

P. Lunardi, Rocksoil S.p.A., Milano

Significato e obiettivi del consolidamento dei suoli oggi e nell'antichità

Sommario

Dopo aver descritto i parametri fondamentali che caratterizzano i terreni dal punto di vista geotecnico (consistenza o resistenza al taglio), vengono illustrati i sistemi con cui è possibile consolidarli per migliorarne la qualità ai fini costruttivi. Vieni fatto cenno, infine, alle tecniche di consolidamento in uso nell'antichità.

Il problema di fondare le proprie opere sul terreno è stato sentito dall'uomo sin dalla più lontana antichità, da quando, lasciate le caverne per stabilirsi in una dimora costruita, sia pure rudimentalmente, con le proprie mani dovette assicurarne la stabilità.

Per molti secoli la maggior parte delle costruzioni furono limitate ad uno o due piani al massimo ed un semplice cordolo in muratura era sufficiente per assicurar loro la stabilità sul terreno, ma quando con il progredire della civiltà le costruzioni si fecero più importanti e complesse, i maestri d'opera furono spesso obbligati ad ideare nuovi metodi e procedimenti per appoggiarle sul terreno. In questo compito, talvolta, hanno persino precorso le attuali soluzioni, soprattutto quando, per esigenze militari o altro, si venivano ad interessare terreni inadatti. Allora, per garantire la stabilità di quanto edificato, era necessario consolidarli aumentandone la consistenza naturale, che

contraddistingue i diversi terreni che costituiscono la crosta terrestre. Semplificando al massimo possiamo dire che in natura esistono tre tipi di terreno principali: la sabbia, l'argilla, la roccia, ognuno caratterizzato dalla propria consistenza naturale: la consistenza della sabbia, la consistenza dell'argilla, la consistenza della roccia.

La consistenza naturale è descritta matematicamente dall'espressione di Coulomb, che contiene due parametri fondamentali la cui variabilità condiziona quella che viene definita resistenza al taglio τ del materiale (fig. 1):

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg}\phi$$

Il parametro c , detto coesione, ha le dimensioni di una forza per unità di superficie ed esprime le proprietà leganti che tengono aggregate le diverse particelle di terreno e che si esplicano in gran parte a livello inter molecolare. Il parametro ϕ , invece, detto angolo d'attrito, indica l'importanza che le resistenze d'attrito tra le singole particelle assumono nei riguardi della resistenza al taglio complessiva che il terreno è in grado di sviluppare.

Questa si misura attraverso prove in situ o in laboratorio. Una delle più semplici e diffuse è la prova di taglio diretto con l'apparecchio di Casagrande. Esso consiste in due telai quadrati sovrapposti, di cui uno scorrevole rispetto all'altro. Il campione di terreno viene posto tra i due telai, quindi attraverso quello superiore si applica una forza normale di compressione N ed una forza orizzontale di taglio T . Il campione si romperà per un certo valore di T lungo il piano di separazione tra i due telai. Conoscendo N , T e la sezione A del campione si ricava $\sigma = N/A$ e $\tau = T/A$. Ripetendo la prova su vari campioni per valori di N variabili si ottengono diagrammi σ - τ come quello riportato in fig. 1, dai quali è agevole estrapolare i valori caratteristici di coesione ed angolo d'attrito del materiale in prova.

Poiché detti valori sono soggetti a variare in funzione delle condizioni di saturazione del terreno ed a seconda che all'acqua contenuta nei pori sia consentito o meno di drenare, occorre distinguere tra valori apparenti e valori reali (fig. 1). Un esempio assai noto di questo fenomeno è quello dei castelli di sabbia, materiale per propria natura notoriamente privo di coesione, l'esistenza dei quali è possibile fin tanto che la sabbia con cui sono stati costruiti rimane umida e tra i singoli grani si sviluppano forze capillari aggreganti (coesione apparente). Quando, in seguito all'essiccazione, queste forze si annullano, il castello lentamente si trasforma in un cono informe più o meno scosceso, a seconda dell'angolo d'attrito che si sviluppa tra i singoli grani.

La consistenza naturale del terreno, attraverso la sua resistenza al taglio, in funzione del rapporto reciproco tra il termine coesivo e quello d'attrito, detta localmente la morfologia della crosta terrestre: in presenza di terreni con consistenza lapidea (rocce) avremo i tipici paesaggi di montagna con pendenze ripide e vette assai ardite, in presenza di terreni di natura prevalentemente coesiva (argille, limi, ecc.) avremo i tipici paesaggi collinari con pendenze e rilievi piuttosto dolci, in presenza di terreni di natura prevalentemente sciolta (ghiaie, sabbie, ecc.) avremo i paesaggi conseguenti (vaste pianure, dune, ecc.).

Quando si parla di consistenza naturale di un terreno è per distinguerla da quella acquisita, che questo assume quando la prima viene variata artificialmente in senso migliorativo (consolidamento) o peggiorativo.

Questo oggi può essere ottenuto attraverso (fig. 2):

- variazioni del contenuto di acqua: drenando il terreno, se ne aumenta la resistenza al taglio, grazie alla diminuzione delle pressioni neutre che riducono l'efficacia dell'attrito tra le singole particelle.

L'allontanamento dell'acqua può avvenire per gravità o per sovrappressione indotta attraverso percorsi ad elevata permeabilità inseriti artificialmente nel suolo.

Il drenaggio incide significativamente sugli equilibri naturali della zona interessata. Di conseguenza, è indispensabile, ogni volta che si vuol realizzare un'opera che può comportare il drenaggio del terreno, considerare attentamente, oltre agli effetti benefici, anche i possibili effetti secondari che possono essere indesiderabili.

L'effetto del drenaggio, infatti, pur producendo in generale un miglioramento delle caratteristiche meccaniche dei terreni, assume valenze diverse a seconda del contesto e della permeabilità del mezzo su cui viene operato.

In particolare, nei terreni fini, prevalentemente argillosi e poco permeabili, assume grande importanza il fenomeno della consolidazione, cioè della riduzione di volume associata all'espulsione progressiva dell'acqua contenuta nei pori ed al riaggiustamento della struttura interna del terreno in seguito al trasferimento di carico dall'acqua allo scheletro dello stesso. Il risultato è un significativo abbassamento del piano campagna (cedimento in superficie).

Più il terreno è impermeabile, più il fenomeno della consolidazione è differito nel tempo e può causare seri problemi alle costruzioni che ne sono influenzate. Tuttavia, se ben conosciuto e correttamente regolato, può essere sfruttato vantaggiosamente.

Prendiamo per esempio il caso della Torre pendente di Pisa, le cui fondazioni insistono su uno strato di sabbie a tetto di un potente complesso argilloso di consistenza assai plastica (fig. 3). Il diagramma di fig. 4 descrive l'evoluzione della pendenza del monumento in funzione delle variazioni del livello piezometrico della falda artesianica che giace a qualche metro sotto il piano campagna, misurate con regolarità a partire dal 1967. Si nota immediatamente come i due eventi siano strettamente correlati. Questa osservazione ha

suggerito allo scrivente una possibile soluzione per ottenere il pieno controllo dei movimenti della Torre e risolvere il problema della sua stabilità in maniera definitiva senza alcuna necessità di toccare l'antica struttura muraria.

E' noto che un terreno poco permeabile nel quale una o più falde subiscono variazioni di livello subisce a sua volta variazioni di volume in funzione del contenuto d'acqua dello stesso. In particolare, il drenaggio dell'acqua dai pori produce una riduzione di volume con conseguente abbassamento del piano campagna.

E' possibile quindi controllare e pilotare nel senso voluto i movimenti della Torre provocando nel terreno di fondazione, mediante azioni separate o combinate di congelamento e drenaggio, cedimenti gradualmente pilotati, in modo da creare una coppia stabilizzante tale da ridurre l'inclinazione del monumento ed ottenerne la completa stabilizzazione.

La realizzazione pratica di questa soluzione prevederebbe (vedi figg. 3 e 5):

- il congelamento del terreno sotto la Torre, lato sotto pendenza (zona A);
- la compartimentazione del terreno, con setti sottili impermeabili realizzati con il metodo jet-grouting, a racchiudere l'area dove si vuol provocare l'abbassamento del piano campagna (zona B) ed il successivo drenaggio forzato e graduale dell'acqua contenuta nella stessa zona fino ad ottenere il cedimento voluto.

La fattibilità di un simile intervento è stata confermata dagli studi fatti attraverso modelli matematici agli elementi finiti in campo non lineare (LUNARDI 1993, pp. 24). Tra le soluzioni sin qui prospettate, questa potrebbe dunque essere quella ottimale e più indolore, perché consentirebbe di rimuovere alla radice le cause del dissesto ed ottenere la completa stabilizzazione del monumento senza alterare in maniera irreversibile lo stato di equilibrio iniziale, né toccare in alcun modo l'antica struttura muraria.

Un esempio opposto, dove dato il contesto (il centro urbano di una grande città come Milano) il drenaggio della falda avrebbe avuto conseguenze negative (cedimenti in superficie inaccettabili per gli antichi edifici in superficie e per alcuni sottoservizi presenti nella zona) è quello della costruzione della Stazione Venezia, nell'ambito dei lavori per la realizzazione del Passante ferroviario.

Si tratta di una grande cavità di quasi trenta metri di luce e duecentocinquanta di lunghezza, scavata a foro cieco nel centro cittadino, con soli quattro metri di copertura sotto gli edifici e le vie ad intenso traffico, in un terreno privo di coesione e sotto falda. E' la più grande galleria del mondo realizzata in condizioni simili e la sua costruzione è stata possibile solo grazie all'adozione dell'"Arco Cellulare" (fig. 6, foto 1), un sistema costruttivo nuovo, che ha permesso di realizzare l'intera struttura portante prima ancora di procedere allo scavo della cavità. In questo modo, il terreno circostante e la falda non subiscono praticamente nessun disturbo ed i cedimenti provocati in superficie dai lavori di scavo sono nulli (LUNARDI 1990, pp. 41).

La costruzione di questa grande opera ha richiesto poco più di due anni ed i costi sono risultati assai competitivi;

- sostituzione del fluido o liquido interstiziale con miscele leganti: iniettando nel terreno miscele a base di cemento o di leganti chimici, si ottengono volumi di materiale trattato la cui consistenza può arrivare anche a quella di un calcestruzzo. Questo tipo di trattamento viene abitualmente adoperato nella realizzazione di linee metropolitane nei centri urbani, onde evitare che l'asportazione di terreno dal sottosuolo provochi cedimenti in superficie tali da danneggiare le strutture civili soprastanti.

Un'evoluzione tecnologica relativamente recente è stata l'introduzione del sistema jet-grouting, con il quale l'iniezione della miscela legante viene

eseguita ad altissima pressione (anche 600 bar) tramite degli ugelli montati su una batteria d'aste in rotazione movimentata in senso longitudinale. Il sistema consente di creare entro il terreno volumi trattati di forma e geometria volute, con il vantaggio, rispetto al metodo tradizionale, di poter circoscrivere il consolidamento strettamente alla zona desiderata;

- processi chimico-fisici: applicando una differenza di potenziale tra due elettrodi infissi in una massa argillosa satura, si innesca una migrazione dei catodi, presenti nel sistema argilla-acqua, verso il catodo (negativo) e degli anioni verso l'anodo (positivo); contemporaneamente si ha un deflusso di acqua interstiziale verso il catodo. Questo effetto di drenaggio porta già di per sé, come già illustrato, ad un sensibile incremento di resistenza al taglio della massa argillosa. A questo effetto primario si aggiungono altri effetti secondari di natura elettrochimica (variazione del pH, dissoluzione degli elettrodi, mobilitazione degli elettroliti), mineralogica (trasformazione-neoformazione di minerali), fisica (modificazione della struttura-tessitura) e geotecnica (variazione dei limiti di Atterberg e della consistenza), che portano ad un ulteriore incremento di resistenza del terreno trattato.

- variazioni di temperatura: congelando il terreno con appositi impianti refrigeranti ad azoto liquido o a salamoia è possibile solidificare la fase liquida dello stesso ottenendo un materiale assai resistente per tutto il tempo necessario allo svolgimento dei lavori. Con certi tipi di terreno si può ottenere un aumento di resistenza attraverso la cottura (terracotta), pratica tuttavia non in uso per fini costruttivi;

- variazioni di pressione: ottenute precaricando il terreno prima di edificarlo (consolidazione) o alleggerendolo mediante la sostituzione di uno strato

superficiale con volumi di materiale più leggero. In alternativa, si può ricorrere ad azioni meccaniche quali il costipamento e la vibroflottazione che ne aumentano la densità;

Possiamo dunque affermare che chi costruisce oggi dispone di numerose possibilità per consolidare il terreno di fondazione delle proprie opere e renderlo adeguato, qualora non lo fosse per propria natura, a sostenere i carichi che intende affidargli.

E chi costruiva nell'antichità ?

Se ripercorriamo con il pensiero quanto detto riguardo ai diversi sistemi con cui oggi è possibile variare la consistenza naturale dei terreni ed ottenerne il consolidamento, ci rendiamo subito conto che la maggior parte di essi non era certamente alla portata dei costruttori di diversi secoli fa.

Costoro, in pratica potevano operare sul terreno solo con variazioni di pressione o di contenuto d'acqua (drenaggio).

Tuttavia, come dimostrano i numerosi reperti archeologici che di continuo vengono portati alla luce, essi seppero sovente supplire alle proprie carenze conoscitive e tecnologiche in maniera sorprendente, dimostrando un'acuta intuizione: come gli antichi costruttori romani che, pur non avendo alcuna nozione sulla natura e sul comportamento dei terreni, usavano accatastare i materiali a piè d'opera alcuni anni prima di iniziarne la costruzione (consolidazione del terreno per variazioni di pressione).

Una pratica assai diffusa nell'antichità fu il ricorso a fitte palificazioni di legname per costipare il terreno ed aumentarne la consistenza. La battitura dei pali, operazione certo non semplice con i mezzi dell'epoca, veniva operata con macchine rudimentali appositamente concepite, delle quali la figura 7 mostra qualche esempio.

Un'opera di costipamento del terreno di questo tipo, risalente al XV secolo d.C. e venuta alla luce recentemente durante i lavori per la costruzione della rampa di levante del sottopasso stradale di Piazza Caricamento, riguarda i lavori che furono eseguiti a Genova nell'antico porto.

Si tratta, come illustrato dalla foto 2, di una serie di fitte palificazioni costituite da pali di legno infissi per qualche metro nel terreno, allora sommerso dal mare, per la fondazione di alcuni moli.

In altri casi sono stati ritrovati banchi di anfore di terracotta ubicati sotto il piano di fondazione delle costruzioni. Sono stati portati alla luce anche a Milano, in numerose zone della città, interne ed esterne alla cerchia muraria romana. Essi si collocano cronologicamente tra il I secolo a.C. ed il I secolo d.C. e di solito sono costituiti da fosse o trincee scavate nel suolo e riempite con anfore capovolte intere o, in alcuni casi, frammentate. Le anfore generalmente si trovano allineate in posizione verticale o leggermente inclinata, con la bocca ed il collo infissi nel terreno sterile. In altri casi esse sono in posizione orizzontale, con il puntale dell'una infilato nel collo della successiva.

Le anfore venivano utilizzate per il loro basso costo e la facile reperibilità in maniera differente a seconda del problema contingente da risolvere.

In sintesi, si possono distinguere tre diverse utilizzazioni principali (fig. 8):

- a scopo di drenaggio anticapillare quando si trovano uniformemente distribuite in un letto di sabbia grossolana al di sotto delle fondazioni e dei pavimenti del piano basso degli edifici. Interponendo tra le strutture murarie ed il terreno di fondazione uno strato di materiale grossolano con ampi vuoti, veniva impedita la risalita capillare dell'acqua, causa prima dell'umidità ascendente nelle costruzioni;
- a scopo di drenaggio per captazione, quando si trovano in posizione orizzontale ed a leggera pendenza, con il puntale dell'una -

intenzionalmente spezzato - infilato nel collo di quella successiva, in modo da creare un vero e proprio collettore per le acque;

- a scopo di alleggerimento, quando si trovano allineate in strisce in corrispondenza delle fondazioni delle opere. Nella costruzione su terreni di ridotta consistenza, la sostituzione del materiale in posto con le anfore aveva lo scopo di produrre un alleggerimento del terreno di fondazione, in modo da compensare il carico trasmesso dalla futura costruzione. In altre parole, non possedendo la tecnologia adatta per consolidare ed aumentare la consistenza del terreno, si cercava di non alterarne gli equilibri naturali alleggerendolo preventivamente, in maniera che a costruzione ultimata fossero ripristinate le condizioni di sollecitazione iniziali.

Con ciò i nostri antenati sembrano ammonirci che la risoluzione ottimale dei problemi costruttivi d'interazione con il terreno sovente sta proprio nella conservazione degli equilibri naturali preesistenti.

Solo rispettando questi equilibri è possibile realizzare grandi opere d'ingegneria, capaci di durare nel tempo e di integrarsi in maniera eccellente con l'ambiente naturale.

Bibliografia

Consolidamento di terreni e rocce in posto nell'ingegneria civile 1978, Atti del Seminario promosso dalla Società Italiana Gallerie, Stresa.

LUNARDI P. 1990, *Un nuovo sistema costruttivo per la realizzazione di gallerie di grande luce in terreni sciolti: l'"Arco Cellulare"*, in *Quarry and Construction*, anno XXVIII, 2, pp. 91-132.

LUNARDI P. 1993, *La Torre di Pisa - Note su una proposta d'intervento alternativa*, in *Materiali e Strutture*, anno III, 1, pp. 1-24.

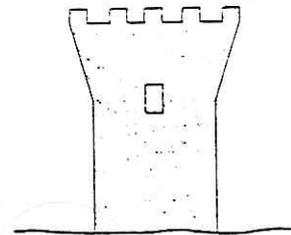
RESISTENZA AL TAGLIO DEL TERRENO

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi$$

c

coesione reale

coesione apparente



ϕ

angolo d'attrito

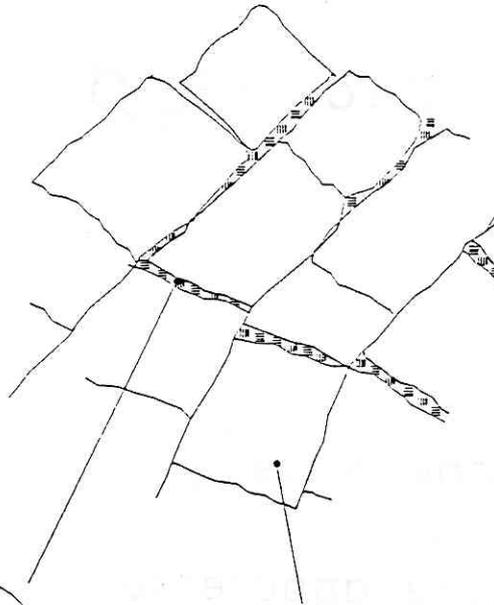
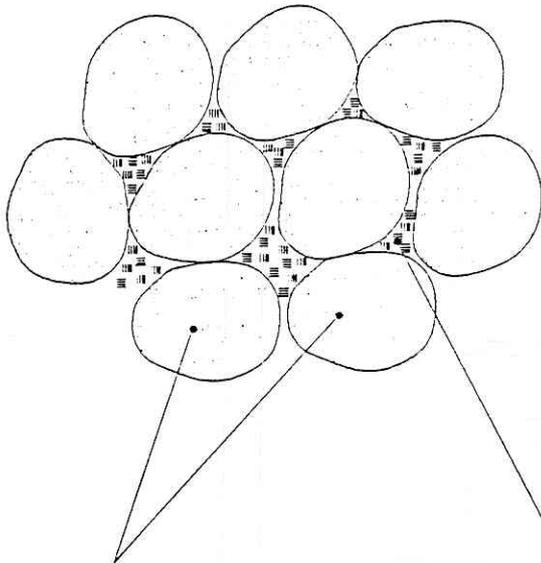


SUOLI

ROCCE

POROSITA'

FRATTURE



PARTICELLE DI TERRENO

ACQUA
E
ARIA

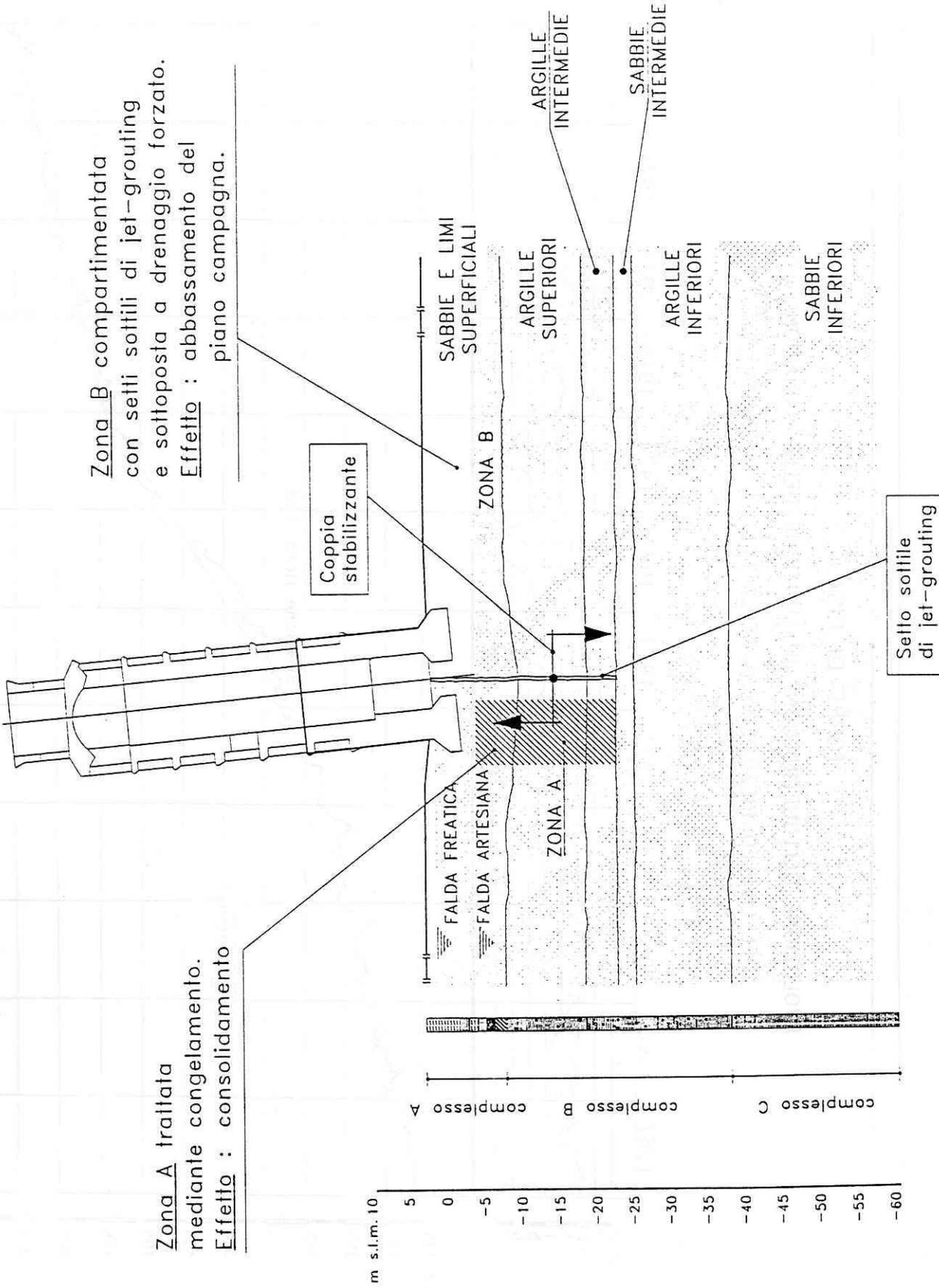
MATRICE
ROCCIOSA

CONSISTENZA ACQUISITA PER CONSOLIDAMENTO

OTTENUTO
PER AZIONE DI

- VARIAZIONE DI CONTENUTO D'ACQUA → DRENAGGIO
- SOSTITUZIONE DEL FLUIDO O LIQUIDO INTERSTIZIALE → INIEZIONI
- PROCESSI CHIMICO-FISICI → ELETTROSMOSI
- VARIAZIONE DI TEMPERATURA → CONGELAMENTO
- VARIAZIONE DI PRESSIONE → COSTIPAMENTO

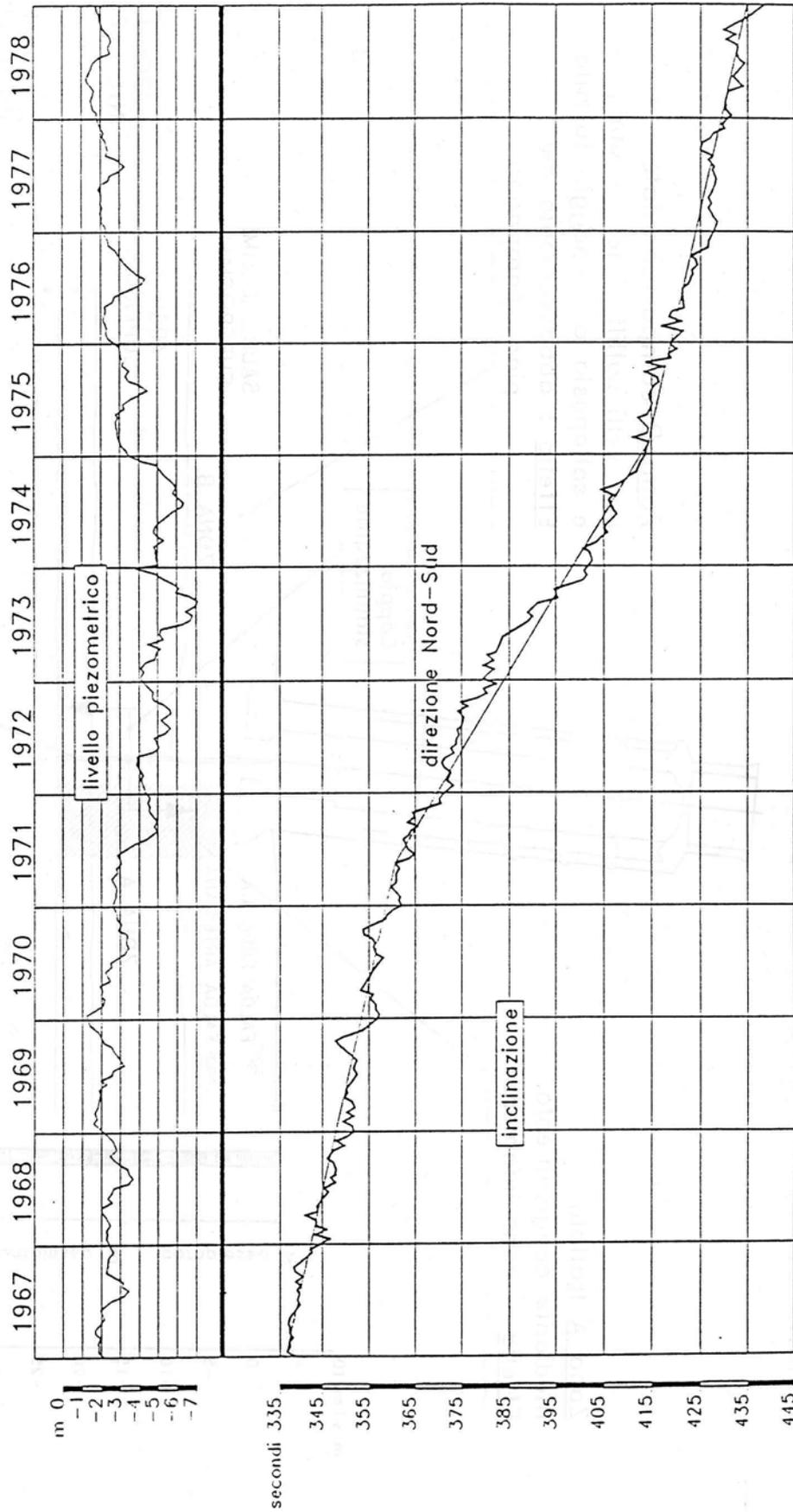
TORRE DI PISA
 SEZIONE STRATIGRAFICA E SCHEMA DELLA SOLUZIONE MEDIANTE DRENAGGIO FORZATO



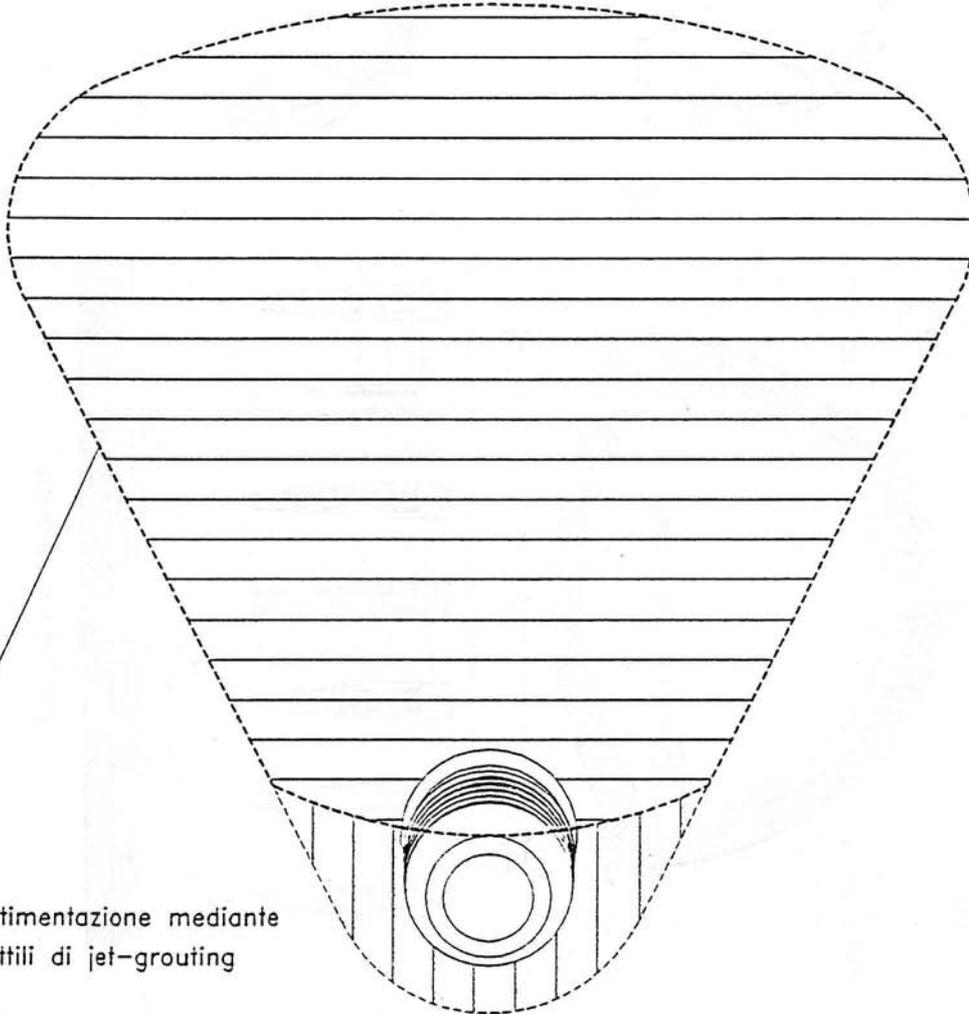
Zona B compartimentata con setti sottili di jet-grouting e sottoposta a drenaggio forzato. Effetto : abbassamento del piano campagna.

Zona A trattata mediante congelamento. Effetto : consolidamento

TORRE DI PISA
 EVOLUZIONE DELL'INCLINAZIONE IN FUNZIONE DELLE VARIAZIONI
 DEL LIVELLO PIEZOMETRICO DELLA FALDA ARTESIANA



TORRE DI PISA
SCHEMA PLANIMETRICO DELLA COMPARTIMENTAZIONE
(SOLUZIONE MEDIANTE DRENAGGIO FORZATO)

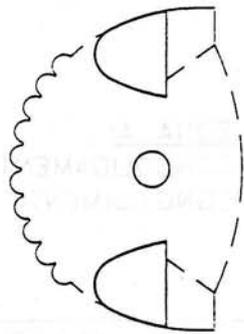
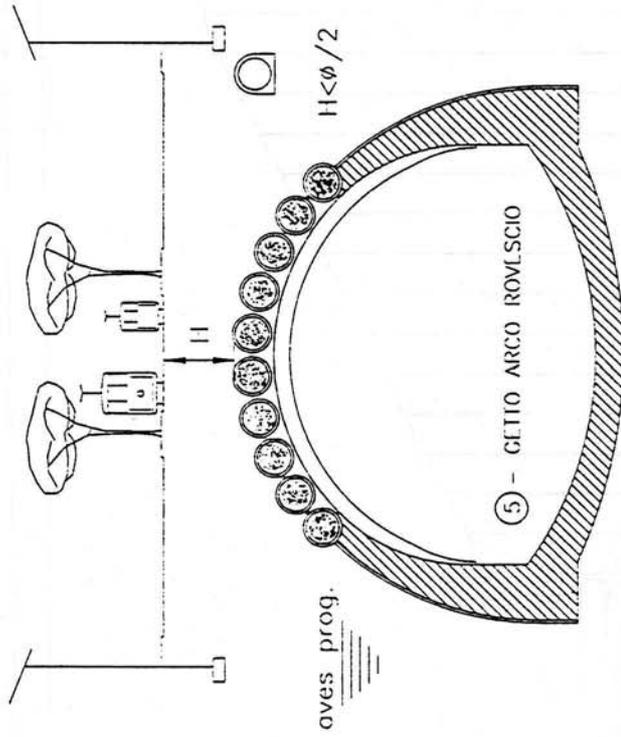


Compartimentazione mediante
setti sottili di jet-grouting

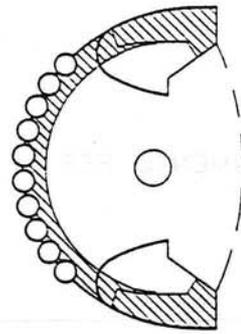
ZONA B:
CONSOLIDAMENTO PER
DRENAGGIO

ZONA A:
CONSOLIDAMENTO PER
CONGELAMENTO

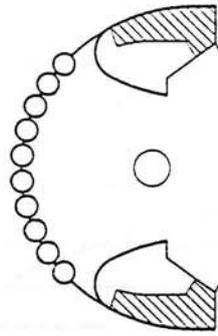
ARCO CELLULARE (fasi esecutive)



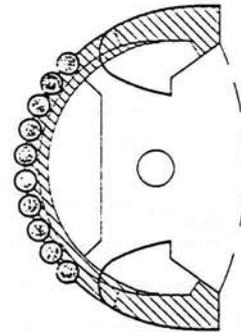
① -- SCAVO CUNICOLI LATERALI



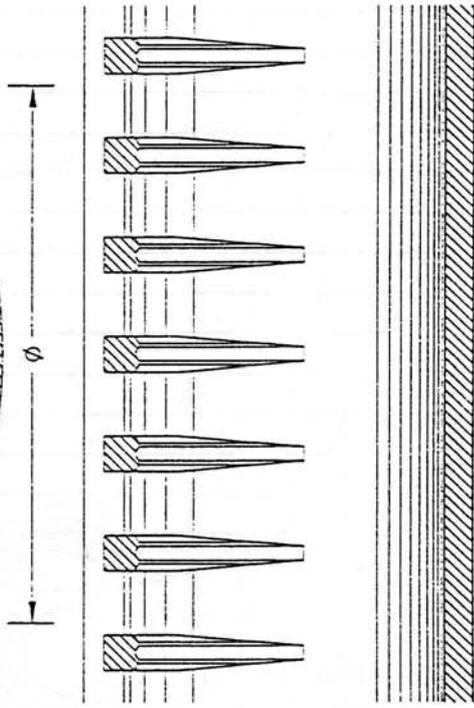
③ -- GETTO ARCO CELLULARE DI CALOITA



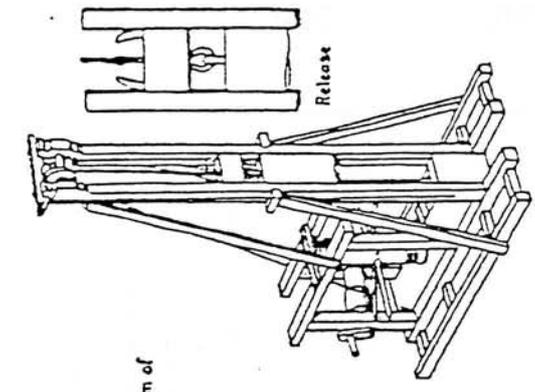
② -- INFISIONE TUBI E GETTO PIEDRITTI



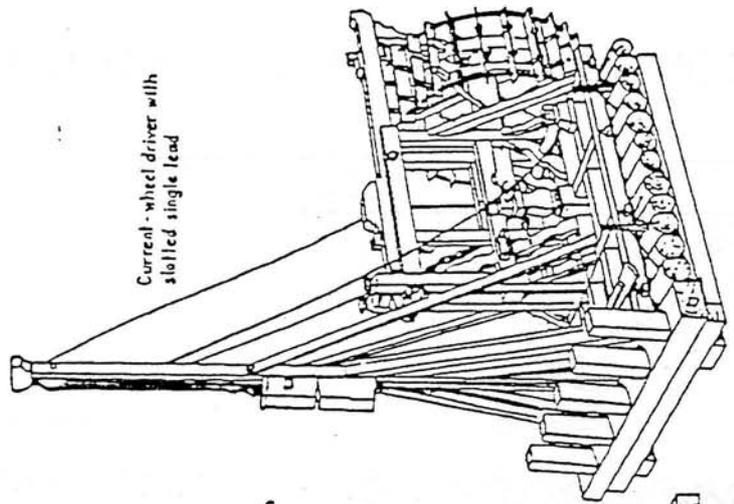
④ -- GETTO TUBI E SCAVO



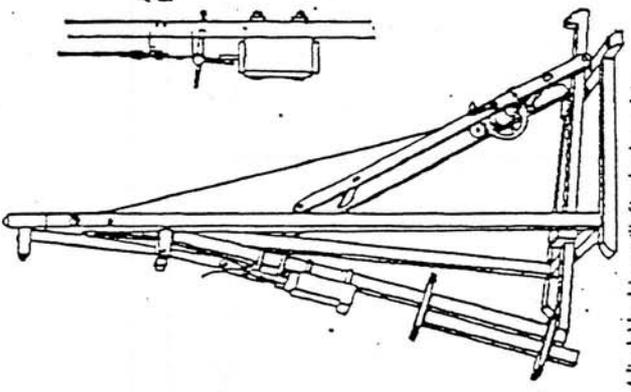
PROFLO LONGITUDINALE



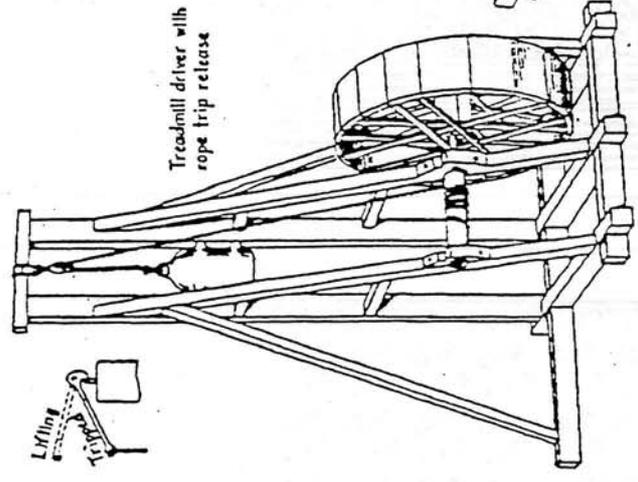
Driver with horizontal and vertical winches



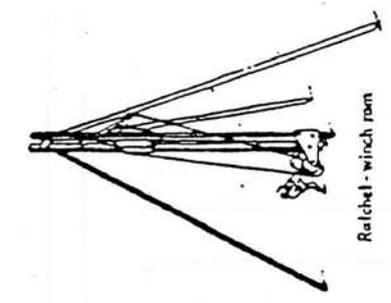
Current-wheel driver with slotted single lead



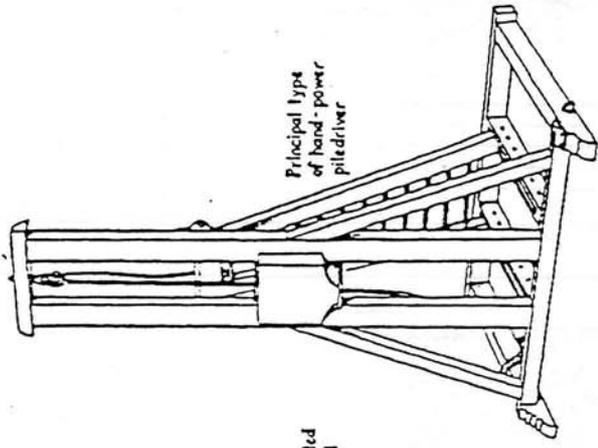
Adjustable driver with fixed release trip



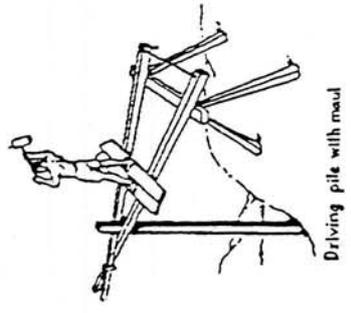
Treadmill driver with rope trip release



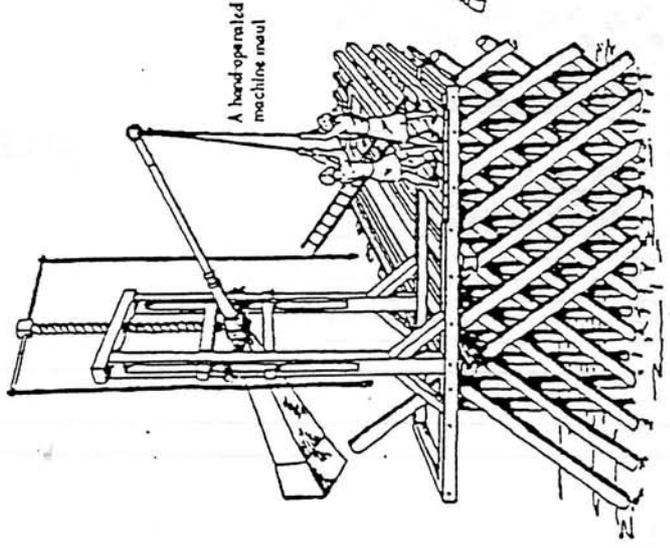
Ratchet-winch ram



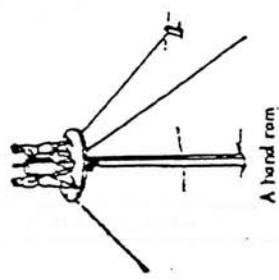
Principal type of hand-power piledriver



Driving pile with maul



A hand-operated machine maul



A hand ram

Medieval Pile Drivers

Primitive Pile Driving and Early Steam Drivers

Didascalie

Fig. 1:

Fig. 2: Tecniche di consolidamento del terreno

Fig. 3:

Fig. 4:

Fig. 5:

Fig. 6:

Fig. 7: Esempi di antiche macchine battipalo

Fig. 8:

Foto 1: Vista della galleria della Stazione Venezia del Passante Ferroviario di Milano ($\varnothing_{est} = \sim 30$ m) durante la costruzione con il metodo dell'"Arco Cellulare".

Foto 2: Vista della palificata di legno che sosteneva un antico molo a Genova presso Piazza Caricamento