UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale
Ingegneria civile ambientale

APPROFONDIMENTI SUI SISTEMI DI BATTITURA DEI PALI INFISSI

INSIGHTS INTO PILE DRIVING SYSTEMS

Relatore:

Dott. Ing. Ivo Bellezza

Studente:

Mario Palazzo

Anno Accademico 2019/2020

ABSTRACT

Le fondazioni profonde, anche chiamate pali di fondazione, sono costruite per infissione, trivellazione o trivellazione con elica continua. Diversi sistemi di infissione sono disponibili e una prima suddivisione consiste in battipali ad impatto (o maglio battente) e sistemi vibranti. I battipali ad impatto hanno un blocco di acciaio, chiamato maglio, che viene prima sollevato e poi lasciato cadere sulla testa del palo. Una successione di colpi, assestati sul palo fa sì che questo affondi nel terreno. Nel caso dei battipali a caduta libera, ad aria o vapore e idraulici, il sollevamento del maglio richiede una forza motrice esterna e per questo si differenziano dai battipali diesel definiti a combustione interna. Quest'ultimi sono anche i più rumorosi.
In generale, l'infissione per impatto è controllata dal numero di colpi e dall'altezza di caduta del maglio. Sono disponibili software, come il GRLWEAP, che tramite l'analisi dell'equazione delle onde di Smith, forniscono informazioni utili sia in fase di progettazione che di monitoraggio e poi verifica della battitura.
I sistemi di infissione vibranti, invece, impartiscono una forza assiale sinusoidale al palo utilizzando pesi eccentrici controrotanti accoppiati, Sono impiegati sia per infiggere sia per estrarre pali in acciaio, soprattutto. I principali vantaggi sono i bassi livelli di rumore e vibrazioni prodotte, e l'efficacia in terreni non coesi. Sono infatti spesso applicati per l'infissione di pali offshore anche di notevoli dimensioni.

The deep foundations, also called pile foundations, are built driving them into the ground, excavating by boring or excavating by continuous flight auger. Several pile driving methods are available. A first subdivision consists of impact hammers (or dropping weight) and vibratory hammers. Impact hammers have a forged steel block, called ram, which is first raised and then dropped on the pile head. A sequence of blows causes the pile to sink down into the soil. In the case of drop, air or steam and hydraulic hammers, the ram requires an external driving force to lift. Indeed, they differ from diesel hammers which are defined as internal combustion hammer. The latter is also the loudest.
In general, the impact driving is controlled by the blow count and the height of drop Software are available, such as GRLWEAP, based on analysis of Smith's wave equation that provides useful information to design, monitoring and validation of pile driving.
On the other hand, Vibratory hammers use paired counter-rotating eccentric weights to impart a sinusoidal vibrating axial force to the pile. are commonly used for driving/extracting sheet piles. The main advantages are the low levels of produced noise and vibration, and the effectiveness in loose soils. They are often applied to drive great piles offshore.

INDICE

1 INTRODUZIONE ALLE FONDAZIONI PROFONDE 4

2 INTRODUZIONE ALLA BATTITURA 7

2.1 CLASSIFICAZIONE DEI PALI INFISSI 7
2.2 PALI GETTATI IN OPERA 8
2.3 CENNI STORICI DELLA BATTITURA 10

3 ATTREZZATURA 12

3.1 BATTIPALI 13
3.2 GRU 14
3.3 LEAD 15
3.4 ELMETTO 19
3.5 CUSCINETTI 20

4 TIPOLOGIA DI BATTIPALI. 22

4.1 BATTIPALI A CADUTA LIBERA 24
4.2 BATTIPALI A VAPORE O ARIA 27
4.2.1 Singola Azione 27
4.2.2 Doppia azione 28
4.2.3 A pressione differenziale 29
4.3 BATTIPALI IDRAULICI 30
4.3.1 Battipali idraulici a singola azione 31
4.3.2 Battipali idraulici a doppia azione 32
4.4 BATTIPALI DIESEL 33
4.4.1 BATTIPALO DIESEL A SINGOLA AZIONE (ESTREMITA' APERTA) 33
4.4.2 BATTIPALI DIESEL A DOPPIA AZIONE (ESTREMITÀ CHIUSA) 36
4.5 SISTEMI DI INFISSIONE VIBRANTI 39
4.6 SISTEMI DI INFISSIONE A RISONANZA 40

5 ACCORGIMENTI PER FACILITARE L'INFISSIONE 43

5.1 ATTREZZATURE PER IL CONTROLLO DEL RUMORE 43
5.2 FOLLOWERS 44
5.3 JETTING 45
5.4 PREDRILLING 46
5.5 SPUDDING 47
5.6 SCAPITTOZZATURA 47

6 SELEZIONE DEL BATTIPALO 49

6.1 SELEZIONE DEL TIPO DI BATTIPALO 49
6.2 MONITORAGGIO DELL'ENERGIA CINETICA DEL BATTIPALO 50

7 SOFTWARE PER PROGETTAZIONE E CONTROLLO DELLA BATTITURA 53

8 CONCLUSIONI 57

BIBLIOGRAFIA 58

SITOGRAFIA 58

APPENDICE 60

SPECIFICHE TECNICHEBATTIPALI ARIA/VAPORE 60
SPECIFICHE TECNICHE BATTIPALI IDRAULICI 61
SPECIFICHE TECNICHE BATTIPALI DIESEL 62
SPECIFICHE TECNICHE SISTEMI DI INFISSIONE VIBRANTI 63

1 INTRODUZIONE ALLE FONDAZIONI PROFONDE

Si definisce fondazione profonda una fondazione per la quale il rapporto tra la profondità della base d'appoggio D e la larghezza B è maggiore di 10. Le fondazioni profonde differiscono da quelle dirette essenzialmente per il fatto che trasmettono una parte della loro sollecitazione per attrito lungo il fusto del palo e una parte alla base.

Le fondazioni profonde sono impiegate, come mostrato in Figura 1 per:

a. trasferire il carico a strati di terreno profondi più resistenti,
b. trasferire il carico anche attraverso tensioni tangenziali d'attrito o d'aderenza lungo il fusto,
c. resistere ad azioni di trazione,
d. resistere ad azioni orizzontali,
e. resistere in gruppo a carichi inclinati,
f. assicurare la stabilità anche in caso di scalzamento degli strati superficiali,
g. trasferire il carico al di sotto di un futuro piano di scavo,
h. attraversare strati di terreno rigonfiante.

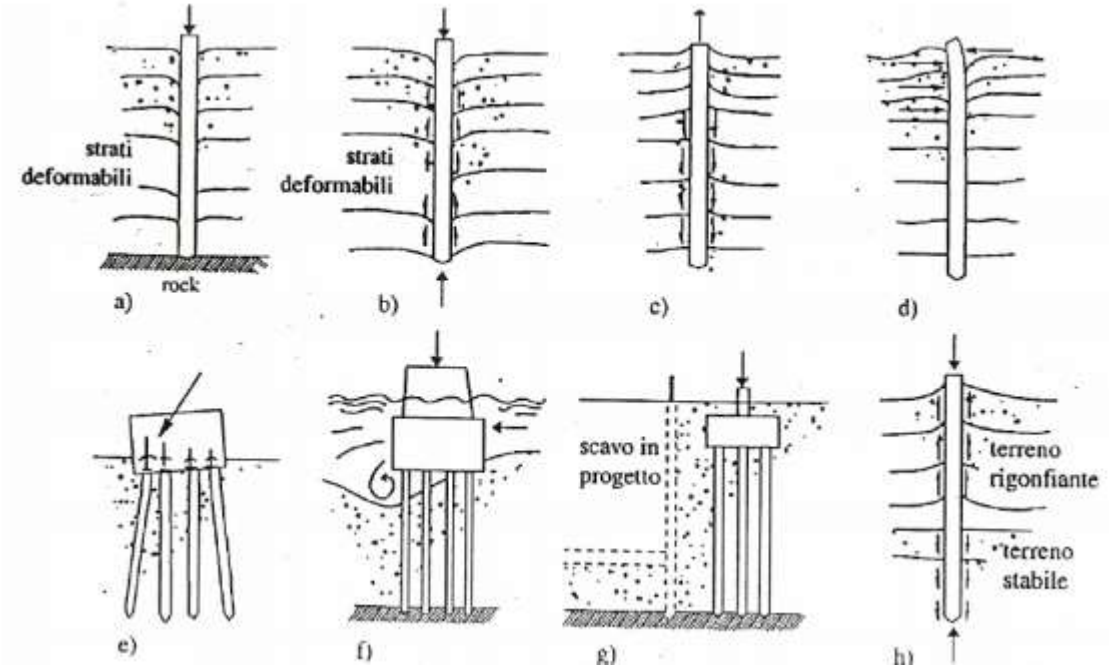


Figura 1 Tipologie di applicazioni dei pali

Per le fondazioni profonde non è trascurabile, ed anzi è spesso prevalente, il contributo alla capacità portante delle tensioni tangenziali d'attrito e di aderenza tra il terreno e la superficie laterale della fondazione.

Le più comuni fondazioni profonde sono i pali di fondazione. Questi possono essere classificati in base a differenti criteri, tra cui materiale, dimensione/diametro e procedimento costruttivo.

In riferimento al diametro, si distinguono pali di grande, medio o piccolo diametro. Come riportato anche nelle NTC 2018 Capitolo 6, i pali con diametro superiore a 800 mm sono definiti pali di grande diametro. Raggiungono anche i 2000 mm e sono generalmente pali trivellati che possono spingersi fino a lunghezze dell'ordine di 20 ÷ 40 m. I pali di medio diametro hanno un diametro compreso tra 300 e 800 mm con lunghezze prevalentemente comprese tra i 5 e i 25 m. I pali di piccolo diametro sono quelli di diametro compreso tra 80 e 300 mm, hanno lunghezze prevalentemente comprese tra 5 e 20 m e generalmente sono realizzati con tecnologie speciali. Il campo delle portate ammissibili può variare da qualche tonnellata ad oltre 500 t per pali di grande diametro.

I pali poi possono essere classificati rispetto al materiale costituente:

- calcestruzzo (prefabbricato o gettato in opera, normale, centrifugato, vibrato, precompresso)
- acciaio
- legno

Infine, i pali vengono suddivisi in tre tipologie principali a seconda del metodo costruttivo, nonché del tipo di "disturbo" arrecato al terreno durante la costruzione del palo, ovvero dello spostamento di terreno indotto:

1. INFISSI: senza asportazione di terreno, prefabbricati o gettati in opera - provocano un notevole spostamento del terreno durante la loro realizzazione, spostando lateralmente e compattando il terreno nel quale andranno a posizionarsi
2. TRIVELLATI: con asportazione di terreno – provocano uno spostamento praticamente nullo del terreno durante la realizzazione poiché il terreno nel quale andranno a posizionarsi viene completamente rimosso prima di realizzare il palo.
3. TRIVELLATI CON ELICA CONTINUA: parziale asportazione di terreno – provocano una condizione di spostamento intermedia (basso spostamento) in cui il suddetto terreno viene solo parzialmente estratto e parzialmente compattato a lato del palo.

Quest'ultimo criterio è il più importante, poiché il comportamento meccanico, resistente e deformativo del sistema palo-terreno è fortemente dipendente, oltre che dal tipo di terreno, dalle modalità di messa in opera del palo e dalle conseguenti modifiche dello stato tensionale preesistente nel terreno. In Tabella 1 sono confrontati i pali battuti con quelli trivellati.

Tabella 1 Confronto tra pali battuti e trivellati

PALI	**BATTUTI**	**TRIVELLATI**
TERRENI ATTRAVERSABILI	notevoli limitazioni in presenza di terreni compatti, strati lapidei, trovanti	possono attraversare qualsiasi terreno (con opportuno sistema di perforazione)
MODIFICHE CHE LA MESSA IN OPERA DEL PALO PROVOCA NEL TERRENO CIRCOSTANTE	- in terreni incoerenti producono un addensamento con conseguente miglioramento delle proprietà meccaniche in terreni coesivi producono rimaneggiamento e diminuzione della resistenza al taglio	decompressione del terreno e peggioramento delle sue caratteristiche meccaniche. In terreni coesivi tale effetto può essere ridotto
DIMENSIONI	Dmax ≅ 60 cm Lmax ≅ 20 m	nessuna limitazione
INCLINAZIONE MASSIMA POSSIBILE	fino a 15°-20°	generalmente impossibile salvo che per pali di piccolo diametro
QUALITÀ DEL CALCESTRUZZO	Ottima	da controllare, può essere molto scadente
ATTREZZATURE	Ingombranti e costose	per pali di grande diametro ingombranti e costose
IMPATTO	vibrazioni e scosse durante la messa in opera	molto minore che per i pali battuti

I pali possono essere infissi nel terreno mediante:

- SUCCESSIONE DI COLPI assestati sulla testa del palo, impiegando un battipalo. Questa tecnica è molto rumorosa e inoltre produce vibrazioni localizzate che, a prescindere da possibili danni prodotti alle proprietà vicine, possono non essere consentite da normative locali o dagli enti preposti alla difesa dell'ambiente;

- APPARECCHIATURA VIBRANTE fissata all'estremità superiore del palo che risulta di solito molto silenziosa e le vibrazioni necessarie all'infissione possono essere non eccessive. Il metodo è meglio applicabile a depositi di terreno scarsamente coesivo;
- REALIZZAZIONE DI UN FORO E SUCCESSIVO INSERIMENTO DEL PALO oppure riempimento della cavità con calcestruzzo, che una volta indurito, viene a costituire il palo. Esistono vari modi per la realizzazione:
  1. Pali senza rivestimento del foro (Western; Franki con cassaforma di espansione alla base);
  2. Pali con cassaforma o camicia di rivestimento (Franki con cassaforma di espansione alla base; tubolare saldato o senza saldature; Western con cassaforma; palo con rastremazione uniforme: Union o Monotube, Raymond standard; Raymond con rastremazione a tratti).

2 INTRODUZIONE ALLA BATTITURA

2.1 CLASSIFICAZIONE DEI PALI INFISSI

Le fondazioni profonde sono realizzate in legno, calcestruzzo o acciaio e vengono in genere infisse mediante battitura tramite l'ausilio di un battipalo montato su uno escavatore. I pali battuti si rivelano in genere dei buoni elementi di fondazione; purtroppo presentano grosse limitazioni di impiego quando si comincia ad avere a che fare con terreni di una certa consistenza (i pali non riescono a penetrare nel terreno e l'eccesso di battitura danneggia la testa e fessura il fusto). Provocano un eccessivo disturbo sonoro e vibrazionale durante l'infissione, fatto che consiglia di evitarli quando siamo in presenza di zone ad alta densità abitativa. Il calcolo di questi pali può venir eseguito con formule statiche, le stesse che si utilizzano con gli altri tipi di palo, o con formule "dinamiche" che mettono direttamente in relazione la battitura (tot centimetri di infissione per ciascun colpo) con la portanza del palo. Queste ultime hanno dimostrato una certa attendibilità solamente nel correlare la battitura con la portanza del palo in terreni non coesivi.

I pali di legno (Figura 2a) hanno una sezione trasversale approssimativamente circolare, con il diametro leggermente decrescente dalla cima del palo alla punta. Il diametro varia tra 150 e 400 mm e la lunghezza tra 6 e 20 m. Il problema principale con pali di legno è la loro durata, dal momento che sono soggetti a decadimento quando alternativamente esposti a bagnatura e asciugatura, come intorno al livello dell'acqua in pali utilizzati in banchine o strutture lungomare o intorno al livello delle acque sotterranee in fondazioni onshore. Anche se sono possibili diversi trattamenti, nessuno è efficace al 100%. Quando i pali di legno sono permanentemente sott'acqua, al contrario, la loro durata può essere piuttosto lunga; ancora oggi le fondazioni di molte costruzioni storiche, ad esempio a Venezia (Italia) o a Stoccolma (Svezia), sono costituite da pali in legno.

I pali in acciaio (Figura 2b) più comuni sono tubi e pali H. I vantaggi dei pali in acciaio sono la loro elevata resistenza alla battitura e alla movimentazione, la loro grande capacità di flessione e la facilità con cui possono essere accorciati o estesi mediante taglio o saldatura. Il loro principale difetto è la suscettibilità alla corrosione nell'ambiente marino.

a) b)

Figura 2 a) Pali di legno, b) Pali tubolari in acciaio (www.maxxpiling.com/products/tubular-piles/)

I pali infissi tipici sono quelli in calcestruzzo prefabbricato o quelli in cemento armato centrifugato (c.a.c.). Si tratta di elementi prefabbricati in genere in calcestruzzo normale, vibrato o centrifugato; il calcestruzzo armato ordinario è preferibile in quasi tutte le circostanze (Alessandrini 2009). Sono fabbricati in impianti e trasportati al sito; solo per grandi progetti possono essere installati impianti temporanei nel sito. La sezione trasversale è generalmente quadrata, esagonale o ottagonale. Hanno una lunghezza preferenziale tra gli 8 e i 12 m, essenzialmente dovuta alla facilità di trasporto stradale. Ma non mancano elementi monolitici fino a

16 e anche 20m (Figura 3). Inoltre, grazie a opportuni sistemi di collegamento tra i singoli "spezzoni" di palo, si possono realizzare elementi più lunghi, che possono raggiungere complessivamente i 30 m e anche oltre, in casi particolari. I diametri di questi pali variano da circa 25 cm fino a circa 60 cm; in casi estremi si arriva a 80 cm (pali cavi) e anche oltre per particolari applicazioni marittime. Quelli a sezione conica invece prevedono generalmente una riduzione di diametro di 1.5 cm ogni metro di lunghezza del palo.

a) b)

Figura 3 a) Pali calcestruzzo di forma circolare cava (www.contecompany.com/what-are-displacement-piles), b) di forma rettangolare (www.structuralguide.com/driven-pile/)

Tabella 2. Tipologie e tecniche di realizzazione dei pali infissi

MATERIALE	**TECNOLOGIA**		**INFISSIONE**
Legno	-		Per battitura
Acciaio	Profilati di varie forme eventualmente saldati fra loro; elementi tubolari		Per battitura o per vibrazione o a pressione
Calcestruzzo	prefabbricati (sempre con armatura)	- in cantiere, di c.a. normale o di c.a.p. - in stabilimento, di c.a. centrifugato	per battitura, con eventuale parziale ausilio di getto d'acqua
	costruiti in opera (con o senza armatura)	- con tubo forma metallico recuperabile	per battitura, per vibrazione
		- con tubo forma metallico a perdere	Per battitura
		- con elementi tubolari in c.a. a perdere	per battitura, a pressione

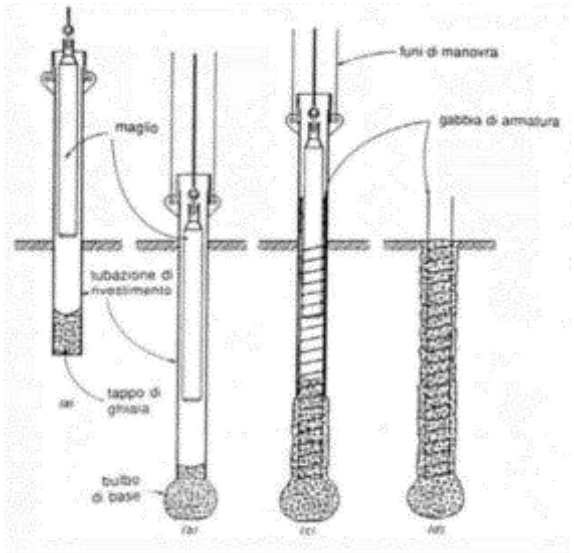
2.2 PALI GETTATI IN OPERA

I pali gettati in opera previa infissione di un palo metallico costituiscono una tecnologia intermedia fra i pali infissi e quelli trivellati, anche se il comportamento risultante rimane più vicino ai primi che ai secondi. In particolare per i cosiddetti pali "Franki" viene utilizzata una tubazione metallica chiusa ad una estremità da un tappo di calcestruzzo a basso contenuto d'acqua che genera un elevato attrito tra la parete della tubazione e il calcestruzzo. Mediante un maglio che batte sul tappo di calcestruzzo, il sistema penetra nel terreno fino alla profondità di progetto alla quale viene fermata la tubazione e con continui colpi del maglio viene espulso il tappo che si rompe e va a formare il bulbo (Figura 4). Successivamente vengono versate nella tubazione delle piccole quantità di calcestruzzo che viene opportunamente vibrato, poi, continuando a battere con il maglio, viene progressivamente sollevata la tubazione metallica. In questo modo si ottiene una colonna di calcestruzzo a contatto con il terreno compattato.

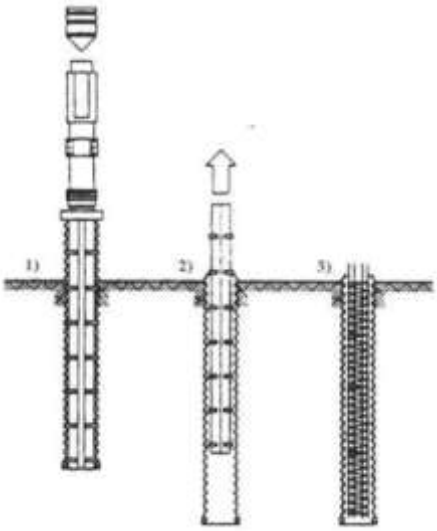
Altre tipologie di pali infissi gettati in opera sono i pali West, i pali Lacòr e i pali Raymond (Figura 4). La realizzazione dei pali West prevede una prima fase di infissione degli elementi tubolari in c.a. prefabbricati,

infilati su di un'asta metallica (mandrino) che è dotata all'estremità inferiore di una puntazza in calcestruzzo a perdere. Una volta raggiunta la profondità richiesta, il mandrino viene estratto e nel foro centrale viene eseguito un getto di calcestruzzo, previa installazione di una gabbia d'armatura. Questa tipologia ha il vantaggio principale che i pali possono essere facilmente regolabili in lunghezza per adattarsi alla profondità di penetrazione desiderata.

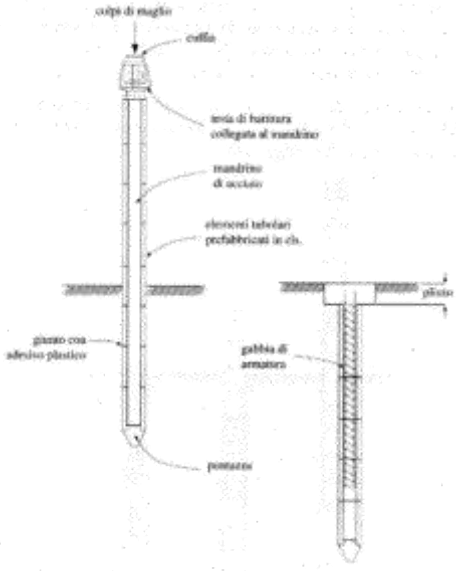
Il pericolo che il calcestruzzo venga dilavato da acque sotterranee o attaccato da sostanze corrosive ha suggerito l'impiego di pali gettati in apposite casseforme metalliche ondulate che, una volta infisse, rimangono a difesa del calcestruzzo. Per i pali Lacòr, si utilizza un tubo in lamierino ondulato che viene infisso tramite un mandrino avente la superficie esterna sagomata come il tubo. Il mandrino è suddiviso longitudinalmente in due parti che vengono espanse meccanicamente in modo da aderire alle pareti interne del tubo. Ciò consente l'adozione di lamierini di ridotto spessore (1,5 ÷ 3 mm). Terminata l'infissione del palo, il mandrino viene contratto ed estratto e si passa, dopo ispezione, alla posa dell'armatura e al getto di calcestruzzo. Il palo Raymond, usato principalmente negli Stati Uniti, viene costruito infiggendo nel terreno elementi di lamierino tronco-conici a diametro variabile, dopo l'inserimento di un mandrino della stessa sezione. Raggiunta la profondità richiesta si estrae il mandrino e si cala l'armatura metallica ed il calcestruzzo formando così un palo in cemento armato entro una cassaforma metallica.



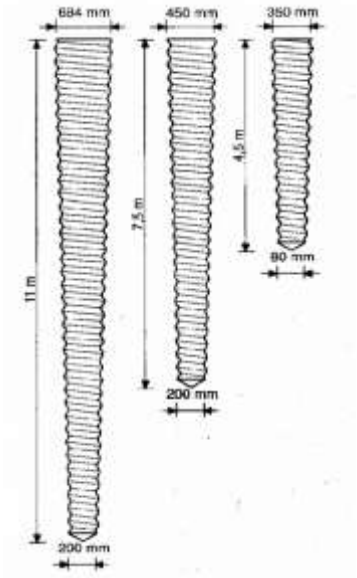
PALI FRANKI



PALI LACOR



PALI WEST



PALI RAYMOND

Figura 4 Alcuni esempi di pali gettati in opera. (Tomlinson e Woodward 2008)

2.3 CENNI STORICI DELLA BATTITURA

Il battipalo nasce come macchina per infiggere tronchi di legno in profondità nel terreno. Utilizzato per rinforzare argini di laghi e fiumi, è molto diffuso ai tempi di Leonardo, che lo descrive in un foglio dedicato a progetti per deviare il corso dell'Arno. È composto da un argano che solleva un peso collegato ad altri due cavi, così da permettere la successiva caduta del peso in maniera lineare sulla testa del palo. Questo sistema trasferisce l'energia al palo. L'operazione poteva essere ripetuta più volte sino ad infiggere il palo alla profondità voluta. Nella parte alta del foglio riportato in Figura 5 è possibile notare il disegno particolareggiato dell'ingegnoso dispositivo che consente di riagganciare automaticamente il peso (maglio) del battipalo dopo la battitura. Il pesante maglio viene sollevato dall'argano e il dente di arresto impedisce alla ruota dentata di girare in senso contrario. Quando il maglio raggiunge la posizione più elevata, due rientranze dei binari fanno aprire la molla che lo trattiene: il maglio ricade e, grazie al suo peso, infigge il tronco nel terreno. L'operazione viene ripetuta più volte fino a raggiungere la profondità desiderata. Il disegno di Leonardo si riferisce a un progetto di studio per la deviazione del corso dell'Arno, eseguito dopo le esperienze accumulate osservando le palificazioni nel milanese e nella città di Pavia.

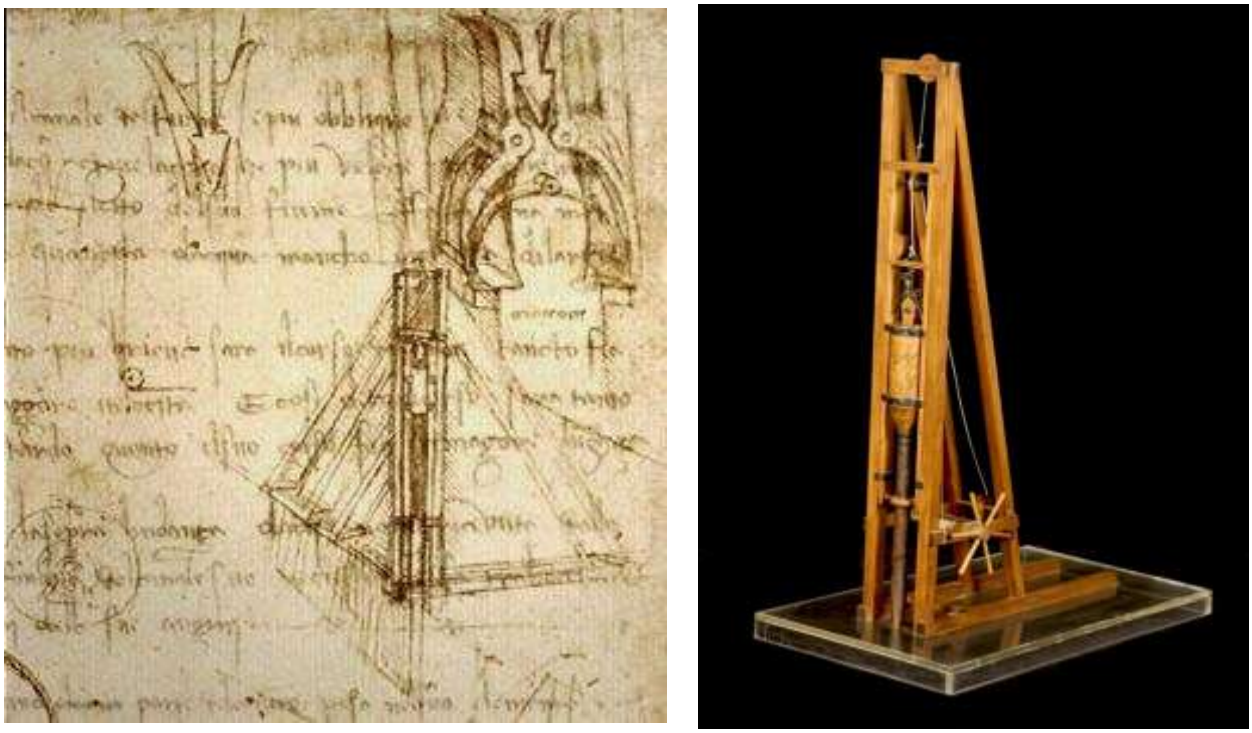


Figura 5 La macchina battipalo progettata da Leonardo da Vinci (Giorgione 2009)

In questo periodo, come senza dubbio per centinaia di anni prima, era stato pienamente riconosciuto che i pali di legno soggetti a cicli di bagnatura e asciugatura erano molto meno durevoli dei pali permanentemente sommersi. Qualora non fosse possibile assicurare una completa e continuativa sommersione, i pali venivano ricoperti di catrame. Allo stesso tempo, dove la battitura comportava la penetrazione in strati pietrosi, venivano montate su pali delle puntazze di ferro.

Nel 1801 o 1802 in Gran Bretagna, John Rennie impiegò per la prima volta la potenza di un motore a vapore per infiggere dei pali al Bell Dock all'ingresso del London Docks. Il maglio fu issato da un motore da 8 cavalli, costruito da Boulton e Watt, che fu usato di nuovo presso le banchine di Hull nel 1804.

Nel 1843, Nasmyth (Figura 6) introdusse un battipalo rivoluzionario in cui il maglio era fissato all'estremità inferiore del cilindro di un motore a vapore. Raggiunse una velocità impressionante di 80 colpi al minuto e fu utilizzato, ad esempio, nel sito del Newcastle High-Level Bridge. Nel 1846, un battipalo ad aria compressa fu proposto da Clarke, Freeman e Varley.

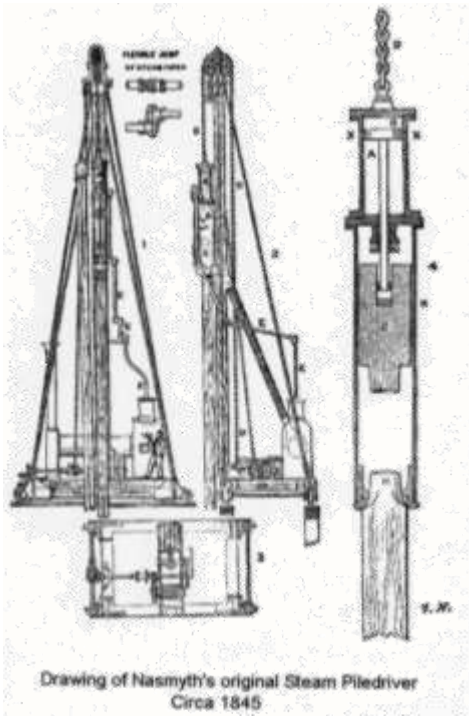


Figura 6 Disegno del battipalo a vapore di Nasmyth. (APE 2011)

Nel 1870 circa, un battipalo alimentato da polvere da sparo fu inventato da un certo signor Shaw di Filadelfia. La macchina aveva diversi vantaggi rispetto a qualsiasi altro tipo disponibile all'epoca, non ultimo il fatto che richiedesse solo un uomo ed un ragazzo per metterla in funzione. Sulla testa del palo era posto un maglio in acciaio fuso in cui era stato formato un incavo sufficiente a contenere alcune once di polvere da sparo. Il maglio era montato su di un telaio e progettato affinché durante la caduta colpisse la polvere da sparo e causasse l'esplosione. Questo permetteva non solo la battitura del palo, ma anche la risalita del maglio alla posizione di partenza pronto per il prossimo scoppio/ciclo. La funzione dell'uomo si limitava a tirare una leva che rilasciava il maglio, mentre il ragazzo ricaricava di polvere da sparo l'incavo del maglio al bisogno. Il funzionamento garantiva 15-20 colpi al minuto.

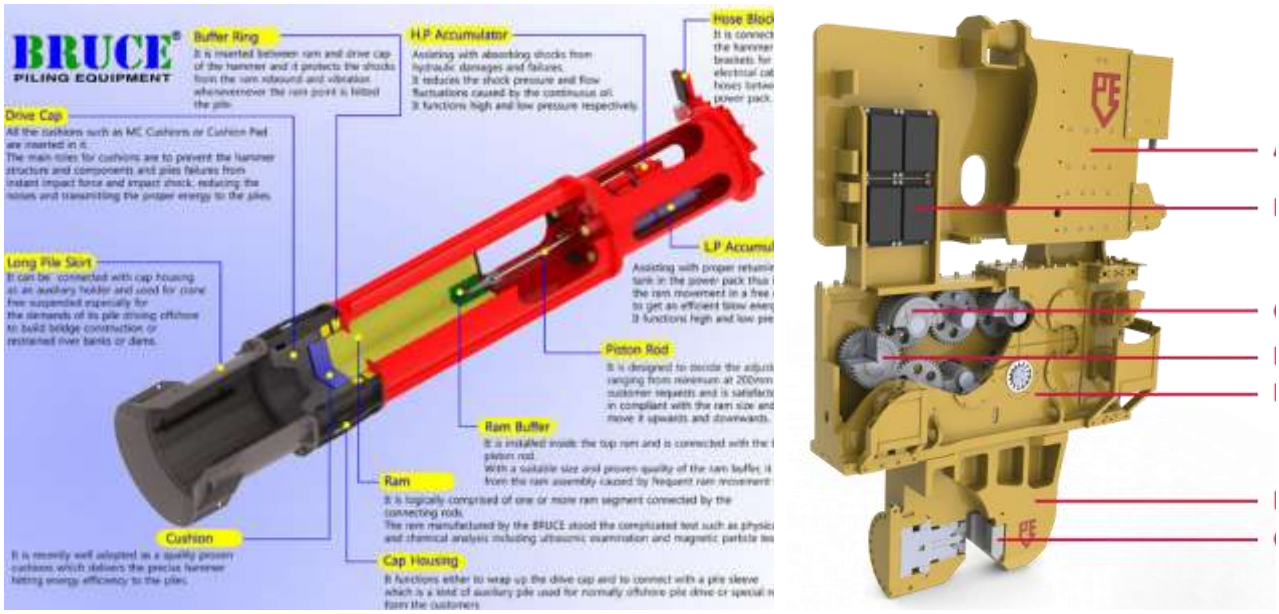
Una macchina di questo tipo fu portata in Inghilterra per la galleria di Severn, ma si rivelò inefficace a causa della tipologia di terreno in cui doveva avvenire l'infissione. Venne poi portato a Londra a St. Katherine's Dock per lavorare nel porto, ma l'esplosione causava un tale stato di allarme tra le autorità portuali che ne ordinarono immediatamente la rimozione.

La stessa macchina fu anche utilizzata per l'infissione dei pali per il terzo ponte sul fiume Elba a Dresda. In questa occasione riscosse successo per la sua efficienza, velocità e costo. 30 pali da 1,8 m a 2,5 m di lunghezza venivano infissi quotidianamente, utilizzando 60 cartucce di polvere da sparo per palo. Il costo risultante era di 8 scellini e 6 pences, per singola infissione.

3 ATTREZZATURA

La posa in opera dei pali prefabbricati è svolta per battitura a mezzo di apposite attrezzature (battipali) in grado di sviluppare l'energia sufficiente a vincere le resistenze opposte dal terreno. L'attività trasmette al terreno delle vibrazioni che si diffondono in direzione radiale con una intensità progressivamente decrescente all'aumentare della distanza dalla sorgente; le vibrazioni possono interferire con strutture confinanti la zona di lavoro e dipendono primariamente dall'energia sviluppata e dalla natura del terreno.

L'infissione può avvenire per impatto o per vibrazione. La seconda metodologia è adatta per sabbia sciolta e satura e viene utilizzata abitualmente per installare pali in acciaio, sezione H e quelli tubolari (Figura 7 b). Il metodo più comune per installare pali infissi, tuttavia, è quello di battere i pali nel terreno colpendolo con il maglio installato sul battipalo.



a) b)

Figura 7 Schema di battipalo ad impatto (a) (www.powerquip.co.kr) e vibrante (b) (www.pve-holland.com)

Il palo da infiggere è posizionato e mantenuto allineato da un telaio in acciaio chiamato traliccio o incastellatura ("lead") che ha un'altezza superiore di alcuni metri alla lunghezza del palo ed è fissato ad una gru (Figura 8). Un certo numero di elementi viene interposto tra il maglio e la testa del palo, al fine di non danneggiare quest'ultimo. Essi sono indicati con vari nomi, come incudine, cuscinetto, cappello ed elmetto.

La realizzazione di fondazioni profonde tramite infissione è un processo intrinsecamente rumoroso. Oggi, man mano che le questioni ambientali diventano più importanti, è necessario sviluppare battipali silenziati o che utilizzino l'uso di coperture antirumore. Inoltre, i moderni sistemi di battitura consentono all'operatore di controllare, direttamente dalla cabina della gru, parametri operativi come la velocità del battipalo, la conseguente energia cinetica e l'altezza di caduta.

La gru, i cavi, il battipalo e l'elmetto sono i componenti principali di qualsiasi sistema di battitura. Possono essere necessarie in determinate circostanze, accorgimenti particolari per facilitare l'infissione quali i "follower", "jetting", "predrilling" e lo "spudding". Al capitolo 5 sono forniti maggiori dettagli.

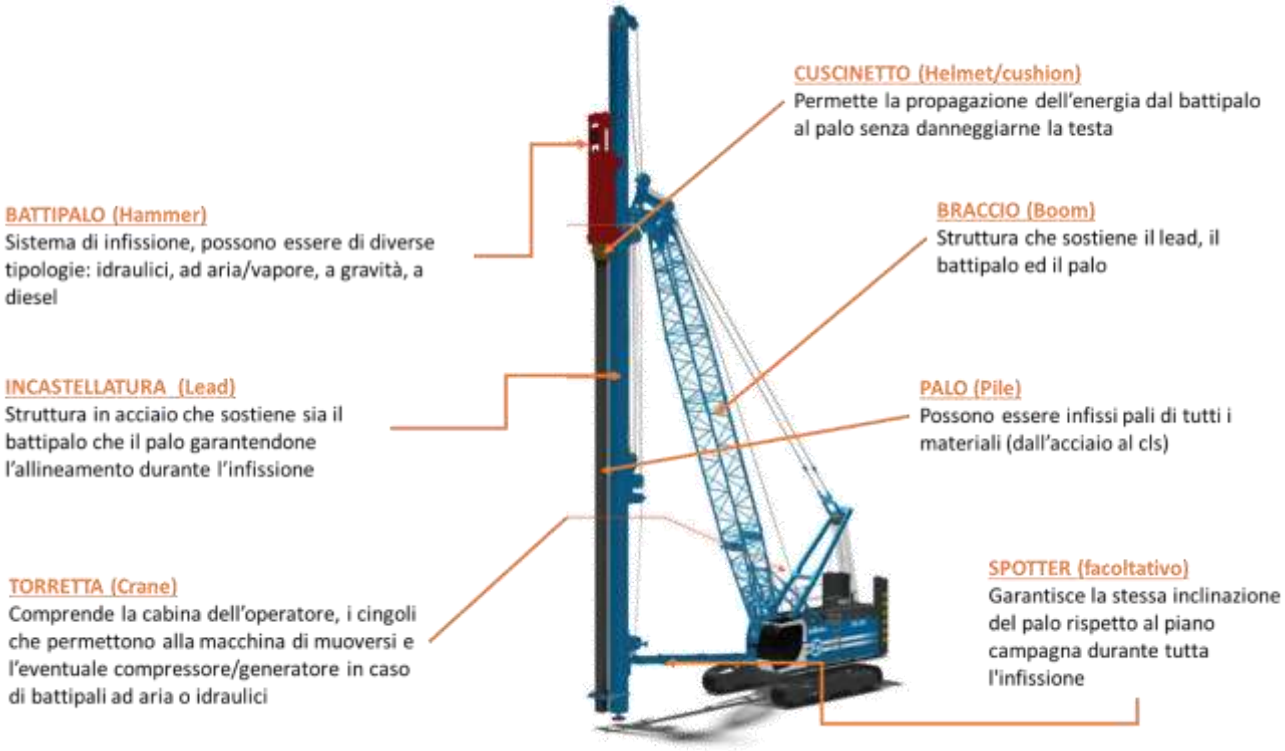


Figura 8 Immagine descrittiva di una tipica gru per la battitura dei pali

3.1 BATTIPALI

Diversi sistemi di infissione sono disponibili e una prima suddivisione consiste in battipali ad impatto (o maglio battente) o sistemi vibranti. Tra quelli ad impatto rientrano:

- battipali a caduta;
- battipali a vapore ad azione singola e a doppia azione;
- battipali ad aria compressa o idraulici
- battipali diesel.

I battipali ad impatto hanno un blocco di acciaio, chiamato maglio, che viene prima sollevato e poi lasciato cadere sulla testa del palo. In caso di infissione in condizioni difficili, c'è il rischio di danneggiare l'estremità superiore del palo. L'altezza di caduta può essere variata per limitare le sollecitazioni sul palo.

In particolare, esistono battipali ad azione singola o ad azione doppia. Nel primo caso, il pistone è collegato ad un maglio, che viene sollevato a monte dal vapore, dall'aria compressa o dal fluido idraulico e quindi lasciato cadere per gravità (Figura 9a). Nei battipali a doppia azione (Figura 9b) la pressione agisce sul pistone sia in salita che in discesa, ottenendo una maggiore forza d'impatto e più impatti per unità di tempo.

I singoli sistemi di infissione sono analizzati nelle prossime sezioni.

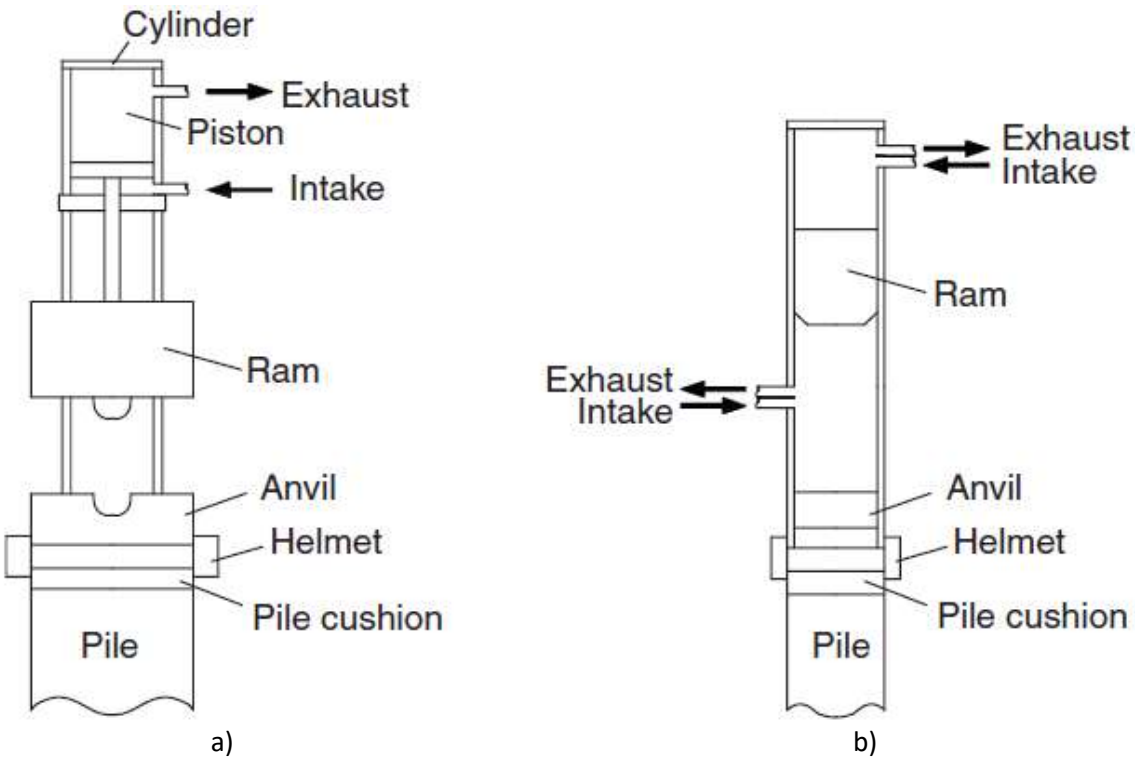


Figura 9 Schema dei sistemi di battitura (a) Singola e (b) Doppio Azione. (Viggiani et al 2012)

3.2 GRU

La gru più comunemente utilizzata per la movimentazione dei pali è storicamente quella cingolata. Le gru cingolate hanno una buona mobilità in condizioni del sito diverse con raggi di azione di 360 gradi. Hanno inoltre una buona stabilità data dalla loro larga base d'appoggio. Sono però da preferire terreni consolidati. Altrimenti si può ricorrere a dei tappeti che fungono da supporti per non far sprofondare la gru nel terreno. Le gru cingolate devono essere trasportate al cantiere in pezzi e poi assemblate da un'altra gru. Una centralina idraulica o un compressore d'aria possono essere montati come contrappeso della gru per facilitare le operazioni di sollevamento dei pali.

Negli ultimi anni, è aumentato l'uso di gru appositamente progettato per l'infissione di pali. Queste speciali piattaforme includono un'incastellatura collegata ad un braccio che può essere rapidamente installata, sollevata e portata alla posizione di battitura verticale utilizzando bracci di supporto a comando idraulico. Quindi, la configurazione del sistema è relativamente veloce senza la necessità di attrezzature pesanti supplementari.

Figura 10 Gru cingolata con traliccio a cavi (Hannigan, et al. 2016)

In Figura 10 è mostrata una gru cingolata con installato un "lead" oscillante.

3.3 LEAD

Il "lead" consente l'allineamento del sistema battipalo-palo. Mantenere l'allineamento del sistema battipalo-palo fa sì che venga trasmesso al palo un colpo centrato ad ogni impatto. I più comuni tipi di "lead" sono illustrati in Figura 11, mentre alcune caratteristiche geometriche sono riportate in Tabella 3.

Tabella 3 Dimensioni di "lead" utilizzati su gru cingolate. (www.powerquip.co.kr)

MODEL		UNIT	FL-457	FL-508	FL-609	FL-660
Diameter		(Ø)	457	508	609	660
Leader Guide (Claw)	Center "L"	(mm)	330	330	600	600
	Diameter	(mm)	70	70	101.6	101.6
Weight Per Meter		(kg)	450	500	600	605
Suited Bruce Hammer		(ton)	3 ~ 4	5 ~ 7	10 ~ 16	20
Total Length		(mm)	**Upon Customr Request**			

• The specification cab be modified for equipment improvements.
• According to customer request, this can be changed for the user's convenience.

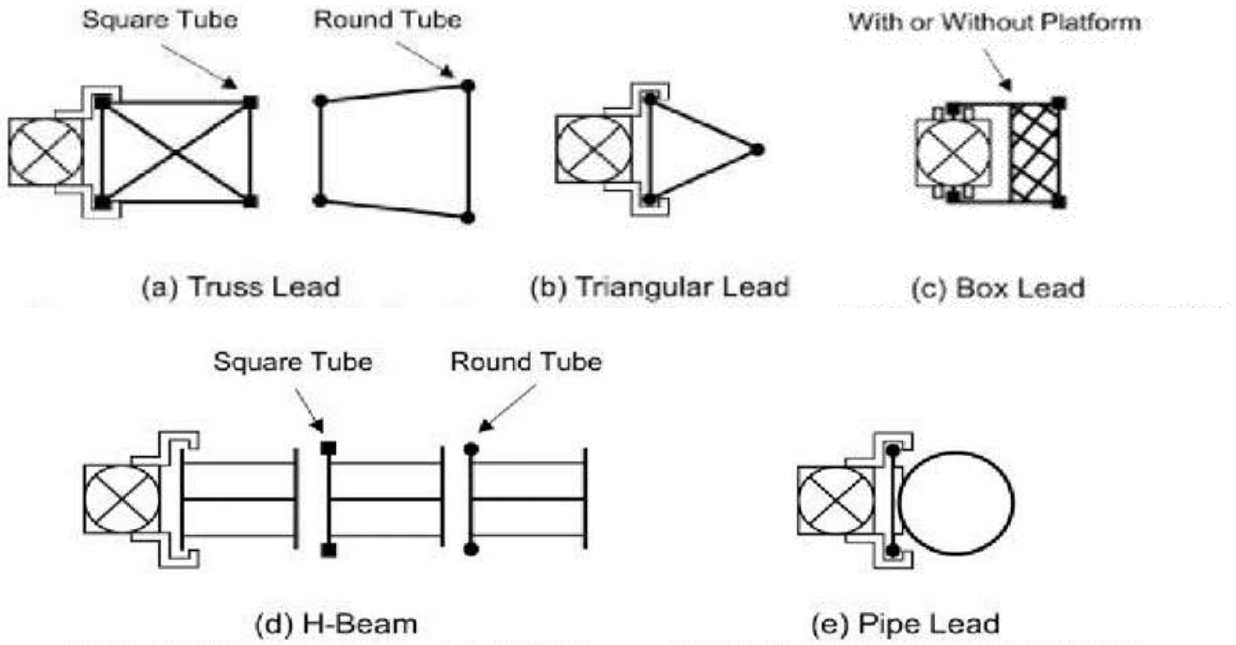


Figura 11 Tipologia di tralicci per l'allineamento battipalo-palo (Hannigan, et al. 2016)

Nella parte inferiore del "lead" è installato un sistema di bloccaggio del palo (Figura 12).

Figura 12 Sistema di bloccaggio del palo ("pile gate") nella zona inferiore del "lead" (Hannigan, et al. 2016)

Il "lead" può essere configurato come:

a. oscillante,
b. fisso,
c. semi-fisso o verticale,
d. per applicazioni offshore.

La configurazione più utilizzata è quella oscillante raffigurata in Figura 13. I "lead" oscillanti sono ampiamente utilizzati per loro semplicità, leggerezza e basso costo. Inoltre non richiedono che la gru sia precisamente allineata al palo. Per garantire la verticalità dell'incastellatura, i cavi che la sostengono devono essere sufficientemente lunghi.

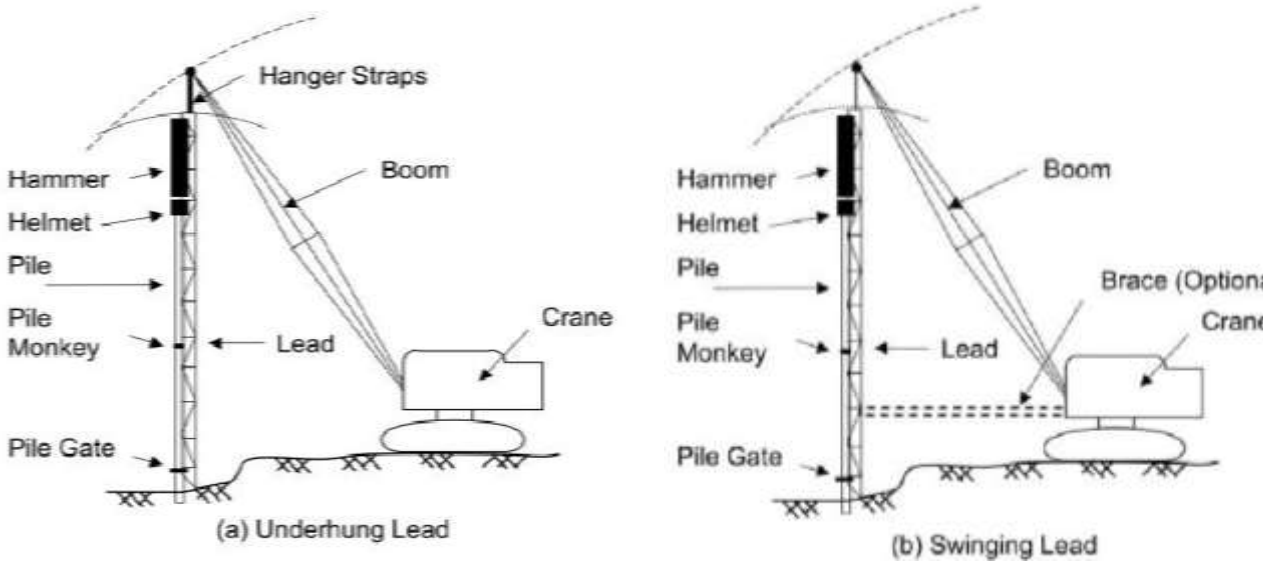


Figura 13 Sistema di "lead" oscillante *(Hannigan, et al. 2016)*

Le incastellature fisse (Figura 14a) sono installate direttamente sull'estremità superiore del braccio della gru. La parte inferiore del "lead" è inoltre collegata alla gru tramite un elemento rigido chiamato "spotter" o "brace". Un esempio è riportato in Figura 15. I "lead" fissi assicurano un maggiore allineamento durante la battitura, ma richiedono più tempo per il loro riposizionamento.

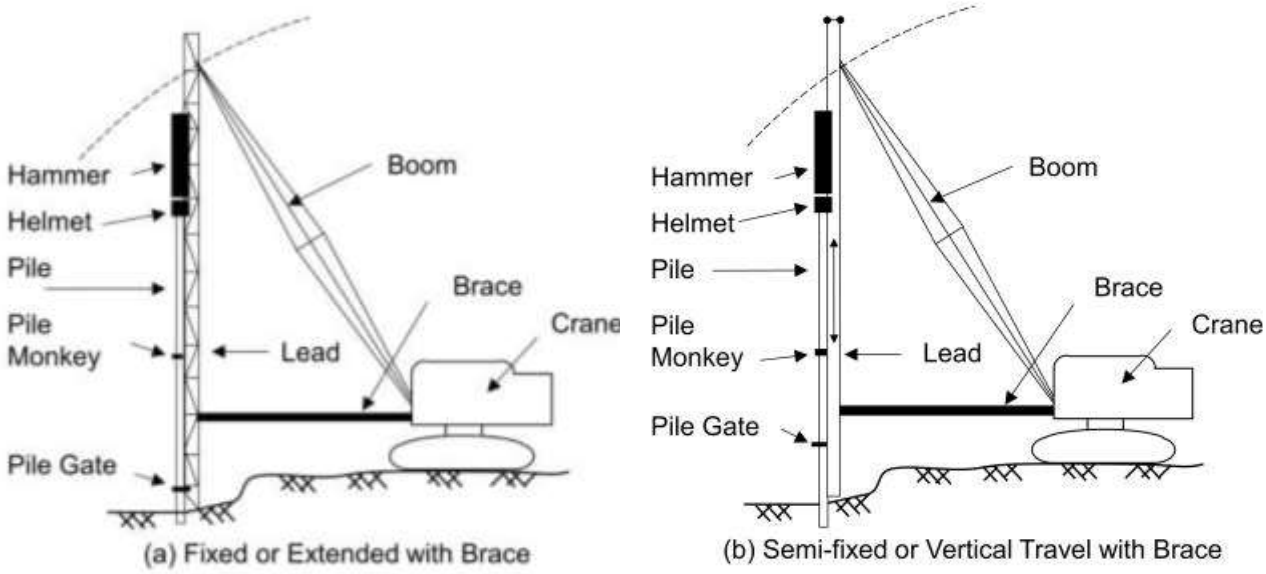
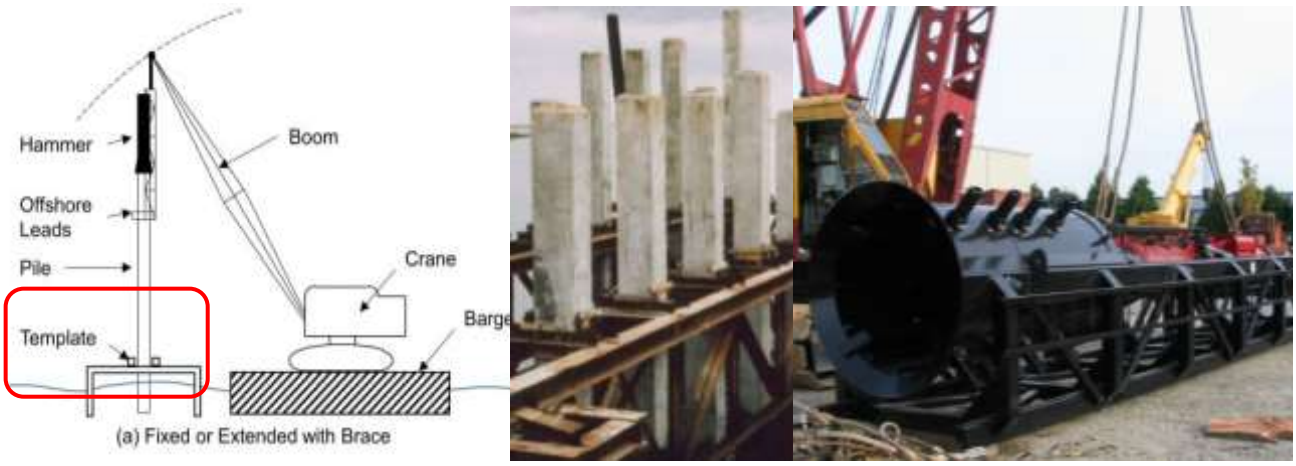


Figura 14 Sistema di "lead" fisso con collegamento tramite "brace" (Hannigan, et al. 2016)

Figura 15 "Lead" fisso con compressore montato nella parte posteriore della gru utilizzato anche come bilanciamento dei carichi (Hannigan, et al. 2016)

I "lead" per applicazioni offshore sono simili ai "lead" oscillanti in quanto sono sufficientemente liberi di ruotare per allineare il battipalo alla testa del palo (Figura 16a), ma sono relativamente corti e provvisti di un supporto per sostenere il palo (Figura 16c). Oltre al "lead", si utilizza una struttura prefabbricata o costruita in situ in acciaio, chiamata "template", in cui vengono inseriti i pali per mantenerli nella posizione corretta durante la battitura (Figura 16b).



a) b) c)

Figura 16 Sistema offshore (a) schema di una ipotetica infissione in mare, b) "template" realizzato per infissione di pali in c.a. offshore, c) Dettaglio di "lead" offshore. (APE 2011)

3.4 ELMETTO

La Figura 17 mostra i componenti di un tipico elmetto con relativa nomenclatura. La configurazione dell'elmetto e le dimensioni utilizzate dipendono dal tipo di "lead", di palo e di battipalo utilizzato per l'infissione. Gli elmetti possono essere fabbricati come monoblocco adattandosi a pali di sezione specifica, o possono essere costituiti da due pezzi ovvero da un elmetto universale e un inserto che si adatti a vari tipi e dimensioni di pali. La scelta dell'elmetto corretto da utilizzare per uno specifico battipalo è consigliata dagli stessi produttori, fornitori e appaltatori.

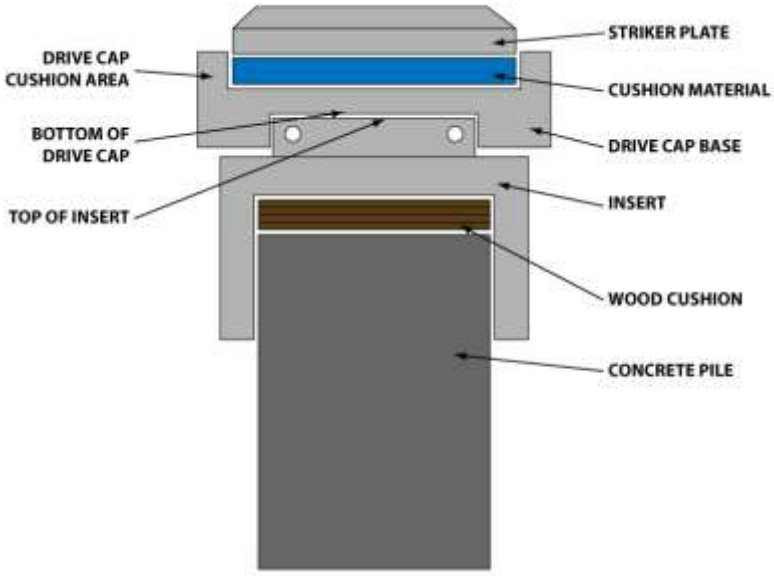


Figura 17 Sezione di un elmetto con tutti i relativi componenti che lo costituiscono (APE 2021)

Gli elmetti monoblocco o gli inserti dovrebbero essere circa 0,25-0,50 cm più grandi del diametro del palo. Il corretto allineamento dei pali è particolarmente critico per i pali prefabbricati in calcestruzzo. Figura 18 mostra degli esempi di elmetti monoblocco e inserti adatti a differenti tipologie di palo.

Inserto per pali in legno

Inserto per pali H in acciaio

Per pali quadrati in c.a.

Per pali cilindrici in c.a.

Universale

Per pali tubolari in acciaio

Figura 18 Tipologie di elmetto (www.vulcanhammer.com).

3.5 CUSCINETTI

La maggior parte dei battipali utilizza un cuscinetto tra il battipalo e l'elmetto al fine di proteggere il maglio dall'usura. Tuttavia, ne esistono modelli ad "azionamento diretto" in cui il cuscinetto è sostituito da una piastra in acciaio. Un'altra serie di cuscinetti è interposta tra elmetto e il palo per evitare il contatto e ridurre la necessità di un taglio successivo. Se il cuscinetto non svolge a dovere la sua funzione, si creano danni al battipalo, all'elmetto e al palo.

I cuscinetti utilizzati sono composti solitamente da materiali durevoli artificiali quali micarta, nylon, uretano o altri polimeri. Col tempo, i materiali dei cuscinetti a causa dei colpi del battipalo tendono ad irrigidirsi perdendo di efficacia. Di conseguenza si verifica una riduzione significativa dell'energia trasferita al palo. La vita utile di un cuscinetto è mediamente di 200 ore di battitura, per cui è sufficiente per la durata di progetti di piccole entità.

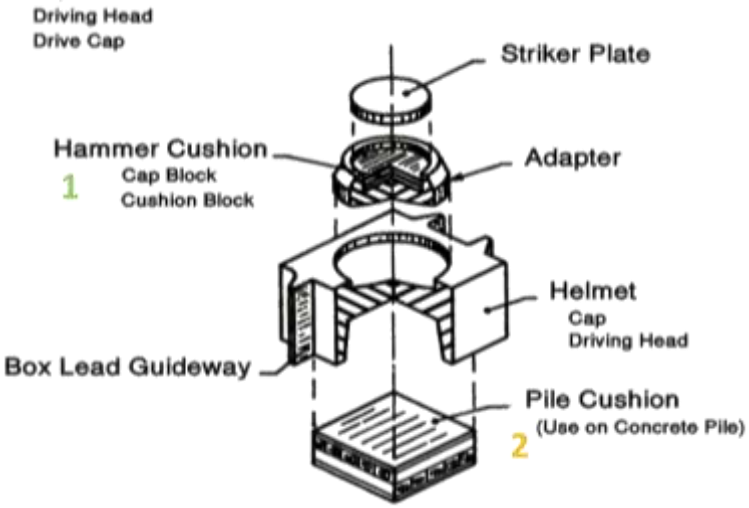


Figura 19 Esploso di un elmetto con i relativi cuscinetti. (Vesić 1977)

In passato, erano comunemente usati cuscinetti di legno spessi circa 15 cm disposti con la venatura parallela all'asse del palo. Questo tipo di ammortizzazione ha lo svantaggio di schiacciarsi rapidamente, oltre ad avere proprietà elastiche variabili durante la battitura. I cuscinetti in legno sono oramai non ammissibili viste le alternative tecnologiche disponibili molto più performanti. Materiali imbottiti contenenti fibre di amianto, utilizzati in passato, non sono più accettabili per il rischio che pongono alla salute.

I materiali brevettati per i cuscinetti hanno caratteristiche di trasmissione dell'energia migliori di un blocco di legno duro, mantengono quasi costanti le proprietà elastiche e hanno una durata relativamente lunga. Il loro utilizzo si traduce in una migliore trasmissione dell'energia dal battipalo al palo e una battitura più uniforme. Ispezioni periodiche dell'usura e dello spessore del cuscinetto dovrebbero essere eseguite su grandi progetti.

Molti battipali richiedono uno spessore del cuscinetto specifico per un corretto funzionamento. Uno spessore improprio del cuscinetto si tradurrà in scarse prestazioni del battipalo. Alcuni cuscinetti artificiali sono strutturati da laminati di alluminio e un altro materiale come micarta. L'alluminio viene utilizzato per dissipare il calore generato dall'impatto, prolungando così la vita del cuscinetto. La Figura 20 mostra i vari materiali come Nylon blu (Figura 20a), compensato (Figura 20b), alluminio (Figura 20 c), Conbest (Figura 20d).

a) Cast Nylon
https://www.redwoodplastics.com

b) Compensato
https://www.ufpconcrete.com

c) Alluminio www.interstateplastics.com

d) Materiale fenolico (Hannigan, et al. 2016)

Figura 20 Tipologie di cuscinetti presenti in commercio

4 TIPOLOGIA DI BATTIPALI.

Una panoramica dei sistemi di infissione è fornita da Hannigan et al. (2016) e riportata in Figura 21.

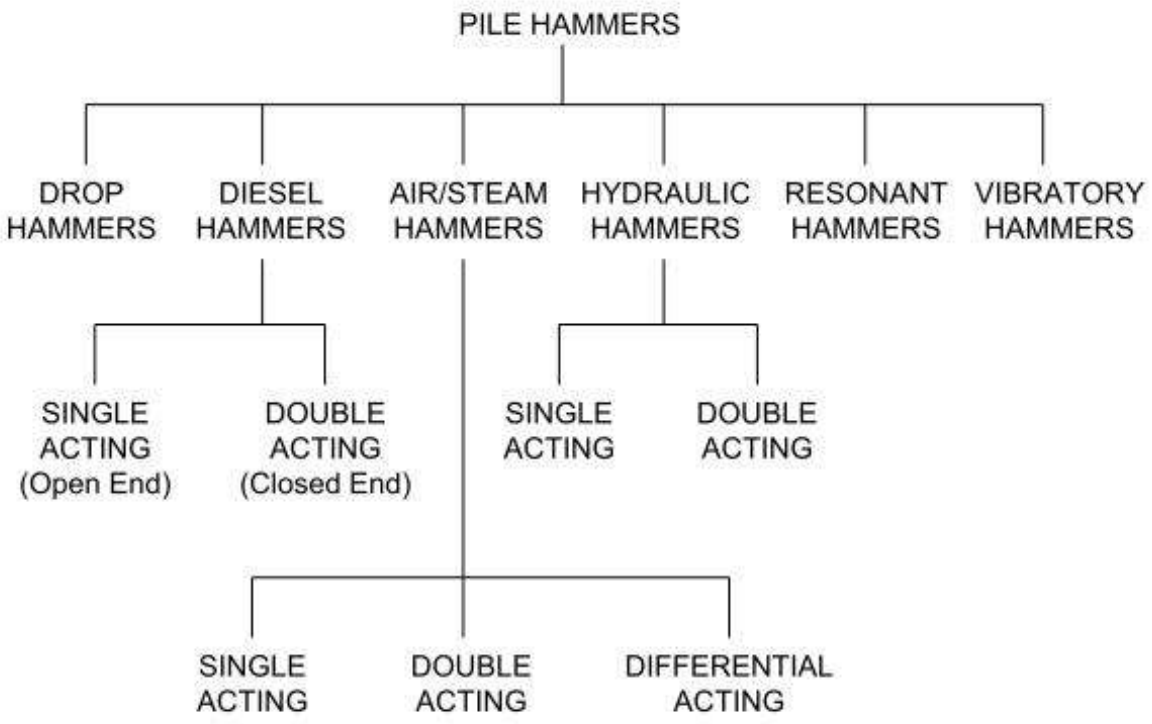


Figura 21 Classificazione dei battipali (Hannigan, et al. 2016)

Secondo Fleming et al 2009, i sistemi di infissione si suddividono in battipali a maglio battente, ad esplosione o a vibrazioni. Nel 2007, Rausche e Klesney propongono un'ulteriore classificazione in battipali ad impatto (combustione interna o combustione esterna) o a vibrazione.

Tabella 4. Riepilogo delle classificazioni dei sistemi di infissione

	Versioni disponibili	Fleming, et al. 2009	Rausche & Klesney 2007
DROP HAMMER **Battipalo a caduta libera**	-	Maglio battente	Impatti a combustione esterna
ACTING AIR/STEAM HAMMERS **Battipalo ad aria / vapore**	• A singola azione • A doppia azione • A pressione differenziale	Maglio battente	Impatti a combustione esterna
ACTIVE DIESEL HAMMERS **Battipalo diesel**	• A singola azione (estremità aperta) • A doppia azione (estremità chiusa)	Esplosioni	Impatti a combustione interna
ACTING HYDRAULIC HAMMERS **Battipali idraulici**	• A singola azione • A doppia azione	Maglio battente	Impatti a combustione esterna
VIBRATORY HAMMERS **Sistemi infissione vibranti**	-	Vibrazioni	Vibrazione
RESONANT HAMMERS **Sistemi infissione risonanti**	-	Vibrazioni	Vibrazione

Per i battipali ad impatto, si definisce l'efficienza (η) come rapporto tra energia cinetica giusto prima dell'impatto e l'energia potenziale (o nominale, "rated energy"). L'energia potenziale è definita come

$$E_P = W_R\, h$$

dove W_R indica il peso del maglio e h l'altezza di caduta. L'energia cinetica è calcolata con

$$E_K = ½\, m_R\, v_i^2$$

dove m_R è la massa del maglio e v_i è la velocità di impatto ($v_i = \sqrt{2gh\eta}$). L'efficienza (η) si ottiene quindi misurando la velocità, in particolare $\eta = v_i^2/(2gh)$.

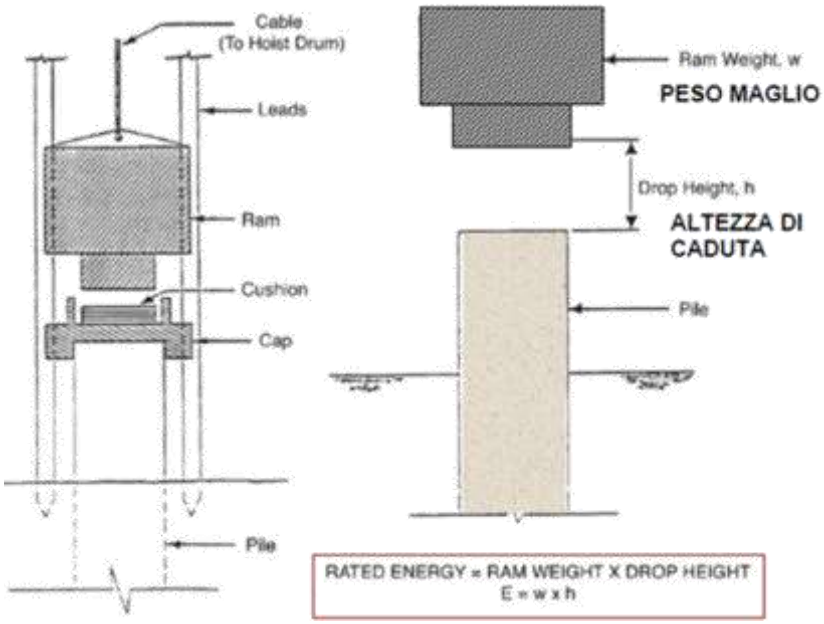


Figura 22. Schematizzazione di un battipalo ad impatto

Ogni sistema di infissione (battipalo) ha una propria efficienza. Ad esempio, al battipalo a combustione interna si associa un'efficienza pari a 80%. Controllando la velocità d'impatto l'efficienza arriva anche al 90-95% (non il 100% per possibili disallineamenti tra maglio e palo). Le efficienze calcolate tramite il programma di calcolo GRLWEAP, meglio descritto a seguire, sono riportate in Tabella 5.

Tabella 5 Valori di efficienza dei sistemi di battitura definiti da GRLWEAP

TIPO MARTELLO	EFFICIENZA DEL BATTIPALO GRLWEAP	INCERTEZZE
A CADUTA LIBERA	0.5	Altezza di caduta, attrito e perdite del verricello
DIESEL SINGOLA AZIONE	0.8	Altezza di caduta, attrito, allineamento
DIESEL DOPPIA AZIONE	0.8	Altezza di caduta, attrito, allineamento
ARIA/VAPORE SINGOLA AZIONE	0.67	Altezza di caduta, "preadmision", attrito, allineamento
ARIA/VAPORE DOPPIA AZIONE	0.50	"preadmision", attrito, allineamento, ridotta pressione
IDRAULICI CON MONITOR	0.95	Allineamento
IDRAULICI SENZA MONITOR	0.8	
IDRAULICI CON POTENZA ASSISTITA	0.8	Altezza di caduta, allineamento, attrito, assistenza della potenza

4.1 BATTIPALI A CADUTA LIBERA

Di battipalo come accennato prima ne esistono diverse tipologie, tutte sono legate però dallo stesso principio di funzionamento e cioè da un sistema che fa alzare e abbassare di colpo un maglio sulla testa del palo che man mano affonda sul terreno. Il battipalo a caduta libera ("drop hammer") è il battipalo più tradizionale e più rudimentale per l'infissione ad impatto. Il peso del maglio è approssimativamente uguale a quello del palo.

Figura 23 Esempio di battipalo a caduta libera (Hannigan, et al. 2016)

Su questi sistemi il maglio è appeso con un cavo che viene fatto scorrere a sua volta su una carrucola posta nella parte più alta del braccio della gru. Il cavo viene tirato da un verricello comandato da un motore a scoppio o elettrico. Il colpo del battipalo è variabile a causa della diversa altezza di caduta e spesso il procedimento di utilizzo ne provoca uno scarso controllo. La caduta avviene lungo delle guide/binari per garantire che l'impatto avvenga precisamente sulla testa del palo. L'efficienza di caduta è ridotta dall'inerzia rotazionale del paranco che sostiene il cavo.

Idealmente, l'operatore della gru attiva il sistema di sollevamento immediatamente dopo l'impatto per evitare un'eccessiva fuoriuscita del cavo. Se l'operatore innesta prematuramente il sistema, o se questa è parzialmente innestata durante la battitura, l'efficienza di caduta e l'energia d'impatto si riducono.

La velocità di funzionamento del battipalo (colpi/minuto) dipende dall'abilità dell'operatore e dall'altezza di caduta utilizzata, ma è generalmente molto lenta (5-10 colpi al minuto).

In generale, i battipali a caduta libera non sono efficienti come gli altri battipali a impatto, ma sono economici e semplici da usare e richiedono poca manutenzione. L'uso corrente di questi battipali è generalmente limitato agli impianti in cui la resistenza ultima richiesta dai pali non sia elevata.

Uno dei maggiori rischi nell'uso di un battipalo a caduta libera è di danneggiare il palo. Le sollecitazioni generalmente aumentano con l'altezza di caduta del maglio (colpo di battipalo) causa di un maggior impatto sul palo. Pertanto, bisogna regolare la corsa massima dal fine di evitare che si verifichino danni sul palo.

Durante l'infissione deve essere assicurato un giusto equilibrio tra un adeguato controllo direzionale e il consentire un leggero movimento del palo all'interno del sistema di bloccaggio posto alla base del "lead". Torsione o leggeri spostamenti laterali si verificano spesso durante la battitura. Se questo è impedito da un serraggio troppo stretto, o peggio, inclinando il "lead" dopo aver iniziato la battitura, il palo può essere

sollecitato a torsione o flessione senza riportare danni evidenti in superficie. Una leggera inclinazione raramente influisce sulle prestazioni del palo, e una piccola deviazione da una posizione specificata può essere spesso tollerata. Una tolleranza di posizionamento di 75 mm e un massimo di 1 su 75 sulla linea assiale per i pali verticali sono tipiche come indicato nella specifica (Institution of Civil Engineers 2016).

a) b)

Figura 24 a) Battipalo a caduta cingolato (www.equipile.com), b)Battipalo con "lead" e supporto per la sollevazione del palo. (Fleming, et al. 2009)

I pesi del battipalo a caduta libera variano generalmente da 0,5 a 2 volte il peso del palo, mentre le altezze di caduta da 0,2 a 2 m. Poiché le sollecitazioni di picco alla testa del palo possono essere notevolmente aumentate se il maglio colpisce il palo eccentricamente, un maglio lungo e stretto è preferibile ad uno corto e di grande diametro.

Spesso i danni all'estremità superiore del palo sono il risultato dell'utilizzo di un battipalo troppo leggero che comporta una battitura troppo prolungata, piuttosto che essere causati da battipali troppo pesanti.

Figura 25 mostra come cambia l'efficienza di battitura (espressa come "useful energy") al variare del rapporto tra peso del battipalo e quello del palo. Nello specifico si fa riferimento ad un palo in c.a. a sezione quadrata lungo 15,2 m con un peso pari a 4,7 tonnellate. L'altezza di caduta è mantenuta costante e pari a 0.9 m. La frazione di energia trasmessa al palo passa dal 5% se si utilizza un battipalo con rapporto di peso battipalo/palo di 0,32 a quasi il 50% con un rapporto di 1,06. Le perdite di inerzia e le perdite temporanee di compressione si riducono man mano che il rapporto aumenta incrementando l'energia disponibile per l'infissione.

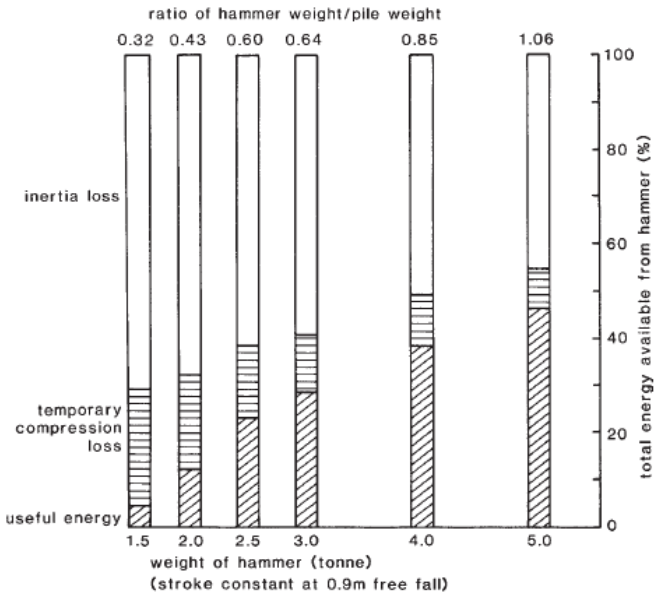


Figura 25 Distribuzione di energia durante l'infissione di un palo di c.a. prefabbricato per vari pesi del battipalo. (Fleming, et al. 2009)

Le sollecitazioni massime all'estremità superiore di un palo possono essere calcolate dalle equazioni di Broms (1978), come segue:

i. Per un palo di calcestruzzo precompresso $\sigma_h = 3\sqrt{h_e}$ MN/m^2
ii. Per un palo di acciaio (con imballaggio in legno) $\sigma_h = 12\sqrt{h_e}$ MN/m^2
iii. Per un palo di acciaio (senza imballaggio di legno) $\sigma_h = 18\sqrt{h_e}$ MN/m^2
iv. Per un palo di legname $\sigma_h = 1{,}2\sqrt{h_e}$ MN/m^2

dove σ_h indica lo sforzo massimo, e h_e (cm) indica l'altezza equivalente di caduta libera del battipalo. Notare che, al momento dell'impatto, la velocità teorica v_0 del maglio, considerata un'efficienza pari a 1, è data da:

$$v_0 = \sqrt{2h_e g}$$

L'effetto della massa del maglio è quello di alterare la lunghezza dell'onda prodotta nel palo. La lunghezza Lw dell'onda è data approssimativamente dalla relazione

$$Lw = \frac{3W_h}{W_p/L}$$

dove W_h indica il peso totale del battipalo e W_p/L indica il peso del palo per unità di lunghezza.

Durante la battitura, le condizioni del terreno determineranno il modo in cui le sollecitazioni vengono trasmesse dal battipalo al palo. In condizioni di infissione facili, lo sforzo di compressione si riflette dall'estremità inferiore del palo come un'onda di trazione ("tensile wave"). Quando la dimensione del palo supera leggermente la metà della lunghezza d'onda ("tensile wave"), è possibile che nella testa del palo si verifichino sforzi di trazione. Questi possono essere dannosi per pali in c.a. prefabbricati, ed è bene ridurre l'altezza di caduta, soprattutto se si utilizzano battipali leggeri, per infissioni di pali lunghi in terreni teneri.
Quando si verificano condizioni di battitura difficili, l'onda di compressione iniziale viene riflessa all'estremità inferiore del palo come onda di compressione. A seconda della dinamica del contatto palo/battipalo, questa onda di compressione può essere ulteriormente riflessa come onda di trazione all'estremità superiore del palo se, nel momento in cui l'onda di ritorno arriva, il battipalo non è in contatto con il palo. Grandi sollecitazioni di compressione si verificano alle estremità del palo quando si incontrano ostruzioni o strati densi che possono essere sufficienti per causare la deformazione dei pali in acciaio.

4.2 BATTIPALI A VAPORE o ARIA

I battipali a vapore/aria compressa sono disponibili sia in configurazione singola azione che doppia azione. Il battipalo a singola azione solleva il maglio tramite un mezzo pressurizzato permettendogli poi di cadere per gravità. Nel battipalo aria/vapore a doppia azione, l'aria compressa o il vapore sono utilizzati sia per sollevare il pistone (e quindi il maglio) sia per spingerlo verso il basso durante la battitura del palo. Richiedono quindi un compressore o un impianto a vapore per il loro funzionamento e rientrano pertanto nella categoria di battipali a combustione esterna. La fornitura di vapore o aria sia per i battipali a singola azione che per i battipali a doppia azione dovrebbe essere almeno pari al 125% del consumo nominale dichiarato dal produttore del battipalo. Il battipalo a doppia azione consuma molta più aria rispetto al battipalo a singola azione. Anche se originariamente sviluppato per sfruttare la potenza del vapore, la stragrande maggioranza di questi battipali oggi opera con aria compressa.

I battipali ad azione singola hanno una massa compresa tra 2,5 e 6 tonnellate con un'altezza massima di caduta di 1,4 m. Il battipalo ad azione singola si adatta meglio alla battitura di pali in legno o calcestruzzo prefabbricato. La caduta del maglio è limitata in altezza ed è controllata individualmente dall'operatore. Il battipalo ad azione singola è adatto per la battitura in argille dure, dove un minore numero di colpi con un maglio pesante sono più efficienti rispetto ad utilizzare un battipalo con un maglio piccolo con un maggiore numero di colpi, così facendo si potrebbe danneggiare la testa del palo. I battipali a doppia azione hanno masse che vanno da 8,6 a 125 tonnellate con una corsa massima di 1,75 m. Sono completamente automatici con corsa variabile.

Esiste un terzo battipalo ad aria/vapore che viene definito DIFFERENZIALE. Si distingue da quello a doppia azione per la presenza di due pistoni di diametro diverso.

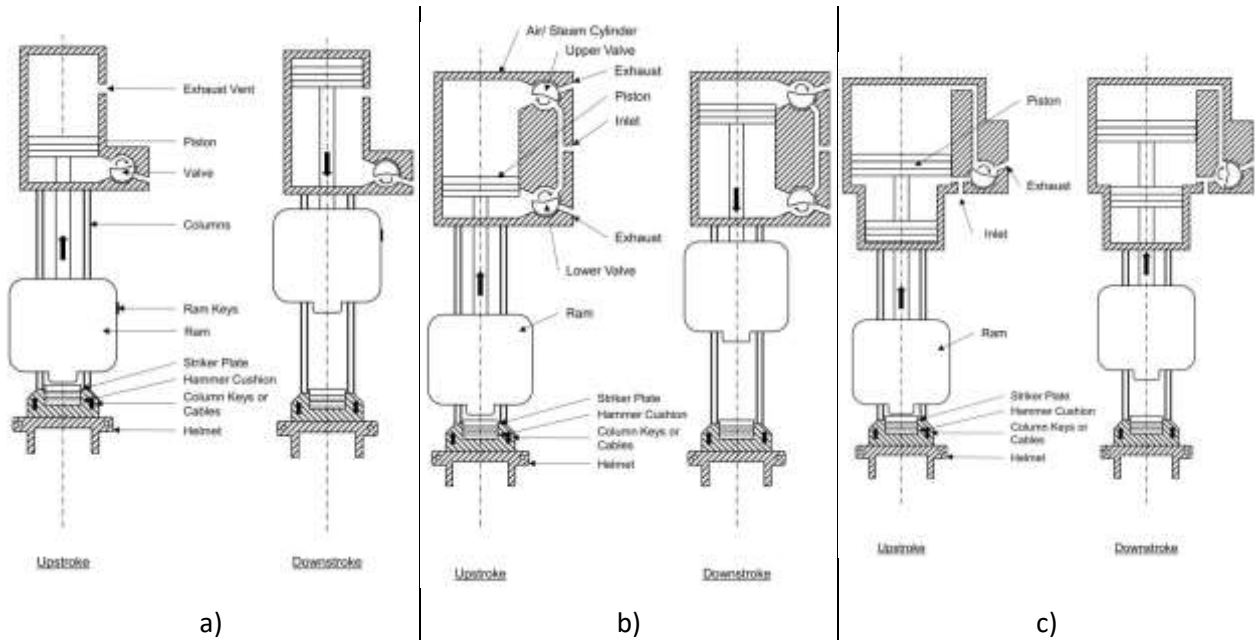


Figura 26 Schema di funzionamento dei battipali ad aria/vapore a) Singola azione, b) Doppia azione, c) A pressione differenziale. (Hannigan, et al. 2016)

4.2.1 Singola Azione

I battipali ad aria/vapore a singola azione sono essenzialmente battipali a caduta per i quali il cavo di sollevamento è stata sostituita da un mezzo pressurizzato, a vapore o ad aria. Per sollevare il maglio con la pressione motrice, si utilizza il principio del motore a vapore a un cilindro. Il battipalo è costituito da un blocco compatto con il maglio fissato alla base di un'asta collegata al pistone che gli permette il movimento alternato. Una fotografia di un tipico battipalo ad azione singola aria/vapore è presentata nella Figura 27.

Figura 27 Battipalo aria/vapore a singola azione. (www.vulcanhammer.com)

Durante il ciclo di salita, il pistone viene sollevato dalla pressione dell'aria o del vapore che agisce contro un pistone alloggiato nella testa del battipalo. Il pistone a sua volta è collegato al maglio da un'asta. Una volta che il maglio è sollevato ad una determinata altezza, viene aperta la valvola e quindi l'aria/vapore che ha garantito il sollevamento del pistone viene espulsa, così da permettere al maglio di cadere verso il palo grazie alla forza di gravità. Durante il ciclo discendente, il maglio cade per effetto della gravità impattando contro l'elmetto posto tra il battipalo e la testa del palo. Appena prima dell'impatto, la valvola di pressione viene attivata e la pressione entra nuovamente nel cilindro. Questo si verifica circa 5 centimetri circa prima dell'impatto, ma dipende dall'avere il corretto spessore del cuscinetto. Se il cuscinetto non è spesso abbastanza, allora la pressione viene introdotta troppo presto, riducendo l'energia di impatto del maglio. Questa condizione è indicata come "preadmission."

Le forze dinamiche esercitate su un palo da un battipalo a singola azione hanno la stessa breve durata di quelle esercitate da un battipalo a caduta libera. Poiché i colpi operativi sono generalmente con altezze di caduta inferiori, le accelerazioni generate dai battipali ad aria/vapore ad azione singola non raggiungono la grandezza dei battipali a caduta libera. Alcuni battipali possono essere dotati di due colpi nominali, uno a corsa piena e uno di altezza inferiore. La corsa massima dei battipali ad aria/vapore a singola azione varia generalmente da 91.44 a 152.40 cm. I battipali a singola azione aria/ vapore di solito sono notevolmente più pesanti di quelli a caduta libera. I battipali ad aria/vapore a singola azione presentano i vantaggi di costi contenuti di funzionamento e manutenzione relativamente semplici. Possono essere utilizzati per molti tipi di pali, in particolare grandi pali in c.a. e acciaio.

4.2.2 Doppia azione

Il principio di funzionamento di un battipalo a doppia azione aria/vapore è illustrato nella Figura 26b. Per un battipalo a doppia azione, il maglio viene sollevato da aria pressurizzata o vapore durante la salita. Man mano che il pistone si avvicina all'altezza massima di caduta, la valvola inferiore dell'aria si apre, permettendo alla camera inferiore del cilindro di rilasciare l'aria pressurizzata. Una volta che il pistone raggiunge la corsa piena, la valvola superiore si chiude per immettere aria pressurizzata o vapore al cilindro superiore. La gravità e la pressione superiore del cilindro accelerano il pistone attraverso la sua caduta verso il basso.
Durante l'utilizzo in terreni duri ci potrebbe essere una situazione di rimbalzo del palo. Per impedire un eccessivo sollevamento del battipalo, la pressione può essere ridotta così che il maglio rallenti in prossimità dalla testa del palo.

Figura 28 Battipalo ad aria/vapore a doppia azione della McKiernan-Terry Corp. (APE 2011)

Il corretto spessore del cuscinetto è estremamente importante per il corretto funzionamento del battipalo. L'energia cinetica del maglio all'impatto dipende dal peso del maglio e dalla corsa, nonché dagli effetti della pressione motrice. Il risultato generale è che un battipalo a doppia azione correttamente funzionante con la sua corsa più breve fornisce un'energia d'impatto comparabile, per colpo, fino a circa due volte la velocità di colpo di un singolo battipalo ad azione dello stesso peso del maglio.

Alcuni battipali a doppia azione aria/vapore sono completamente chiusi (Figura 28) e possono essere azionati sott'acqua. Essi possono essere più produttivi di singoli battipali ad azione, ma sono più dipendenti dalla pressione dell'aria. L'esperienza ha dimostrato che, in media, essi sono leggermente meno efficienti degli equivalenti battipali a singola azione. I battipali a doppia azione generalmente costano più di quelli a singola azione e richiedono una manutenzione aggiuntiva. Analogamente ai battipali ad aria/vapore a singola azione, richiedono un compressore d'aria o un impianto a vapore. Tuttavia, i battipali a doppia azione aria/vapore consumano più aria e richiedono pressioni maggiori rispetto ai battipali a singola azione equivalenti. L'uso di battipali a doppia azione aria/vapore è diminuito e si riscontrano raramente nella pratica.

4.2.3 A pressione differenziale

Il battipalo differenziale aria/vapore è un altro tipo di battipalo a doppia azione con corsa relativamente breve e un elevato numero di colpi al minuto. Figura 26c mostra il funzionamento di un battipalo ad aria ad azione differenziale. I battipali a doppia azione (o ad azione differenziale) sono azionati a vapore o ad aria sia nella fase di salita che in quella di discesa, e sono progettati per impartire una rapida successione (fino a 300 colpi al minuto) di colpi sul palo.

Il funzionamento è ottenuto dalla pressione che agisce su due pistoni di diametro diverso collegati al maglio. All'inizio del ciclo, la valvola singola è posizionata in modo che la camera superiore sia aperta solo alla pressione atmosferica e la camera inferiore sia pressurizzata. Il maglio sale grazie alla pressione tra i due pistoni che provoca una forza netta verso l'alto. Il maglio ha una velocità verso l'alto quando la posizione della valvola cambia e applica una pressione dell'aria nella camera superiore, causando il cambiamento della forza netta verso il basso. Così la pressione dell'aria si somma alla gravità e l'attrito per rallentare il pistone nella risalita, mentre accelera la discesa del maglio nella fase successiva.

Come per i battipali a doppia azione, per evitare il sollevamento del battipalo può essere necessario ridurre l'energia cinetica durante l'urto, riducendo la pressione. Come per gli altri battipali aria/vapore, quando il pistone raggiunge la sua massima energia cinetica poco prima dell'impatto, la posizione della valvola viene invertita e il ciclo ricomincia. Di conseguenza, il cuscinetto del battipalo deve essere dello spessore adeguato a impedire il "preadmission" che potrebbe causare una riduzione dell'energia trasferita al palo. Per il corretto

funzionamento sono necessarie pressioni d'aria molto elevate tra 0,83 a 0,97 MPa all'ingresso del battipalo. Tuttavia, la maggior parte dei compressori d'aria produce solo pressioni di circa 0,83 a 0,90 MPa. Come per il battipalo a doppia azione, l'efficienza di un battipalo differenziale è leggermente inferiore all'equivalente battipalo a singola azione aria/vapore. Il pistone del battipalo ad azione differenziale viene sollevato e spinto verso il basso con un volume di aria o vapore inferiore a quello utilizzato da un battipalo a doppia azione.

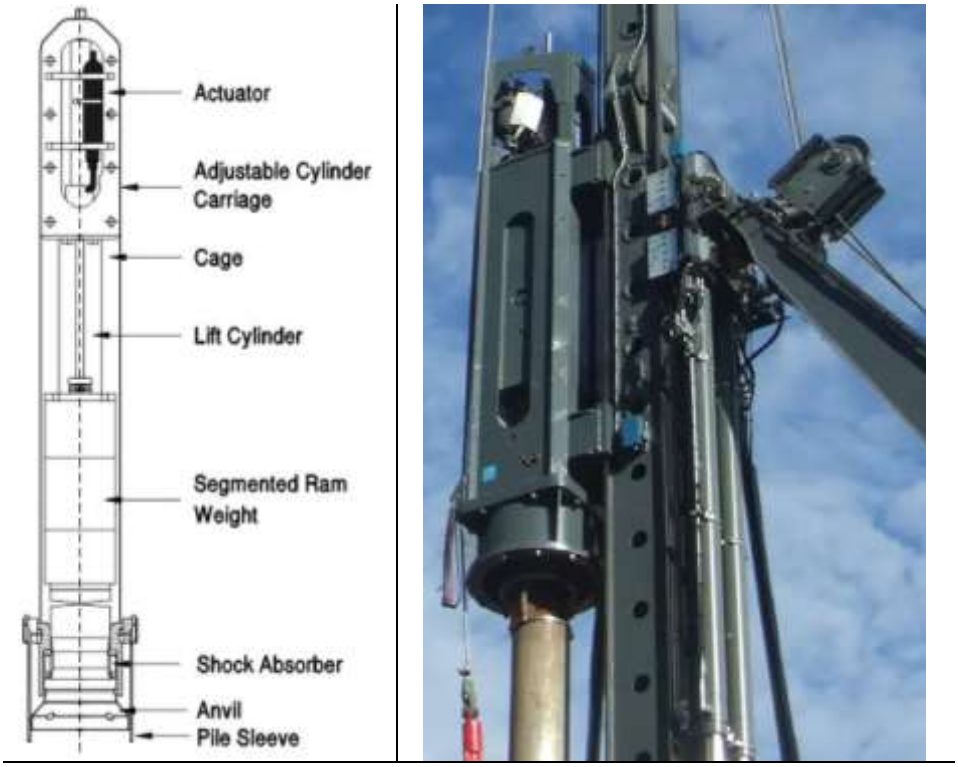
L'uso di battipali ad azione differenziale aria/vapore è diminuito e anche questi si incontrano raramente nella pratica.

4.3 BATTIPALI IDRAULICI

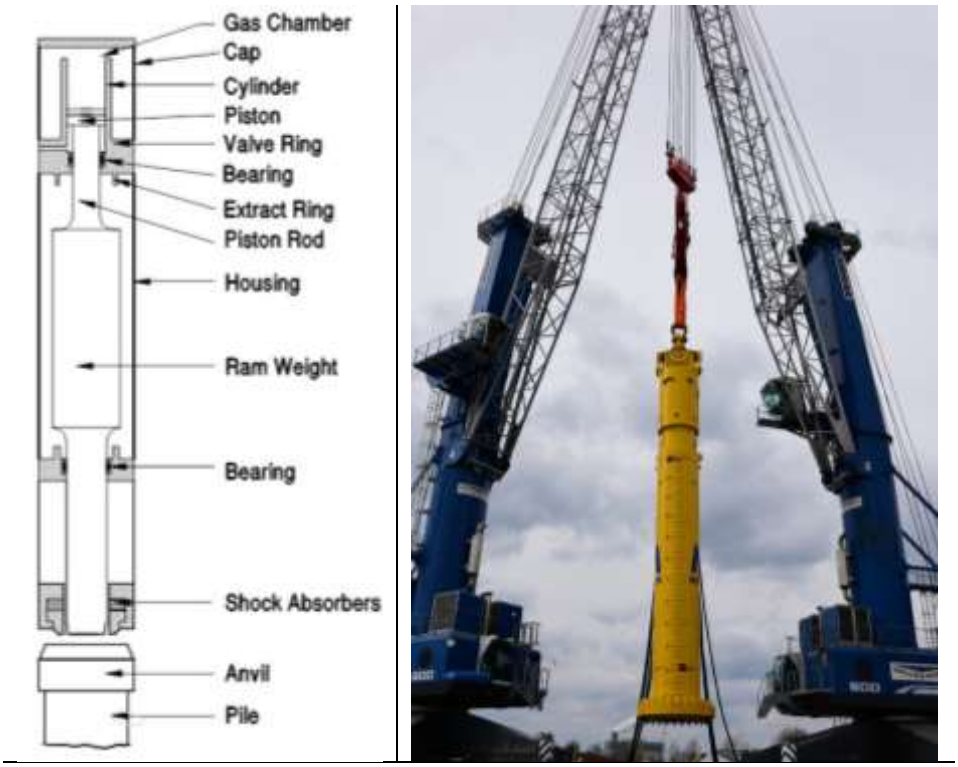
I battipali idraulici possono essere considerati come una versione moderna, anche se più complicata, di battipali ad aria/ vapore in quanto i pesi sollevati e i colpi forniti sono comparabili. Il battipalo, infatti, è costituito da una massa battente, che attraverso un pistone idraulico viene sollevata di un'altezza variabile da 20 a 120 cm. Successivamente il maglio viene lasciato cadere sulla testa del palo al quale trasferisce la sua energia cinetica.

Battipali da 300 tonnellate (di cui 175 ton solo di maglio) arrivano a produrre energie nominali di 2,5 MNm (www.menck.com). I battipali idraulici come quelli prodotti da BSP, Junttan e Menck tendono ad essere più efficienti e silenziosi rispetto ad altri tipi, e si preferiscono ai battipali a caduta libera e ai battipali diesel in molte applicazioni.

Il ricorso ai battipali idraulici permette di modulare ampiamente l'energia nominale regolando l'altezza di caduta del maglio. Ciò consente di ottimizzare le operazioni di infissione minimizzando al tempo stesso il rumore e i danni arrecabili alle eventuali strutture limitrofe. La maggior parte dei moderni battipali idraulici può essere dotato di strumentazione elettronica per la visualizzazione in continuo della profondità e resistenza alla battitura. Sono anche disponibili sistema di controllo e monitoraggio dell'energia cinetica.



Azione singola



Doppia azione

Figura 29 Schemi ed esempi di battipalo Idraulico (Hannigan, et al. 2016)

Sono disponibili sia battipali da utilizzare sospesi direttamente dalla gru che installati sulle convenzionali incastellature ("lead") come mostra Figura 30. Maggiori dettagli tecnici sono riportati in Appendice.

Figura 30 Configurazione sospesa e incastellata. (BSP International Foundations Limited 2019)

4.3.1 Battipali idraulici a singola azione

Nel battipalo a singola azione il sistema idraulico solleva il pistone che si ritrae rapidamente a un'altezza predeterminata. Questo rilascia completamente il maglio, che cade sotto l'effetto della gravità, colpendo il cuscinetto inserito nella parte superiore dell'elmetto. Il cilindro idraulico solleva quindi nuovamente il maglio e il ciclo si ripete.

Uno schema di battipalo idraulico a singola azione è illustrato nella Figura 29a, mentre una fotografia di un battipalo idraulico a singola azione è presentata nella Figura 31.

La maggior parte dei battipali idraulici ad azione singola ci permette di variare e controllare la corsa del pistone, la velocità all'impatto e il tempo di permanenza ovvero il tempo che il maglio resta sulla testa del palo dopo l'impatto. Altezze di caduta minime vengono impiegate per ridurre gli sforzi su pali in c.a. Altezze di caduta maggiori vengono impiegate in condizioni di battitura difficili.
Su molti battipali idraulici a singola azione, come quello illustrato nella Figura 29a, la corsa può essere facilmente valutata visivamente. La maggior parte dei battipali idraulici più recenti includono un sistema di monitoraggio integrato che misura la velocità del pistone appena prima dell'impatto. La velocità del pistone è poi convertita in energia cinetica.

Figura 31 Battipalo idraulico a singola azione (www.powerquip.co.kr)

4.3.2 Battipali idraulici a doppia azione

Il battipalo a doppia azione è costituito da un maglio fissato al pistone interamente racchiuso dall'alloggiamento del battipalo. Completa il sistema una fonte idraulica esterna che fornisce l'energia al battipalo. L'olio scorre attraverso una valvola di alimentazione nel battipalo e fuoriesce attraverso una valvola di ritorno al gruppo di alimentazione. Quando la valvola di ritorno è chiusa, il pistone sale e raggiunta l'altezza richiesta viene chiusa la valvola di alimentazione e aperta quella di ritorno. Il maglio inizia così la sua corsa verso il basso, accelerato dalla pressione idraulica. Il maglio poi colpisce l'elmetto, che a sua volta è a contatto con il palo. L'urto si verifica tra queste due parti, con un trasferimento di energia relativamente elevato. La Figura 29b presenta uno schema di un battipalo idraulico a doppia azione.

Simile ai battipali idraulici a singola azione, la corsa del pistone può essere controllata per adattarsi alle condizioni di infissione. Tuttavia, a causa dell'alloggiamento chiuso, la corsa non può essere valutata visivamente. I sistemi di monitoraggio integrati sono quindi essenziali sui battipali a doppia azione per documentare le prestazioni del battipalo. Una fotografia di un battipalo idraulico a doppia azione è inclusa nella Figura 32.

La maggior parte dei battipali idraulici a doppia azione non ha cuscinetti come i battipali convenzionali e quindi generano impatti acciaio-acciaio ad alta efficienza. Alcuni modelli possono anche essere utilizzati per battere pali orizzontalmente.

Figura 32 Battipalo Idraulico a doppia azione di 310 ton (www.menck.com)

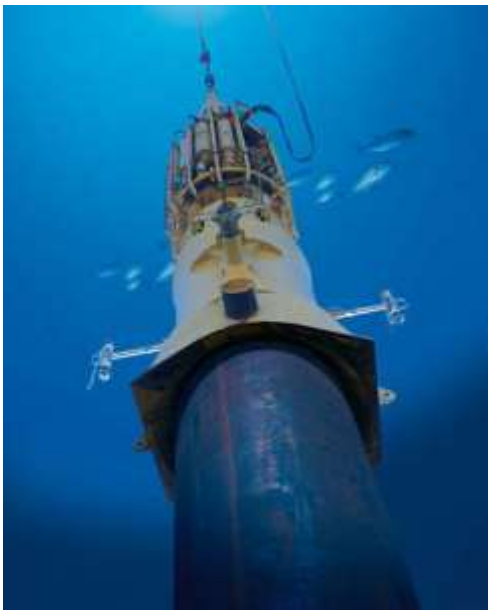


Figura 33 Battipalo Idraulico a doppia azione in battitura sott'acqua. (www.menck.com)

Un vantaggio significativo dei battipali idraulici a doppia azione è che possono operare sott'acqua in quanto completamente chiusi. Specifici battipali idraulici subacquei sono stati sviluppati appositamente per la battitura in acque profonde e sono spesso provvisti di un ammortizzatore ad azoto.
Un'applicazione di battipalo idraulico per infissioni subacquee è mostrata in Figura 33.

4.4 BATTIPALI DIESEL

I primi esperimenti di battitura a combustione interna utilizzarono l'energia esplosiva della polvere da sparo. L'equivalente moderno impiega il diesel per produrre esplosioni rapide e controllate.
La differenza di base tra i battipali diesel e i battipali idraulici o a vapore è che non richiedono una forza motrice da fonti esterne. I magli sono più leggeri di quelli utilizzati con battipalo a caduta libera, ma un azionamento più rapido compensa questa differenza.

L'azione di un battipalo diesel ad azione singola (ad es. tipo Delmag, Mitsubishi, Vulcan o Kobelco) è più adatta alla battitura di pali portanti alla punta, ossia che ricavano la maggior parte della loro resistenza alla punta del palo, come avviene durante la battitura attraverso depositi granulari. Il battipalo diesel è più versatile del battipalo a caduta libera e può lavorare anche sospeso senza l'ausilio del "lead". Una sintesi delle specifiche tecniche dei battipali Delmag è riportata nella Tabella 6.

Tabella 6 Specifiche tecniche di alcuni battipali diesel Delmag. (Fleming, et al. 2009)

Modello	**D6-32**	**D8-22**	**D12-42**	**D16-32**	**D19-42**	**D36-32**	**D62-22**	**D100-13**	**D200-42**
Peso maglio (kg)	600	800	1280	1600	1820	3600	6200	10000	20000
Colpi (min/max)	38/52	36/52	36/52	36/52	35/52	36/52	35/50	35/45	36/52
Max. Energia per colpo (Nm)	18500	28000	46000	54000	60000	123000	224000	370000	670000
Peso battipalo (kg)	2470	2670	3455	4045	4320	9770	12900	19900	57120
Lunghezza del battipalo (mm)	3810	4699	4724	4724	4724	5283	5918	7366	8230

4.4.1 BATTIPALO DIESEL A SINGOLA AZIONE (ESTREMITA' APERTA)

La Figura 34 raffigura le fasi di funzionamento un battipalo diesel a singola azione. Il battipalo diesel è privo di pistone. Una forza esterna solleva, solo inizialmente, il maglio (Figura 34 a), quindi questo viene sganciato dal supporto di sollevamento e lasciato cadere. Poco prima che termini la corsa, viene iniettato/spruzzato il

diesel (Figura 34 b) che verrà compresso nel momento dell'impatto (Figura 34c) provocando nello stesso attimo la sua esplosione (Figura 34 d). I gas di scarico prodotti dalla combustione vengono espulsi da delle aperture (Figura 34 e), mentre la forza dell'esplosione riporta il maglio fino all'altezza massima (Figura 34 f), così da far ripartire il ciclo senza ricorrere ad una forza di sollevamento esterna. Con questo moto alternato vengono infissi i pali.

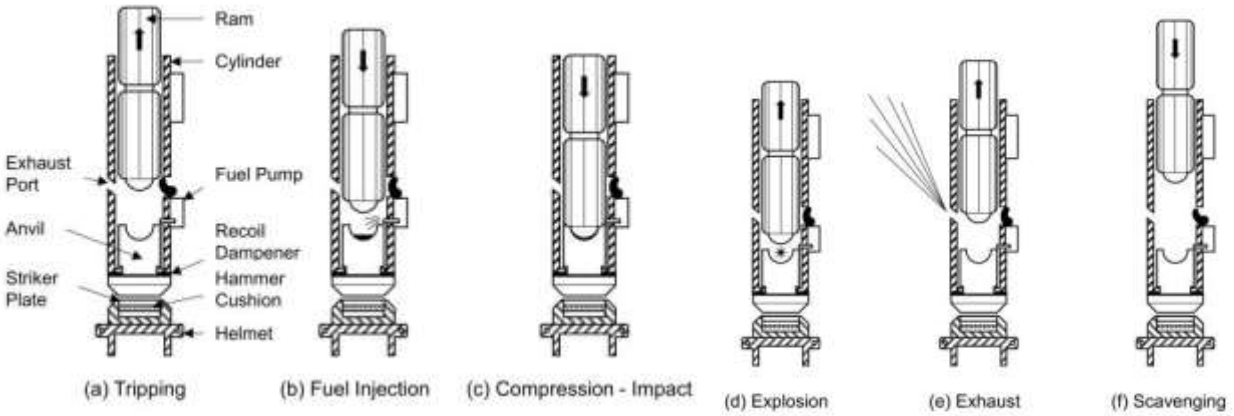


Figura 34 Descrizione di tutte le fasi di funzionamento del battipalo diesel a singola azione (Hannigan, et al. 2016)

I battipali diesel hanno il vantaggio di essere autonomi senza la necessità di gruppi elettrogeni separati, compressori d'aria o generatori di vapore. Efficienze alte si hanno nell'infissione in argille dure.
In alcuni battipali il combustibile viene iniettato in forma liquida, come mostrato nella Figura 34b, mentre in altri battipali il combustibile viene atomizzato/iniettato poco prima dell'impatto.

È molto difficile valutare la potenza dei battipali diesel a singola azione dalle informazioni fornite dai vari costruttori. Molti produttori riportano la massima energia potenziale calcolata come prodotto dell'altezza di caduta e peso del maglio. La corsa effettiva del maglio dipende dalla quantità di carburante inserita in camera di esplosione, dall'usura della fascia elastica attorno al maglio (detta anche segmento di tenuta), dallo spessore del cuscinetto, dalla resistenza di infissione e dalla lunghezza e rigidezza del palo.

In condizioni normali, parte dell'energia potenziale disponibile viene utilizzata per comprimere i gas, mentre il maglio procede verso il basso. Durante il funzionamento in continuo, quando la temperatura all'interno del battipalo aumenta a causa della combustione, il diesel può infiammarsi prematuramente. Questa condizione, chiamata "pre-accensione", riduce l'efficacia del battipalo, in quanto la pressione aumenta drasticamente prima dell'impatto, rendendo necessario un lavoro maggiore da parte del maglio per comprimere i gas traducendosi in minor quantità di energia trasferita al palo.

I battipali diesel sono adatti a tutti i tipi di terreno ad eccezione delle argille tenere. Quando la resistenza all'infissione è molto bassa come nel caso di argille tenere, la corsa verso l'alto del maglio può essere insufficiente per aspirare l'aria nel cilindro e il battipalo potrebbe smettere prematuramente di funzionare. Quindi, il maglio deve essere sollevato nuovamente manualmente e bisogna ripetere l'avvio. Più resistente è il terreno, più alto è il rimbalzo del maglio, e quindi maggiore è l'energia del colpo. Allo stesso tempo questo può causare danni ai pali in calcestruzzo prefabbricati che vengono infissi attraverso strati di rocce tenere alternati a rocce dure.

La corsa del maglio può essere regolata, controllando la quantità di carburante iniettato: minor carburante, minor corsa. In alcuni modelli la portata di diesel è regolata tramite una pompa azionabile sia manualmente che tramite un programma dall'operatore da terra.

Ridurre il quantitativo di carburante può essere anche utile per limitare le sollecitazioni indotte dalla battitura sui pali. Per i battipali diesel a singola azione, la corsa del maglio è anche funzione della resistenza del palo. La corsa effettiva può e deve essere monitorata, per i battipali diesel può essere calcolata con la seguente formula (Hannigan, et al. 2016):

$$h = 4{,}01 \times \left(\frac{60}{bpm}\right)^2 - 0{,}3$$

Dove h = corsa del maglio (piedi) e bpm = colpi al minuto. Dalla formula si deduce che una maggior frequenza di colpi implica una minore altezza di caduta.

Per i battipali diesel le manutenzioni possono essere complesse e anche costose. Sono inoltre emerse preoccupazioni riguardanti l'inquinamento atmosferico causato dai gas di scarico. Per superare le problematiche ambientali, si può impiegare biodiesel o lubrificanti meno inquinanti. Il progettista Berminghammer ha sviluppato un battipalo diesel "senza fumo" che lavora ad alte pressioni di iniezione del carburante eliminando virtualmente il problema. Nella Tabella 7 sono riportate i valori di inquinamento atmosferico riportati da Hera Hammers e che sono stati calcolati in base al consumo di carburante del singolo battipalo (www.hera-hammers.com).

Tabella 7 Parametri d'inquinamento di battipali diesel a singola azione e i (www.hera-hammers.com)

<table>
<tr><th>Modello di battipalo diesel</th><th>Energia nominale</th><th>Idrocarburi non metanici NMHC + ossidi di azoto NOx</th><th>Monossido di carbonio CO</th><th>Particolato atmosferico PM</th></tr>
<tr><td></td><td>(kW)</td><td>(g/kWh)</td><td>(g/kWh)</td><td>(g/kWh)</td></tr>
<tr><td>D6-32</td><td>22</td><td rowspan="8">7.5</td><td rowspan="5">5.5</td><td rowspan="8">0.6</td></tr>
<tr><td>D8-22</td><td>24</td></tr>
<tr><td>D12-42</td><td>27</td></tr>
<tr><td>D16-32</td><td>30</td></tr>
<tr><td>D19-42</td><td>45</td></tr>
<tr><td>D25-32</td><td>48</td><td rowspan="5">5.0</td></tr>
<tr><td>D30-32</td><td>60</td></tr>
<tr><td>D36-32</td><td>69</td></tr>
<tr><td>D46-32</td><td>96</td><td rowspan="10">6.6</td><td rowspan="2">0.4</td></tr>
<tr><td>D62-22</td><td>120</td></tr>
<tr><td>D80-23</td><td>151</td><td rowspan="8">3.5</td><td rowspan="8">0.2</td></tr>
<tr><td>D100-13</td><td>181</td></tr>
<tr><td>D125-32</td><td>220</td></tr>
<tr><td>D138-32</td><td>250</td></tr>
<tr><td>D160-32</td><td>288</td></tr>
<tr><td>D180-32</td><td>325</td></tr>
<tr><td>D225-22</td><td>372</td></tr>
<tr><td>D250-22</td><td>415</td></tr>
<tr><td>D280-22</td><td>450</td></tr>
</table>

Rispetto ai battipali ad aria/vapore, quelli diesel sono notevolmente più leggeri pur avendo caratteristiche energetiche simili. Ciò permette alle gru di muoversi più liberamente e di impiegare direttamente di taglia minore. Una fotografia di un tipico battipalo diesel ad azione singola è mostrata nella Figura 35a.

Figura 35 Battipali Diesel (a) A singola azione, (b) a doppio azione (Hannigan, et al. 2016)

4.4.2 BATTIPALI DIESEL A DOPPIA AZIONE (ESTREMITÀ CHIUSA)

Il battipalo diesel a doppia azione funziona in linea di principio come il battipalo diesel a singola azione, ma l'estremità superiore è chiusa. Quando il maglio si muove verso l'alto, l'aria viene compressa nella parte superiore del maglio nella cosiddetta "camera di rimbalzo" o "bounce chamber" provocando un colpo più breve e quindi una velocità di battitura più elevata. Una fotografia di un tipico battipalo diesel a doppia azione è fornita nella Figura 35b.

La "camera di rimbalzo" si trova in situazioni di pressione atmosferica fin quando il maglio non raggiunge le aperture nella camera stessa (Figura 36). Operativamente, man mano che il maglio supera queste aperture e si muove verso l'alto, crea una pressione che riduce efficacemente la corsa e immagazzina energia che sarà a sua volta utilizzata durante la discesa.

Come per il battipalo a singola azione, la corsa effettiva dipende dalla quantità del carburante, dalla lunghezza e rigidezza del palo, dalla resistenza del terreno e dall'usura del segmento di tenuta. Con l'aumentare della corsa, la pressione all'interno della camera aumenta fino a quando la forza totale verso l'alto è in equilibrio con il peso del maglio stesso.

Anche la maggior parte di questi battipali hanno pompe del carburante collegate da un tubo di gomma per controllare manualmente il flusso di carburante. I colpi del battipalo, e quindi l'energia trasferita, possono essere aumentati o diminuiti incrementando o riducendo, rispettivamente, la pressione della pompa del carburante.

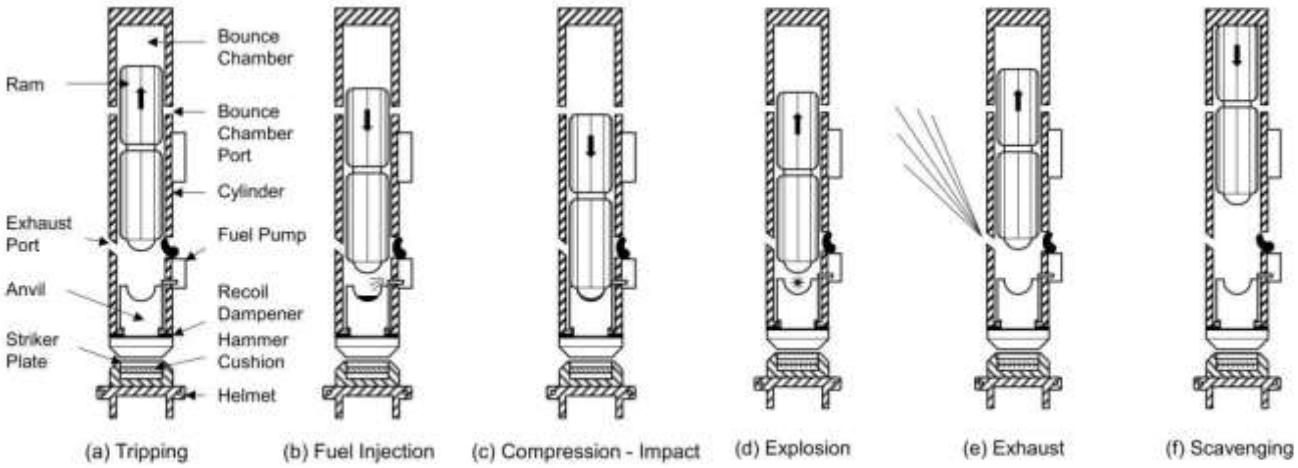


Figura 36 Schema di funzionamento del battipalo diesel a doppia azione (Hannigan, et al. 2016)

Per determinare l'energia fornita dal battipalo, si misura la pressione di picco nella camera di rimbalzo. È compito del produttore del battipalo fornire un grafico che correli la pressione con l'energia fornita dal battipalo.
La nota serie di battipali Delmag (Figura 37) spazia dalla serie D6 (massa del maglio di 600 kg per pali fino a 2000 kg) alla serie D200 (massa del maglio 20 tonnellate per pali fino a 250 tonnellate). La ICE e la MKT fabbricano battipali diesel a doppia azione che raggiungono 70-90 colpi al minuto rispetto ai 40-60 ottenuti dai produttori di battipali diesel ad azione singola. Le caratteristiche delle varie marche di battipali diesel sono indicate in Tabella 8.

Poiché è difficile garantire una energia di infissione costante tramite il battipalo diesel, questa tipologia è spesso soppiantata dal battipalo idraulico che viene invece utilizzato in combinazione con sistemi di analisi degli sforzi indotti dall'infissione. L'uso di battipali diesel a doppia azione è limitato e raramente si riscontra nella pratica (Hannigan, et al. 2016).

Figura 37 Battipalo diesel a doppia azione Delmag (HAMMER&STEEL 2021)

Tramite l'utilizzo di sistemi di analisi dell'infissione ("pile-driving analyzer"), è stato dimostrato che l'energia fornita da un battipalo diesel diminuisce rapidamente man mano che si utilizza anche in caso di buone

condizioni di manutenzione. Tra l'altro, le condizioni del sito non sempre permettono di garantire adeguati livelli di manutenzione per cui sono frequenti i casi in cui le efficienze di lavoro sono inferiori rispetto quelle ottimali (Fleming, et al. 2009).

Tabella 8 Caratteristiche di alcuni battipali diesel (Tomlinson e Woodward 2008)

Marca	Tipo	Peso del maglio (Kg)	Massima energia (KJ)	Massimo numero di colpi (colpi/min)
Berminghammer (Canada)	B2005	900	31	36-60
	B23[a]	1270	31	82
	B3505	1800	62	36-60
	B4005	2300	78	36-60
	B4505	3000	103	36-60
	B5005	3400	118	36-60
	B5505	4182	146	36-60
	B6005	6000	212	36-60
	B6505	7990	273	36-60
	B6505C	10000	238	35-60
BSP International Foundations Limited (UK)	DE30C	1360	36	42-54
	DE50C	2260	60	42-54
MKT (USA)	DE33/30/20C	1810	54	40-50
	DE-70/50C	3180	95	40-50
	DE-150/110	6800	203	40-50
	DA-35C[a]	1270	32	78-82
	DA-45[a]	1810	46	82
	DA-55C[a]	2270	57	78-82
ICE International Construction Equipment (Netherlands and USA)	WICE 8	800	23.9	3-52
	WICE 30	3000	94.8	37-52
	WICE 80	8000	266.8	36-45
	WICE 100	10000	333.5	36-45
	WICE 128	12500	426.5	36-45
	WICE 160	16000	550.0	36-45
	WICE 220	22000	733.0	36-45
	32S	1364	43.0	41-60
	60S	3175	98.9	41-59
	100S	4535	162.7	38-55
	120S	5440	202.0	38-55
	205S	9072	284.7	40-55
	I-12	1280	41.0	37-52
	I-30	3000	102.3	35-53
	I-46	4600	146.0	36-53
	I-62	6623	223.7	35-50
	I-80	8030	288.0	35-45
	I-100	10000	360.0	35-45
	422[a]	1810	30.5	76-82
	520[a]	2300	40.6	80-84
	640[a]	2722	54.2	74-77

4.5 SISTEMI DI INFISSIONE VIBRANTI

I sistemi di infissione vibranti non rientrano nei sistemi ad impatto. Impartiscono una forza assiale sinusoidale al palo utilizzando pesi eccentrici controrotanti accoppiati. La Figura 38 schematizza il funzionamento di un sistema vibrante, mentre Figura 39 ne mostra un esempio reale.

L'azionamento avviene elettricamente o idraulicamente tramite generatore mobile o centralina idraulica. La vibrazione è causata dalle masse eccentriche controrotanti all'interno di un alloggiamento collegato alla testa del palo. I requisiti di potenza sono fino a 250 kW, per le unità alimentate elettricamente e fino a circa 746 kW (1000HP) per le unità alimentate idraulicamente, con valori tipici tra 75 e 373 kW (100-500 HP).

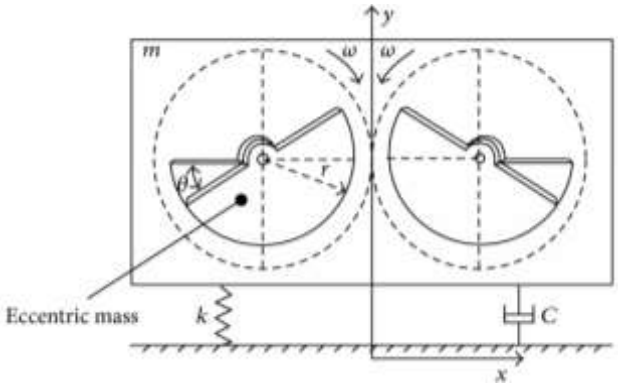


Figura 38 Modello strutturale di un sistema di infissione vibrante. (Xin e Wanjun 2016)

Esistono diversi tipi di sistemi vibranti:

- a momento variabile,
- ad alta frequenza,
- standard
- a bassa frequenza.

I sistemi vibranti a momento variabile e ad alta frequenza funzionano tipicamente fino a 2300-2400 vibrazioni al minuto o 40 Hz. Quelli standard funzionano fino a un massimo di 1600 vibrazioni al minuto o 26 Hz mentre quelli a bassa frequenza funzionano fino a circa 1200 vibrazioni al minuto o 20 Hz. Minore è la velocità operativa (vibrazioni al minuto) del sistema vibrante, maggiore è l'effetto sul terreno e sulla struttura. Pertanto i modelli standard con momento eccentrico costante hanno una frequenza critica durante le fasi di avvio e d'arresto comparabile alla frequenza naturale degli edifici vicini allarmando gli occupanti. Lo sviluppo di modelli a momento variabile, ovvero ad alta frequenza (maggiore di 30 Hz) per tempi variabili con regolazione automatica, ha virtualmente eliminato questo inconveniente.

I sistemi a vibrazione hanno un vantaggio rispetto ai battipali ad impatto in quanto il rumore e l'onda d'urto vengono eliminati, inoltre causano meno danni al palo ed hanno una velocità di penetrazione molto rapida. Se il generatore elettrico è montato in una camera acustica ben progettata, questi sistemi possono essere utilizzati in aree urbane con un rischio di reclami molto inferiore rispetto a quando si utilizzano battipali ad impatto.

Figura 39 Sistema di infissione vibrante in opera (www.powerquip.co.kr)

I sistemi vibranti sono rigidamente collegati alla testa del palo mediante dei morsetti idraulici e possono essere utilizzati sia per l'installazione che l'estrazione del palo. I sistemi vibranti in genere non richiedono l'utilizzo di "lead", ma sono impiegati come unità sospese. I sistemi vibranti montati sul braccio di escavatori idraulici hanno rapporti peso-potenza elevati e sono utili per l'infissione di pali tubolari a sezione piccola (pali H) di limitata lunghezza in terreni granulari di tipo sciolti o medio-densi. L'esperienza ne sconsiglia l'utilizzo in argille dure. I battipali vibranti non devono essere utilizzati per pali in calcestruzzo prefabbricato a causa di possibili danni dovuti a sollecitazioni di trazione e flessione.

Per l'infissione di pali tubolari in acciaio fino a 5m di diametro, l'American Pile Driving Corporation (APE) utilizza un sistema brevettato costituto da quattro morsetti con una forza di bloccaggio di 125 tonnellate ciascuno (Quad-Clamp) installato sul vibrocostipatore Super Kong con un motore 1000HP.

Per l'infissione in un terreno granulare, Rodger e Littlejohn (1980) consigliano frequenze da 10 a 40 Hz con ampiezze di 1-10 mm per pali infissi che richiedono basse resistenze alla punta da 4-16 Hz con ampiezze di 9-20 mm per alti valori di resistenza alla punta. Nei terreni fini saranno necessarie frequenze superiori a 40 Hz e un'ampiezza elevata, ma occorre prestare attenzione a causa dei potenziali cambiamenti nelle proprietà del terreno, come la trasformazione tissotropica.

Misurazioni dinamiche sono state effettuate anche su pali vibro infissi. Tuttavia, non è stata ancora sviluppata una tecnica affidabile per la stima della resistenza nominale durante l'installazione del battipalo vibrante. Risulta pertanto ancora necessaria la verifica della resistenza nominale con altri mezzi. La previsione delle prestazioni di un palo vibro-infisso non è ancora molto affidabile.

Sebbene esistano limitazioni per quanto riguarda i tipi di terreno in cui possono essere utilizzati e nonostante la complessità della macchina e la sua manutenzione, la nuova gamma di sistemi vibranti sospesi sviluppano una maggiore forza motrice e ampiezza di spostamento per superare la resistenza della punta quando si infiggono pali di spostamento sempre più lunghi.

4.6 SISTEMI DI INFISSIONE A RISONANZA

Il funzionamento dei sistemi di infissione a risonanza non si basa sul movimento di una massa eccentrica, ma di cilindri. Questi sistemi variano la frequenza da 100 a 180 Hz (da 6000 a 10.000 rpm) e sfruttano la frequenza di risonanza del terreno (circa 100 Hz); utilizzano un pistone idraulico per generare una forza oscillante ad alta frequenza e ampiezza (Figura 40a). La forza di infissione è controllata attraverso una valvola che dirige dell'olio idraulico, alternativamente, ai lati del pistone facendolo oscillare fino a 180 Hz.

I potenziali vantaggi del sistema risonante includono tempi di infissione rapidi, vibrazioni al terreno molto basse e livelli di rumore ridotti rispetto ad altri battipali in uso (il battipalo diesel è il più rumoroso).
Questo metodo di infissione manca di un'indagine approfondita. È potenzialmente molto efficace, soprattutto per l'estrazione dei pali ma sono state condotte ancora poche applicazioni e pochissimi modelli sono disponibili. Simile alla vibro-infissione, risulta difficile determinare la resistenza nominale (una tecnica affidabile non è al momento disponibile). Pertanto, la resistenza nominale è verificata una volta completata l'infissione tramite i metodi di verifica tradizionali che utilizzano battipali ad impatto. Figura 40b mostra un sistema di infissione a risonanza in funzione.

a) b)

Figura 40 a) Schema di funzionamento b) Esempi di sistemi Risonanti (www.pve-holland.com)

La Tabella 9 riassume le caratteristiche e impieghi dei diversi tipi di battipali, descritti precedentemente.

Tabella 9 Caratteristiche e impeghi dei diversi tipi di battipali (Hannigan, et al. 2016)

Tipo di battipalo	A caduta libera	Singola azione aria/vapore	Doppia azione aria/vapore	Azione differenziale aria/vapore	Singola azione Diesel (estremità aperta)	Doppia azione Diesel (estremità chiusa)	Singola azione Idraulico	Doppia azione Idraulico	Vibrazione	Risonanza
Energia nominale (kNm)	9.5 a 81	9.5 a 2440.5	1.4 a 28.5	20.4 a 67.8	12.3 a 2196.4	6.8 a 99	33.9 a 2931.3	33.9 a 3431.6		
Velocità d'impatto (m/s)	7 a 10	2.4 a 5	4.6 a 6.1	4 a 4.6	3 a 5	2.4 a 5	1.5 a 4.9	1.5 a 7		
Velocità dei colpi (colpi/minuto)	4 a 8	35 a 60	95 a 300	98 a 300	40 a 60	80 a 105	30 a 50	40 a 90	750 a 2400 Vibrazioni/min	Fino a 10,800 Vibrazioni/min
Energia (per colpo)	Peso Maglio x Altezza caduta	Peso Maglio x Corsa	(Peso maglio + Effettiva aria sopra il pistone x pressione effettiva del fluido) x Corsa	(Peso maglio + Effettiva aria sopra il pistone x pressione effettiva del fluido) x Corsa	Peso Maglio x Corsa	(Peso Maglio + Pressione della camera di rimbalzo) x Corsa	Peso Maglio x Corsa	(Peso maglio + Effettiva aria sopra il pistone x pressione effettiva del fluido) x Corsa		
Potenza di sollevamento	Fornita con motore di sollevamento o con gru	Aria compressa o vapore	Aria compressa o vapore	Aria compressa o vapore complessi di altri battipali ad impatto	Proviene dalla combustione o dall'iniezione del diesel	Proviene dalla combustione o dall'iniezione del diesel	Idraulica	Idraulica	Idraulica o Motore elettrico	Idraulica
Manutenzione	Semplice	Più complessa del battipalo a caduta	Più complessa del battipalo a singola azione Air/vap.	Più complessa del battipalo a singola azione Air/vap	Più complessa dei battipali ad aria	Più complessa dei battipali ad aria	Più complessa di altri battipali ad impatto	Più complessa di altri battipali ad impatto	Costo di manutenzione più alto	Più complesso di altri tipi di battipalo
Idoneità del battipalo per tipo di palo	Tutti i tipi esclusi in calcestruzzo	Versatile su tutti I pali, in particolare pali grandi in calcestruzzo e tubi in acciaio	Legno, Sezione H e tubi in acciaio	Legno, Sezione H e tubi in acciaio	Tutti I pali	Tutti i pali	Tutti I tipi di palo	Tutti I tipi di palo	Sezione H e tubi in acciaio. Molto efficaci in terreni granulari	Sezione H e Tubi in acciaio
Vantaggi	Attrezzatura a basso costo	Relativamente semplici e costo moderato	Più produttivo della singola azione. Alcuni a doppia azione sono chiusi completamente e possono essere utilizzati sottacqua	Più produttivo della singola azione. Il battipalo differenziale utilizza meno volume di aria/vapore della doppia azione e ha meno velocità d'impatto	Il combustibile gli permette di generare energia d'infissione. La corsa è in funzione della resistenza del palo	Il combustibile gli permette di generare energia d'infissione. La corsa è in funzione della resistenza del palo	Energia completamente variabile può essere fornita	L'energia è variabile su una vasta gamma. Può essere utilizzato per l'infissione subacquea	Può essere utilizzata sia per infissione che estrazione	Veloce installazione del palo. Ridotto rumore. Basse vibrazioni nel terreno
Svantaggi	Grandi forze dinamiche e pericolo di danno al palo. Produttività più bassa	Necessita di compressore d'aria o impianto a vapore. Pesante se confrontato con quelli Diesel	Maggiori costi della singola azione. Necessita di compressore d'aria o impianto di vapore.	Costi più alti. Necessita di compressore d'aria o impianto a vapore. Pesante se confrontato con quelli Diesel	Inquinamento dai gas di scarico. Costoso. Pochi colpi al minuto per corse maggiori	Inquinamento dai gas di scarico. Costoso. Non adatto a terreni particolarmente duri	Costi iniziali alti.	Costi iniziali alti. Completamente chiuso. No controllo visivo altezza di caduta	Investimenti e manutenzione impegnativi. Non raccomandati per pali a trazione	Poca disponibilità ad oggi

5 ACCORGIMENTI PER FACILITARE L'INFISSIONE

5.1 ATTREZZATURE PER IL CONTROLLO DEL RUMORE

A seconda del tipo di battipalo e palo con cui si opera, il rumore proveniente dalle operazioni di battitura ad impatto può variare da circa 80 a 130 dB. Le ordinanze o le specifiche locali possono porre limiti ai livelli di rumore influenzando la selezione delle apparecchiature o imponendo l'uso di involucri fonoassorbenti. I produttori di alcuni battipali diesel e idraulici forniscono dispositivi opzionali di soppressione del rumore (fino a circa 10 dB). Figura 41 ne mostra degli esempi.

Dal monitoraggio ambientale eseguito nell'ambito dei lavori di costruzione del MOSE (Venezia) emerge come tra tutte le misurazioni effettuate durante le lavorazioni, quelle più impattanti in termini di rumorosità sono state la battitura dei pali, la vibro-infissione delle palancole, le movimentazioni del pietrame e la realizzazione dei diaframmi plastici. La criticità non è dipesa soltanto dalla potenza sonora generata dai macchinari ma anche dalla distanza tra le sorgenti di rumore e le aree o i ricettori sensibili dove venivano collocate le centraline di monitoraggio (Campostrini, et al. 2017).

Una riduzione di 20-25 dB si può ottenere attraverso la combinazione di cuscinetti, coperture antirumore sul battipalo, l'applicazione di cuscinetti sui pali in acciaio e l'uso di una copertura antirumore specifica intorno alla zona di impatto tra battipalo-palo.

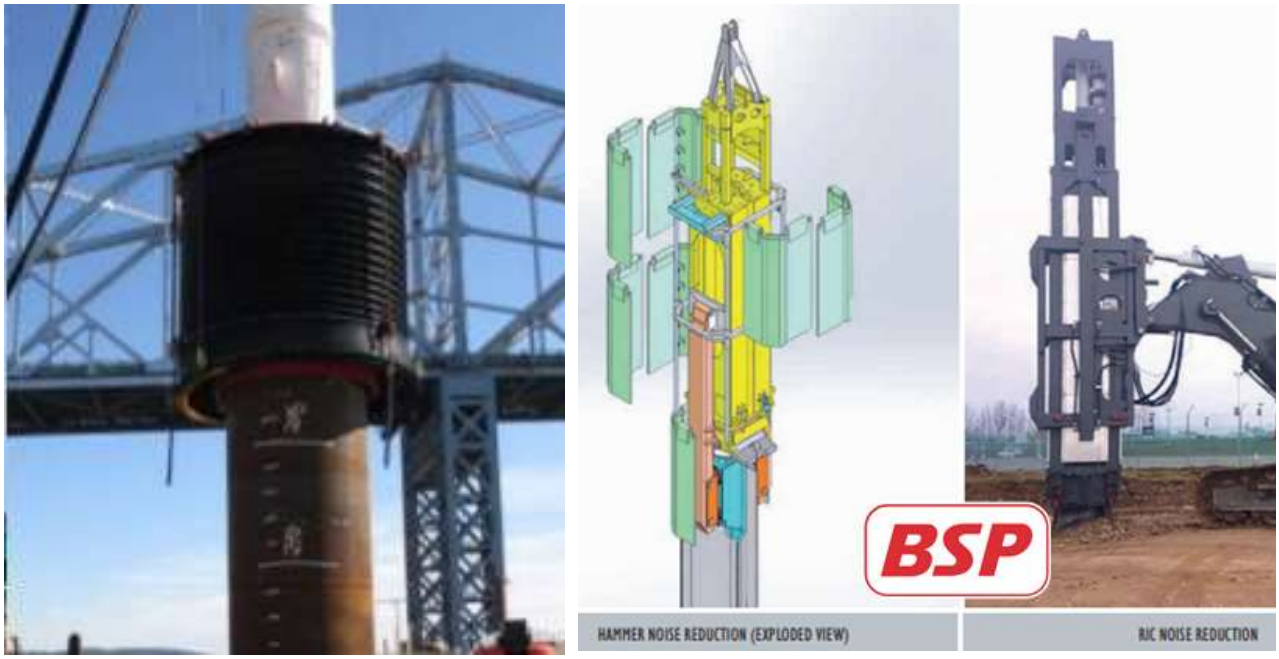


Figura 41 a) Struttura fonoassorbente per battipalo idraulico. (https://www.scranet.org/), b) Riduttore di rumore (BSP International Foundations Limited 2019)

Le cosiddette "bubble curtains" usano delle bolle d'aria per ridurre le onde sonore sottomarine ovvero le onde d'urto e sovrapressioni che colpiscono i mammiferi marini e i pesci durante la battitura dei pali sott'acqua. In generale, i livelli di sovrapressione superiori a 30 kPa risultano dannosi. Più precisamente, andrebbero considerate la varietà e specie di pesci, la loro taglia e il loro livello di maturità. I livelli sonori immessi nell'ambiente sono notevoli ma variano in funzione del substrato e delle caratteristiche oceanografiche al contorno.

I "bubble ring" sono tipicamente utilizzati intorno ad un singolo palo e consistono in un compressore d'aria, un collettore di distribuzione primaria ed uno di distribuzione secondaria. Mentre le "bubble curtains"

consistono in una parete fonoassorbente tipicamente posizionate intorno alla sottostruttura completa piuttosto che su un singolo palo.

Affinché una struttura antirumore sia efficace, deve completamente circondare l'area in cui avviene il movimento del palo. Questo può essere a volte difficile da realizzare con "bubble ring" in aree con maree e correnti, mentre risulta più efficace un sistema a parete. La Figura 42 mostra un palo infisso all'interno di un anello a bolle in combinazione con un dispositivo di contenimento.

Il WSDOT e il FHWA hanno sponsorizzato un test su larga scala della nuova tecnologia di soppressione del rumore subacqueo sviluppata dall'Università di Washington e dalla Marine Construction Technologies, PBC.

Figura 42 Anello a bolle con dispositivo di contenimento. (Hannigan, et al. 2016)

5.2 FOLLOWERS

I follower sono estensioni per pali prefabbricati che si posizionano tra l'estremità superiore del palo e il battipalo. Consistono in elementi metallici (acciaio) che fanno da tramite (prolunga). Sono infatti spesso usati per infiggere i pali al di sotto del livello dell'acqua specialmente con battipali a caduta libera o più in generale sistemi ad impatto ad azione singola che non possono operare sott'acqua. Questi sistemi di prolunga sono usati in combinazione a "lead" fissi o oscillanti e richiedono una notevole manutenzione.

Il loro utilizzo provoca una riduzione dell'energia trasferita al palo a causa della compressione del "follower" e al disallineamento. Queste perdite possono essere stimate mediante un'analisi estesa e approfondita dell'equazione delle onde, o mediante misure dinamiche.

Hannigan et al (2016) consiglia l'uso di "follower" di sezione pari ad almeno il 25% di quella del palo se in c.a. Per pali in legno o acciaio, invece, il "follower" deve avere un'impedenza Z_f dello stesso ordine di grandezza di quella del palo ($Z_f = 0.5 \div 2\ Z_p$). L'impedenza è definita come rapporto forza/velocità:

$$Z = EA/c$$

Dove E è il modulo di Young, A la sezione e c la velocità delle onde di compressione.

Figura 43a mostra un classico esempio di "follower" utilizzabile per la battitura di pali in acciaio di sezione H sott'acqua. Mentre Figura 43b riporta un caso di disallineamento tra battipalo, follower e palo in acciaio di sezione H. Il loro uso dovrebbe essere evitato quanto più possibile.

Per pali da infiggere sott'acqua, un'alternativa è quella di utilizzare un battipalo adatto per la battitura subacquea, ovvero sistemi a doppia azione.

Figura 43 (a) "follower" e (b) "follower" un uso in una battitura di un palo a sezione H (Hannigan, et al. 2016)

5.3 JETTING

Il "jetting" consiste nell'uso dell'acqua o dell'aria sul terreno che viene spostato, al fine di facilitare la penetrazione del palo attraverso uno strato superficiale compatto relativamente sottile. I "jet" possono essere utilizzati per creare un foro pilota prima o contemporaneamente al posizionamento dei pali. L'acqua viene pompata ad alta pressione attraverso tubi interni o esterni attaccati al palo; in alcuni casi, un getto d'aria ad alta pressione può essere utilizzato in combinazione con l'acqua per aumentarne l'efficacia. I tubi vengono poi rimossi e l'infissione procede normalmente. La taratura del getto comporta un costo supplementare da non sottovalutare.

Il "jetting" non è raccomandato nel caso di pali progettati per fornire una notevole resistenza laterale perché la resistenza all'attrito è ridotta dalla perforazione/movimentazione dovuta dall'acqua in pressione. In questo caso è bene effettuare alla fine una battitura tradizionale, senza l'uso di "jetting". Se il foro prodotto dal "jetting" rimane aperto dopo l'installazione del palo, bisogna riempirlo.

Il "jetting" è di solito più efficace in terreni sciolti, granulari di media densità. Non funziona in argilla consistente o se il terreno contiene materiale di grande pezzatura. Inoltre va prestata attenzione anche in presenza di strutture vicine. Al tempo stesso, l'uso del getto è stato notevolmente ridotto a causa di restrizioni ambientali. Figura 44 e Figura 45 mostrano rispettivamente un sistema a doppio getto montato su un palo di c.a. e un sistema a "Jet/Punch". Le alternative al getto includono tecniche di "predrilling" e "spudding", spiegate di seguito.

Figura 44 Sistema a doppio getto montato su di un palo in c.a. (Hannigan, et al. 2016)

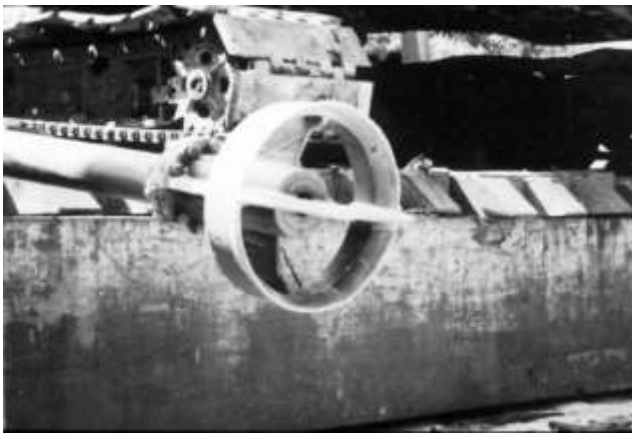


Figura 45 Sistema Jet/Punch (Hannigan, et al. 2016)

5.4 PREDRILLING

Talvolta si possono utilizzare trivelle per facilitare la battitura attraverso rilevati o limitare le vibrazioni. Questa tecnica può risultare necessaria per installare un palo in terreni con ostruzioni, come vecchi legni, massi ecc. ed è anche spesso utilizzato per il posizionamento dei pali sulle scarpate o per ridurre il sollevamento dei pali quando sono a distanza ravvicinata. È soprattutto impiegato quando il "jetting" non è indicato (es. argille consistenti) o non funziona.

Il diametro del preforo dipende dal formato e dalla sezione del palo, così come dalle caratteristiche del terreno. Il foro dovrebbe essere abbastanza grande per consentire la battitura, ma abbastanza piccolo in modo che il palo sarà sostenuto contro il movimento laterale. Le dimensioni e la profondità del foro devono essere stabilite in fase di progettazione. Se l'obiettivo del "predrilling" è mitigare vibrazioni o evitare disallineamenti il foro di diametro è leggermente più piccolo rispetto alle dimensioni del palo infisso:

- Per pali a sezione quadrata, utilizzare diametri di perforazione 10 cm inferiori alla diagonale (es. palo B=40 cm; D<46 cm)
- Per pali a sezione circolare, utilizzare diametri di perforazione 2.5 cm inferiori del diametro.

Se invece l'obiettivo è superare ostacoli o attraversare un rilevato il diametro è maggiore di quello del palo (+15 cm) e poi l'intercapedine viene riempita con sabbia, ghiaia o iniezioni. Figura 46 mostra un sistema di predrilling.

Figura 46 Sistema predrilling con sistema a trapano(coclea) (Hannigan, et al. 2016).

5.5 SPUDDING

Lo “spudding” consiste nell’eseguire un preforo attraverso un materiale denso battendo o infiggendo un utensile metallico corto e tozzo per poi rimuoverlo. L'appaltatore può ricorrere a tale strumento in sostituzione del “jetting” o del “predrilling”, quando la parte di terreno superficiale è costituita da detriti vari.

Una difficoltà potenziale dello “spudding” è che non può essere estratto una volta battuto troppo in profondità. Tuttavia, poiché non vengono asportate né porzioni di terreno né acque sotterranee si evitano eventuali costi di smaltimento finale.

Figura 47a mostra un sistema di “spudding” costituito da una spessa sezione di tubo murata con una punta conica formata da lamiere d'acciaio. In Figura 47b una punta a cuneo e delle piastre laterali sono state saldate ad un palo in acciaio di sezione H come sistema di “spudding”.

Figura 47 “spudding” (a) per pali tubolari, (b) per pali di sessione H (Hannigan, et al. 2016)

5.6 SCAPITTOZZATURA

Quando si utilizzano pali in calcestruzzo prefabbricato, lo scapitozzatore permette di frantumare rapidamente la parte del palo che fuoriesce dal terreno, mantenendo intatta l’armatura interna. L’alternativa più rudimentale consiste nell’uso di un martello demolitore manuale.

Lo scapitozzatore è solitamente montato su di un escavatore. Viene prima calato sopra il palo, poi messo in funzione per effettuare la demolizione ed infine utilizzato per asportare il calcestruzzo demolito lasciando a nudo i ferri di armatura del palo stesso.

Questo macchinario è composto da un sistema modulare, come si può osservare dalla Figura 48, che consente la demolizione sia di pali tondi che quadrati semplicemente variando il numero e la tipologia di moduli e adattando l’attrezzatura ad ogni specifica lavorazione con la massima flessibilità. Gli scapitozzatori essendo composti da moduli si adattano facilmente molteplici dimensioni di pali, garantendo, al livello di taglio, l’assenza di crepe longitudinali e la rottura dei ferri dell’armatura; grazie alla sua facilità d’uso/manutenzione ed alta produzione (dai 20 ai 35 pali finiti al giorno) l’attrezzatura viene impiegata costantemente, per ottenere una “scapitozzatura” dei pali precisa e controllata a differenza delle altre metodologie (martello demolitore manuale).

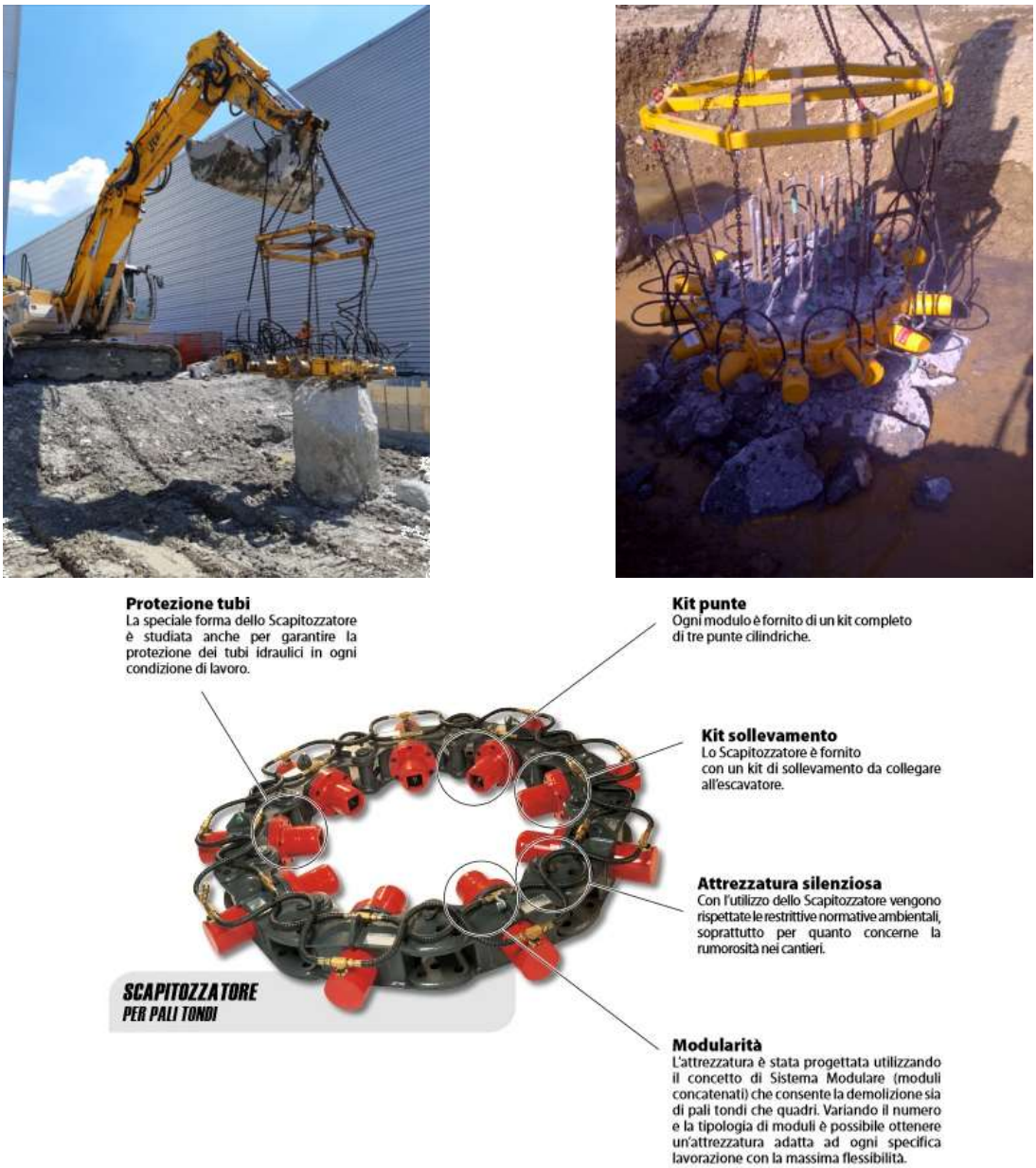


Figura 48 Scapitozzatore idraulico (www.pi2000srl.it/tecnologie)

6 SELEZIONE DEL BATTIPALO

È importante che l'appaltatore e l'ingegnere scelgano il battipalo più efficiente per un determinato progetto. Un battipalo ad impatto troppo piccolo potrebbe non essere in grado di fornire al palo la resistenza richiesta o potrebbe richiedere un numero eccessivo di colpi. D'altra parte, un battipalo ad impatto troppo grande può danneggiare il palo.

In generale, come prima stima si considera necessario un maglio con un peso compreso tra l'1 e il 2% della resistenza nominale. Però l'uso di formule empiriche dinamiche per determinare l'energia e la dimensione del battipalo non è raccomandato soprattutto perché i risultati di queste formule peggiorano all'aumentare della complessità dei battipali e della resistenza nominale richiesta.

Un'analisi dell'equazione delle onde è il metodo raccomandato per determinare la dimensione ottimale del battipalo. Essa considera l'intero sistema composto da terreno, cuscinetti, palo e battipalo.

La Tabella 10 fornisce inoltre una stima orientativa dell'energia nominale in funzione della resistenza del palo da infiggere. Ovviamente, per maggiori resistenze nominali del palo si richiedono sistemi di infissioni con maggiore energia\. In alcuni casi, un battipalo più piccolo di quanto indicato può essere più adatto per controllare le sollecitazioni indotte dalla battitura.

Tabella 10 Requisiti energetici preliminari del battipalo (Hannigan, et al. 2016)

Resistenza nominale **kN**	**Minima energia dichiarata dal costruttore** **kNm**
≤ 800	16.6
800-1330	28.5
1330-1840	39.0
1840-2400	51.0
2400-2660	56.9

6.1 SELEZIONE DEL TIPO DI BATTIPALO

La scelta del battipalo più adatto per un dato compito comporta una considerazione del tipo e peso del palo, e delle caratteristiche del terreno in cui il palo deve essere infisso. La scelta deve tener conto dell'energia trasferita per singolo colpo, della velocità di infissione e dell'eventuale consumo di carburante. Conoscere l'energia fornita per colpo serve a verificare che il palo raggiunga la profondità richiesta o la resistenza finale senza ricorrere a velocità di battitura sostenuta rischiando di danneggiare il palo e/o il battipalo. Una battitura di pali in c.a. a velocità sostenute in terreni duri può far cadere dall'alto pezzi di calcestruzzo o componenti meccanici, mettendo in pericolo la sicurezza degli operatori. Non di secondaria importanza è il rumore prodotto dall'operazione di battitura che può restringere la scelta, soprattutto in ambito urbano.

L'energia trasmessa al palo dipende dalla precisione di allineamento del battipalo, dal tipo di cuscinetto tra il palo e il battipalo, e dalla condizione del materiale nel tempo. L'uso crescente di strumenti per la misurazione delle sollecitazioni dell'estremità superiore del palo durante la battitura ha fornito dati sulle efficienze di un'ampia gamma di tipi di battipalo, come già introdotto nelle sezioni precedenti. Alcuni valori tipici sono riportati nuovamente in Tabella 11. L'ampia gamma di valori per il battipalo diesel riflette la sensibilità al tipo di terreno in cui il palo è infisso e la necessità di una buona manutenzione.

Tabella 11 Efficienza dei battipali (Tomlinson e Woodward 2008)

Tipo battipalo	Idraulico	Caduta (con verricello)	Diesel
Efficienza del sistema battipalo (%)	65-90	40-55	20-80

Nella pratica corrente il battipalo è scelto sulla base dei risultati di un'analisi di infissione utilizzando l'equazione dell'onda di Smith. Figura 49 mostra esempi di grafici che si possono ottenere, riferiti all'utilizzo di un battipalo diesel D100 per infiggere pali tubolari in acciaio attraverso argilla tenera. Poiché la resistenza finale da garantire è di 17,5 MN, sarebbero necessari 200 colpi/250 mm di penetrazione. Questa è da considerarsi una condizione di infissione piuttosto grave; il limite pratico per la battitura prolungata tramite sistemi diesel o idraulici è di circa 120 a 150 colpi/250 mm. Tuttavia, 200 colpi/250 mm sarebbero accettabili per brevi periodi di infissione.

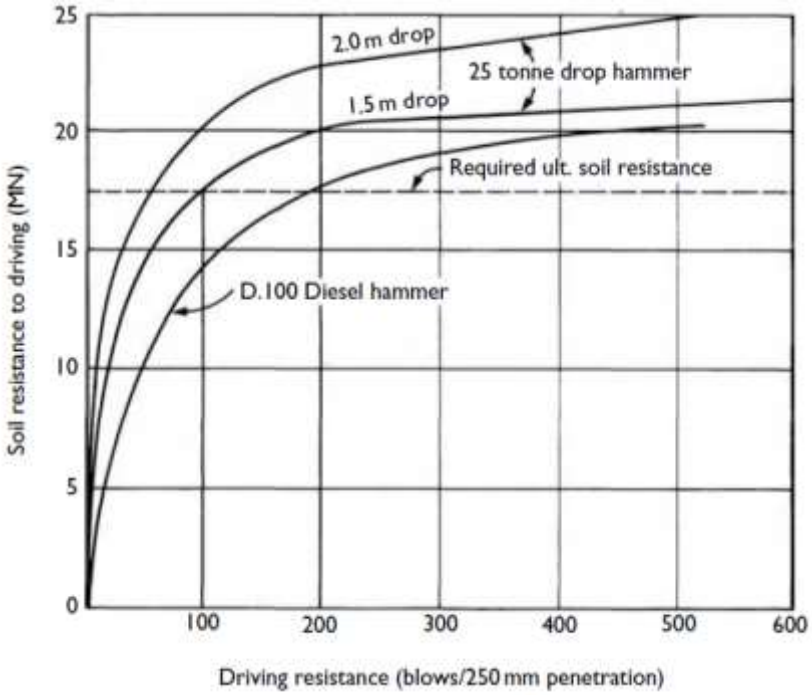


Figura 49 Curva di infissione di palo tubolare con battipalo diesel D100 (Tomlinson e Woodward 2008)

I programmi commerciali per computer basati su modelli di equazioni d'onda consentono all'ingegnere di prevedere la "drivability" (infissibilità), ottimizzare la selezione del battipalo, selezionare il livello di energia che non danneggia il palo e garantire che vengano utilizzati gli accessori corretti. L'American Petroleum Institute afferma che, se nel contratto di costruzione non sono incluse altre disposizioni, le condizioni operative limite corrispondono a 300 colpi per piede (248 colpi/250 mm) per 1,5 metri di infissione o 800 colpi per piede (662 colpi/250 mm) per una penetrazione di 0,3 m.

6.2 MONITORAGGIO DELL'ENERGIA CINETICA DEL BATTIPALO

Il monitoraggio dei pali durante la battitura consente di stimare e controllare il rischio di danneggiamento della base ("pile buckling") e di validare le ipotesi di progetto. Esso consente inoltre lo sviluppo di modelli numerici di battitura, di stimare il danneggiamento a fatica del palo accumulato durante l'installazione e lo sviluppo tramite analisi a ritroso di modelli semplificati per pali non strumentati.

Parecchi battipali sono forniti già provvisti di dispositivi di lettura di energia cinetica. La velocità d'impatto e l'energia cinetica del battipalo sono calcolate in base al tempo impiegato dal maglio per percorrere la distanza tra salita e discesa. Questi dispositivi in genere forniscono anche i colpi al minuto del battipalo. Figura 50 mostra un dispositivo di monitoraggio dell'energia cinetica installato su battipalo idraulico IHC, mentre in Figura 51 su battipalo diesel Berminghammer.

Figura 50 Pannello di lettura dell'energia cinetica per battipalo idraulico IHC. (Hannigan, et al. 2016)

a) b)

Figura 51 Sistemi di controllo energia cinetica su battipalo diesel Berminghammer. (Hannigan, et al. 2016)

Qualsiasi battipalo esistente può essere adattato per queste misurazioni installando dei trasduttori di velocità collegati ad un trasmettitore montato sul battipalo che invia la velocità d'impatto e l'energia cinetica ad un'unità palmare wireless (E-saximeter). Le procedure di fissaggio variano a seconda del modello di battipalo. Ad esempio, per un battipalo diesel, i trasduttori di velocità sono installati in due fori da 3 cm circa di diametro nella parete del cilindro sopra la camera di combustione. Per battipali idraulici o ad aria/vapore, sono fissati sul corpo del battipalo. La Figura 52a presenta una fotografia di un battipalo diesel adattato per la misurazione dell'energia cinetica e il dispositivo di lettura è riportato nella Figura 52b.

I battipali dotati di dispositivi di lettura dell'energia cinetica offrono un migliore controllo della qualità di infissione. Per questo sono particolarmente impiegati in grandi progetti o con pali che richiedono una grande resistenza nominale.

a) b)

Figura 52 a) Sistema di controllo di prossimità su battipalo diesel, b) E-saximeter senza fili per la lettura dell'energia. (Hannigan, et al. 2016)

Un esempio disponibile oggi in commercio è l'analizzatore PDA-8G che riceve i dati registrati da accelerometri e trasduttori di deformazione fissati sul palo ed effettua il calcolo della capacità portante della fondazione. Con l'analizzatore PDA-8G, gli ingegneri hanno la possibilità di essere presenti in sito durante la battitura o di usare la tecnologia SiteLink®. Questa tecnologia consente la trasmissione dei dati registrati dall'analizzatore PDA tramite internet permettendo ad un ingegnere di seguire in tempo reale il test da qualsiasi luogo. I dati dei test e i risultati sono identici in entrambe le modalità.

7 SOFTWARE PER PROGETTAZIONE E CONTROLLO DELLA BATTITURA

La cosiddetta "analisi dell'equazione delle onde" applicata all'infissione di pali ha eliminato molte carenze associate alle formule dinamiche simulando realisticamente gli impatti dei battipali e il processo di penetrazione dei pali. Per la maggior parte degli ingegneri, il termine equazione d'onda si riferisce ad un'equazione differenziale parziale. Tuttavia, per chi si occupa di fondazioni, significa un approccio completo per rappresentare matematicamente un sistema composto da battipalo, cuscinetti, elmetto, palo, e terreno. Ciò è facilitato dall'utilizzo di un software per il calcolo dei movimenti dinamici e delle forze ottenute dall'impatto del maglio.

L'approccio è stato sviluppato da Smith nel 1960, e dopo aver riconosciuto la razionalità dell'approccio, diversi ricercatori hanno sviluppato svariati modelli informatici. Sulla base della teoria delle onde sono stati infatti messi a punto programmi di calcolo che permettono di valutare la possibilità di infissione di un palo, per un assegnato terreno e per un assegnato battipalo. Il più noto è GRLWEAP (Wave Equation Analysis of Pile). Il programma WEAP fu aggiornato diverse volte sotto la sponsorizzazione della FHWA, fino al 1986 (Goble e Rausche 1986). L'approccio basato sull'equazione delle onde è stato sottoposto a numerosi controlli e studi di correlazione. Studi sulle prestazioni di WEAP hanno prodotto pubblicazioni che dimostrano le prestazioni e l'utilità del programma.

Inizialmente, quando il battipalo colpisce la parte superiore del palo, solo le particelle vicino l'interfaccia maglio-palo vengono compresse. Questa zona compressa, o impulso di forza, come mostrato nella Figura 53, si espande lungo palo ad una velocità d'onda costante, C, che dipende dal modulo elastico e peso specifico del palo. L'impulso si riduce quando raggiunge la porzione di palo a contatto con il terreno a causa delle forze statiche e dinamiche legate alla resistenza del terreno. A seconda di quest'ultima, lo sforzo si rifletterà sull'estremità inferiore del palo come sforzo di trazione o di compressione. Quando la forza dovuta all'impatto supera la resistenza del palo (laterale e di base), la punta del palo si muoverà producendo uno spostamento permanente ("permanent set").

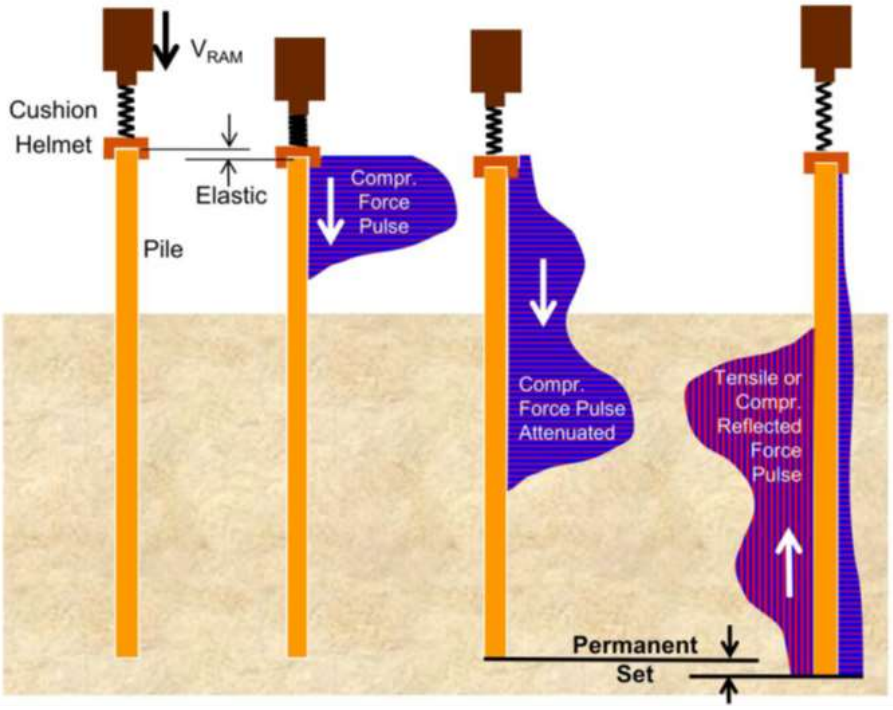


Figura 53 Propagazione d'onda d'urto di un battipalo su di un palo (Hannigan, et al. 2016)

La modellazione dei vari elementi è molto complessa. Le informazioni da inserire riguardano il sistema di battitura, parametri del palo e ad alcuni parametri del terreno per i quali sono comunque fornite raccomandazioni standard. In testa per i cuscinetti viene definito un coefficiente di restituzione che varia tra 0 e 1. Per il terreno bisogna definire i valori limite della risposta sia laterale che in punta (che vanno stimati in base al tipo di terreno e/o alle prove in sito eseguite). Di default GRLWEAP assume il "quake" in punta pari a D/120 in sabbia molto densa o D/60 in sabbia densa. Conoscendo la meccanica della propagazione delle onde e conoscendo i requisiti e i vincoli di progettazione del particolare progetto, si facilita l'interpretazione dei risultati e si evitano errori nell'applicazione del risultato ottenuto.

Nell'analisi di un'equazione d'onda di tipo Smith, il battipalo, l'elmetto e il palo sono modellati da una serie di segmenti ciascuno costituiti da una massa concentrata e una molla senza peso.I segmenti di battipalo e palo sono lunghi circa un metro. Segmenti più corti possono migliorare l'accuratezza della soluzione numerica a scapito dei tempi di esecuzione che si allungano (Rausche et al. 2004). I valori di rigidezza della molla e di massa sono calcolati in base alla sezione trasversale, al modulo di elasticità e al peso specifico della sezione corrispondente.

I cuscinetti sono modellati attraverso da molle aggiuntive la cui rigidezza è calcolata in base all'area, al modulo di elasticità e allo spessore dei materiali del cuscinetto. Inoltre, i coefficienti di restituzione (COR) sono di solito specificati per modellare le perdite di energia nei cuscinetti. Il COR è uguale a 1.0 per una collisione perfettamente elastica che preserva tutta l'energia, ed è uguale a 0.0 per una condizione perfettamente plastica che perde tutta l'energia di deformazione. In genere la collisione viene modellata con un valore intermedio del COR. Ad esempio, il valore predefinito per il COR di un cuscinetto in legno è 0.50. Tuttavia, quando un cuscinetto di legno tenero è gravemente usurato, un valore di 0,25 può essere più appropriato e può essere inserito nell'input dell'equazione d'onda insieme ad altre proprietà del cuscinetto.

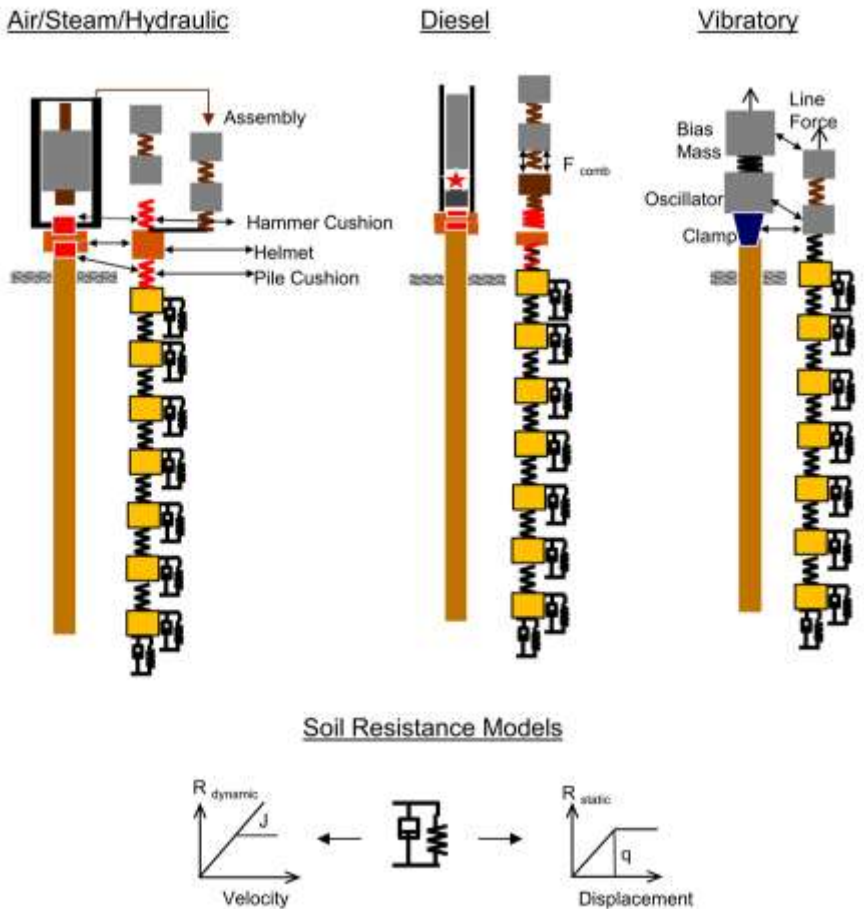


Figura 54 Tipici schemi d'equazioni d'onde applicati a diversi battipali (Hannigan, et al. 2016)

La resistenza del terreno lungo la porzione del palo a contatto con il terreno e alla punta del palo è rappresentata da componenti sia statici che dinamici (Molla e smorzatore in parallelo). Le forze statiche di resistenza del terreno sono modellate da molle elastico-plastiche, mentre la resistenza dinamica da dissipatori viscosi. Uno schema dell'equazione d'onda battipalo-palo-terreno è presentato nella Figura 54.

All'inizio dell'analisi, una resistenza nominale calcolata o assunta (capacità ultima, R_{ut}) dai valori specificati dall'utente viene distribuita lungo il fusto e la punta del palo. Stessa cosa avviene per i fattori di smorzamento che rappresentano la resistenza dinamica del terreno. L'analisi procede quindi calcolando una velocità del maglio basata sull'efficienza del battipalo e l'altezza di caduta. Il movimento del maglio provoca spostamenti dell'elmetto e delle molle applicate sulla testa del palo, e quindi compressioni (o estensioni) che agiscono nella parte superiore e inferiore dei segmenti. Inoltre, il movimento di un segmento di palo provoca sia forze statiche che dinamiche di resistenza del terreno.

Ricapitolando il palo e il maglio sono suddivisi in segmenti di altezza ΔL divisi da una molla priva di peso. Dopo aver calcolato la velocità d'impatto ($t = 0$) si analizza il sistema per definiti step temporali (Δt).
Per ogni tempo, per ogni concio si ricava la forza complessiva agente da cui si ricava l'accelerazione ($a = F/M$; $M = \rho A \Delta L$).
Dall'accelerazione si ricava la velocità ($v = a\Delta t$) e dalla velocità si ricava l'incremento di spostamento ($\Delta u = v\Delta t$). Si somma lo spostamento dello step precedente con l'incremento e si aggiorna lo spostamento cumulato (così per tutti i segmenti). Noto lo spostamento cumulato u, si ricava la forza sul segmento ($F = k\,u$ con $k = EA/\Delta L$) da cui si ricava la tensione ($\sigma = F/A$).
Infine si ricava lo spostamento della punta. All'impatto successivo la parte interrata di palo è quella precedente più quella causata dall'ultimo impatto. L'analisi si ripete quindi per il passo successivo utilizzando le variabili di movimento, la velocità e gli spostamenti aggiornati dei segmenti e del Δt precedente.
Analizzando l'equazione delle onde per diversi valori di resistenze nominali è possibile tracciare grafici di portanza ("bearing graph") che mettono in relazione la resistenza nominale e le sollecitazioni con la resistenza alla penetrazione espressa come colpi per unità di lunghezza/profondità. Ogni grafico è associato ad uno specifico sistema di battitura rappresentato da tipo di battipalo, tipo e lunghezza del palo e profilo del terreno. Se uno qualsiasi degli elementi di cui sopra viene modificato, anche il "bearing graph" cambierà.

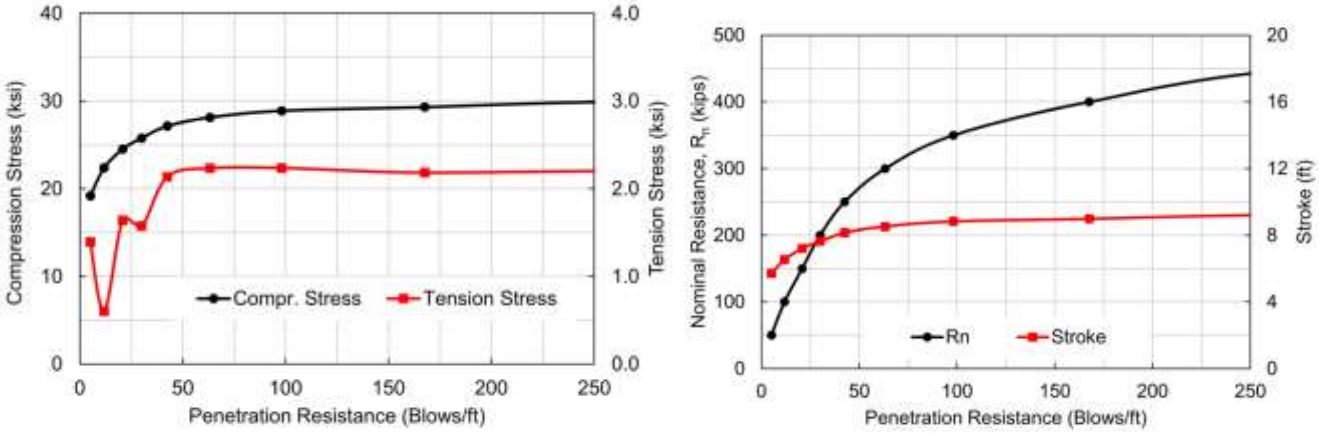


Figura 55 Tipici "bearing graph" per battipalo diesel. (Hannigan, et al. 2016)

Nell'esempio di Figura 55, ad esempio, ad un valore di resistenza nominale di 350 kips (1554 kN) corrisponde una resistenza alla penetrazione di 99 colpi/piede; la massima tensione di compressione è circa 29 ksi (29x6.8948 =200 MPa).

GRLWEAP fornisce altri due risultati:

I. un'analisi a resistenza costante ("Inspector's Chart") al variare dell'energia dell'impatto fornendo anche le sollecitazioni massime sul palo

II. un'analisi di "Drivability" (proprietà del palo di essere infisso) che fornisce la resistenza alla penetrazione e le sollecitazioni durante l'infissione a definiti valori di sezione interrata.

Nell'analisi a resistenza constante ("Inspector's Chart") si fissa la resistenza nominale e si valuta l'effetto dell'energia d'impatto. È utile al personale di cantiere per stabilire la fine dell'infissione se l'altezza di caduta del maglio è diversa da quella prevista nei "bearing graphs". Si entra con l'altezza di caduta osservata in cantiere e si legge la resistenza alla penetrazione associata alla resistenza nominale fissata; con la nuova resistenza alla penetrazione si valutano le sollecitazioni col grafico sopra

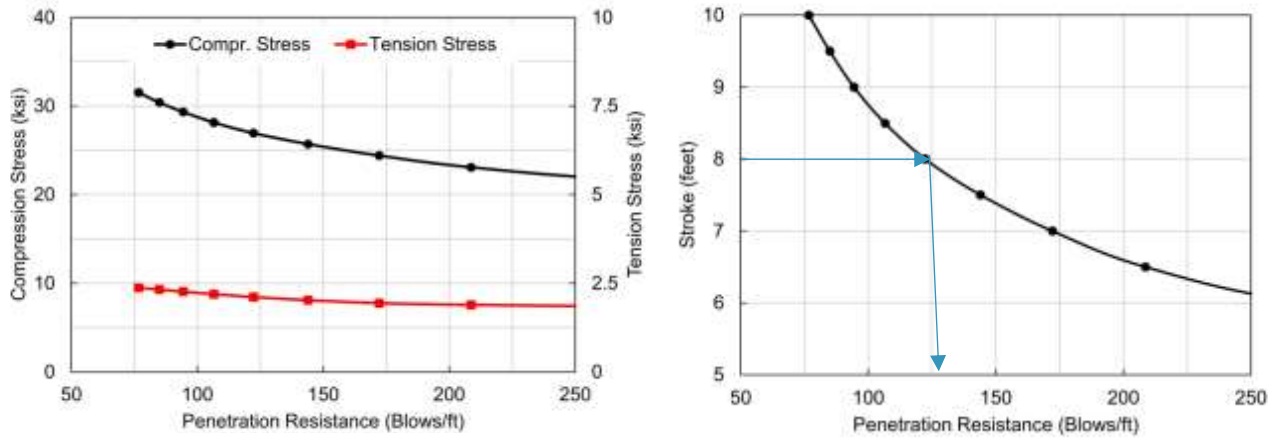


Figura 56 "Inspector's chart" (Hannigan, et al. 2016)

Per stratigrafie non omogenee la resistenza alla penetrazione e le sollecitazioni sul palo possono essere massime a livelli di infissione intermedi. La "drivability analysis" serve proprio a calcolare le resistenze di penetrazione e le sollecitazioni dal palo conseguenti ai valori di resistenza lungo il fusto e la punta del palo definiti dall'utente. I risultati calcolati possono quindi essere tracciati insieme ai valori di resistenza nominale rispetto alla penetrazione del palo. Il grafico risultante individua condizioni di penetrazione che sconsigliano la battitura a seguito di alti livelli di sforzo che potrebbero svilupparsi. Inoltre, questa opzione di analisi fornisce una stima approssimativa della durata di battitura senza contare però le necessarie interruzioni.

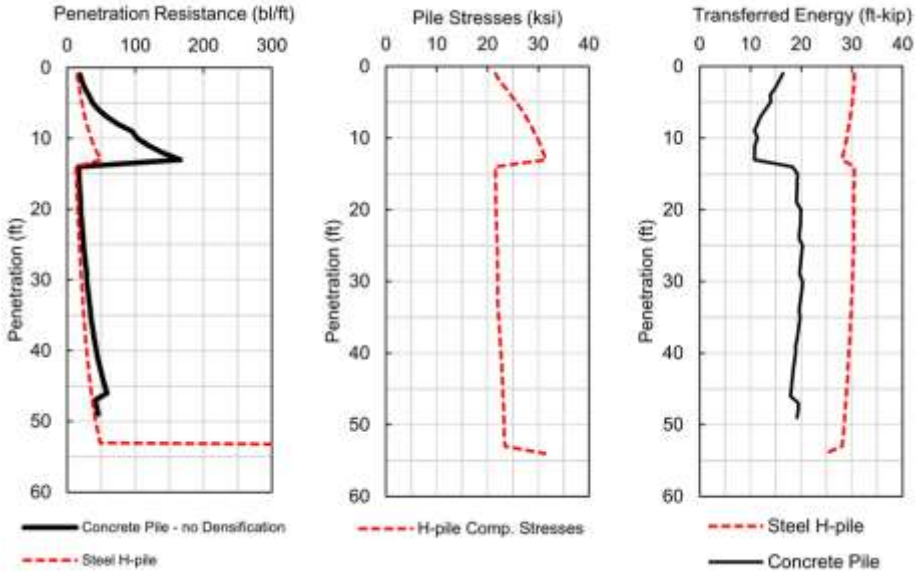


Figura 57 "Drivability analysis" di pali in acciaio sezione H rispetto a pali in c.a. (Hannigan, et al. 2016)

8 CONCLUSIONI

Nelle sezioni precedenti, abbiamo avuto modo di analizzare diversi sistemi di infissione. Questi macchinari possono realizzare fondazioni profonde on-shore e off-shore. Ne è un esempio l'aeroporto di Sanya in Cina, costruito in mare grazie a pali lunghi 34 m e larghi 30 m, installati per vibro infissione (APE 2017).

Il battipalo a caduta libera (drop hammer) è la tipologia più tradizionale e rudimentale utilizzata per l'infissione. Tra i battipali ad impatto, è il meno efficiente ma il più economico e semplice da impiegare richiedendo poca manutenzione. Va prestata particolare attenzione per evitare di danneggiare la testa del palo, soprattutto se il terreno si rivela molto duro.

La prima evoluzione tecnologica ha visto l'introduzione di battipali ad aria/vapore che esistono tuttora in configurazione a singola e doppia azione o a pressione differenziale. L'azionamento ovvero il sollevamento del maglio è garantito da un compressore o motore a vapore esterno, per questo anche classificati come battipali a combustione esterna. Nel sistema a singola azione, la caduta del maglio avviene per effetto della sola gravità, mentre nel sistema a doppia azione è incentivata e controllata anche dalla pressione dell'aria o del vapore. Di contro i consumi di aria o vapore sono più alti nel secondo caso, così come i requisiti di manutenzione. Pertanto, sono più comunemente utilizzati i battipali a singola azione. I range di energia vanno da 20,3 kJ a 203,4 kJ, mentre i pesi del maglio vanno da 2268 kg a 13608 kg.

Un ulteriore ammodernamento consiste nel battipalo diesel. Sempre classificabile come battipalo ad impatto, è invece definito a combustione interna poiché il sollevamento del maglio è provocato da un'esplosione all'interno del battipalo stesso (inizialmente con polvere da sparo ed oggi con un motore a scoppio diesel). Sono sprovvisti di pistone e sono disponibili versioni sia a singola che doppia azione. I range di energia vanno da 19 KJ a 682 KJ e i pesi del maglio vanno da 600 kg a 20000 kg. I principali vantaggi di questi battipali sono la "leggerezza" e versatilità che permette l'utilizzo di sistemi di sostegno (gru) leggeri o l'utilizzo in modalità sospesa. Sono inoltre compatibili con tutte le tipologie di pali. I difetti principali, invece, consistono in una manutenzione costosa e nell'inquinamento ambientale dovuto alla combustione del diesel, così come quello acustico.

La versione più utilizzata oggi, è il battipalo idraulico a singola o doppia azione. Il motore/centralina per permettergli in movimento è esterno o situato nella parte posteriore della gru che viene utilizzato anche come peso per bilanciare tutto il sistema. Questi battipali sono super efficienti e molto versatili, visto che hanno la possibilità di essere installati su escavatore di dimensioni ridotte. I range di energia vanno da 23,5 a 1200 KJ e i pesi del maglio vanno da 2000 a 24000 kg. I battipali a doppia azione sono utilizzati soprattutto offshore, in applicazioni sott'acqua con opportuni accorgimenti per ridurre il rumore e vibrazioni così da non danneggiare la fauna marina.

I più recenti tipi di battipalo sono quelli vibranti e risonanti. Hanno il vantaggio di causare pochissimo rumore e la possibilità di essere montato su escavatori. Inoltre, sono dei macchinari che permettono sia la battitura che l'estrazione dei pali in acciaio tubolari, sezione H, paratie e ecc. I range di energia come momento di eccentricità variano da 0,1128 KJ (11,5 kgm) a 1,078 KJ (110 kgm). Di contro nei terreni sciolti possono creare fenomeni di liquefazione e far entrare in risonanza anche gli edifici vicini creando danni rilevanti.

In conclusione, la scelta del battipalo deve essere sempre contestualizzata alle richieste del progetto e alle sue specifiche peculiarità. In linea generale, tra i sistemi a maglio battente, quelli idraulici sono i più versatili, in grado di minimizzare le vibrazioni indotte e l'impatto acustico. Sempre più frequenti sono anche le infissioni tramite sistemi vibranti, soprattutto per applicazioni offshore. Il vantaggio, come nel caso dell'Octagonck e Dodecakong, sta nel poter usare simultaneamente più corpi vibranti su unico palo. È così possibile infiggere pali di dimensioni notevoli (diametri di 30 m e lunghezza di 34 m ad esempio con il Dodecakong).

BIBLIOGRAFIA

Alessandrini, F. «Pali e fondazioni su pali secondo le N.T.C. 2008.» Quaderni tecnici di ingegneria. Vol. 2. Udine: CISM International Centre for Mechanical Sciences, 2009.

Campostrini, P., Dabalà C, Del Negro P. e Tosi L. «IL CONTROLLO AMBIENTALE DELLA COSTRUZIONE DEL MOSE. 10 anni di monitoraggi tra mare e laguna di Venezia 2004-2015.» 2017. http://www.monitoraggio.corila.it/Docs/4-MOSE_Rumore%20Fausti.pdf.

DELMAG Dieselbaren. «Diesel Pile Hammers.» Niedernberg, 2018.

Fleming K., Weltman A., Randolph M. e Elson K. *Piling Engineering*. Terza Edizione. London and New York: Taylor&Francis, 2009.

Giorgione, C. *Leonardo da Vinci.* La collezione di modelli del Museo. Milano, 2009.

Hannigan PJ., Rausche F., Likins GE., Robinson BR. e Becker ML *Geotechnical Engineering Circular No. 12–Volume II Design and Construction of Driven Pile Foundations*. No. FHWA-NHI-16-010. 2016.

Institution of Civil Engineers. ICE Specification for Piling and Embedded Retaining Walls. ICE Publishing, 2016.

Rodger, AA. e Littlejohn, GA. *Study of vibratory driving in granular soils*, Geotechnique, Vol. 30, No. 3, 1980, pp. 269–93.

Tomlinson M. e Woodward J. *Pile design and costruction practice*. Quinta Edizione. London and New York: Taylor & Francis, 2008.

Vesić, A. «Design of pile foundations.» NCHRP Synthesis of Highway Practice, 1977.

Viggiani C., Mandolini A. e Russo G. *Piles and Pile Foundations*. Abingdon: Spon Press, 2012.

Xin L. e Wanjun X. «Theoretical and experimental study on electromechanical coupling properties of multihammer synchronous vibration system.» Shock and vibration, 2016: 1-11.

SITOGRAFIA

www.americanpiledriving.com/.

www.americanpiledriving.com/wordpress/2017/01/12/dodecakong/.

www.americanpiledriving.com/pdfs/training/Air%20hammers.pdf.

https://bsp-if.com/wp-content/uploads/2019/04/01912-BSP-A4-32PP-BROCHURE-2019_LOW-RES.pdf.

www.contecompany.com/what-are-displacement-piles

www.equipile.com

www.hammersteel.com/03-21-07-delmags-new-diesel-hammers-cleaner-more-powerful.html.

www.hera-hammers.com/wp-content/uploads/2017/11/Dieselhammer_instructions.pdf.

www.maxxpiling.com/products/tubular-piles

www.menck.com

www.pi2000srl.it/tecnologie

www.powerquip.co.kr

www.pve-holland.com

www.scranet.org

https://www.slideshare.net/samirsinhparmar/lec-2-pile-installation-spp

www.structuralguide.com/driven-pile

www.vulcanhammer.com.

SPECIFICHE TECNICHEBATTIPALI ARIA/VAPORE

(www.vulcanhammer.com)

SPECIFICATIONS

HAMMER SIZE

OPERATING DATA	1	06	505	08	506	010	012	508	014	016	510	512	320	330	520	530
Energia Rated Striking Energy, ft.-lbs.	15,000	19,500	25,000	26,000	32,500	32,500	39,000	40,000	42,000	48,750	50,000	60,000	60,000	90,000	100,000	150,000
kJ	20.3	26.4	33.9	35.3	44.1	44.1	52.9	54.2	57.6	66.1	67.8	81.3	81.3	122.0	135.6	203.4
Blows per Minute-Normal Stroke, No Set	60	60	46	50	46	50	50	41	59	58	41	41	55	54	42	42
Nominal Stroke, in.	36	36	60	39	60	39	39	60	36	36	60	60	36	36	60	60
mm	914	914	1524	991	1524	991	991	1524	914	914	1524	1524	914	914	1524	1524
Rated Operating Pressure at Hammer, psi	80	100	100	83	120	105	125	65	110	120	83	100	102	150	102	150
bar	5.52	6.89	6.89	5.72	8.27	7.24	8.62	4.48	7.58	8.27	5.72	6.89	7.04	10.34	7.04	10.34
Steam Consumption, lb/hr	2,794	3,230	3,176	4,158	3,843	5,022	5,835	4,542	6,111	6,814	5,480	5,940	6,200	8,280	7,160	8,680
Kg/hr	1,267	1,465	1,441	1,886	1,743	2,278	2,647	2,060	2,772	3,091	2,486	2,694	2,812	3,756	3,248	4,391
Required Boiler Horsepower	81	94	92	125	112	150	175	150	200	210	160	200	200	250	250	300
Air Consumption (Adiabatic), cfm	565	625	563	880	744	1,002	1,075	818	1,161	1,275	932	1,094	1,432	1,795	1,652	2,076
m³/min	16.0	17.7	15.9	24.9	21.06	28.4	30.4	23.2	32.9	36.1	26.4	31.0	35.3	50.8	46.8	58.8
Required Air Compressor Size, cfm	600	750	600	900	900	1,050	1,200	900	1,300	1,300	1,050	1,200	1,600	2,000	2,000	2,400
m³/min	17.0	21.2	17.0	25.5	25.5	28.4	34.0	25.5	36.8	36.8	29.7	34.0	45.3	56.6	56.6	68.0
DIMENSIONAL DATA																
Bore, in.	13.5	13.5	13.5	16.5	13.5	16.5	16.5	16.5	19	19	16.5	16.5	21.75	21.75	21.75	21.75
mm	343	343	343	419	343	419	419	419	483	483	419	419	552	552	552	552
Net Area of Piston, sq. in.	133.51	133.51	133.51	197.92	133.51	197.92	197.92	197.92	255.26	255.26	197.92	197.92	335.75	335.75	335.75	335.75
cm²	861.4	861.4	861.4	1276.9	861.4	1276.9	1276.9	1276.9	1646.8	1646.8	1276.9	1276.9	2166.1	2166.1	2166.1	2166.1
Length of Hammer (overall), ft.-in.	12'-9"	12'-9"	17'-5"	14'-10"	17'-5"	15'-7"	15'-7"	18'-5"	13'-11"	13'-11"	18'-5"	18'-5"	17'-5½"	17'-5½"	21'-6"	21'-5½"
m	3.88	3.88	5.31	4.52	5.31	4.75	4.75	5.61	4.24	4.24	5.61	5.61	5.32	5.32	6.55	6.54
Distance Across Female Jaws, in.	20	20	20	26	20	26	26	26	32	32	26	26	37	37	37	37
mm	508	508	508	660	508	660	660	660	813	813	660	660	940	940	940	940
Width of Female Jaws, in.	8¼	8¼	8¼	9¼	8¼	9¼	9¼	9¼	11¼	11¼	9¼	9¼	11¼	11¼	11¼	11¼
mm	210	210	210	235	210	235	235	235	286	286	235	235	286	286	286	286
Largest Outside Diameter of Pile, in.	18	18	18	24	18	24	24	24	29	29	24	24	34	34	34	34
(Permitted by Standard Jaws) mm	457	457	457	610	457	610	610	610	737	737	610	610	864	864	864	864
Size of Hose, in.	2	2	2	2½	2	2½	2½	2½	3	3	2½	2½	3	3	3	3
mm	51	51	51	64	51	64	64	64	76	76	64	64	76.2	76.2	76.2	76.2
WEIGHT DATA																
Maglio Battipalo Weight of Striking Parts, lb.	5,000	6,500	5,000	8,000	6,500	10,000	12,000	8,000	14,000	16,250	10,000	12,000	20,000	30,000	20,000	30,000
Kg.	2,268	2,948	2,268	3,629	2,948	4,536	5,443	3,629	6,350	7,371	4,536	5,433	9,072	13,608	9,072	13,608
Net Weight of Hammer, lb.	9,700	11,200	11,800	16,750	13,025	18,750	20,750	19,480	27,500	30,250	21,480	23,480	43,500	53,500	45,160	55,160
Kg.	4,400	5,080	5,352	7,598	5,908	8,505	4,412	8,836	12,474	13,721	9,743	10,650	19,732	24,268	20,485	25,021
Shipping Weight of Hammer, lb.	10,100	12,100	12,700	17,500	14,000	19,500	21,500	20,230	28,250	32,000	22,230	24,230	44,900	55,000	45,560	56,660
Kg.	4,581	5,488	5,761	7,938	6,350	8,845	9,752	9,176	13,041	14,515	10,083	10,991	20,367	24,948	21,120	25,701

SPECIFICHE TECNICHE BATTIPALI IDRAULICI

(www.powerquip.co.kr)

BRUCE PILING EQUIPMENT **HYDRAULIC PILE HAMMER**

Fixed leader type

Perform Data	Ram Weight	Max. Potential Energy	Blow Rate at Max. Stroke	Operating Pressure	Required Flow Rate	Hammer Weight
MODEL	ton	ton.m	bpm	bar	lpm	kg
SGH-0212	2	2.4	40	230	100	4,300
SGH-0312	3	3.8	40	230	100	5,600
SGH-0412	4	4.8	40	230	120	7,000
SGH-0612	5	6.0	40	230	160	8,500
SGH-0712	7	8.4	40	230	160	12,500
SGH-0715	7	10.5	35	230	230	13,000
SGH-1012	10	12.0	35	250	280	18,500
SGH-1015	10	15.0	35	250	298	19,000
SGH-1212	12	14.4	35	250	320	21,000
SGH-1215	12	18	35	250	370	21,500
SGH-1312	13	15.6	35	250	320	22,000
SGH-1315	13	19.5	35	250	370	22,500
SGH-1412	14	16.8	36	250	320	23,500
SGH-1415	14	21.0	35	250	370	24,000

- Model Name Meaning : ex) SGH-3012 identified as a 30tons Ram Weight with 1.2m of Stroke
- Modification is subject to change without prior notice

BRUCE PILING EQUIPMENT **HYDRAULIC PILE HAMMER**

Crane suspended type

Perform Data	Ram Weight	Max. Potential Energy	Blow Rate at Max. Stroke	Operating Pressure	Required Flow Rate	Hammer Weight
MODEL	ton	ton.m	bpm	bar	lpm	kg
SGH-1912	18	19.2	32	250	350	30,500
SGH-1915	18	24.0	30	250	410	31,000
SGH-1918	18	28.8	28	250	460	31,500
SGH-1919	18	33.4	26	250	480	32,000
SGH-1812	18	21.6	30	250	410	33,000
SGH-1815	18	27.0	28	270	460	34,000
SGH-2012	20	24.0	30	270	410	37,000
SGH-2015	20	30.0	28	270	460	38,000
SGH-2512	25	30.0	26	270	600	48,000
SGH-2515	25	37.5	26	270	650	50,000
SGH-3012	30	36	26	270	600	56,500
SGH-3013	30	39	26	270	600	57,000
SGH-3015	30	45	26	270	650	58,000
SGH-3512	35	42.0	26	270	640	69,000
SGH-3515	35	52.5	26	270	800	70,000

- Model Name Meaning : ex) SGH-3012 identified as a 30tons Ram Weight with 1.2m of Stroke
- Modification is subject to change without prior notice

BRUCE PILING EQUIPMENT **HYDRAULIC PILE HAMMER**

U-TYPE

Perform Data	Ram Weight	Max. Potential Energy	Blow Rate at Max. Stroke	Operating Pressure	Required Flow Rate	Hammer Weight
MODEL	ton	ton.m	bpm	bar	lpm	kg
SGH-4012	40	48	26	270	983	66,000
SGH-4015	40	60	24	270	854	67,000
SGH-4212	42	50.4	26	270	983	67,000
SGH-4215	42	63	26	270	854	68,000
SGH-4512	45	54	26	270	830	81,000
SGH-4515	45	67.5	28	270	1,040	82,000
SGH-4519	45	85.5	24	270	1,230	83,000
SGH-4712	47	56.4	26	270	800	83,000
SGH-4715	47	70.5	26	270	1,040	84,000
SGH-4719	47	88.3	24	270	1,230	85,000
SGH-5715	57	85.5	26	270	1,250	100,000
SGH-6015	60	90	24	250	1,250	110,000
SGH-7015	70	105	24	250	1,975	130,000
SGH-8015	80	120	24	250	1,975	140,000

- Model Name Meaning : ex) SGH-3012 identified as a 30tons Ram Weight with 1.2m of Stroke
- Modification is subject to change without prior notice

BRUCE PILING EQUIPMENT **HYDRAULIC POWER PACK**

Perform Data	Engine Power	Rated Flow rate	Hyd. Tank Capacity	Fuel Tank Capacity	Pack Weight	Hammer suitability
MODEL	PS	lpm	liter	liter	kg	MODEL
PQ-150	125	150	330	200	4,000	SGH-0212 SGH-0312 SGH-0412
PQ-230	154	165	350	300	4,000	SGH-0612 SGH-0712
PQ-250	230	325	600	500	4,400	SGH-0715 SGH-1012 SGH-1015 SGH-1212 SGH-1312 SGH-1412
PQ-330	290	400	700	500	5,000	SGH-1215 SGH-1315 SGH-1415 SGH-1612
PQ-430	350	500	800	500	5,300	SGH-1615 SGH-1812 SGH-2012
PQ-530	475	650	800	500	5,600	SGH-1618 SGH-1619 SGH-1815 SGH-2015 SGH-2512 SGH-3012 SGH-3015
PQ-630	525	650	1,000	800	7,800	SGH-2515 SGH-3015 SGH-3512 SGH-4012 SGH-4015
PQ-730	700	930	1,200	800	8,000	SGH-3515 SGH-4212 SGH-4215 SGH-4512
PQ-830	750	1,000	1,500	800	8,000	SGH-4515 SGH-4712 SGH-4715
PQ-1000	930	1,200	1,800	1,500	8,500	SGH-4519 SGH-4719
PQ-1200	1,120	1,300	2,430	1,922	12,000	SGH-5715
PQ-1500	1,500	2,000	3,200	2,200	19,000	SGH-7015 SGH-8015

- Modification is subject to change without prior notice

SPECIFICHE TECNICHE BATTIPALI DIESEL

(DELMAG Dieselbaren 2018)

/ Technical Data

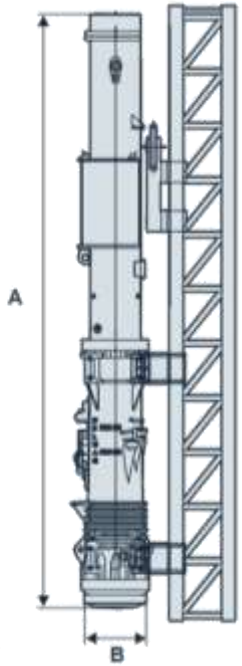
		D6-32	D8-22	D12-42	D16-32	D19-42	D25-32	D30-32	D36-32	D46-32	D62-22	D80-23	D100-13	D150-42	D200-42
Impact weight (piston)	kg	600	800	1280	1600	1820	2500	3000	3600	4600	6200	8000	10000	15000	20000
Energy per blow	kNm	19-9	27-13	46-20	54-25	66-29	90-40	103-48	123-56	166-71	224-107	288-171	360-214	512-329	682-436
Number of blows	min-1	38-52	36-52	35-52	36-52	35-52	35-52	36-52	36-53	35-53	35-50	35-45	35-45	36-45	36-45
Suitable for driving piles (depending on soil and pile)	kg	300-2000	500-3000	800-5000	1000-6000	1100-6000	1600-7500	2000-9000	2,5-12	3-16	4-30	6-60	7-100	12-160	14-250
Consumption															
Diesel oil	l/h	3,7	4	4,5	5	7,5	7,5	10	11,5	16	20	25	30	50	60
Lubricant	l/h	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	1	1,5	1,5	2	2,6	2,6	4,8	5,8
Tank capacity															
Diesel oil tank	l	19	20	25	32	32	67	67	89	89	98	155	155	310	430
Lube tank	l	5	6	6,5	9	9	19	19	17	17	31,5	32	32	45	80
Max. rope diameter for deflector sheave of tripping device	mm	20	20	20	20	20	22	22	38	38	38	30*	30*	36*	36*
Max. inclined pile driving without / with extension		1:3 / -	1:2 / -	1:5 / 1:1	1:5 / 1:1	1:5 / 1:1	1:5 / 1:1	1:5 / 1:1	1:5 / 1:1	1:5 / 1:1	1:2 / 1:1	1:5 / 1:2	1:5 / 1:2	1:5 / 1:2	1:5 / 1:3
Weight															
Diesel pile hammer	kg	1620	1935	2735	3620	3840	5670	6170	8200	9300	12250	16905	20720	28450	51800
Tripping device	kg	114	114	114	114	114	186	186	450	450	450	750	750	1850	1850

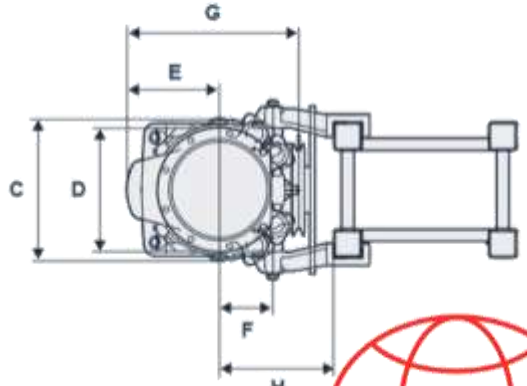
Maße / Dimensions

		D6-32	D8-22	D12-42	D16-32	D19-42	D25-32	D30-32
A	mm	4300	4700	4770	5160	5160	5500	5500
B	mm	350	350	400	440	440	560	560
C	mm	465	410	440	480	480	670	670
D	mm	320	320	320	320	320	540	540
E	mm	310	315	335	345	345	405	405
F	mm	245	245	245	280	280	235	235
G	mm	590	590	610	700	700	780	780
H	mm	320	320	340	355	360	435	435

Maße / Dimensions

		D36-32	D46-32	D62-22	D80-23	D100-13	D150-42	D200-42
A	mm	5470	5470	5910	7200	7358	7490	8175
B	mm	660	660	710	820	820	990	1250
C	mm	800	800	800	890	890	1280	1425
D	mm	640	640	560	800	800	1110	1425
E	mm	445	445	490	550	550	720	730
F	mm	275	275	380	350	350	375	580
G	mm	950	950	970	1110	1110	1450	1890
H	mm	500	500	500	660	660	900	1050



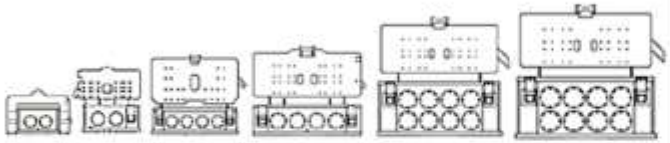


SPECIFICHE TECNICHE SISTEMI DI INFISSIONE VIBRANTI

(www.powerquip.co.kr)

BRUCE® PILING EQUIPMENT

VIBRO HAMMER



Perform Data	Eccentric Moment	Centrifugal Force	Max. Frequency	Max. Hydraulic Power	Max. Oil Flow	Vibro Weight
MODEL	Kg-m	tons	vpm	HP	lpm	kg
SGV-80	11.5	51	2,000	135	190	2,400
SGV-100	17.3	62	1,800	193	270	2,900
SGV-200	26	84	1,730	258	360	4,600
SGV-300	34	96	1,650	258	360	5,370
SGV-400	46	130	1,600	380	530	7,000
SGV-450	52	147	1,600	429	600	7,800
SGV-500	58	167	1,600	500	700	8,730
SGV-600	76	215	1,600	601	840	9,500
SGV-1000	110	271	1,500	751	1,050	12,000

- 320 Bar of (Max. Setting) Pressure can be set on the Power Pack
- Modification is subject to change without prior notice

Clamp Data	Universal Clamp Force / Weight		Caisson Clamp Force / Weight	
MODEL	tons	kg	tons	kg
SGV-80	60 (60U)	250 (60U)	80 (40D)	1,000 (40D)
SGV-100	80 (80U)	480 (80U)	80 (40D)	1,000 (40D)
SGV-200	100 (100U)	500 (100U)	160 (80D)	1,408 (80D)
SGV-300	130 (130U)	630 (130U)	160 (80D)	1,408 (80D)
SGV-400	160 (160U)	1,190 (160U)	160 (80D)	1,562 (80D)
SGV-450 SGV-500	180 (180U)	1,200 (180U)	240 (120D)	1,606 (120D)
SGV-600	320 (320U)	2,500 (320U)	280 (140D)	2,800 (140D)
SGV-1000	320 (320U)	2,500 (320U)	320 (160D)	3,000 (160D)

- 300 Bar of (Clamp Operating) Pressure can be set on the Power Pack
- Modification is subject to change without prior notice

BRUCE® PILING EQUIPMENT

VIBRO POWER PACK

Perform Data	Engine Power	Max. Flow rate	Hyd. Tank Capacity	Fuel Tank Capacity	Pack Weight	Vibro suitability
MODEL	HP	lpm	liter	liter	kg	MODEL
PQ-200V	199	227	350	300	4,100	SGV-80
PQ-250V	230	280	600	500	4,400	SGV-100
PQ-350V	290	400	800	500	5,400	SGV-200 SGV-300
PQ-500V	475	530	800	500	5,800	SGV-400
PQ-600V	525	600	1,000	800	6,600	SGV-450
PQ-700V	650	764	1,200	900	7,200	SGV-500 SGV-600
PQ-800V	750	950	1,500	900	7,500	SGV-1000

- 320 Bar of? Max. Setting? Pressure can be set on the Power Pack
- Modification is subject to change without prior notice