A _b	[m ²]	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Q _b	[KN]	63,48	60,30	66,65	63,48	60,30	66,65	63,48	60,30	66,65
q _l	[KN/m ²]	7,95	7,67	8,15	7,95	7,67	8,15	7,95	7,67	8,15
A _l	[m ²]	3,14	3,14	3,14	3,14	3,14	3,14	3,14	3,14	3,14
Q _l	[KN]	24,99	24,08	25,60	24,99	24,08	25,60	24,99	24,08	25,60
Q _{tot}	[KN]	88,46	84,38	92,25	88,46	84,38	92,25	88,46	84,38	92,25
Q*	[KN]	44,23	42,19	46,12	44,23	42,19	46,12	44,23	42,19	46,12
q	[KN/m ²]	156,44	149,22	163,13	156,44	149,22	163,13	156,44	149,22	163,13
q scelto	[KN/m ²]	160	150	165	160	150	165	160	150	165

Tabella 7.3.1: Valori del carico applicato al modello in funzione del suolo

7.4 Risultati

7.4.1 Cedimenti e accorciamento

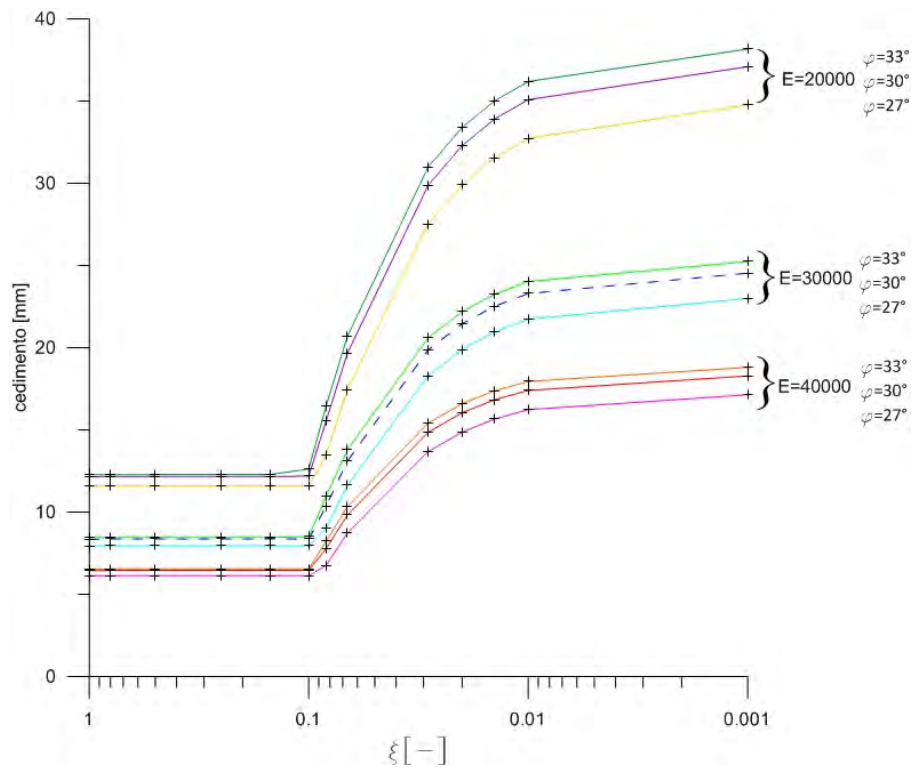


Immagine 7.4.1.1 Andamento cedimento testa del palo L=5m in funzione del degrado, per tutti i terreni

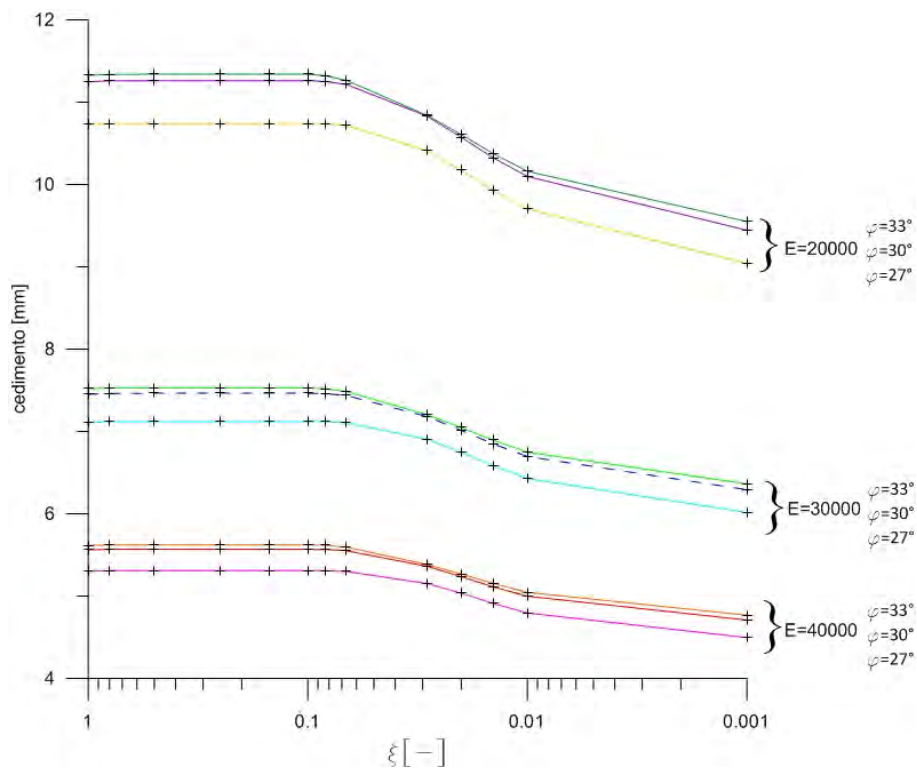


Immagine 7.4.1.2: Andamento cedimento punta del palo L=5m in funzione del degrado, per tutti i terreni

Commenti

L'andamento delle curve, per U_A e per U_C , sono simili: si ha cedimento costante fino ad un certo livello di degrado, e in seguito il cedimento della testa del palo (U_A) cresce, mentre quello della punta (U_C) diminuisce, anche se in misura molto minore.

Questo recupero dei cedimenti è dovuto, come visto in precedenza, alla redistribuzione dei carichi tra palo e terreno con il degrado, e alla scelta del modello elastico lineare.

Le curve sono raggruppate in gruppi di tre, e corrispondono ai terreni con lo stesso modulo di Young: questo significa che i cedimenti sono più influenzati dalla compressibilità, cioè dal modulo di Young E , che dalla resistenza del materiale (ϕ); più piccolo è E e maggiori sono i cedimenti.

Risultano poi influenzati, seppur in modo minore, anche dall'angolo di attrito: i cedimenti crescono al crescere di ϕ .

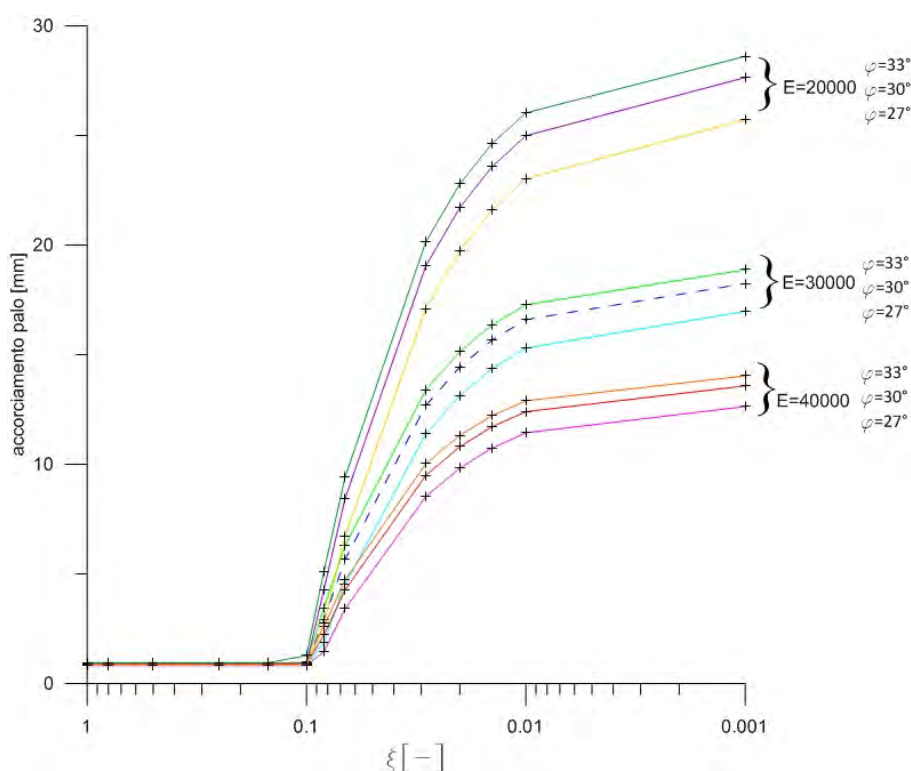


Immagine 7.4.1.3: Andamento accorciamento del palo $L=5m$ in funzione del degrado, per tutti i terreni

Commenti

Fino ad un certo livello di degrado, che definiamo degrado “critico”, l’accorciamento è costante, e uguale per tutti i terreni, poi aumenta considerevolmente e si assesta su tre fasce di valori in funzione del modulo di Young E; minore è E e maggiore è l’accorciamento che si verifica.

Si hanno piccole variazioni anche al variare dell’angolo di attrito: maggiore è ϕ e maggiore è l’accorciamento.

Il livello del degrado “critico” è funzione del modulo elastico e dell’angolo di attrito del terreno, tuttavia la sua variazione nel range di valori studiato è decisamente trascurabile rispetto all’effetto della lunghezza del palo.

7.4.2 Analisi delle forze agenti sull’interfaccia

F_{base}-degrado

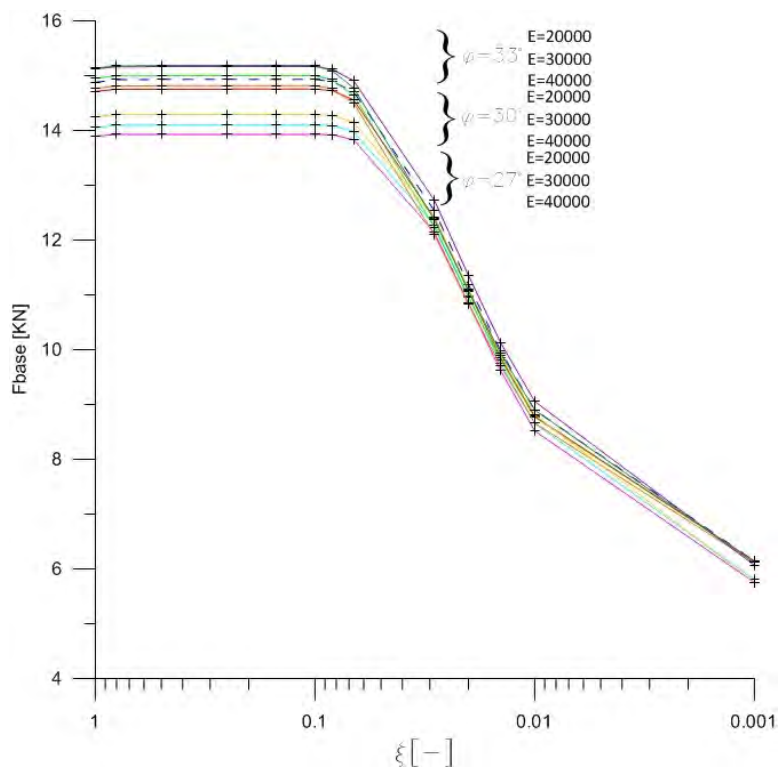


Immagine 7.4.2.1: Andamento F_{base} del palo $L=5m$ in funzione del degrado, per tutti i terreni

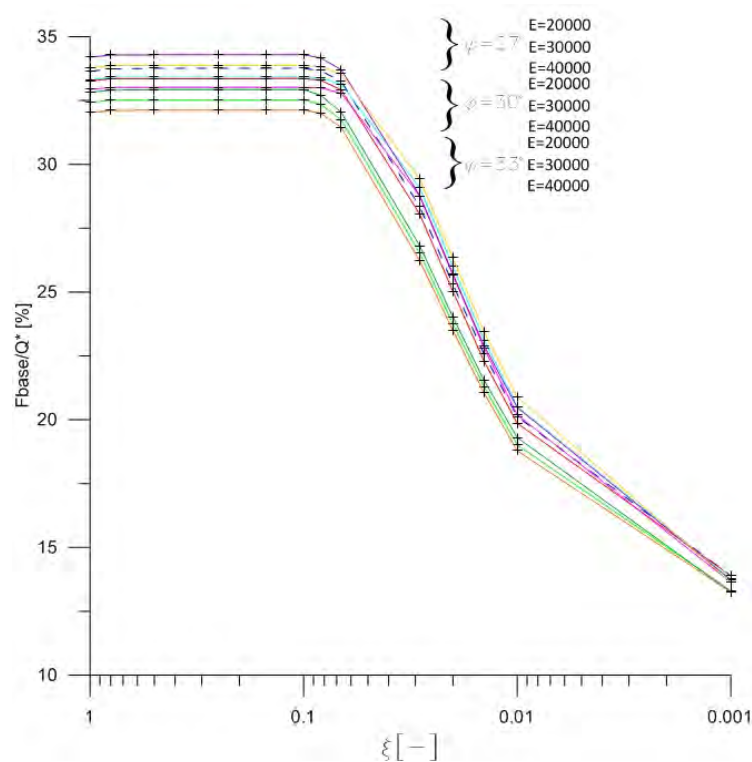


Immagine 7.4.2.2: Andamento F_{base} relativa del palo $L=5m$ in funzione del degrado, per tutti i terreni

Commenti

Si ritiene utile ricordare che per F_{base} si intende la reazione del terreno sulla base del palo, la quale è funzione della rigidità e della resistenza del terreno e sarà sempre minore o al massimo uguale al valore limite che invece è funzione della sola resistenza del terreno.

L'andamento delle curve di F_{base} è comune per tutti i terreni: costante fino ad un certo livello di degrado, e poi decrescente. Il livello di degrado critico non appare significativamente influenzato dalla variazione dei parametri del terreno nel range considerato.

Le curve di F_{base} si raggruppano in base all'angolo di attrito, il minore genera forze minori e viceversa; questo ordine viene meno per l'andamento di F_{base}/Q^* , a conferma del fatto che la forza di base è funzione sia di E che di ϕ , mentre la Q^* , che è una forza limite, dipende solamente da ϕ .

F_{laterale}-degrado

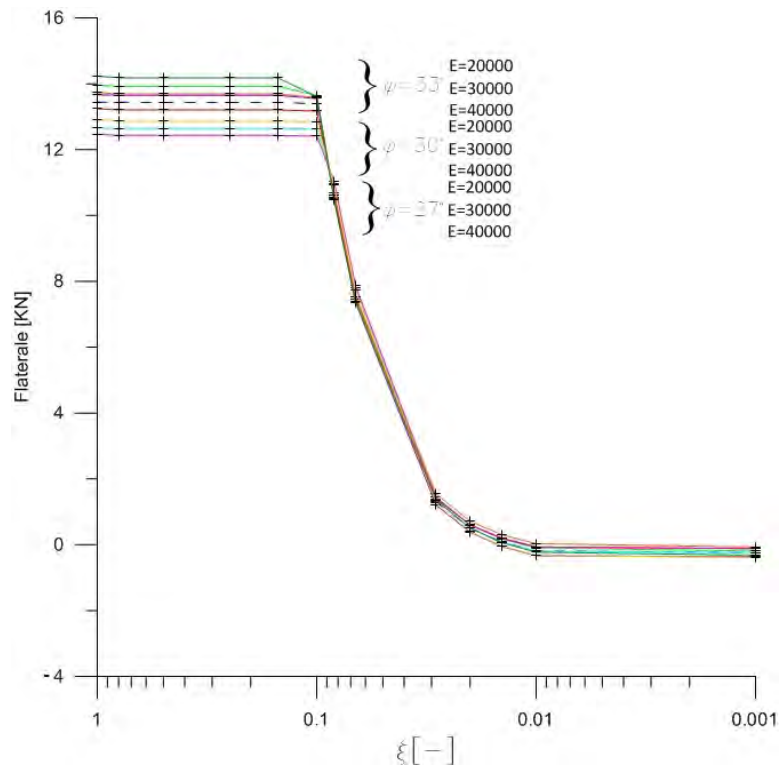


Immagine 7.4.2.3: Andamento F_{lat} del palo $L=5m$ in funzione del degrado, per tutti i terreni

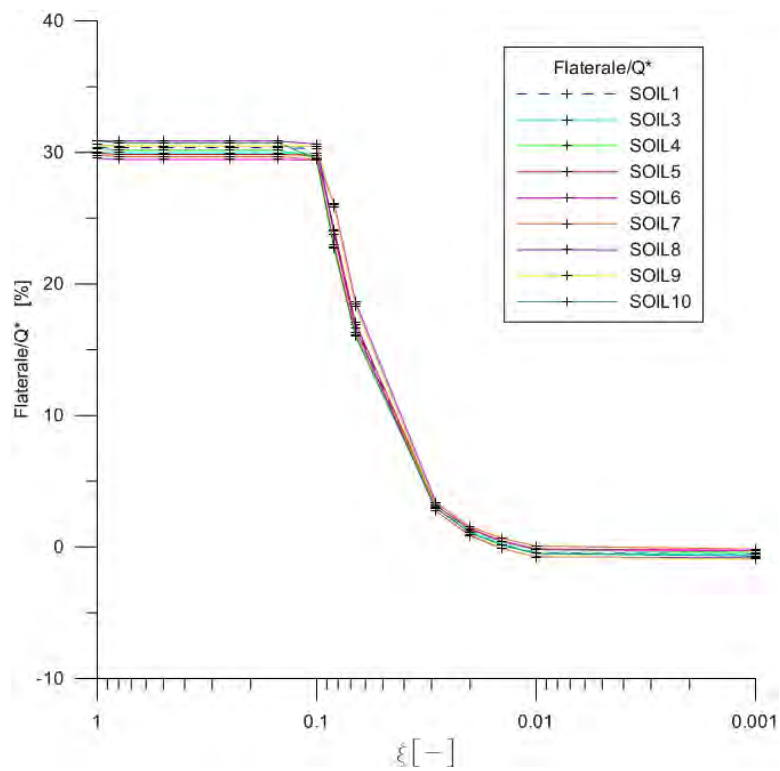


Immagine 7.4.2.4: Andamento F_{lat} relativa del palo L=5m in funzione del degrado, per tutti i terreni

Commenti

L'andamento della forza laterale in funzione del degrado è lo stesso per ogni terreno, e si evidenzia come la diminuzione abbia inizio per lo stesso livello di degrado, fino ad arrivare a zero: questo è dato dal fatto che con il degrado del palo c'è una redistribuzione degli sforzi dal palo al terreno; il terreno, maggiormente sollecitato cede di più e di conseguenza si riduce lo spostamento relativo tra palo e terreno, quindi la forza tangenziale. Questo fenomeno è simile a quello dell'attrito negativo.

Le differenze sono minime, tuttavia si nota come i terreni con angolo di attrito maggiore realizzino forze leggermente maggiori di quelli con ϕ minore.

Dal grafico $F_{laterale}/Q^*$ si vede che la forza laterale rappresenta in tutti i casi il 30% del carico totale applicato Q^* .

F_{tot} -degrado

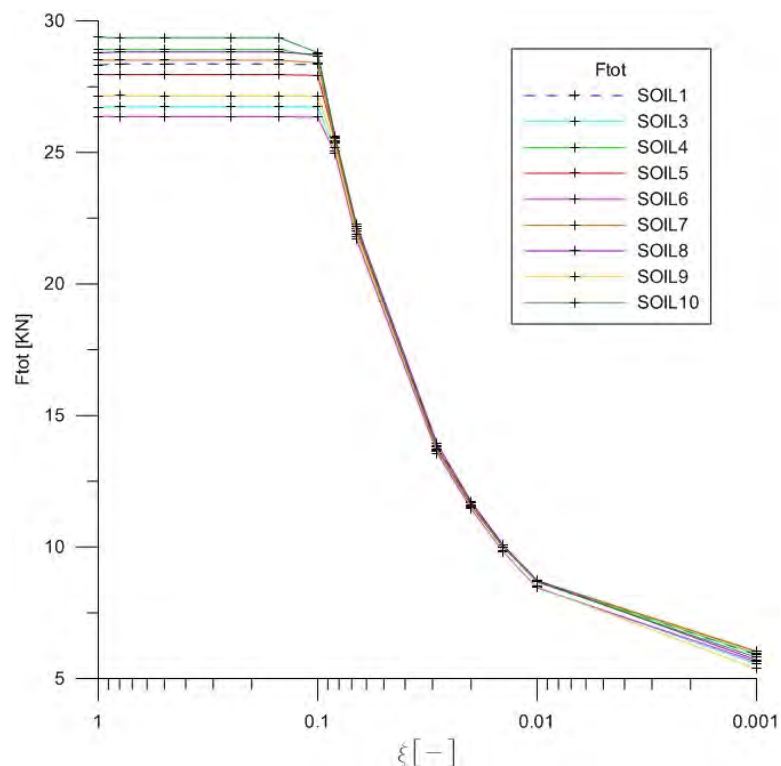


Immagine 6.4.2.5: Andamento F_{tot} del palo L=5m in funzione del degrado, per tutti i terreni

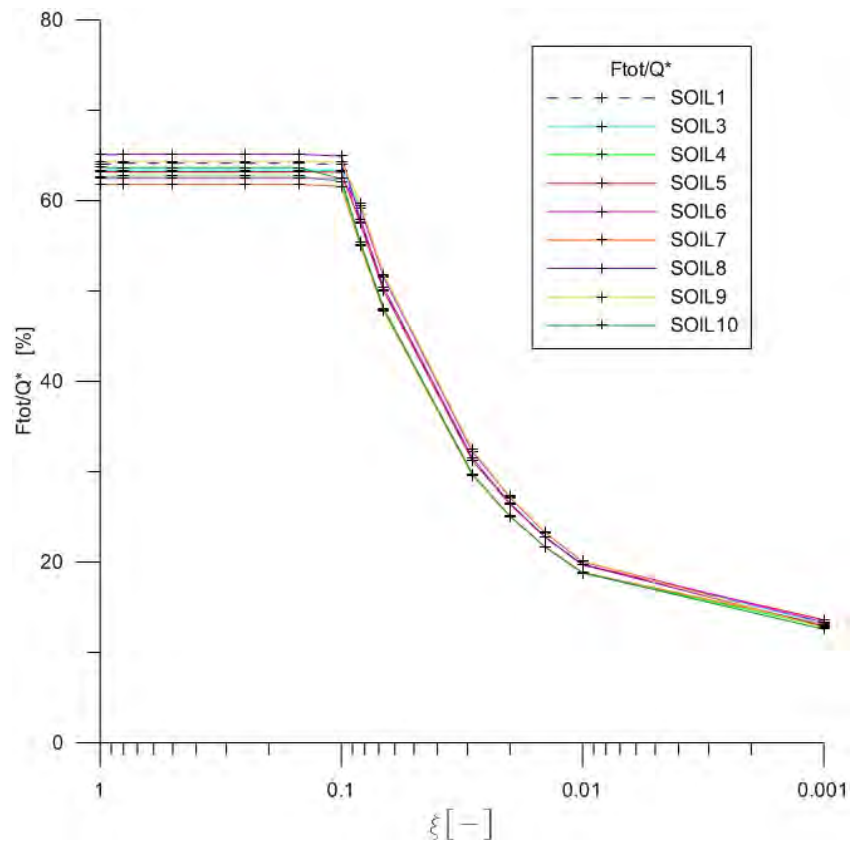


Immagine 6.4.2.6: Andamento F_{tot} relativa del palo $L=5m$ in funzione del degrado, per tutti i terreni

Commenti

Analogamente a $F_{laterale}$ gli andamenti sono molto simili e caratterizzati da un primo tratto in cui la forza rimane costante seguito da una rapida diminuzione dopo un certo livello di degrado comune.

In F_{tot}/Q^* si nota che la forza totale è di poco inferiore al 65% del carico totale applicato.

8 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

8.1 Conclusioni

Analizzando il comportamento del palo degradato si osserva una redistribuzione degli sforzi dal palo al terreno: con l'aumentare del degrado diminuisce il carico trasmesso al palo e aumenta quello trasferito dalla piastra direttamente al terreno; risulta poi significativa la perdita di attrito laterale, infatti, in tutti i casi studiati la forza laterale arriva a un valore prossimo allo zero: i cedimenti relativi tra palo e terreno si riducono e di conseguenza anche le tensioni trasmesse; una forza laterale nulla rappresenta in pratica un palo che cede solidalmente con il terreno.

La ricerca ha mostrato poi, che maggiore è la lunghezza dei pali e minore è il livello di degrado per cui si osserva un cambiamento sensibile della risposta meccanica, cioè è sufficiente una minore perdita di proprietà meccaniche del legno, qui quantificata dal rapporto $\xi = E/E_0 = \sigma/\sigma_0$ per osservare una riduzione della forza sul palo accompagnata da un aumento dei cedimenti; quindi, tenendo conto che pali più lunghi sono stati installati in edifici più recenti, è paradossalmente possibile che questi mostrino prima i segni del degrado, rispetto a edifici più antichi, caratterizzati da pali corti.

Per quanto riguarda invece il palo installato in suoli diversi, è interessante notare come il modulo di rigidezza E , e l'angolo di attrito ϕ , non modificano significativamente la risposta al degrado e che quindi il livello di degrado "critico" è funzione prevalentemente della lunghezza del palo.

L'effetto di queste modifiche è evidente però nei cedimenti, in cui si rilevano dei cambiamenti in funzione, soprattutto, delle variazioni di modulo di rigidezza.

8.2 Sviluppi futuri

Le analisi eseguite in questo lavoro di tesi hanno evidenziato l'esistenza di un livello di degrado, funzione della lunghezza del palo, oltre il quale si riscontrano problemi. Sarebbe interessante la ricerca di un legame generale, tra degrado critico e lunghezza dei pali, che tenga conto delle proprietà del legno e del terreno.

Molto utile poi, sarebbe l'individuazione di una legge di degrado del legno che sia in grado di rappresentare le variazioni delle proprietà meccaniche del materiale nel tempo.

Sarebbe utile inoltre, investigare il fenomeno ricorrendo a modelli costitutivi dei materiali più evoluti, infatti abbiamo visto come, ad esempio, il modello lineare elastico utilizzato per rappresentare il terreno sia poco aderente alla realtà, in quanto la non differenziazione tra il modulo di compressione e quello di scarico conducano a risultati fuorvianti riguardo i cedimenti.

Infine l'uso di modelli numerici più sofisticati, che possano ad esempio tenere in considerazione l'effetto di infissione dei pali, sarebbe di notevole interesse.

APPENDICE A

Tablelle di calcolo relative ai pali in funzione della loro lunghezza

L=2m				
FASE	DEGRADO	$U_{y,C}$ [mm]	$U_{y,A}$ [mm]	accorciamento [mm]
1	1	2,67	2,80	0,12
2	1/1,25	2,68	2,80	0,12
3	1/2	2,68	2,80	0,12
4	1/4	2,68	2,80	0,12
5	1/6,66	2,68	2,80	0,12
6	1/10	2,68	2,80	0,12
7	1/12	2,68	2,80	0,12
8	1/15	2,68	2,80	0,12
9	1/35	2,67	3,14	0,47
10	1/50	2,65	3,66	1,01
11	1/70	2,61	4,03	1,42
12	1/100	2,56	4,33	1,78
13	1/1000	2,27	4,82	2,55

Tabella A.1 : Valori dei cedimenti di A e C e conseguente accorciamento del palo di L=2m

L=2m								
FASE	DEGRADO	Q^* [KN]	F_{base} [KN]	$F_{laterale}$ [KN]	F_{tot} [KN]	F_{base}/Q^* [-]	$F_{laterale}/Q^*$ [-]	F_{tot}/Q^* [-]
1	1	16,92	9,31	5,07	14,38	0,55	0,30	0,85
2	1/1,25	16,92	9,30	5,07	14,37	0,55	0,30	0,85
3	1/2	16,92	9,30	5,07	14,37	0,55	0,30	0,85
4	1/4	16,92	9,30	5,07	14,37	0,55	0,30	0,85
5	1/6,66	16,92	9,30	5,07	14,37	0,55	0,30	0,85
6	1/10	16,92	9,30	5,07	14,37	0,55	0,30	0,85
7	1/12	16,92	9,30	5,07	14,37	0,55	0,30	0,85
8	1/15	16,92	9,30	5,07	14,37	0,55	0,30	0,85
9	1/35	16,92	9,22	3,55	12,77	0,54	0,21	0,75
10	1/50	16,92	8,81	2,01	10,82	0,52	0,12	0,64
11	1/70	16,92	7,66	1,12	8,77	0,45	0,07	0,52
12	1/100	16,92	6,28	0,60	6,88	0,37	0,04	0,41
13	1/1000	16,92	3,13	0,19	3,32	0,18	0,01	0,20

Tabella A.2: Valori delle forze e delle forze relative agenti sull'interfaccia per L=2m

L=3m				
FASE	DEGRADO	$U_{y,C}$ [mm]	$U_{y,A}$ [mm]	accorciamento [mm]
1	1	4,32	4,61	0,28
2	1/1,25	4,33	4,61	0,28
3	1/2	4,33	4,61	0,28
4	1/4	4,33	4,61	0,28
5	1/6,66	4,33	4,61	0,28
6	1/10	4,33	4,61	0,28
7	1/12	4,33	4,61	0,28
8	1/15	4,33	4,61	0,28
9	1/35	4,30	6,72	2,42
10	1/50	4,24	7,62	3,38
11	1/70	4,14	8,24	4,10
12	1/100	4,03	8,71	4,68
13	1/1000	3,65	9,45	5,79

Tabella A.3 : Valori dei cedimenti di A e C e conseguente accorciamento del palo di L=3m

L=3m								
FASE	DEGRADO	Q^* [KN]	F_{base} [KN]	$F_{laterale}$ [KN]	F_{tot} [KN]	F_{base}/Q^* [-]	$F_{laterale}/Q^*$ [-]	F_{tot}/Q^* [-]
1	1	25,19	13,96	7,45	21,41	0,55	0,30	0,85
2	1/1,25	25,19	13,98	7,44	21,41	0,55	0,30	0,85
3	1/2	25,19	13,98	7,43	21,41	0,55	0,30	0,85
4	1/4	25,19	13,98	7,43	21,41	0,55	0,30	0,85
5	1/6,66	25,19	13,98	7,43	21,41	0,55	0,30	0,85
6	1/10	25,19	13,98	7,43	21,41	0,55	0,30	0,85
7	1/12	25,19	13,98	7,43	21,41	0,55	0,30	0,85
8	1/15	25,19	13,98	7,43	21,41	0,55	0,30	0,85
9	1/35	25,19	13,43	2,45	15,88	0,53	0,10	0,63
10	1/50	25,19	11,41	1,17	12,58	0,45	0,05	0,50
11	1/70	25,19	9,42	0,60	10,01	0,37	0,02	0,40
12	1/100	25,19	7,78	0,29	8,08	0,31	0,01	0,32
13	1/1000	25,19	4,28	0,12	4,40	0,17	0,00	0,17

Tabella A.4: Valori delle forze e delle forze relative agenti sull'interfaccia per L=3m

L=5m				
FASE	DEGRADO	$U_{y,C}$ [mm]	$U_{y,A}$ [mm]	accorciamento [mm]
1	1	7,45	8,35	0,90
2	1/1,25	7,46	8,36	0,90
3	1/2	7,46	8,36	0,90
4	1/4	7,46	8,36	0,90
5	1/6,66	7,46	8,36	0,90
6	1/10	7,47	8,37	0,90
7	1/12	7,46	10,36	2,90
8	1/15	7,44	13,11	5,67
9	1/35	7,18	19,87	12,69
10	1/50	7,01	21,46	14,45
11	1/70	6,85	22,52	15,67
12	1/100	6,70	23,30	16,60
13	1/1000	6,29	24,54	18,25

Tabella A.5 : Valori dei cedimenti di A e C e conseguente accorciamento del palo di L=5m

L=5m								
FASE	DEGRADO	Q^* [KN]	F_{base} [KN]	$F_{laterale}$ [KN]	F_{tot} [KN]	F_{base}/Q^* [-]	$F_{laterale}/Q^*$ [-]	F_{tot}/Q^* [-]
1	1	44,23	14,88	13,44	28,32	0,34	0,30	0,64
2	1/1,25	44,23	14,93	13,44	28,36	0,34	0,30	0,64
3	1/2	44,23	14,93	13,43	28,37	0,34	0,30	0,64
4	1/4	44,23	14,93	13,43	28,37	0,34	0,30	0,64
5	1/6,66	44,23	14,93	13,43	28,37	0,34	0,30	0,64
6	1/10	44,23	14,93	13,39	28,33	0,34	0,30	0,64
7	1/12	44,23	14,89	10,61	25,50	0,34	0,24	0,58
8	1/15	44,23	14,71	7,46	22,17	0,33	0,17	0,50
9	1/35	44,23	12,53	1,31	13,85	0,28	0,03	0,31
10	1/50	44,23	11,19	0,50	11,69	0,25	0,01	0,26
11	1/70	44,23	9,98	0,08	10,06	0,23	0,00	0,23
12	1/100	44,23	8,90	-0,19	8,71	0,20	0,00	0,20
13	1/1000	44,23	6,14	-0,24	5,91	0,14	-0,01	0,13

Tabella A.6: Valori delle forze e delle forze relative agenti sull'interfaccia per L=5m

L=7m				
FASE	DEGRADO	$U_{y,C}$ [mm]	$U_{y,A}$ [mm]	accorciamento [mm]
1	1	11,40	13,32	1,92
2	1/1,25	11,42	13,35	1,92
3	1/2	11,42	13,35	1,92
4	1/4	11,42	13,35	1,92
5	1/6,66	11,42	13,35	1,92
6	1/10	11,38	23,83	12,45
7	1/12	11,34	27,97	16,63
8	1/15	11,26	32,21	20,95
9	1/35	10,65	42,14	31,49
10	1/50	10,39	44,39	34,00
11	1/70	10,18	45,88	35,69
12	1/100	10,00	46,98	36,98
13	1/1000	9,48	48,72	39,24

Tabella A.7 : Valori dei cedimenti di A e C e conseguente accorciamento del palo di L=7m

L=7m								
FASE	DEGRADO	Q^* [KN]	F_{base} [KN]	$F_{laterale}$ [KN]	F_{tot} [KN]	F_{base}/Q^* [-]	$F_{laterale}/Q^*$ [-]	F_{tot}/Q^* [-]
1	1	66,60	22,79	20,00	42,79	0,34	0,30	0,64
2	1/1,25	66,60	22,89	19,96	42,85	0,34	0,30	0,64
3	1/2	66,60	22,89	19,97	42,85	0,34	0,30	0,64
4	1/4	66,60	22,89	19,97	42,85	0,34	0,30	0,64
5	1/6,66	66,60	22,89	19,97	42,85	0,34	0,30	0,64
6	1/10	66,60	22,56	11,01	33,57	0,34	0,17	0,50
7	1/12	66,60	22,20	7,96	30,16	0,33	0,12	0,45
8	1/15	66,60	21,53	5,07	26,60	0,32	0,08	0,40
9	1/35	66,60	16,67	0,44	17,11	0,25	0,01	0,26
10	1/50	66,60	14,79	-0,22	14,57	0,22	0,00	0,22
11	1/70	66,60	13,32	-0,59	12,73	0,20	-0,01	0,19
12	1/100	66,60	12,07	-0,81	11,26	0,18	-0,01	0,17
13	1/1000	66,60	8,60	-0,58	8,02	0,13	-0,01	0,12

Tabella A.8: Valori delle forze e delle forze relative agenti sull'interfaccia per L=7m

L=10m				
FASE	DEGRADO	$U_{y,C}$ [mm]	$U_{y,A}$ [mm]	accorciamento [mm]
1	1	18,08	22,51	4,43
2	1/1,25	18,10	22,54	4,43
3	1/2	18,10	22,54	4,43
4	1/4	18,10	22,54	4,43
5	1/6,66	18,01	50,53	32,52
6	1/10	17,76	69,10	51,34
7	1/12	17,62	75,41	57,79
8	1/15	17,37	81,76	64,39
9	1/35	16,35	96,20	79,85
10	1/50	16,07	99,43	83,36
11	1/70	15,83	101,57	85,74
12	1/100	15,63	103,14	87,52
13	1/1000	14,80	105,64	90,84

Tabella A.9 : Valori dei cedimenti di A e C e conseguente accorciamento del palo di L=10m

L=10m								
FASE	DEGRADO	Q^* [KN]	F_{base} [KN]	$F_{laterale}$ [KN]	F_{tot} [KN]	F_{base}/Q^* [-]	$F_{laterale}/Q^*$ [-]	F_{tot}/Q^* [-]
1	1	106,40	38,34	30,01	68,34	0,36	0,28	0,64
2	1/1,25	106,40	38,40	29,99	68,40	0,36	0,28	0,64
3	1/2	106,40	38,40	29,99	68,40	0,36	0,28	0,64
4	1/4	106,40	38,40	29,97	68,37	0,36	0,28	0,64
5	1/6,66	106,40	37,60	14,42	52,02	0,35	0,14	0,49
6	1/10	106,40	35,13	6,10	41,23	0,33	0,06	0,39
7	1/12	106,40	33,63	3,78	37,42	0,32	0,04	0,35
8	1/15	106,40	31,28	1,97	33,25	0,29	0,02	0,31
9	1/35	106,40	23,13	-0,94	22,19	0,22	-0,01	0,21
10	1/50	106,40	20,92	-1,48	19,45	0,20	-0,01	0,18
11	1/70	106,40	19,13	-1,71	17,42	0,18	-0,02	0,16
12	1/100	106,40	17,64	-1,81	15,83	0,17	-0,02	0,15
13	1/1000	106,40	11,77	-1,11	10,66	0,11	-0,01	0,10

Tabella A.10: Valori delle forze e delle forze relative agenti sull'interfaccia per L=10m

APPENDICE B

Tablelle di calcolo relative ai pali in funzione del tipo di suolo

SOIL1				
FASE	DEGRADO	$U_{y,C}$ [mm]	$U_{y,A}$ [mm]	accorciamento [mm]
1	1	7,45	8,35	0,90
2	1/1,25	7,46	8,36	0,90
3	1/2	7,46	8,36	0,90
4	1/4	7,46	8,36	0,90
5	1/6,66	7,46	8,36	0,90
6	1/10	7,47	8,37	0,90
7	1/12	7,46	10,36	2,90
8	1/15	7,44	13,11	5,67
9	1/35	7,18	19,87	12,69
10	1/50	7,01	21,46	14,45
11	1/70	6,85	22,52	15,67
12	1/100	6,70	23,30	16,60
13	1/1000	6,29	24,54	18,25

Tabella B.1: Cedimenti e accorciamento palo L=5m SOIL1

SOIL1								
FASE	DEGRADO	Q^* [KN]	F_{base} [KN]	F_{skin} [KN]	F_{tot} [KN]	F_{base}/Q^* [-]	F_{skin}/Q^* [-]	F_{tot}/Q^* [-]
1	1	44,23	14,88	13,44	28,32	0,34	0,30	0,64
2	1/1,25	44,23	14,93	13,44	28,36	0,34	0,30	0,64
3	1/2	44,23	14,93	13,43	28,37	0,34	0,30	0,64
4	1/4	44,23	14,93	13,43	28,37	0,34	0,30	0,64
5	1/6,66	44,23	14,93	13,43	28,37	0,34	0,30	0,64
6	1/10	44,23	14,93	13,39	28,33	0,34	0,30	0,64
7	1/12	44,23	14,89	10,61	25,50	0,34	0,24	0,58
8	1/15	44,23	14,71	7,46	22,17	0,33	0,17	0,50
9	1/35	44,23	12,53	1,31	13,85	0,28	0,03	0,31
10	1/50	44,23	11,19	0,50	11,69	0,25	0,01	0,26
11	1/70	44,23	9,98	0,08	10,06	0,23	0,00	0,23
12	1/100	44,23	8,90	-0,19	8,71	0,20	0,00	0,20
13	1/1000	44,23	6,14	-0,24	5,91	0,14	-0,01	0,13

Tabella B.2: Forze e forze relative agenti sul palo L=5m SOIL1

SOIL3				
FASE	DEGRADO	$U_{y,C}$ [mm]	$U_{y,A}$ [mm]	accorciamento [mm]
1	1	7,11	7,94	0,84
2	1/1,25	7,12	7,96	0,84
3	1/2	7,12	7,96	0,84
4	1/4	7,12	7,96	0,84
5	1/6,66	7,12	7,96	0,84
6	1/10	7,12	7,96	0,84
7	1/12	7,12	9,00	1,88
8	1/15	7,10	11,63	4,53
9	1/35	6,90	18,29	11,39
10	1/50	6,75	19,88	13,14
11	1/70	6,58	20,95	14,36
12	1/100	6,43	21,73	15,30
13	1/1000	6,02	23,00	16,98

Tabella B.3: Cedimenti e accorciamento palo L=5m SOIL3

SOIL3								
FASE	DEGRADO	Q^* [KN]	F_{base} [KN]	$F_{laterale}$ [KN]	F_{tot} [KN]	F_{base}/Q^* [-]	$F_{laterale}/Q^*$ [-]	F_{tot}/Q^* [-]
1	1	42,19	14,05	12,66	26,71	0,33	0,30	0,63
2	1/1,25	42,19	14,10	12,64	26,74	0,33	0,30	0,63
3	1/2	42,19	14,10	12,64	26,74	0,33	0,30	0,63
4	1/4	42,19	14,10	12,64	26,74	0,33	0,30	0,63
5	1/6,66	42,19	14,10	12,64	26,74	0,33	0,30	0,63
6	1/10	42,19	14,10	12,63	26,72	0,33	0,30	0,63
7	1/12	42,19	14,09	10,98	25,07	0,33	0,26	0,59
8	1/15	42,19	13,98	7,80	21,78	0,33	0,18	0,52
9	1/35	42,19	12,27	1,35	13,62	0,29	0,03	0,32
10	1/50	42,19	10,97	0,50	11,47	0,26	0,01	0,27
11	1/70	42,19	9,76	0,08	9,83	0,23	0,00	0,23
12	1/100	42,19	8,66	-0,19	8,46	0,21	0,00	0,20
13	1/1000	42,19	5,81	-0,24	5,56	0,14	-0,01	0,13

Tabella B.4: Forze e forze relative agenti sul palo L=5m SOIL3

SOIL4				
FASE	DEGRADO	$U_{y,C}$ [mm]	$U_{y,A}$ [mm]	accorciamento [mm]
1	1	7,52	8,45	0,93
2	1/1,25	7,53	8,46	0,93
3	1/2	7,53	8,46	0,93
4	1/4	7,53	8,46	0,93
5	1/6,66	7,53	8,46	0,93
6	1/10	7,53	8,51	0,98
7	1/12	7,52	10,96	3,45
8	1/15	7,48	13,79	6,30
9	1/35	7,20	20,61	13,40
10	1/50	7,05	22,19	15,15
11	1/70	6,90	23,25	16,35
12	1/100	6,75	24,03	17,28
13	1/1000	6,37	25,24	18,88

Tabella B.5: Cedimenti e accorciamento palo L=5m SOIL4

SOIL4								
FASE	DEGRADO	Q^* [KN]	F_{base} [KN]	$F_{laterale}$ [KN]	F_{tot} [KN]	F_{base}/Q^* [-]	$F_{laterale}/Q^*$ [-]	F_{tot}/Q^* [-]
1	1	46,12	14,96	13,96	28,92	0,32	0,30	0,63
2	1/1,25	46,12	15,00	13,92	28,92	0,33	0,30	0,63
3	1/2	46,12	15,00	13,92	28,92	0,33	0,30	0,63
4	1/4	46,12	15,00	13,92	28,92	0,33	0,30	0,63
5	1/6,66	46,12	15,00	13,92	28,92	0,33	0,30	0,63
6	1/10	46,12	15,00	13,64	28,64	0,33	0,30	0,62
7	1/12	46,12	14,93	10,53	25,46	0,32	0,23	0,55
8	1/15	46,12	14,64	7,45	22,09	0,32	0,16	0,48
9	1/35	46,12	12,23	1,44	13,67	0,27	0,03	0,30
10	1/50	46,12	10,96	0,61	11,56	0,24	0,01	0,25
11	1/70	46,12	9,82	0,17	9,99	0,21	0,00	0,22
12	1/100	46,12	8,77	-0,10	8,67	0,19	0,00	0,19
13	1/1000	46,12	6,13	-0,19	5,94	0,13	0,00	0,13

Tabella B.6: Forze e forze relative agenti sul palo L=5m SOIL4

SOIL5				
FASE	DEGRADO	$U_{y,C}$ [mm]	$U_{y,A}$ [mm]	accorciamento [mm]
1	1	5,56	6,45	0,89
2	1/1,25	5,57	6,46	0,89
3	1/2	5,57	6,46	0,89
4	1/4	5,57	6,46	0,89
5	1/6,66	5,57	6,46	0,89
6	1/10	5,57	6,46	0,89
7	1/12	5,57	7,78	2,21
8	1/15	5,55	9,83	4,27
9	1/35	5,36	14,86	9,50
10	1/50	5,24	16,04	10,81
11	1/70	5,11	16,83	11,71
12	1/100	5,00	17,40	12,40
13	1/1000	4,71	18,29	13,58

Tabella B.7: Cedimenti e accorciamento palo L=5m SOIL5

SOIL5								
FASE	DEGRADO	Q^* [KN]	F_{base} [KN]	$F_{laterale}$ [KN]	F_{tot} [KN]	F_{base}/Q^* [-]	$F_{laterale}/Q^*$ [-]	F_{tot}/Q^* [-]
1	1	44,23	14,72	13,24	27,96	0,33	0,30	0,63
2	1/1,25	44,23	14,75	13,20	27,96	0,33	0,30	0,63
3	1/2	44,23	14,75	13,20	27,96	0,33	0,30	0,63
4	1/4	44,23	14,75	13,20	27,96	0,33	0,30	0,63
5	1/6,66	44,23	14,75	13,20	27,96	0,33	0,30	0,63
6	1/10	44,23	14,76	13,17	27,93	0,33	0,30	0,63
7	1/12	44,23	14,73	10,68	25,40	0,33	0,24	0,57
8	1/15	44,23	14,56	7,54	22,10	0,33	0,17	0,50
9	1/35	44,23	12,40	1,40	13,80	0,28	0,03	0,31
10	1/50	44,23	11,07	0,60	11,67	0,25	0,01	0,26
11	1/70	44,23	9,86	0,20	10,06	0,22	0,00	0,23
12	1/100	44,23	8,79	-0,07	8,72	0,20	0,00	0,20
13	1/1000	44,23	6,14	-0,12	6,02	0,14	0,00	0,14

Tabella B.8: Forze e forze relative agenti sul palo L=5m SOIL5

SOIL6				
FASE	DEGRADO	$U_{y,C}$ [mm]	$U_{y,A}$ [mm]	accorciamento [mm]
1	1	5,30	6,13	0,83
2	1/1,25	5,31	6,14	0,83
3	1/2	5,31	6,14	0,83
4	1/4	5,31	6,14	0,83
5	1/6,66	5,31	6,14	0,83
6	1/10	5,31	6,14	0,83
7	1/12	5,31	6,76	1,45
8	1/15	5,30	8,72	3,42
9	1/35	5,15	13,68	8,53
10	1/50	5,04	14,87	9,83
11	1/70	4,91	15,65	10,74
12	1/100	4,80	16,24	11,44
13	1/1000	4,50	17,14	12,64

Tabella B.9: Cedimenti e accorciamento palo L=5m SOIL6

SOIL6								
FASE	DEGRADO	Q^* [KN]	F_{base} [KN]	$F_{laterale}$ [KN]	F_{tot} [KN]	F_{base}/Q^* [-]	$F_{laterale}/Q^*$ [-]	F_{tot}/Q^* [-]
1	1	42,19	13,90	12,47	26,37	0,33	0,30	0,62
2	1/1,25	42,19	13,93	12,43	26,36	0,33	0,29	0,62
3	1/2	42,19	13,93	12,43	26,36	0,33	0,29	0,62
4	1/4	42,19	13,93	12,43	26,36	0,33	0,29	0,62
5	1/6,66	42,19	13,93	12,43	26,36	0,33	0,29	0,62
6	1/10	42,19	13,93	12,41	26,34	0,33	0,29	0,62
7	1/12	42,19	13,92	11,03	24,95	0,33	0,26	0,59
8	1/15	42,19	13,83	7,88	21,71	0,33	0,19	0,51
9	1/35	42,19	12,13	1,43	13,57	0,29	0,03	0,32
10	1/50	42,19	10,85	0,59	11,44	0,26	0,01	0,27
11	1/70	42,19	9,62	0,19	9,81	0,23	0,00	0,23
12	1/100	42,19	8,52	-0,07	8,45	0,20	0,00	0,20
13	1/1000	42,19	5,75	-0,12	5,64	0,14	0,00	0,13

Tabella B.10: Forze e forze relative agenti sul palo L=5m SOIL6

SOIL7				
FASE	DEGRADO	$U_{y,C}$ [mm]	$U_{y,A}$ [mm]	accorciamento [mm]
1	1	5,62	6,54	0,92
2	1/1,25	5,62	6,54	0,92
3	1/2	5,62	6,54	0,92
4	1/4	5,62	6,54	0,92
5	1/6,66	5,62	6,54	0,92
6	1/10	5,62	6,55	0,93
7	1/12	5,62	8,23	2,61
8	1/15	5,59	10,33	4,74
9	1/35	5,38	15,41	10,03
10	1/50	5,27	16,59	11,32
11	1/70	5,16	17,37	12,22
12	1/100	5,05	17,95	12,90
13	1/1000	4,77	18,81	14,04

Tabella B.11: Cedimenti e accorciamento palo L=5m SOIL7

SOIL7								
FASE	DEGRADO	Q^* [KN]	F_{base} [KN]	$F_{laterale}$ [KN]	F_{tot} [KN]	F_{base}/Q^* [-]	$F_{laterale}/Q^*$ [-]	F_{tot}/Q^* [-]
1	1	46,12	14,77	13,74	28,51	0,32	0,30	0,62
2	1/1,25	46,12	14,81	13,69	28,50	0,32	0,30	0,62
3	1/2	46,12	14,82	13,69	28,51	0,32	0,30	0,62
4	1/4	46,12	14,82	13,69	28,51	0,32	0,30	0,62
5	1/6,66	46,12	14,82	13,69	28,51	0,32	0,30	0,62
6	1/10	46,12	14,82	13,59	28,41	0,32	0,29	0,62
7	1/12	46,12	14,76	10,61	25,37	0,32	0,23	0,55
8	1/15	46,12	14,50	7,52	22,03	0,31	0,16	0,48
9	1/35	46,12	12,09	1,54	13,63	0,26	0,03	0,30
10	1/50	46,12	10,84	0,72	11,55	0,23	0,02	0,25
11	1/70	46,12	9,71	0,30	10,01	0,21	0,01	0,22
12	1/100	46,12	8,67	0,03	8,70	0,19	0,00	0,19
13	1/1000	46,12	6,11	-0,07	6,04	0,13	0,00	0,13

Tabella B.12: Forze e forze relative agenti sul palo L=5m SOIL7

SOIL8				
FASE	DEGRADO	$U_{y,C}$ [mm]	$U_{y,A}$ [mm]	accorciamento [mm]
1	1	11,25	12,16	0,91
2	1/1,25	11,26	12,17	0,91
3	1/2	11,26	12,17	0,91
4	1/4	11,26	12,17	0,91
5	1/6,66	11,26	12,17	0,91
6	1/10	11,26	12,19	0,92
7	1/12	11,25	15,54	4,29
8	1/15	11,22	19,67	8,45
9	1/35	10,83	29,88	19,05
10	1/50	10,57	32,29	21,72
11	1/70	10,32	33,90	23,57
12	1/100	10,10	35,09	24,99
13	1/1000	9,44	37,09	27,65

Tabella B.13: Cedimenti e accorciamento palo L=5m SOIL8

SOIL8								
FASE	DEGRADO	Q^* [KN]	F_{base} [KN]	$F_{laterale}$ [KN]	F_{tot} [KN]	F_{base}/Q^* [-]	$F_{laterale}/Q^*$ [-]	F_{tot}/Q^* [-]
1	1	44,23	15,13	13,67	28,79	0,34	0,31	0,65
2	1/1,25	44,23	15,16	13,65	28,81	0,34	0,31	0,65
3	1/2	44,23	15,17	13,65	28,82	0,34	0,31	0,65
4	1/4	44,23	15,17	13,65	28,82	0,34	0,31	0,65
5	1/6,66	44,23	15,17	13,65	28,82	0,34	0,31	0,65
6	1/10	44,23	15,17	13,55	28,72	0,34	0,31	0,65
7	1/12	44,23	15,12	10,51	25,62	0,34	0,24	0,58
8	1/15	44,23	14,91	7,37	22,28	0,34	0,17	0,50
9	1/35	44,23	12,72	1,20	13,93	0,29	0,03	0,31
10	1/50	44,23	11,35	0,38	11,74	0,26	0,01	0,27
11	1/70	44,23	10,13	-0,05	10,07	0,23	0,00	0,23
12	1/100	44,23	9,06	-0,33	8,72	0,20	-0,01	0,20
13	1/1000	44,23	6,07	-0,36	5,71	0,14	-0,01	0,13

Tabella B.14: Forze e forze relative agenti sul palo L=5m SOIL8

SOIL9				
FASE	DEGRADO	$U_{y,C}$ [mm]	$U_{y,A}$ [mm]	accorciamento [mm]
1	1	10,73	11,58	0,85
2	1/1,25	10,74	11,59	0,85
3	1/2	10,74	11,59	0,85
4	1/4	10,74	11,59	0,85
5	1/6,66	10,74	11,59	0,85
6	1/10	10,74	11,59	0,85
7	1/12	10,74	13,48	2,74
8	1/15	10,72	17,45	6,74
9	1/35	10,41	27,51	17,10
10	1/50	10,17	29,92	19,75
11	1/70	9,93	31,53	21,60
12	1/100	9,70	32,73	23,03
13	1/1000	9,04	34,77	25,73

Tabella B.15: Cedimenti e accorciamento palo L=5m SOIL9

SOIL9								
FASE	DEGRADO	Q^* [KN]	F_{base} [KN]	$F_{laterale}$ [KN]	F_{tot} [KN]	F_{base}/Q^* [-]	$F_{laterale}/Q^*$ [-]	F_{tot}/Q^* [-]
1	1	42,19	14,25	12,90	27,15	0,34	0,31	0,64
2	1/1,25	42,19	14,29	12,86	27,15	0,34	0,30	0,64
3	1/2	42,19	14,29	12,86	27,15	0,34	0,30	0,64
4	1/4	42,19	14,29	12,86	27,15	0,34	0,30	0,64
5	1/6,66	42,19	14,29	12,86	27,15	0,34	0,30	0,64
6	1/10	42,19	14,29	12,85	27,14	0,34	0,30	0,64
7	1/12	42,19	14,28	10,91	25,19	0,34	0,26	0,60
8	1/15	42,19	14,15	7,73	21,88	0,34	0,18	0,52
9	1/35	42,19	12,41	1,27	13,69	0,29	0,03	0,32
10	1/50	42,19	11,11	0,40	11,51	0,26	0,01	0,27
11	1/70	42,19	9,89	-0,04	9,85	0,23	0,00	0,23
12	1/100	42,19	8,82	-0,32	8,49	0,21	-0,01	0,20
13	1/1000	42,19	5,75	-0,38	5,37	0,14	-0,01	0,13

Tabella B.16: Forze e forze relative agenti sul palo L=5m SOIL9

SOIL10				
FASE	DEGRADO	$U_{y,C}$ [mm]	$U_{y,A}$ [mm]	accorciamento [mm]
1	1	11,33	12,28	0,95
2	1/1,25	11,34	12,29	0,95
3	1/2	11,34	12,29	0,95
4	1/4	11,34	12,29	0,95
5	1/6,66	11,34	12,29	0,95
6	1/10	11,34	12,62	1,28
7	1/12	11,32	16,44	5,12
8	1/15	11,27	20,69	9,43
9	1/35	10,84	30,99	20,15
10	1/50	10,61	33,40	22,79
11	1/70	10,38	35,00	24,63
12	1/100	10,16	36,19	26,03
13	1/1000	9,55	38,17	28,61

Tabella B.17: Cedimenti e accorciamento palo L=5m SOIL10

SOIL10								
FASE	DEGRADO	Q^* [KN]	F_{base} [KN]	$F_{laterale}$ [KN]	F_{tot} [KN]	F_{base}/Q^* [-]	$F_{laterale}/Q^*$ [-]	F_{tot}/Q^* [-]
1	1	46,12	15,14	14,23	29,37	0,33	0,31	0,64
2	1/1,25	46,12	15,18	14,18	29,36	0,33	0,31	0,64
3	1/2	46,12	15,19	14,18	29,36	0,33	0,31	0,64
4	1/4	46,12	15,19	14,18	29,36	0,33	0,31	0,64
5	1/6,66	46,12	15,19	14,18	29,36	0,33	0,31	0,64
6	1/10	46,12	15,19	13,61	28,80	0,33	0,30	0,62
7	1/12	46,12	15,09	10,47	25,56	0,33	0,23	0,55
8	1/15	46,12	14,78	7,39	22,17	0,32	0,16	0,48
9	1/35	46,12	12,36	1,36	13,72	0,27	0,03	0,30
10	1/50	46,12	11,08	0,51	11,59	0,24	0,01	0,25
11	1/70	46,12	9,93	0,06	9,99	0,22	0,00	0,22
12	1/100	46,12	8,90	-0,23	8,67	0,19	0,00	0,19
13	1/1000	46,12	6,11	-0,31	5,80	0,13	-0,01	0,13

Tabella B.18: Forze e forze relative agenti sul palo L=5m SOIL10

Bibliografia

R. K. W. M. Klaassen, 2008, “Bacterial decay in wooden foundation piles—Patterns and causes: A study of historical pile foundations in the Netherlands” International Biodeterioration & Biodegradation

F. Ceccato, Comportamento meccanico delle palificate lignee di Venezia, Tesi di Laurea Magistrale

C.C.Gerhards , “Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects” 1980, wood and fiber V14 gennaio 1982

G. Gottardi, A. Lionello, C. Modena, 2008, Influenza delle caratteristiche di fondazione sulla stabilità dei campanili di S. Stefano e dei Frari a Venezia Metodi e strategie di progetto.

F. Ceccato, P. Simonini, C. Köppl, H. F. Schweiger, F. Tschuchnigg, 2014, Analysis of degradation effect on the wooden foundations in Venice

F. Ceccato, P. Simonini, 2012, Comportamento meccanico delle palificate lignee di Venezia nel tempo

Biscontin G., Izzo F., Rinaldi E. (a cura di), 2009, Il sistema delle fondazioni lignee a Venezia. Valutazione del comportamento chimico-fisico e microbiologico, pubblicato da CORILA

S. Cola, P. Simonini, 2002, Influenza della granulometria sul comportamento meccanico dei terreni limosi eterogenei: il caso dei terreni della laguna di Venezia

R. K. W. M. Klaassen, B. S. Van Overeem, 2012, Factors that influence the speed of bacterial wood degradation

R. K. W. M. Klaassen, J.G.M. Creemers, 2012, Wooden foundation piles and its underestimated relevance for cultural heritage

I. Cavaggioni, A. Lionello, Le fondazioni storiche a Venezia. Stato dell’arte, tecniche di costruzione e comportamenti

A. Lionello, 2008 (a cura di), Il campanile di Santa Maria Gloriosa dei Frari in Venezia conoscenza, consolidamento e restauro

C. Köeppl, 2012, Numerical modeling of the long-term behavior of wooden pile foundations in Venice (Master Thesis)

F. Castelli, M. Maugeri, E. Motta, 1993, Modellazione del fenomeno di attrito negativo nei pali