

Bolzano, 24 novembre 2016

# Seminario d'aggiornamento INGEGNERIA GEOTECNICA GEO-STRUTTURE, FONDAZIONI e PERMAFROST

## Progettare Fondazioni per Strutture «Offshore»

Dott. Ing. Flaviana Moccia  
PhD Ingegneria Geotecnica

V° Edizione dell'Incontro delle Commissioni di Ingegneria Geotecnica

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA AUTONOMA DI BOLZANO  
CORSI DI FORMAZIONE E CORSI DI AGGIORNAMENTO PROFESSIONALE



# Progettare Fondazioni per Strutture «Offshore»

## Indice della presentazione:

1. Introduzione: le tipologie di fondazioni delle strutture installate mare (offshore)
2. Cenni sui principali aspetti del progetto (installazione) delle fondazioni offshore
3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)
4. Case pratico e Conclusione

## 1. Introduzione

### Peculiarità nel progetto di fondazioni per strutture installate a mare

Il progettazione nel campo della ingegneria geotecnica «offshore» storicamente nasce dalla progettazione di fondazioni per opere a terra, ma negli ultimi 30 anni i due campi di applicazione hanno subito delle forti divergenze, guidate in parte dalle dimensioni delle fondazioni utilizzate a mare e dalla sostanziale diversità delle tecniche di costruzione ed installazione.

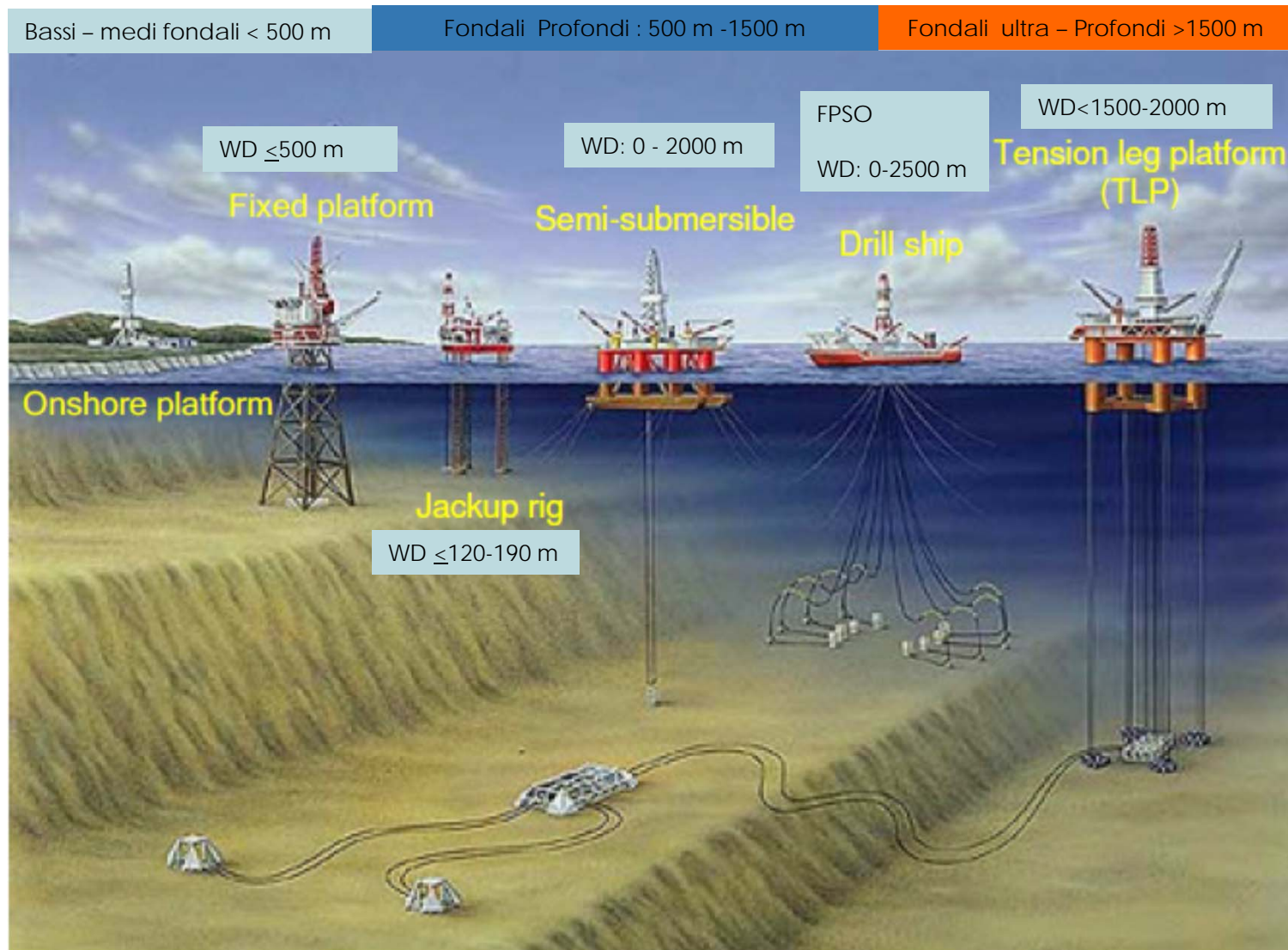
Le principali scelte di buona pratica ingegneristica per le applicazioni di ingegneria geotecnica offshore hanno portato negli anni a preferire:

- 1) **Pali di grande diametro** ( $>45''$ ) rispetto a gruppi di pali di medie dimensioni;
- 2) allo scavo (e/o soil reclamation) in presenza di terreni soffici o sciolti superficiali (entro 1-2 m di profondità da fondale), l' **Uso di «Skirt»** (gonne) per fondazioni superficiali o lo **«sprofondamento» di fondazioni** per diversi diametri (gravity foundation o spudcan) di profondità dalla linea del fondale, trasferendo il piano dei carichi più in profondità in corrispondenza di terreno dalle migliori caratteristiche meccaniche;
- 3) **Installazione subaquea di fondazioni** «Skirted» o cassoni per gravità o per «Suction»;
- 4) **Tipologia di terreni**: contenuti d'acqua superiori al 100%, terreni soffici-tipo mud;
- 5) L'importante dei **carichi ciclici** (carichi d'onda) nel dimensionamento e con tolleranze deformative diverse rispetto al campo onshore. Queste differenze hanno portato a **sviluppare normative (design code) relativi alle sole strutture offshore e relative fondazioni**.

*Doc. ref.: «Challenges of Offshore Geotechnical Engineering», di Mark Randolph, Mark Cassidy, Susan Gourvenec.*

# 1. Definizione delle caratteristiche principali delle strutture offshore e fondazioni

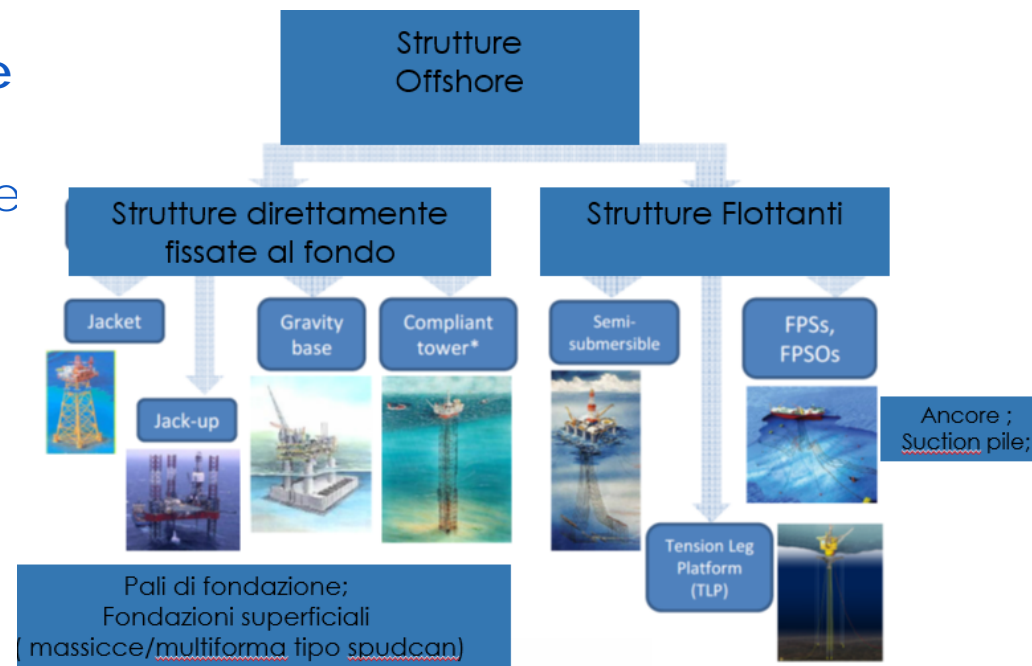
## Le principali strutture «offshore»:



# 1. Definizione delle caratteristiche principali delle strutture offshore e fondazioni

Per i principali tipi di **strutture offshore**

- ▶ piattaforme fisse palificate
- ▶ strutture a gravità
- ▶ sistemi di produzione galleggianti
- ▶ jack-up drilling rigs
- ▶ sistemi sottomarini
- ▶ sealines



vengono utilizzate comunemente le seguenti tipologie di fondazione:

- ▶pali battuti
- ▶pali trivellati
- ▶fondazioni a spud can per jack-up
- ▶fondazioni superficiali
- ▶suction piles
- ▶ancore

Ref. Foundation of offshore structure  
Dr. Pulpong Pongvithayapanu (Ph.D, Civil Engineering)  
International Maritime College Kasetsart University, Si Racha campus

# 1. Definizione delle caratteristiche principali delle strutture offshore e fondazioni

## Principali tipi di ancoraggi

- **Pali**

usati generalmente per TLP e FPSO, infissi mediante battipali sottomarini fino a fondali di circa 1500 m (pali);

- **Suction Pile**

Tipicamente i suction pile sono strutture in acciaio, cilindriche e cave. Caratterizzate da:

- Grandi diametri: 3 - 10m;
- rapporto tra lunghezza e diametro ( $L/D$ )  $\sim 1 \div 10$ ;
- rapporto tra diametro e spessore ( $D/t$ )  $\sim 100 \div 250$ .



# 1. Definizione delle caratteristiche principali delle strutture offshore e fondazioni

## Principali tipi di ancoraggi

### • Suction Piles

soluzione tipica per installazioni offshore in alti fondali con terreni argillosi soffici. L'installazione avviene per gravità e per suzione («suction») applicando un pompaggio (ovvero aspirando l'acqua presente all'interno dell'elemento) in testa palo (valvole chiuse) che genera una differenza di pressione dell'acqua all'interno e all'esterno del cassone ( $\Delta u$ ). Tale differenza di pressione rappresenta una forza aggiuntiva, diretta verso il basso, che ne favorisce l'installazione nel terreno.

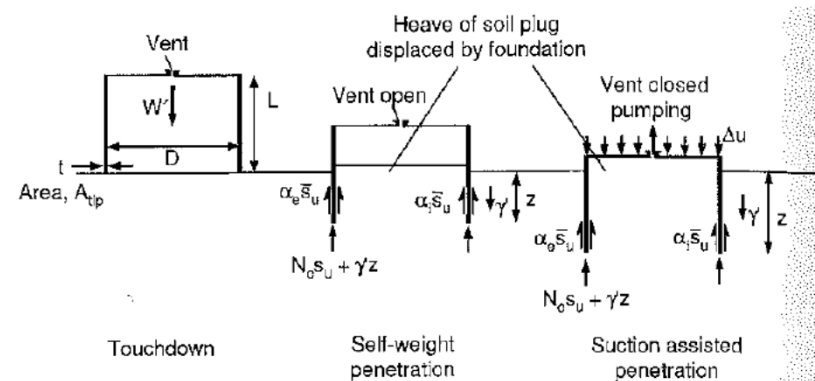
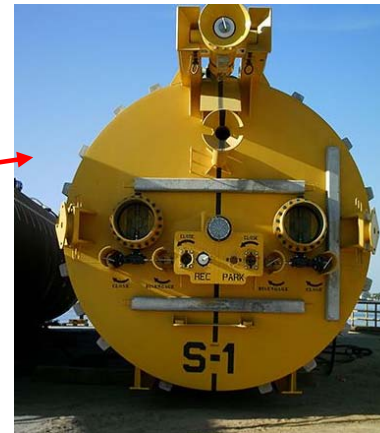
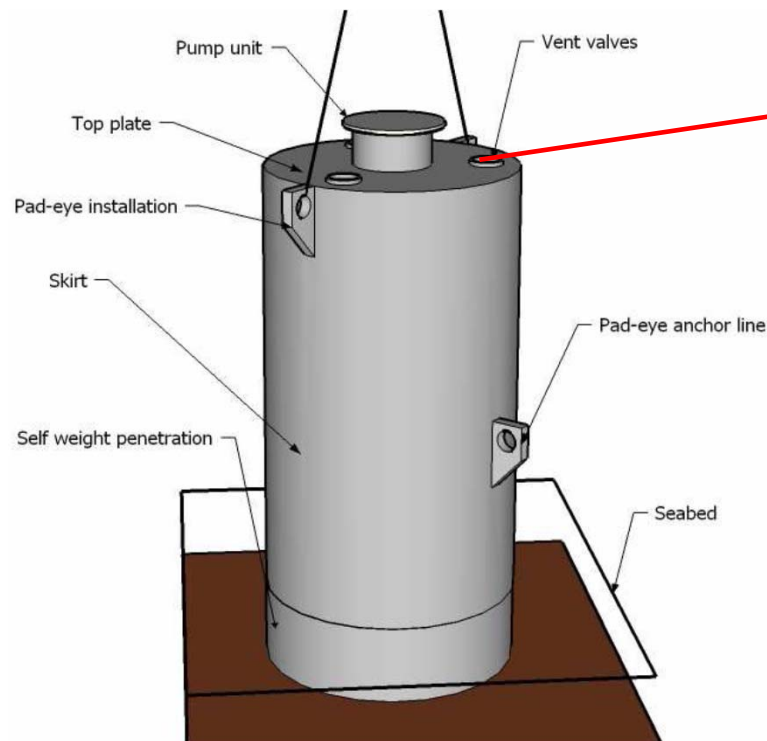


Figure 6.15 Forces during installation of a skirted foundation (Randolph *et al.* 1998)

## 1. Definizione delle caratteristiche principali delle strutture offshore e fondazioni

### Principali tipi di ancoraggi

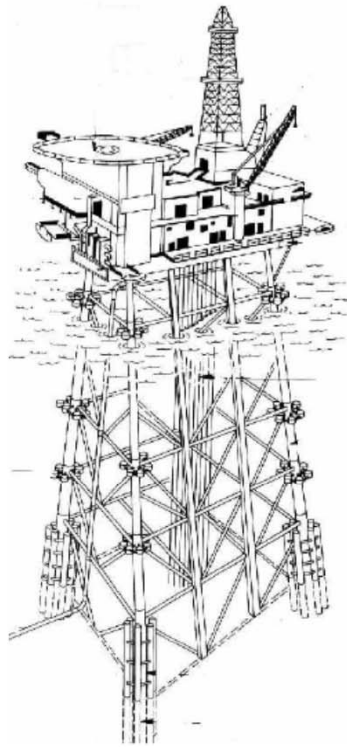
- **Torpedo Piles & Deep Penetrating Anchors (DPA)**

- usate **principalmente in argille soffici** (tipiche degli alti fondali) sfruttano il principio della gravità per l'installazione.
- connessione **tra DPA e linea di ormeggio omnidirezionale** per evitare problemi di installazione
- di recente applicazione utilizzata per ancoraggi di deepwater drilling rig e FPSO (**dimensionamento non normato**)

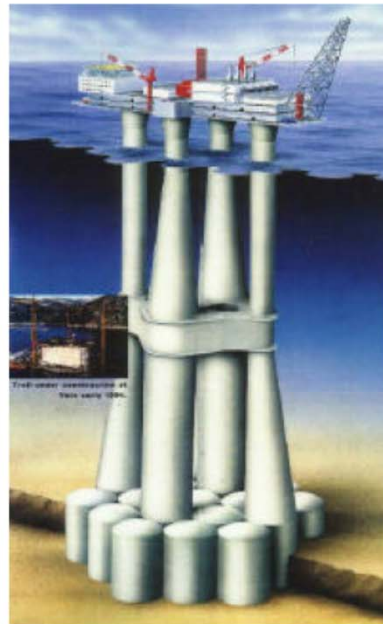


## 1. Definizione delle caratteristiche principali delle fondazioni per strutture «offshore»

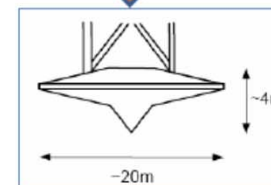
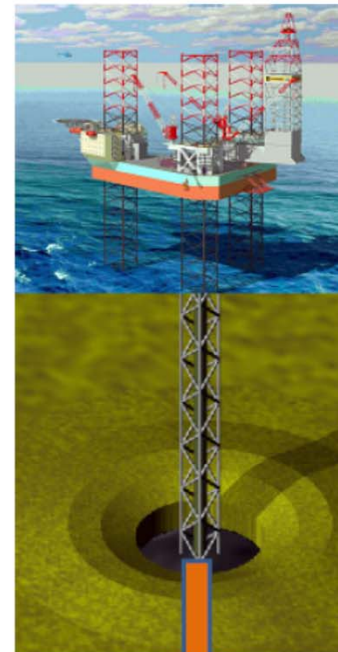
### Fondazioni per piattaforme di perforazione e produzione NON FLOTTANTI



Pile  
foundation



Shallow  
foundation



Spudcan

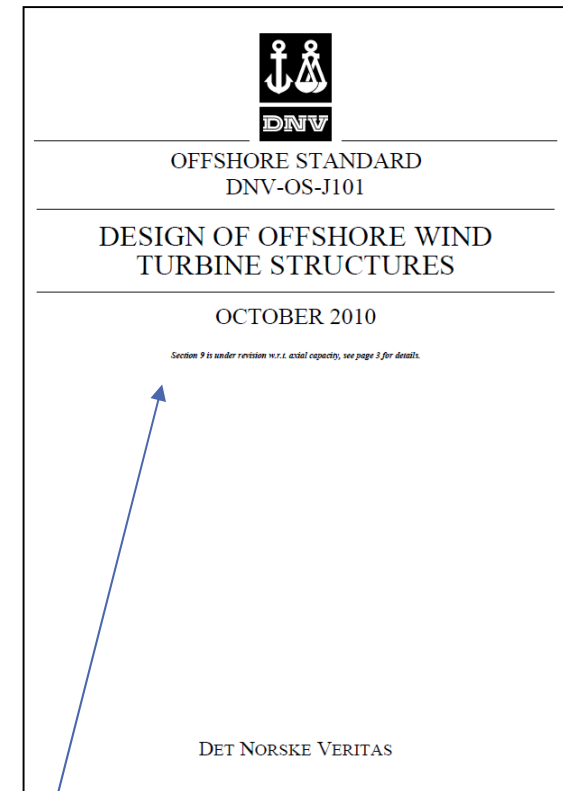
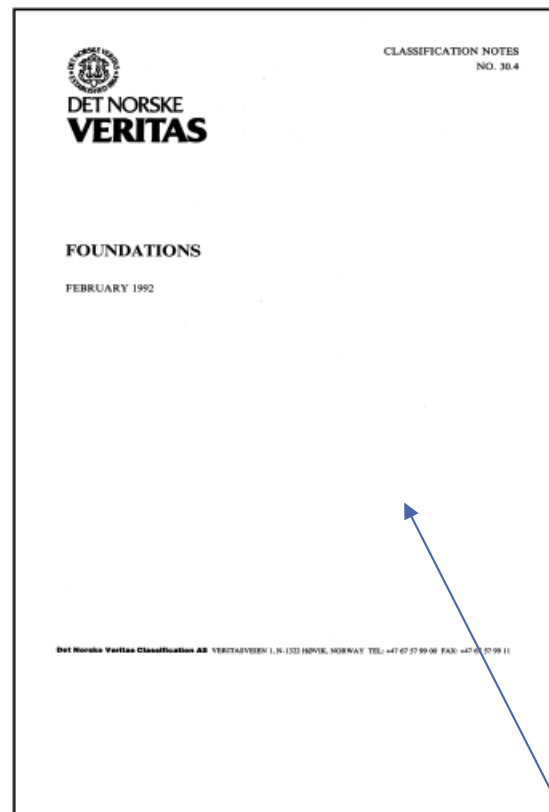
Ref. *Foundation of offshore structure*  
Dr. Pulpong Pongvithayapanu (Ph.D, Civil Engineering)  
International Maritime College Kasetsart University, Si Racha campus

**Cenni sui principali aspetti del progetto (installazione) delle  
fondazioni offshore**

## 2. Cenni sui principali aspetti del progetto (installazione) delle fondazioni offshore

### NORMATIVA

### Principali Codici di riferimento per il progetto delle fondazioni Offshore: API e DNV



Solo Fondazioni superficiali

altri codici sono : ISO e NAVFAC

## 2. Cenni sui principali aspetti del progetto (installazione) delle fondazioni offshore

### Fondazioni superficiali: MUDMAT

I **Mudmat** sono in genere fondazioni temporanee

- sono usati durante il posizionamento e la fase di battitura dei pali di fondazione del jacket
- sono progettate con elementi verticali detti “gonne” (skirt) che penetrano nel terreno di fondazione fino a superare lo strato di terreno più «scadente» e ad appoggiarsi su un terreno dalle migliori caratteristiche di capacità portante. Gli skirt inducono **un aumento della capacità portante e della resistenza laterale nei confronti di azioni orizzontali**
- L'installazione avviene per gravità
- Per il progetto classiche verifiche di capacità portante scorrimento e ribaltamento andando a definire i domini di rotture H-N.



## 2. Cenni sui principali aspetti del progetto (installazione) delle fondazioni offshore

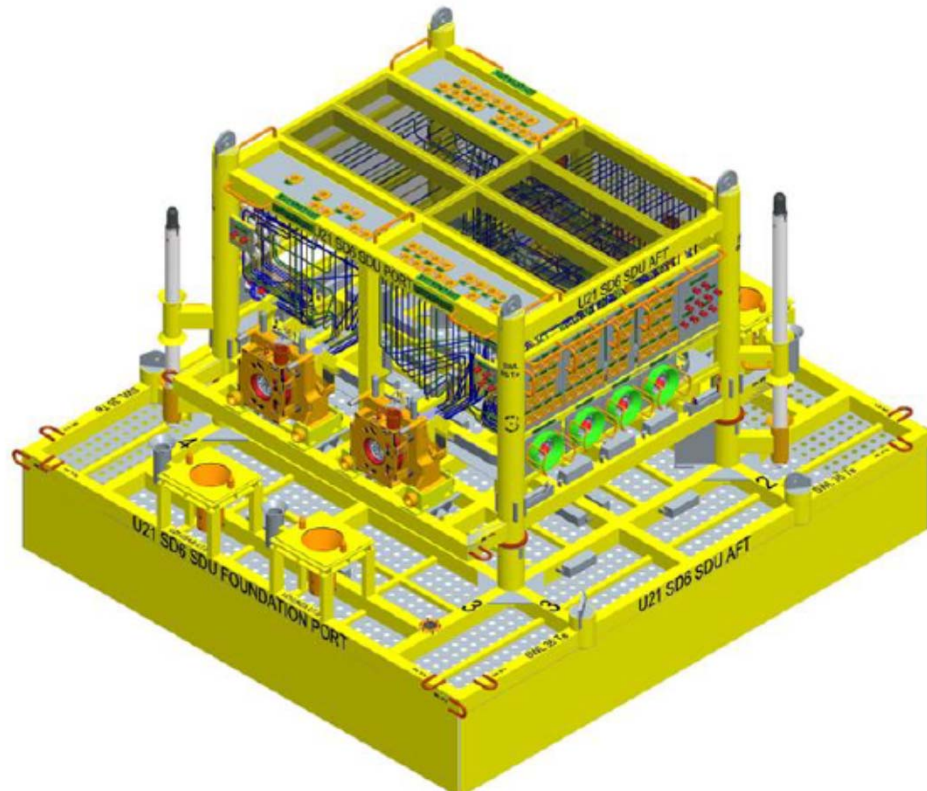
### Fondazioni superficiali: MUDMAT

#### Skirted foundation: SDU (subsea distribution unit) Foundation

Mudmat dimension: 10 m x 8.6 m

Corrugated skirts walls : 1 m

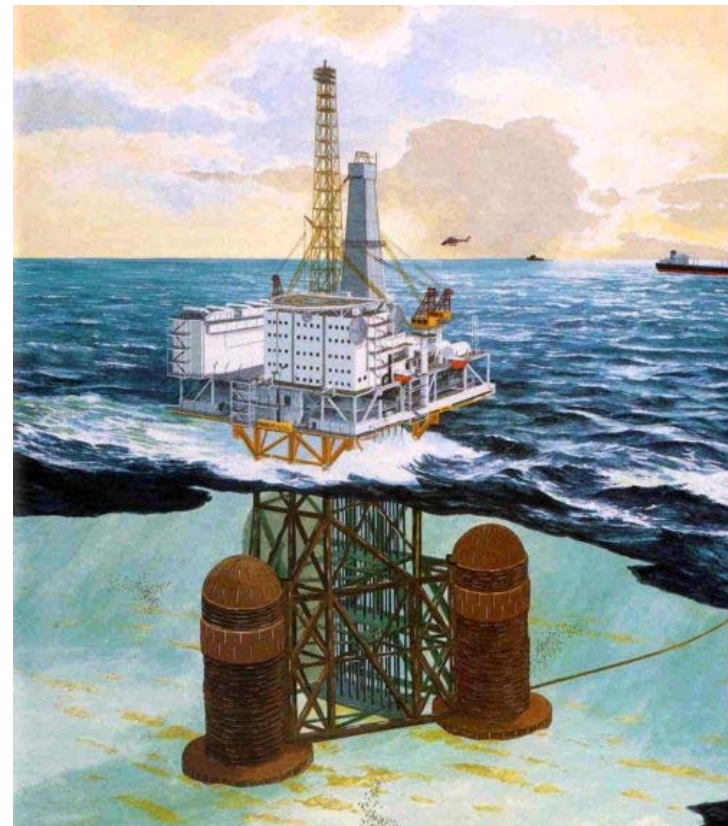
Installation: self weight only



## 2. Cenni sui principali aspetti del progetto (installazione) delle fondazioni offshore

### Fondazioni superficiali: PIATTAFORME A GRAVITÀ

- Adottate come fondazioni permanenti in caso di terreni caratterizzati da elevata resistenza (hard soil).
- Dopo le fasi di installazione tutte **le zone in cui non c'è connessione tra la struttura di fondazione e il terreno sono cementate** in modo da ottenere una base di appoggio smussata e regolare.
- In questo caso devono essere valutati gli spostamenti a lungo termine indotti per effetto di carichi ciclici che in genere non sono considerati nel progetto delle fondazioni offshore.



## 2. Cenni sui principali aspetti del progetto (installazione) delle fondazioni offshore

### Fondazioni superficiali: PIATTAFORME A GRAVITÀ



## 2. Cenni sui principali aspetti del progetto (installazione) delle fondazioni offshore

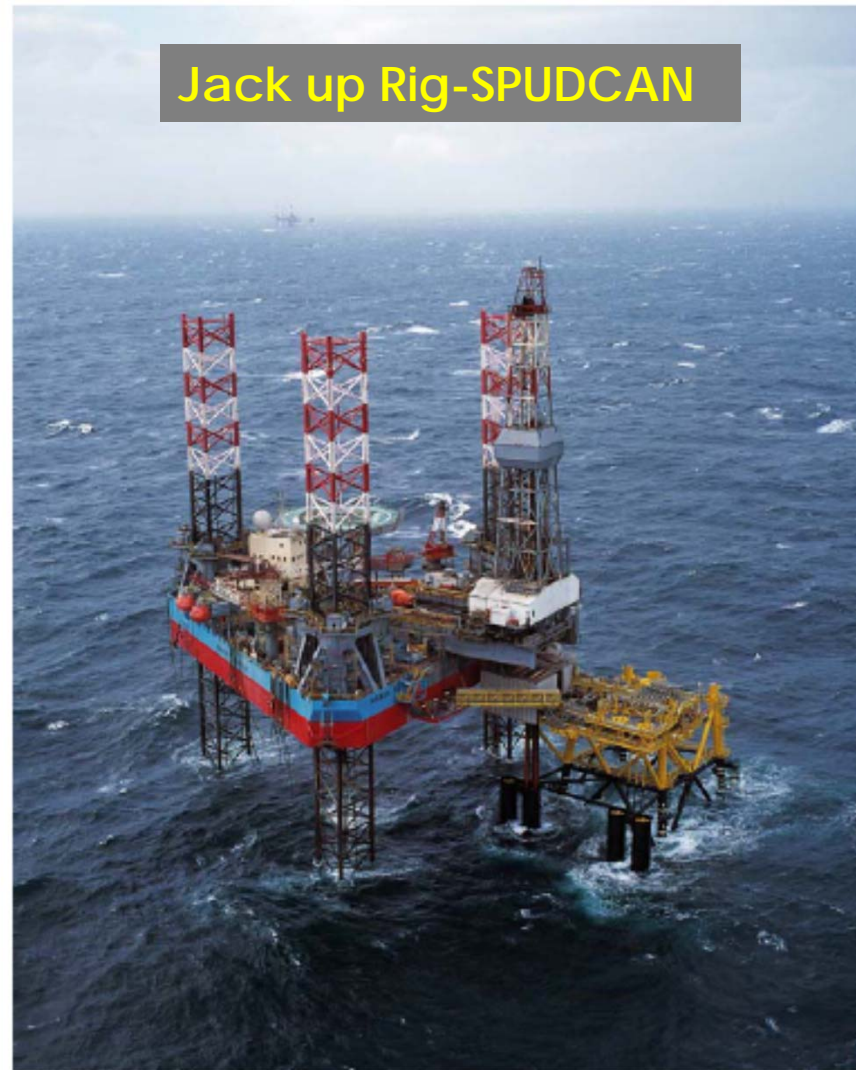
### Fondazioni Jack-up Rig

- Le fondazioni di un jack-up consistono in elementi strutturali posti all'estremità inferiore di ciascuna leg (*spud cans*) che agendo sul terreno come fondazioni superficiali garantiscono adeguata stabilità al jack-up soggetto ai carichi gravitazionali e alle azioni ambientali.

SPUDCAN



Jack up Rig-SPUDCAN

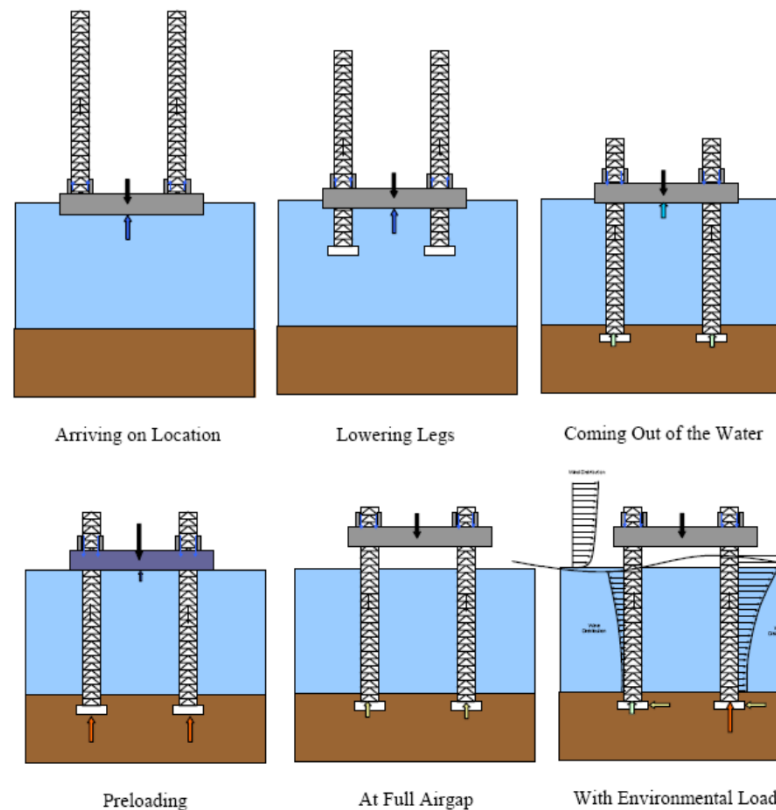
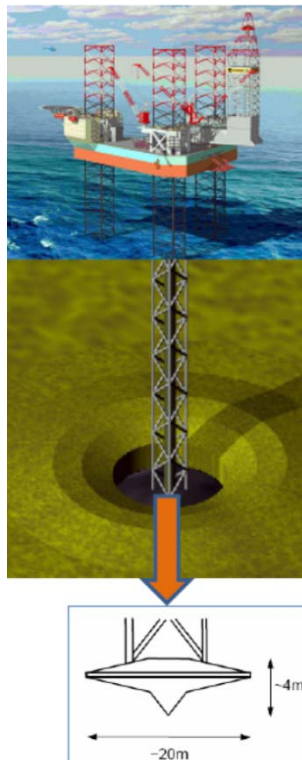


PIATTAFORME PERFORAZIONE  
(MOBILI)

## 2. Cenni sui principali aspetti del progetto (installazione) delle fondazioni offshore

### ➤ Spud can penetration and preload

- Viene eseguita l'analisi di penetrazione dello spud can valutando la capacità portante del terreno in funzione della profondità
- L'analisi di capacità portante / penetrazione viene eseguita considerando il carico di preload definito in modo che lo spud can raggiunga una posizione che garantisca stabilità al jack-up in condizioni ambientali estreme (solitamente il carico di preload è pari a 1.5 volte il carico operativo)



SPUD CAN

## 2. Cenni sui principali aspetti del progetto (installazione) delle fondazioni offshore

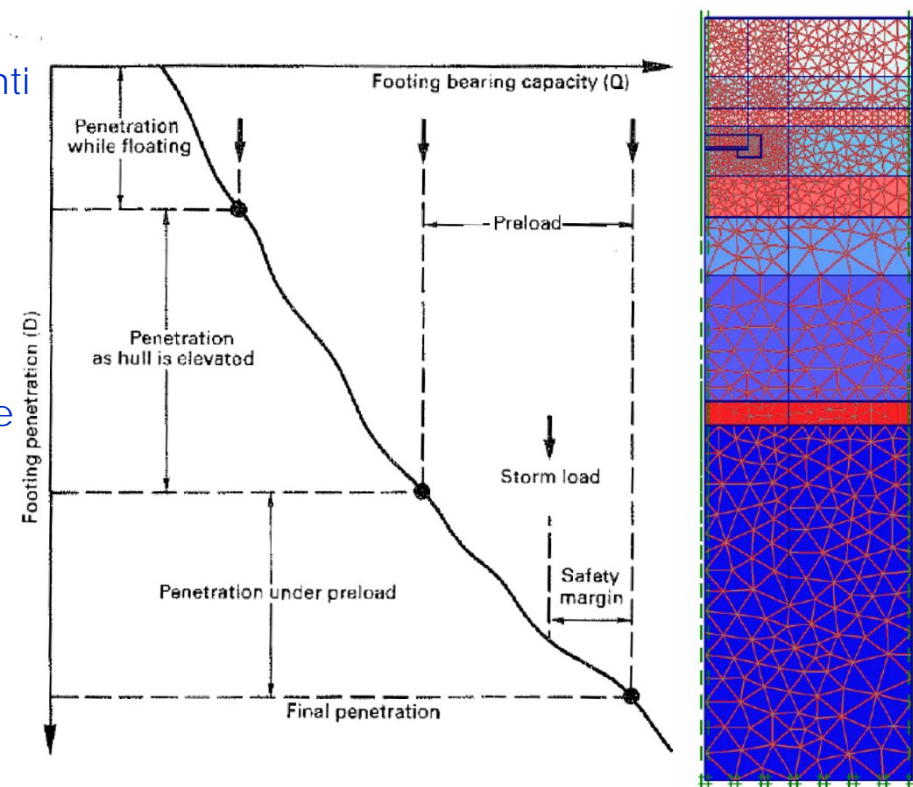
### SPUD CAN-PRELOAD

- In condizioni ambientali estreme il jack-up è soggetto a significativi carichi orizzontali: **il preload deve essere in grado di attivare una sufficiente resistenza allo scorrimento della fondazione nel terreno per contrastare i carichi meteomarinari**
- Il preload deve tenere conto di un **fattore di sicurezza definito per compensare le incertezze di valutazione dei carichi agenti** e della caratterizzazione meccanica del suolo

La valutazione della penetrazione degli spud cans è complicata principalmente per i seguenti motivi:

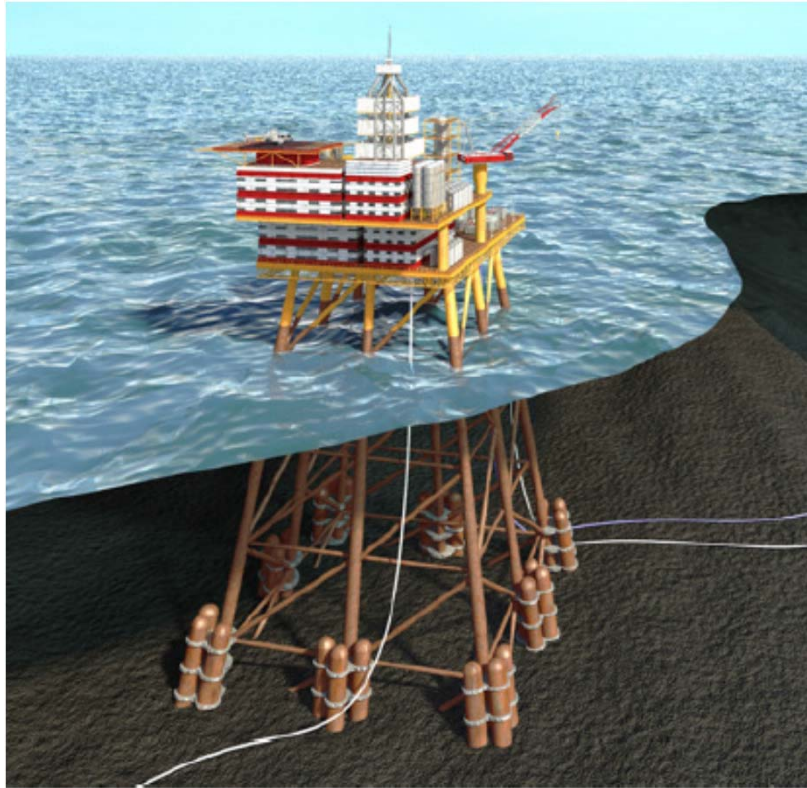
- difficoltà di **descrivere i terreni con modelli costitutivi in grado di riprodurre il comportamento non lineare a partire da livelli di sollecitazione modesti fino a raggiungere le condizioni di rottura**
- anche con il ricorso ad analisi numeriche FEM, risulta difficoltoso rappresentare fenomeni deformativi rilevanti che contraddistinguono la fase di rottura/penetrazione.

Nella pratica corrente vengono utilizzate procedure semplificate, tipo quelle descritte in SNAME Technical and Research Bulletin 5-5° (dimensionamento fondazione superficiale)



## 2. Cenni sui principali aspetti del progetto (installazione) delle fondazioni offshore

Piattaforme fisse di produzione: **Jacket**-Fixed platform



Sulla piattaforma (DECK) sono installati impianti per la perforazione, produzione, moduli, alloggi per il personale.

La struttura di supporto è reticolare, costituita da elementi tubolari in acciaio, fondate su pali in acciaio nel terreno per profondità rilevanti (>40 m).

Queste piattaforme sono caratterizzate da periodi naturali di max 5 sec.

In uso per fondali di massimo 400-500 m. Bullwinkle (1991) Golfo del Messico ->412 m.

Le tipologie di pali di fondazione per le piattaforme sono in genere battuti (**main pile; skirt pile; pin pile**), ma quando necessario trivellati.

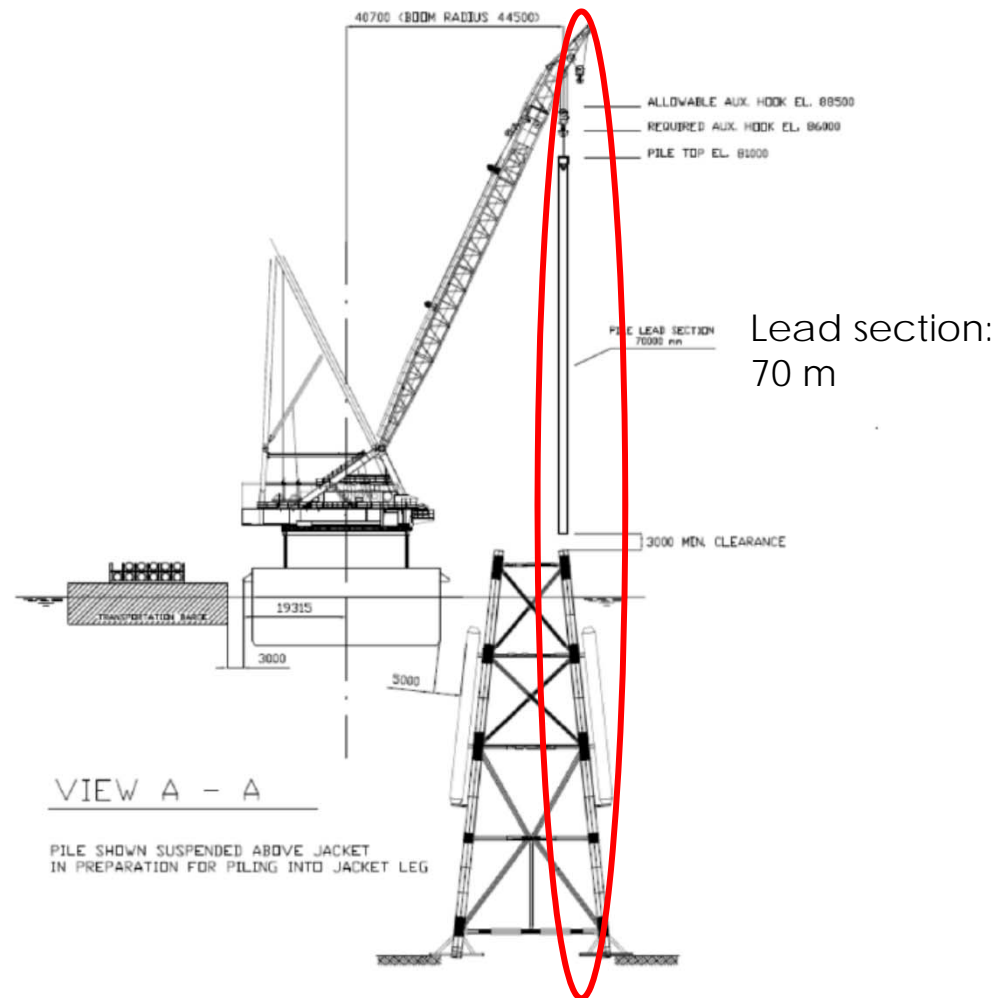
I pali sono resi solidali con la struttura della piattaforma mediante: **cementazione; saldatura in testa palo; connessione meccanica (Hydra-Lok)** .

## 2. Cenni sui principali aspetti del progetto (installazione) delle fondazioni offshore

### MAIN PILE

#### Pali Battuti - Main piles

- Pali installati all'interno delle piantane del jacket.
- Utilizzati solitamente in fondali bassi con diametro del palo e infissione limitate.
- Diametro massimo del palo compatibile con le dimensioni della piantana.
- Infissione palo compatibile con capacità battipalo e caratteristiche terreno.
- Installazione di palo in più sezioni: lead section e add-ons.
- N° di add-ons definito in funzione delle problematiche di stick-up in fase di battitura.

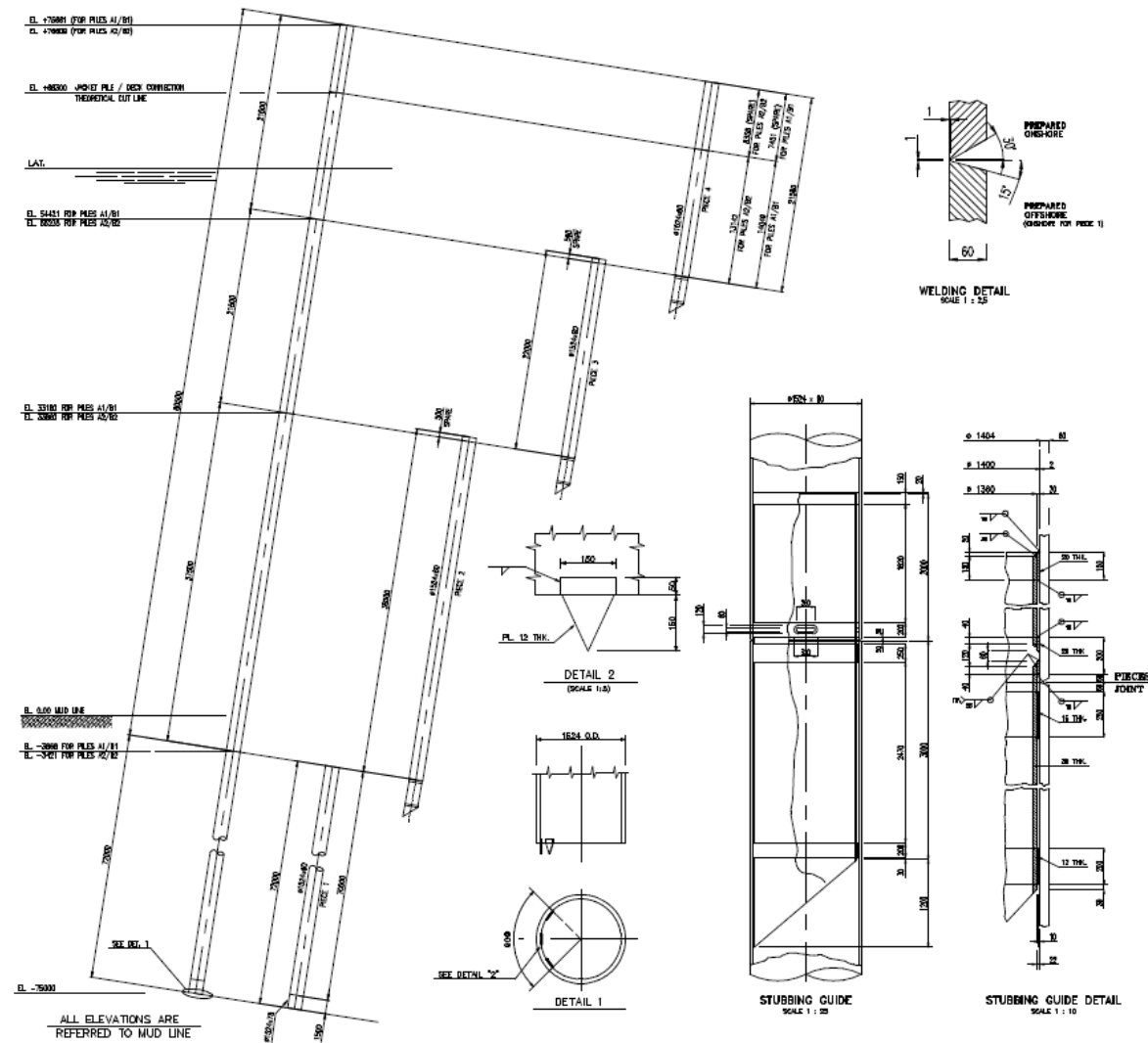


## 2. Cenni sui principali aspetti del progetto (installazione) delle fondazioni offshore

### MAIN PILE

#### Installazione Main Pile

- Esempio di composizione palo: lead section + add-ons
- Esempio di connessione tra due spezzoni di palo.



## 2. Cenni sui principali aspetti del progetto (installazione) delle fondazioni offshore

### MAIN PILE

- Battitura avviene attraverso **Battipali aerei (Idraulici o diesel)**;
- Il palo è composto da più sezioni;
- Vantaggio di disporre di **pali inclinati** e quindi garantire un **miglior comportamento del jacket sotto l'azione di carichi orizzontali**;
- **Tempi di installazioni lunghi (più giorni)**:
  - ogni sezione i palo deve essere installata, saldata e poi testata;
  - tempi di montaggio/rimozione del battipalo ;
  - battitura;
  - eventuale rimozione mezzi di installazione.



## 2. Cenni sui principali aspetti del progetto (installazione) delle fondazioni per piattaforme stabili

### SKIRTED PILES

Pali installati e battuti **attraverso tubi guida (SLEEVES)** posizionati a fondo mare, connessi rigidamente tra di loro e alla struttura del jacket;

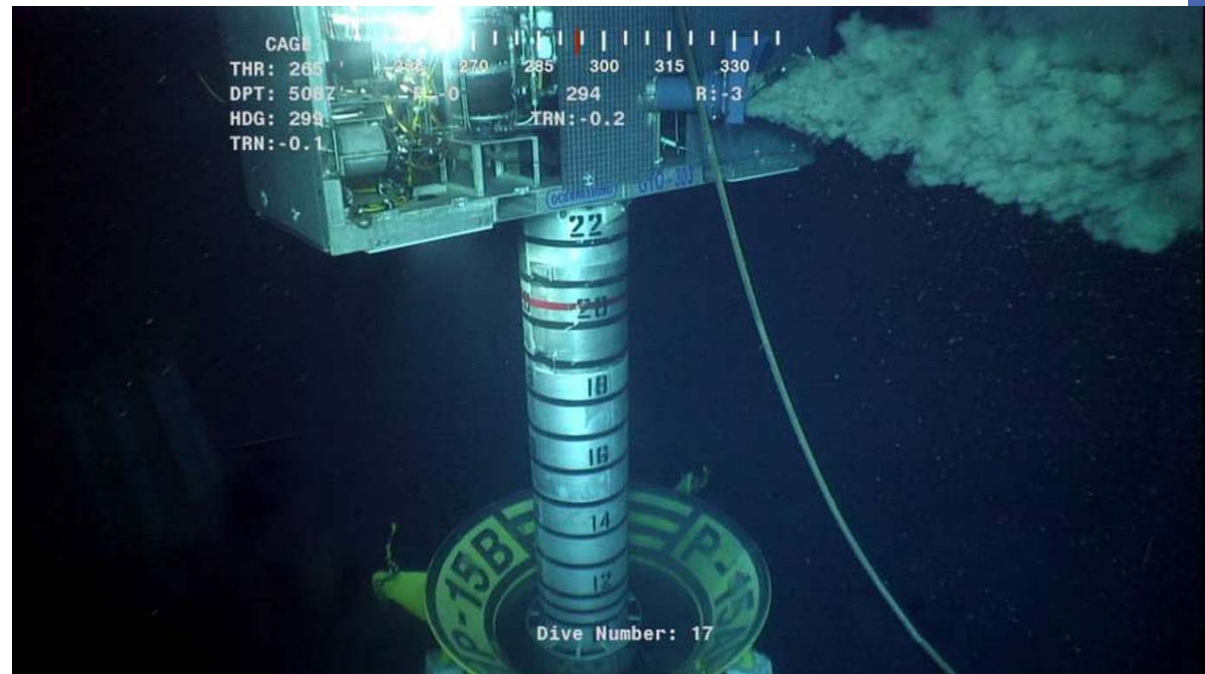
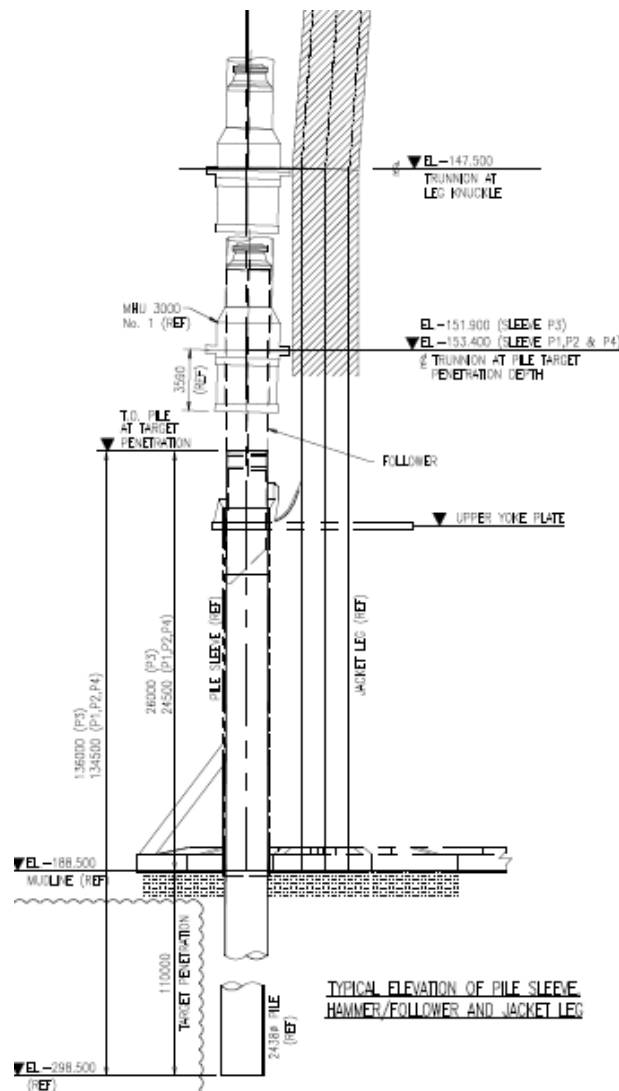
VANTAGGI:

- Possibilità di avere gruppo di pali;
- Pali composti da **un'unica sezione**, battuti mediante uso di battipalo sottomarino (solo idraulico);
- **Tempi ridotti di installazione rispetto ai main pile;**



## 2. Cenni sui principali aspetti del progetto (installazione) delle fondazioni offshore

### SKIRTED PILES



## 2. Cenni sui principali aspetti del progetto (installazione) delle fondazioni offshore

### Pile sizes – piling hammers

- Typical pile OD: 1.2 – 2.4m (1.8 – 2.4m in N.Sea)
- Typical length: 40 – 100m
- Pile hammers:
  - ➔ 90-150 kJ hydraulic hammers for typical “small” piles
  - ➔ 600kJ or more for large piles

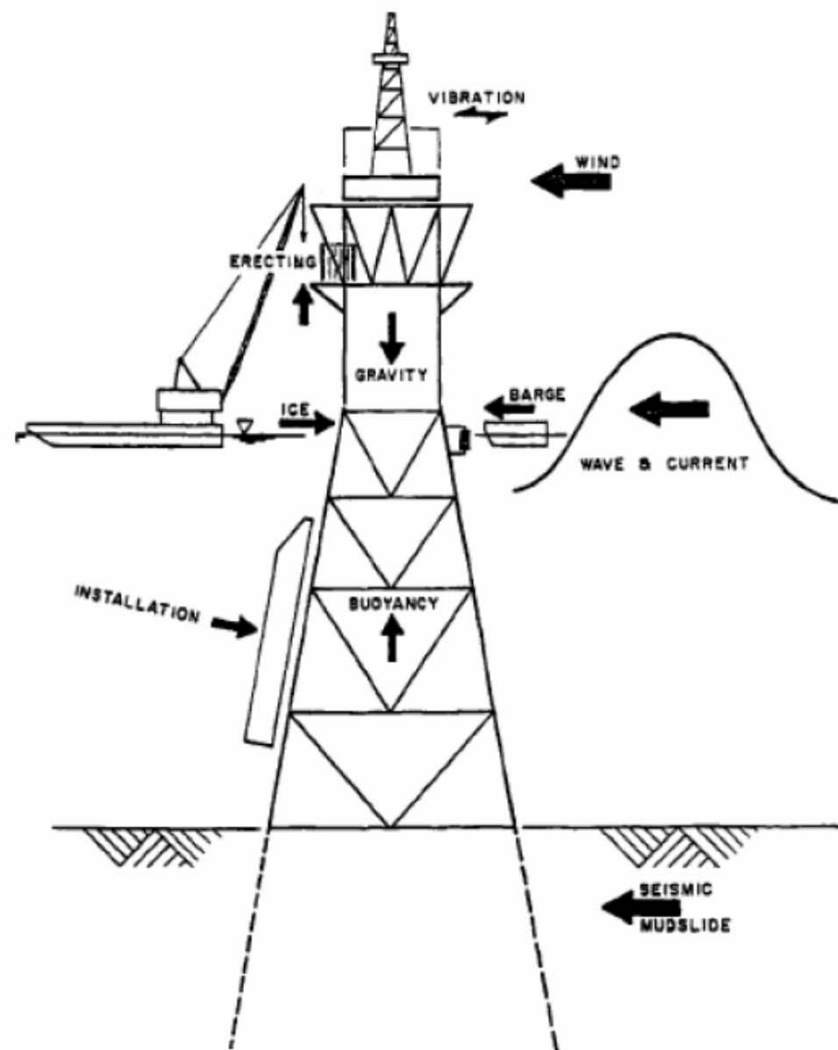
HAMMER SIZES		S-30	S-35	S-70	S-80	S-120	S-130	S-200	S-280	S-500	S-600	S-900	S-1200	S-1800	S-2300
<b>OPERATIONAL DATA</b>															
Max. blow energy on the pile	kN/m	30	35	70	80	120	130	200	280	500	600	900	1200	1800	2300
Max. blow energy on the pile	kN/m	2	2	2	2	6	6	10	10	20	20	45	60	100	230
Blow rate at max. blow energy (%)	blows/min	60	60	50	50	44	44	45	45	45	30	30	30	30	30
<b>WEIGHTS</b>															
Hammer	ton	1.5	3	3.5	4.5	6.2	7.5	10	13.6	25	30	45	60	75	115
Hammer with carrier (2.3)	ton	5.7	7.1	9.3	9.6	14.3	16.2	24.5	29	55	63	125	136	200	260
<b>DIMENSIONS</b>															
Outer diam. hammer	mm	437	610	610	610	712	712	915	915	1220	1220	1625	1625	1818	1890
Length hammer (1)	mm	1745	3080	1130	1800	1800	2718	3000	3190	10390	11000	12765	14045	15840	19040
<b>HYDRAULIC DATA</b>															
Operation pressure	bar	200	200	200	200	200	200	250	280	300	280	250	210	210	200
Oil flow (2)	l/min	160	180	220	220	400	400	750	750	1400	1500	2000	2800	4500	4500
Flow (3)	mm	25	32	32	32	38	38	50	50	63.5	63.5	76	76	100	100
<b>POWER PACK TYPE</b>															
(recommended)															
Air cooled		P-130	P-130	P-250	P-250	P-400	P-400	P-750L	P-750L	P-1600W	P-1600W			on request	
Water cooled								P-750W	P-750W	P-1600W	P-1600W			on request	

IHC range  
Menck MHU range  
is similar

## Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

#### I PASSI DEL PROGETTO: DATI DI BASE – CARICHI AGENTI



#### Dead load

1. Gravity  
(Mass of structure)

#### Live load

1. Vibration
2. Barge
3. Erecting
4. Installation
5. Buoyancy

#### Environmental load

1. Wind
2. Current wave
3. Seismic  
(Earthquake)
4. Ice

Per il progetto  
ciò che  
interessa sono i  
carichi intesa  
palo in termini  
di carico  
assiale (N) ,  
momento (M),  
e carichi  
orizzontali (H)

### 3. Il progetto dei pali di fondazioni offshore

#### I PASSI DEL PROGETTO: DATI DI BASE – GEOTECNICA

Necessario disporre dei risultati di una campagna di Indagini preliminari o di prima fase ad Hoc.

Il piano di indagini è pianificato sulla base delle conclusioni del “desk study” e del tipo di strutture programmate, con lo scopo di fornire gli elementi necessari (e sufficienti) alla progettazione delle fondazioni.

**Per piattaforme fisse si ha come obiettivo:**

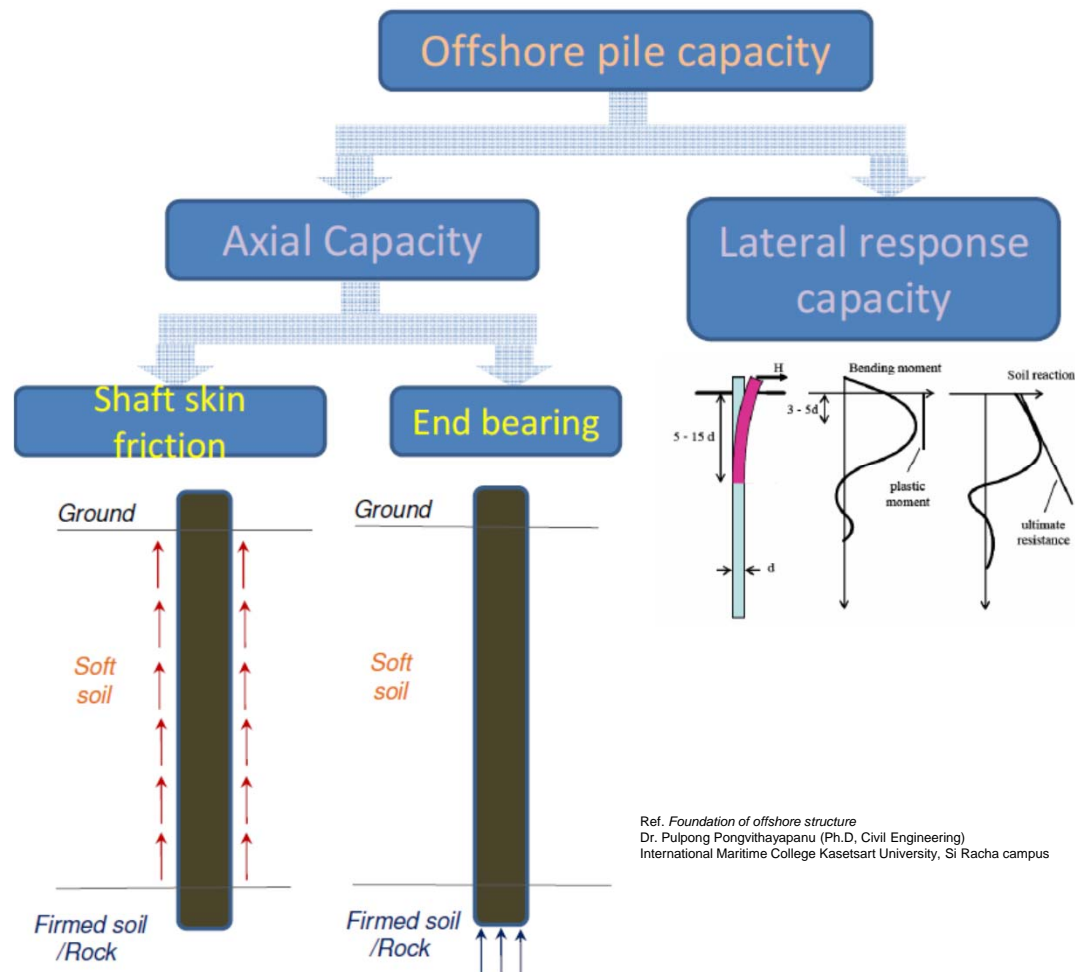
- **fondazioni su pali:** richiesta conoscenza “in media” del profilo del terreno, per pali oltre i 30-40m di infissione;
- fondazioni temporanee superficiali (“mudmats”): fattibilità legata a ottima conoscenza delle caratteristiche del terreno.

Si eseguono quindi:

- **CPTU** continue fino a prof. di 20 - 30m;
  - **SONDAGGIO:**
    - carotaggio continuo fino a prof. di 20 - 30m;
    - alternando da 20 - 30m fino a 100 - 150m:
      - **CPTU con avanzamento 1-3m;**
      - **carotaggio continuo con avanzamento 1-3m;**
- (durante l’avanzamento in carotaggio continuo vengono raccolti campioni rimaneggiati e/o indisturbati a seconda del tipo di terreno incontrato)(PROVE LAB)

### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

#### I PASSI DEL PROGETTO: PROGETTO DELLE FONDAZIONI



### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

#### PROGETTO PALI: CAPACITA' PORTANTE (Carichi verticali)

**Normative di riferimento:** API RP 2A, WSD o LRFD  
API 2GEO (sostituisce API RP 2A)  
ISO 19902 (LRFD)  
ISO 19901-4

La **capacità ultima in compressione**,  $Q$ , per una data penetrazione, è calcolata come la somma dello attrito laterale e della resistenza di punta, utilizzando l'equazione:

$$Q_d = Q_f + Q_p = fA_s + qA_p$$

where

$Q_f$  = skin friction resistance, lb (kN),

$Q_p$  = total end bearing, lb (kN),

$f$  = unit skin friction capacity, lb/ft<sup>2</sup> (kPa),

$A_s$  = side surface area of pile, ft<sup>2</sup> (m<sup>2</sup>),

$q$  = unit end bearing capacity, lb/ft<sup>2</sup> (kPa),

$A_p$  = gross end area of pile, ft<sup>2</sup> (m<sup>2</sup>).

Nel calcolo della resistenza allo sfilamento la resistenza di punta non è considerata.

### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

#### PROGETTO PALI: CAPACITA' PORTANTE (Carichi verticali)

Per pali a punta aperta la resistenza di punta  $Q_p$  non deve eccedere la capacità del tappo interno di terreno (plug).

La capacità portante del palo è dunque calcolata come la somma dei seguenti valori:

- attrito laterale esterno ( $f_o$ )
- resistenza di punta sulla corona circolare del palo ( $A_{wp}$ )
- il minore valore tra l'attrito laterale interno ( $f_i$ ) e la resistenza di punta del tappo di terreno ( $A_{sp}$ )

ossia, la capacità portante è il minimo valore tra:

- attrito laterale esterno + attrito laterale interno + resistenza di punta sulla corona del palo
- attrito laterale esterno + resistenza di punta sulla sezione trasversale chiusa del palo

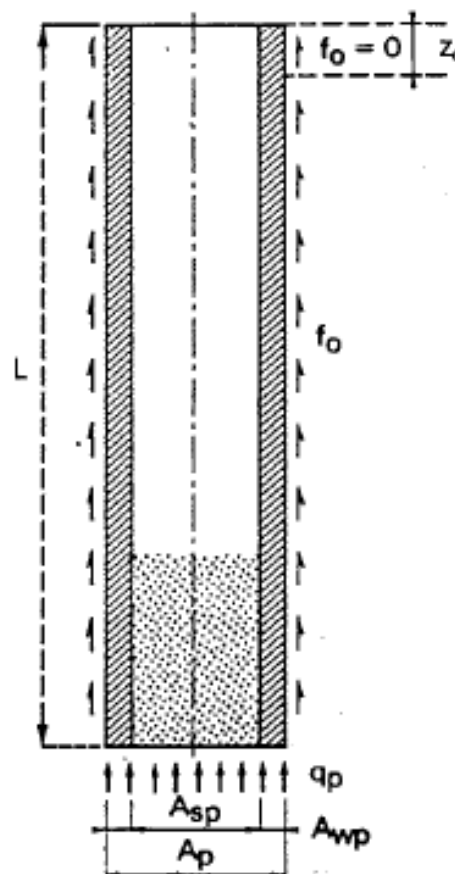


Fig. 1.2a Plugged pile.

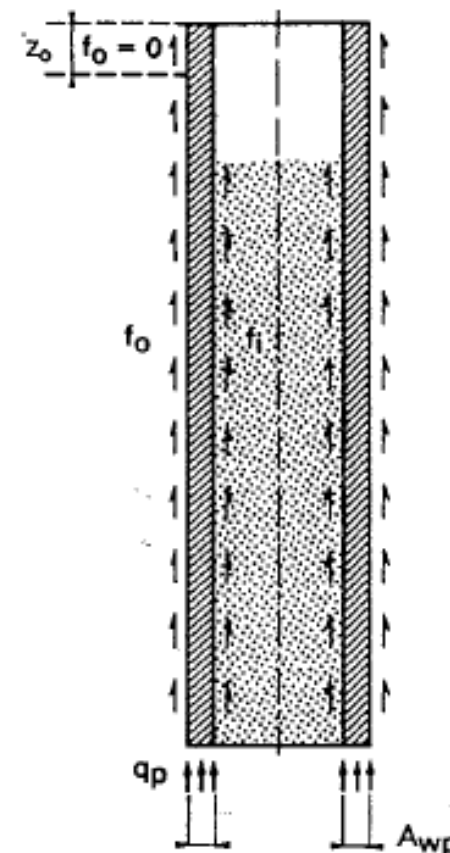


Fig. 1.2b Unplugged pile.

### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

#### Attrito laterale e resistenza di punta (skin friction & end bearing):

##### 1) Terreni coesivi

skin friction:

$$f = \alpha c \quad (6.4.2-1)$$

where

$\alpha$  = a dimensionless factor,

$c$  = undrained shear strength of the soil at the point in question.

The factor,  $\alpha$ , can be computed by the equations:

$$\alpha = 0.5 \psi^{-0.5} \quad \psi \leq 1.0 \quad (6.4.2-2)$$

$$\alpha = 0.5 \psi^{-0.25} \quad \psi > 1.0$$

with the constraint that,  $\alpha \leq 1.0$ ,

where

$\psi = c/p'_o$  for the point in question,

$p'_o$  = effective overburden pressure at the point in question lb/ft<sup>2</sup> (kPa).

end bearing:  $q = 9c$

nota:  $c$  ( $c_u$ ) determinato sulla base di prova triassiale non consolidata, non drenata (prove UU)

##### 2) Terreni granulari

skin friction:

$$f = \beta p'_o \quad (6.4.3-1)$$

where

$\beta$  = dimensionless shaft friction factor,

$p'_o$  = effective overburden pressure at the depth in question.

tradizionalmente  $\beta = K \tan \delta$ ,

$K = 0.8$  per pali a punti aperta battuti unplugged

$\delta$  = angolo d'attrito palo-terreno

end bearing:  $q = N_q p'_o$

where

$N_q$  = dimensionless bearing capacity factor,

$p'_o$  = effective overburden pressure at the depth in question.

I fattori e valori limiti di "f" e "q" per terreni non coesivi silicei sono dati in tabella:

### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

Table 6.4.3-1—Design Parameters for Cohesionless Siliceous Soil<sup>1</sup>

Relative Density <sup>2</sup>	Soil Description	Shaft Friction Factor <sup>3</sup> (-)	Limiting Shaft Friction Values kips/ft <sup>2</sup> (kPa)	End Bearing Factor $N_q$ (-)	Limiting Unit End Bearing Values kips/ft <sup>2</sup> (MPa)
Very Loose Loose Loose Medium Dense Dense	Sand Sand Sand-Silt <sup>4</sup> Silt Silt	Not Applicable <sup>5</sup>	Not Applicable <sup>5</sup>	Not Applicable <sup>5</sup>	Not Applicable <sup>5</sup>
Medium Dense	Sand-Silt <sup>4</sup>	0.29	1.4 (67)	12	60 (3)
Medium Dense Dense	Sand Sand-Silt <sup>4</sup>	0.37	1.7 (81)	20	100 (5)
Dense Very Dense	Sand Sand-Silt <sup>4</sup>	0.46	2.0 (96)	40	200 (10)
Very Dense	Sand	0.56	2.4 (115)	50	250 (12)

<sup>1</sup> The parameters listed in this table are intended as guidelines only. Where detailed information such as CPT records, strength tests on high quality samples, model tests, or pile driving performance is available, other values may be justified.

<sup>2</sup> The following definitions for relative density description are applicable:

Description	Relative Density [%]
Very Loose	0 – 15
Loose	15 – 35
Medium Dense	35 – 65
Dense	65 – 85
Very Dense	85 – 100

API RP 2A 1993

TABLE 6.4.3-1  
Design Parameters for Cohesionless Siliceous Soil\*

Density	Soil Description	Soil-Pile Friction Angle, $\delta$ Degrees	Limiting Skin Friction Values kips/ft <sup>2</sup> (kPa)	$N_q$	Limiting Unit End Bearing Values kips/ft <sup>2</sup> (MPa)
Very Loose Loose Medium	Sand Sand-Silt** Silt	15	1.0 (47.8)	8	40 (1.9)
Loose Medium Dense	Sand Sand-Silt*** Silt	20	1.4 (67.0)	12	60 (2.9)
Medium Dense	Sand Sand-Silt**	25	1.7 (81.3)	20	100 (4.8)
Dense Very Dense	Sand Sand-Silt***	30	2.0 (95.7)	40	200 (9.6)
Dense Very Dense	Gravel Sand	35	2.4 (114.8)	50	250 (12.0)

API RP 2A 2002  
Err. 2007

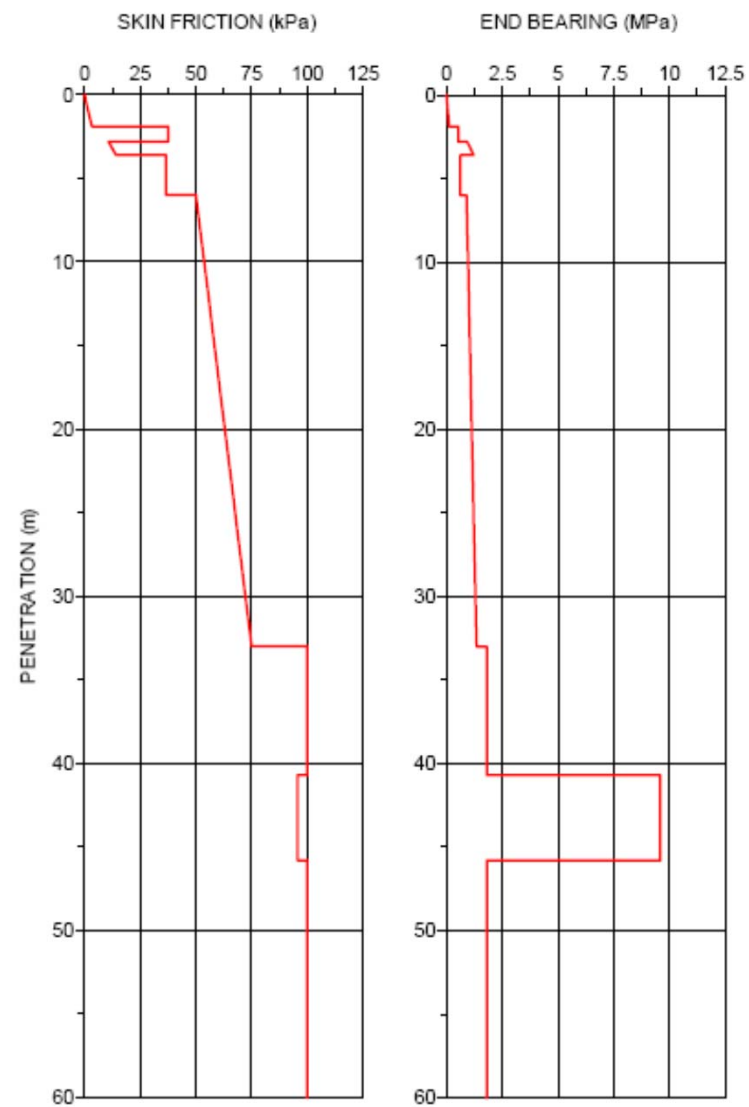
API 2 GEO

Valori limite specifici vengono comunque dati nei rapporti geotecnici.

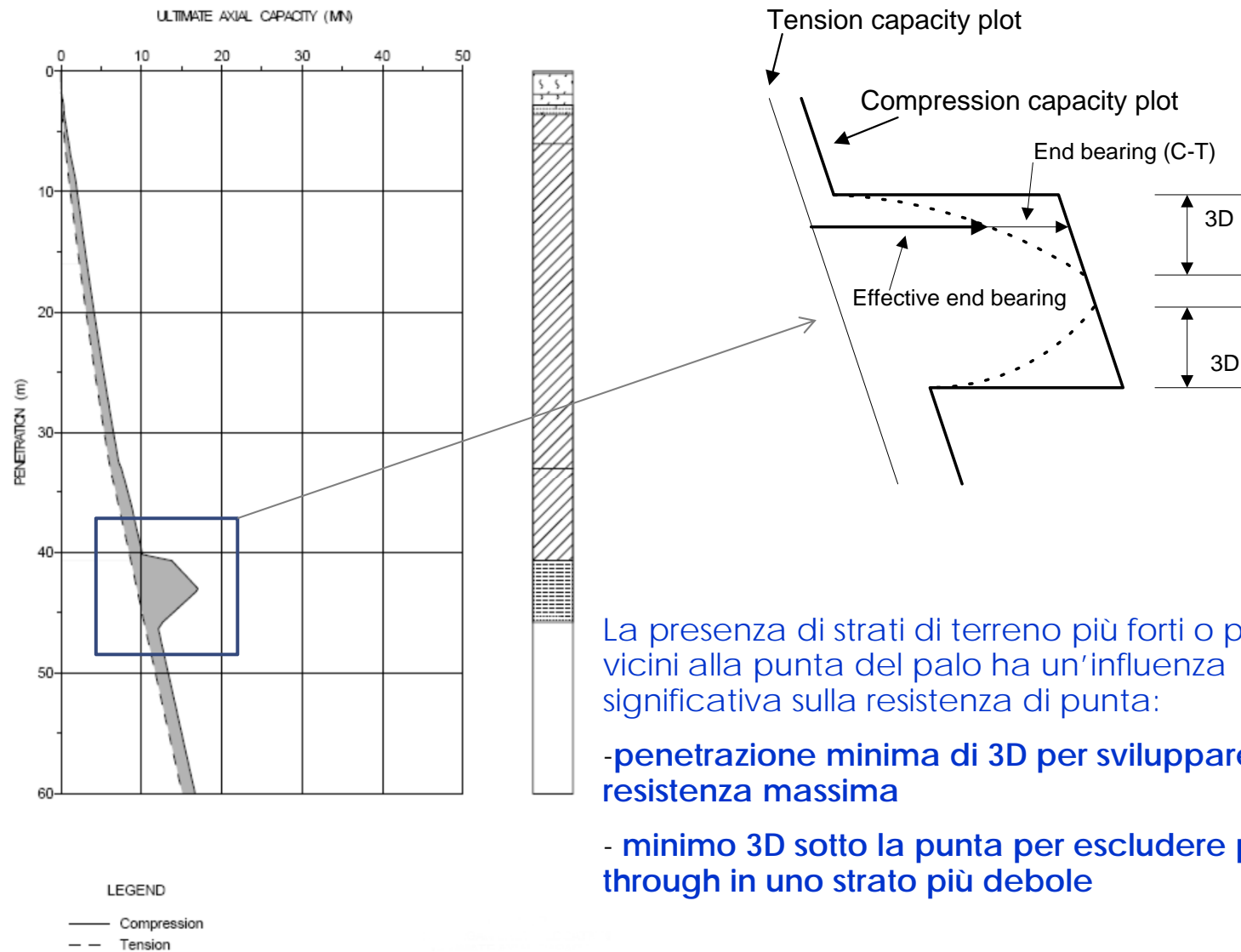
### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

#### Attrito laterale e resistenza di punta

Esempio



### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)



La presenza di strati di terreno più forti o più deboli vicini alla punta del palo ha un'influenza significativa sulla resistenza di punta:

- penetrazione minima di 3D per sviluppare la resistenza massima
- minimo 3D sotto la punta per escludere punch through in uno strato più debole

### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

---

#### Determinazione della lunghezza di infissione di un palo:

1) Determinazione dei carichi agenti alla mudline: in servizio operativo, storm; sismica SLE, RIE; ecc.

2) Considerazione del peso proprio del palo ( $W_p$ )

3) Applicazione coefficienti di sicurezza richiesti dalla normativa:

per esempio API WSD per piattaforme fisse

caso in-servizio operativo:  $SF \geq 2.0$

caso in-servizio storm:  $SF \geq 1.5$

4) Determinazione della infissione necessaria nel grafico "capacità portante versus lunghezza" che otteniamo dal confronto :

Carico di progetto a Compressione:  $Q_{ult}/SF - W_p$ ;

Carico di progetto a trazione:  $Q_{lat}/SF + W_p$ ;

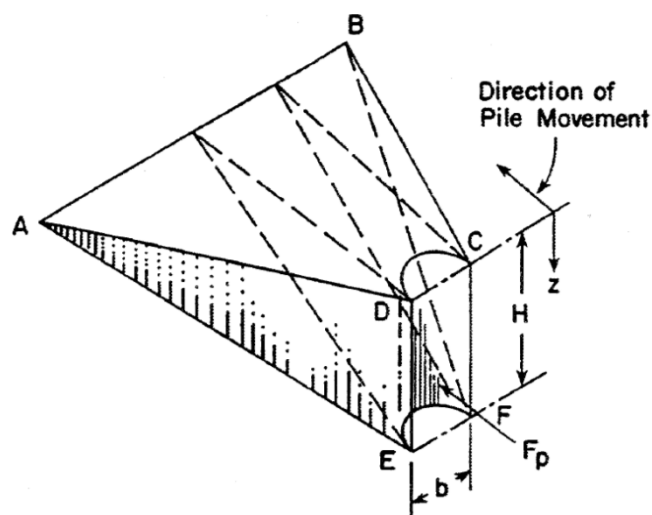
5) La lunghezza di progetto dei pali dovrà essere verificata a carichi orizzontali e da analisi di battitura.

Dalle Analisi di battitura si considera anche la profondità di self penetration.

### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

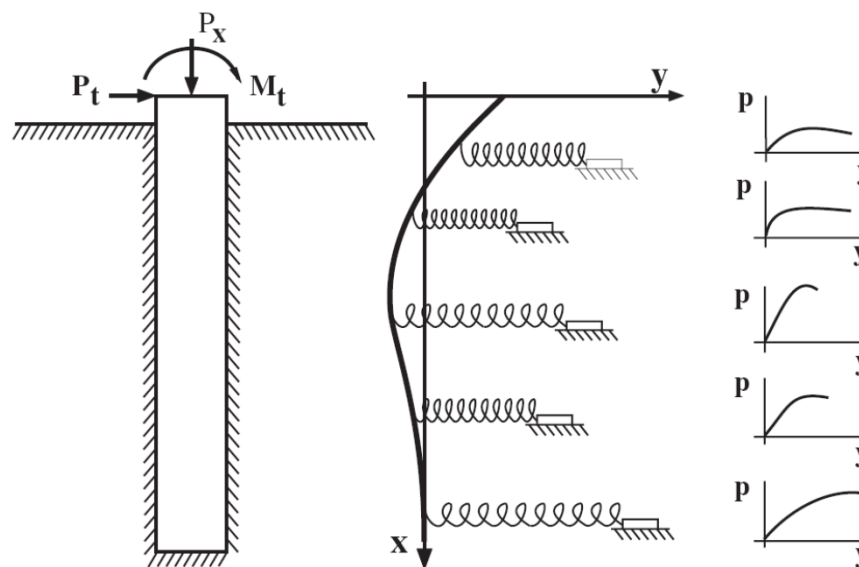
#### PROGETTO PALI: COMPORTAMENTO AI CARICHI ORIZZONTALI

Reazione del terreno (non carbonatico) per pali caricati lateralmente (molle laterali):



Il terreno intorno al palo è **schematizzato attraverso un sistema di molle non lineari utilizzate per simulare l'interazione tra palo e terreno: la resistenza del terreno ( $p$ ) è una funzione non lineare dello spostamento del palo  $y$ .**

Le curve P-y sono definite per differenti tipi di terreno e per carichi statici e dinamici (API).



In caso di applicazioni standard note le condizioni al contorno l'uso delle curve p-y è di buona norma accettato.

Nel caso di pali tozzi e per speciali applicazioni è richiesto uno specifico studio numerico

### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

#### Reazione del terreno (non carbonatico) per pali caricati lateralmente (molle laterali):

- formulazioni per soft clay:

$p_u$  statico:

$p/p_u$	$y/y_c$
0.00	0.0
0.23	0.1
0.33	0.3
0.50	1.0
0.72	3.0
1.00	8.0
1.00	$\infty$

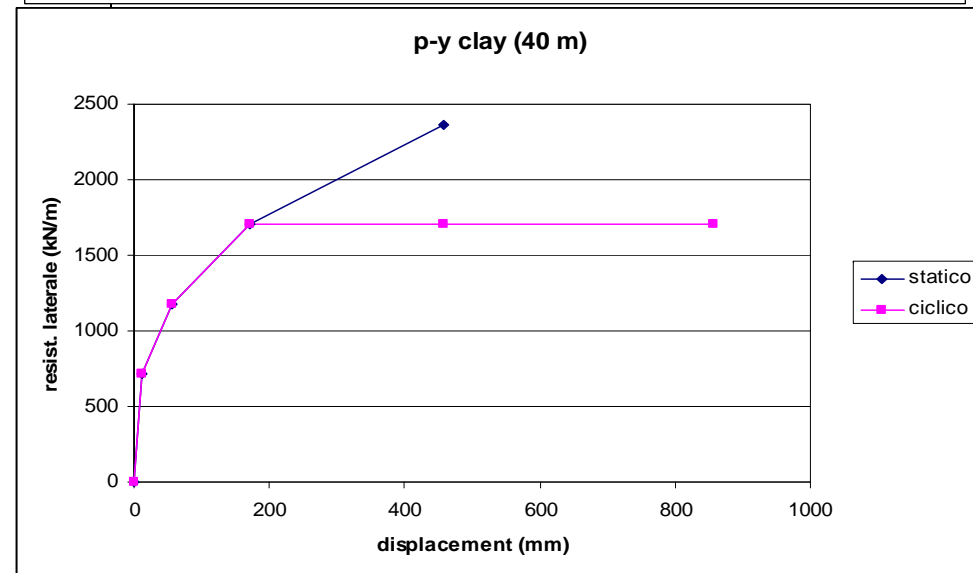
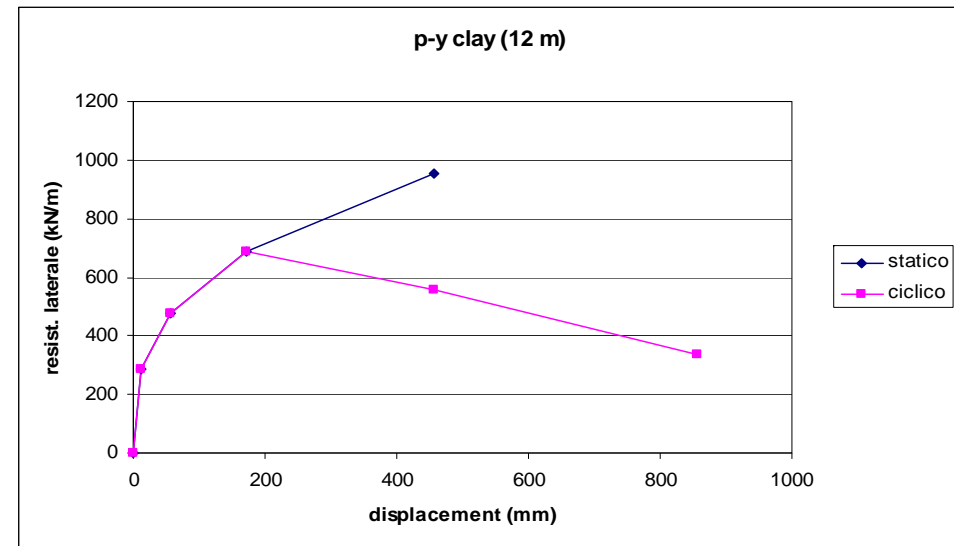
where

$p$  = actual lateral resistance, psi (kPa),

$y$  = actual lateral deflection, in. (m),

$y_c = 2.5 \varepsilon_c D$ , in. (m),

$\varepsilon_c$  = strain which occurs at one-half the maximum stress on laboratory unconsolidated undrained compression tests of undisturbed soil samples.



### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

#### PROGETTO PALI: COMPORTAMENTO DEFORMATIVO

##### VALUTAZIONE DEL COMPORTAMENTO NON-LINEARE SUOLO-STRUTTURA

La progettazione delle strutture offshore deve tener conto del comportamento **non-lineare del terreno** e deve assicurare **compatibilità di forze e spostamenti** tra la struttura e il sistema palo-terreno.

Si deve tener conto degli effetti di carichi ciclici e transienti (\*) sulla resistenza del terreno e sulla risposta strutturale della fondazione.

Le normative forniscono indicazioni riguardanti:

- reazione del terreno per pali caricati assialmente (curve t-z e Q-z)
- reazione del terreno per pali caricati lateralmente (curve p-y)
- reazioni per pali in gruppo.

Le curve da applicare nei progetti specifici vengono in ogni caso richieste agli specialisti geotecnici.

Il terreno viene modellato come un letto di molle non lineari la resistenza del terreno (t-p-q) è una funzione non lineare dello spostamento del palo  $y$ .

(\*) liquefazione in terreni non coesivi sciolti

### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

Reazione del terreno (non carbonatico) per pali caricati assialmente

(molle laterali lungo il fusto del palo)

curve t-z

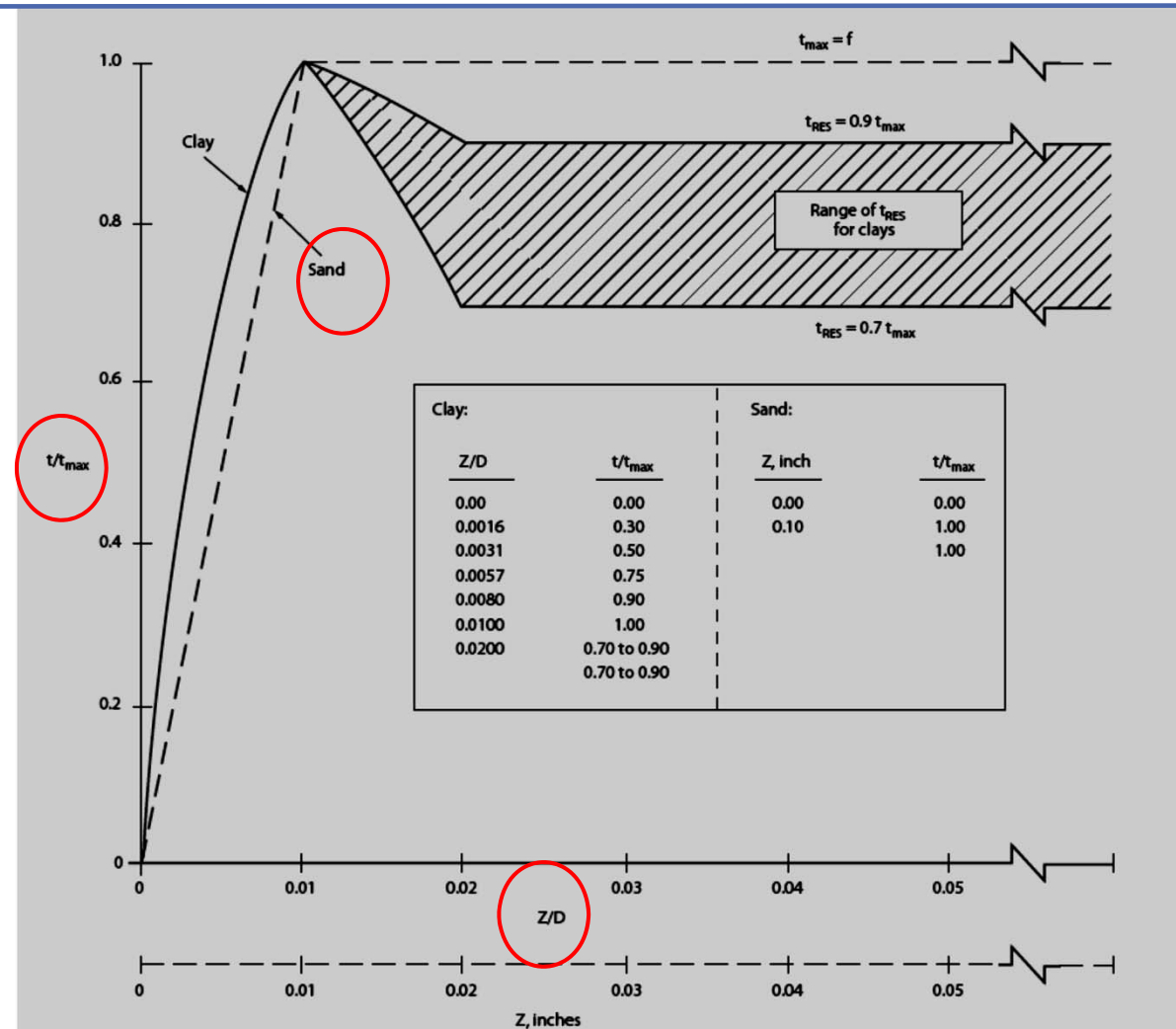


Figure 6.7.2-1—Typical Axial Pile Load Transfer—Displacement ( $t$ - $z$ ) Curves

### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

Reazione del terreno (non carbonatico) per pali caricati assialmente (molle di base):

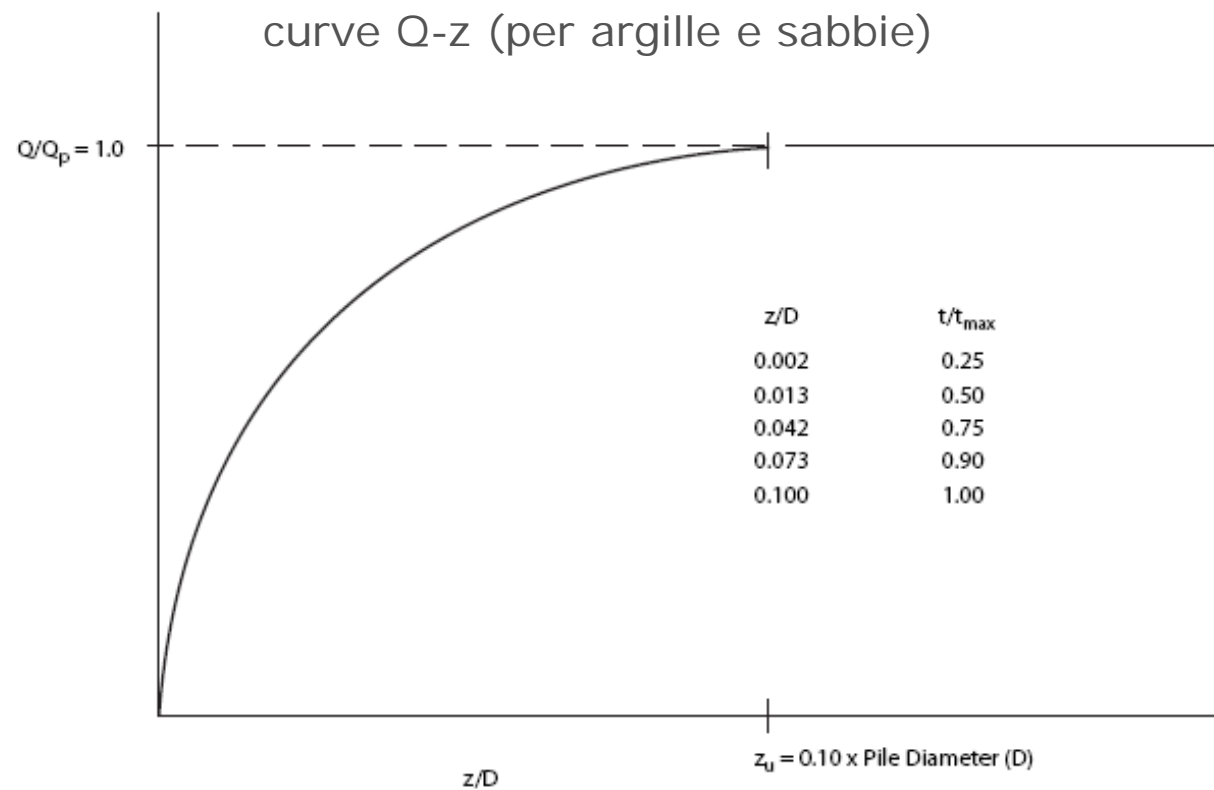


Figure 6.7.3-1—Pile Tip-load—Displacement (Q-z) curve

### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

---

**Installazione pali battuti**

### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

#### Pali battuti

L'analisi di battitura dei pali di fondazione viene eseguita principalmente per:

- **Verificare l'installabilità del palo attraverso i sistemi di battitura disponibili**
- Calcolare e **verificare lo stato tensionale del palo in modo da evitare possibili danneggiamenti** durante tutte le fasi di installazione

- **Dati di Input**

- Caratterizzazione e stato del profilo del suolo
- Curva SRD (Soil Resistance to Driving)
- Geometria del palo
- Caratteristiche del battipalo

- **Output principali**

- Valutazione self-penetration
- Stato tensionale nel palo durante l'installazione
- Blow count (Numero di colpi)

- **Principali verifiche strutturali sul palo**

- Verifica sollecitazioni dinamiche
- Verifica sollecitazioni statiche + dinamiche
- La verifica di stick up: consiste nella verifica tensionale e di stabilità del palo di fondazione soggetto al peso proprio e a quello del battipalo nella condizione di massima lunghezza di "free standing".

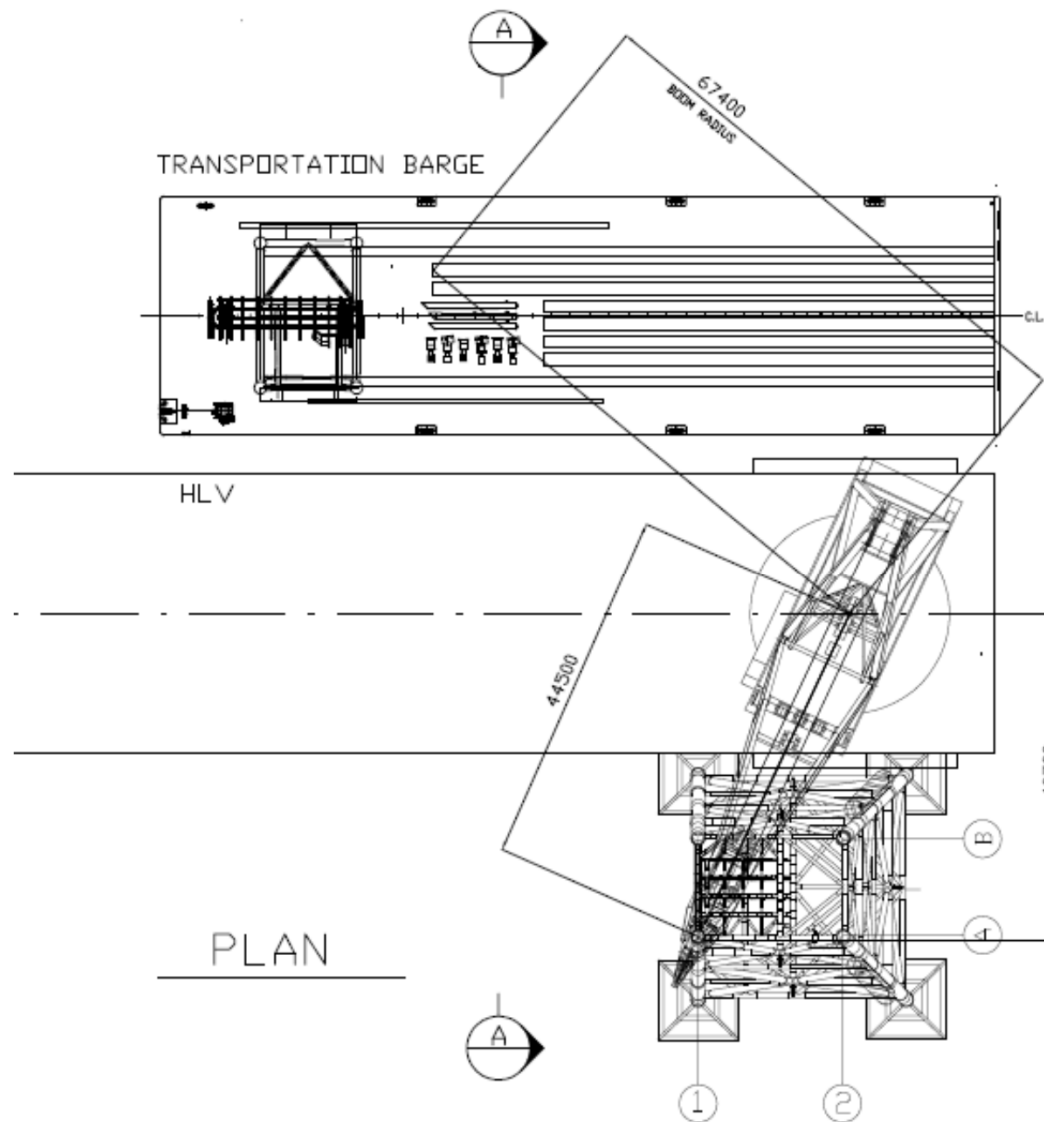


### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

Verifica installabilità palo  
l'analisi di battitura è solo  
una delle verifiche per  
l'installabilità dei pali.

■ Altri esempi di verifica  
sono (Main pile):

- Verifica  
movimentazione  
palo
- Capacità di  
sollevamento al  
gancio
- Altezza limite del  
gancio del crane  
barge
- Rispetto delle  
tolleranze di  
installazione



### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

#### Pali battuti - Analisi di battitura

- Profilo e caratterizzazione del terreno

Si eseguono sondaggi, esami e prove in sito e prove di laboratorio sul terreno di fondazione per poter descrivere correttamente il profilo del suolo e le proprietà meccaniche relative a ogni singolo layer di terreno.

Le principali caratteristiche fornite e necessarie per l'analisi sono:

Profilo di progetto del terreno  $C_u$  (per strati argillosi) e  $\delta, \Phi$  (per strati sabbiosi)

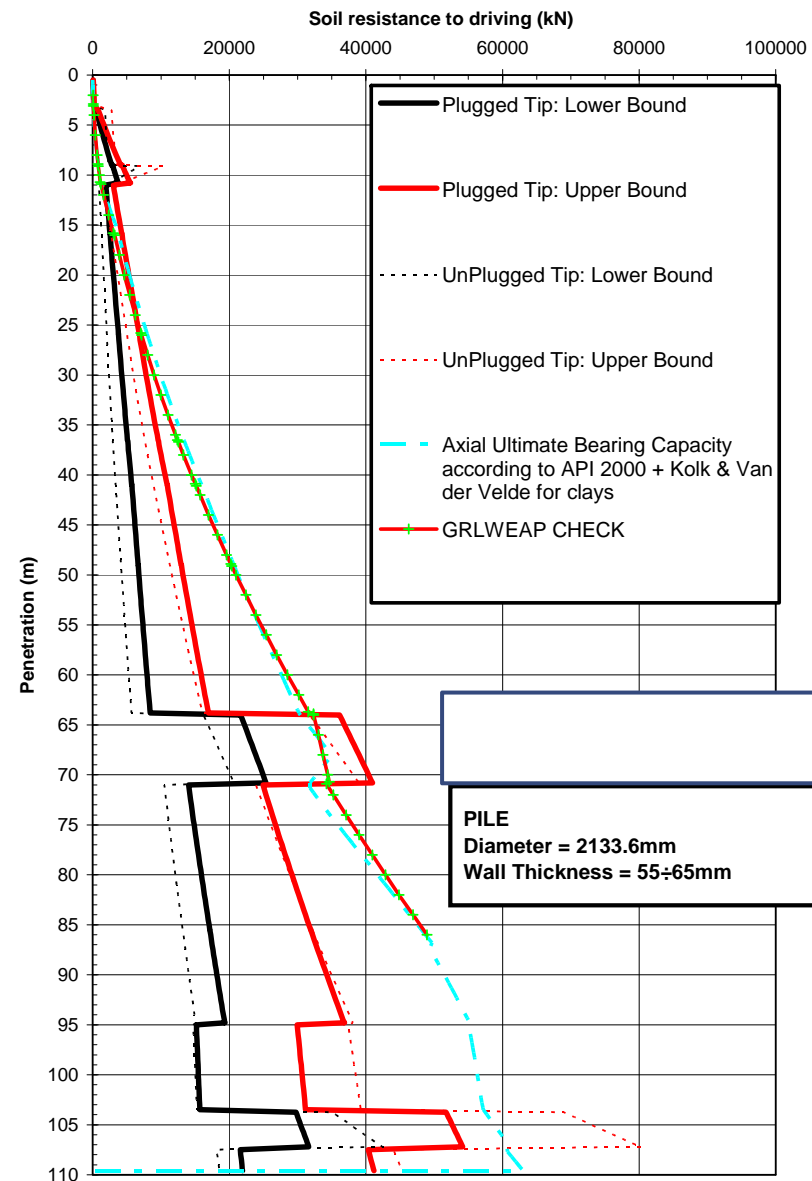
Depth (m)		Thickness	Layer	Soil Type	$\gamma'$	$S_u$ (kPa)		$\delta$	$\phi$	$N_q$	$f_{smax}$	$q_{max}$	$q_{c1}$	
from	to	(m)	No.	(brief description)	kN/m <sup>3</sup>	from	to	(°)	(°)	(-)	(kPa)	(kPa)	from (kPa)	to (kPa)
0.0	3.00	3.0	1	CLAY	3.9	2	4							
3.0	9.0	6.0	2	SAND	7.8			20	25	12.0	67.0	2900	5000	5000
9.0	10.8	1.8	3		7.8			20	25	12.0	67.0	2900	18000	5000
10.8	15.9	5.1	4	CLAY	7.8	40	50							
15.9	25.9	10.0	5	CLAY	6.4	50	70							
25.9	36.6	10.7	6	CLAY	6.9	70	91							
36.6	41.0	4.4	7	CLAY	7.8	91	100							
41.0	49.0	8.0	8	CLAY	8.8	100	109							
49.0	63.8	14.8	9	CLAY	7.4	109	125							
63.8	70.8	7.0	10	SAND	7.8			25	30	20.0	81.3	4800	30000	30000
70.8	94.8	24.0	11	CLAY	7.4	180	230							
94.8	103.5	8.7	12	CLAY	4.9	100	100							
103.5	107.2	3.7	13	SAND	6.9			25	30	20.0	81.3	4800	55000	70000
107.2	109.6	2.4	14	CLAY	6.9	220	220							

- Si definiscono i coefficienti di smorzamento **Damping (s/mm)** e di **Quake (mm)** del terreno da considerare per l'analisi di battitura differenti a seconda del tipo di terreno: sabbia, limo, argilla.

### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

#### • Pali battuti - Curva SRD (Soil Resistance to Driving)

- La curva SRD rappresenta la resistenza del terreno durante la battitura e tiene conto degli **effetti dinamici che nascono durante le operazioni di battitura**.
- Le analisi di battitura vengono solitamente eseguite considerando entrambe le condizioni di palo **"plugged"** e **"unplugged"**
- L'andamento effettivo della **curva SRD non è** in genere analiticamente quantificabile; pertanto **per ciascun caso si definiscono due curve "limite" inferiore e superiore applicando coefficienti correttivi empirici**
- **Non è detto che siano sistematicamente inferiori della capacità statica, dipende dal terreno.**
- Se si verifica l'interruzione della battitura di un palo (per esempio causata da un guasto al battipalo), alla ripresa delle operazioni deve essere considerata tutta la capacità ultima assiale del palo



### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

#### Pali battuti – Analisi battitura

- Palo di fondazione
  - Dimensioni (diametro, spessore, lunghezza)
  - Peso del palo in acqua
  - Inclinazione del palo
  - Dimensioni e geometria dello sleeve
  - Valutazione della possibile massima inclinazione del palo nello sleeve
- Principali caratteristiche del battipalo (hammer idraulico)
  - Peso e lunghezza Ram (massa battente)
  - Peso helmet
  - Massima energia, Energia cinetica, Energia potenziale
  - Velocità d'impatto
  - Efficienza % del battipalo
  - Massimo "stroke" (è possibile adottare un valore ridotto per limitare le sollecitazioni indotte nel palo durante la battitura)

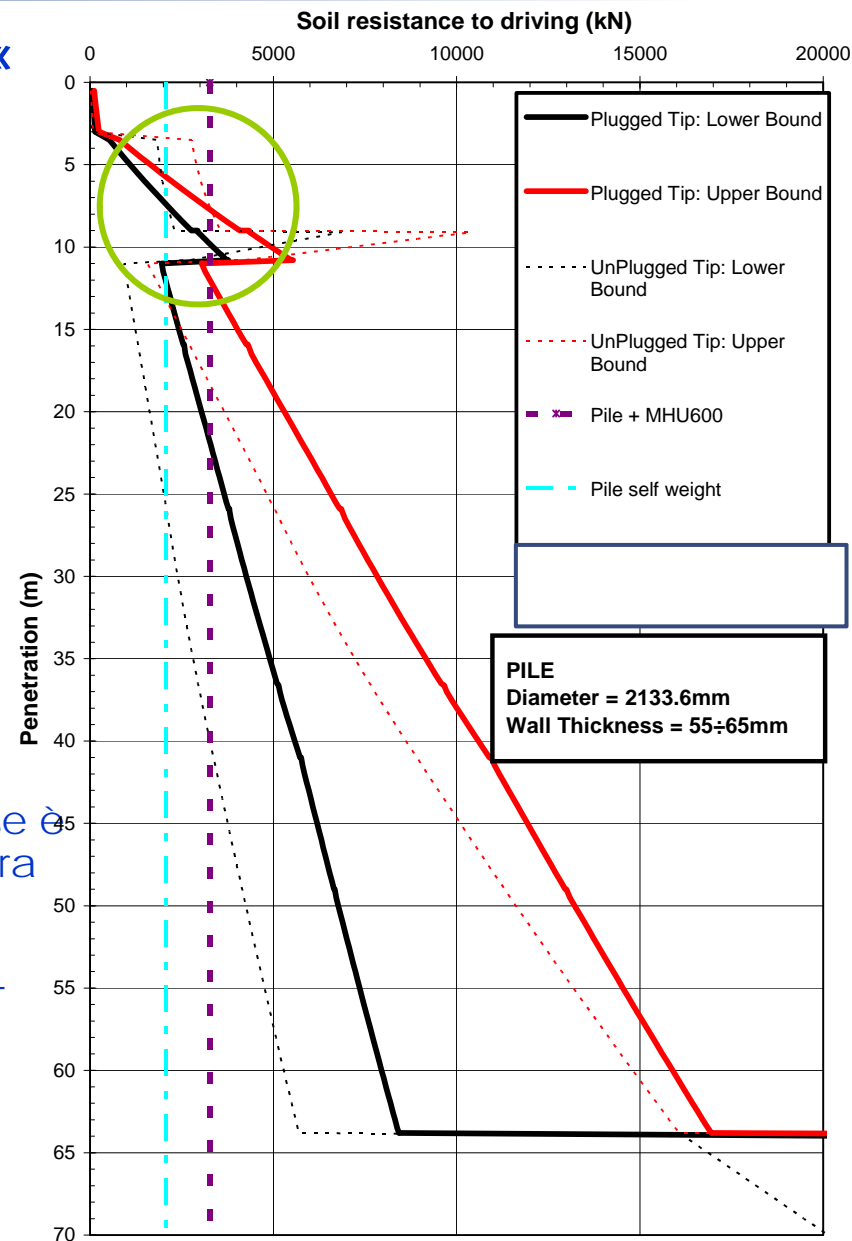


### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

#### Installazione per peso proprio « Self penetration»

- Nella fase iniziale di installazione **il palo viene posizionato sul fondo mare e successivamente, a causa del peso proprio e poi di quello del battipalo, penetra all'interno del suolo fino al raggiungimento di una situazione di equilibrio tra azione e resistenza del terreno.**
- Assunzioni per la valutazione di self-penetration del palo:
  - Il palo e il battipalo sono posizionati lentamente in modo da non indurre effetti sollecitanti dinamici
  - La resistenza del terreno in questa fase è la stessa opposta nella fase di battitura in prima approssimazione

È possibile quantificare un range di self-penetration **intersecando il carico gravitazionale agente con le curve "limite" SRD valutate per il terreno di fondazione.**

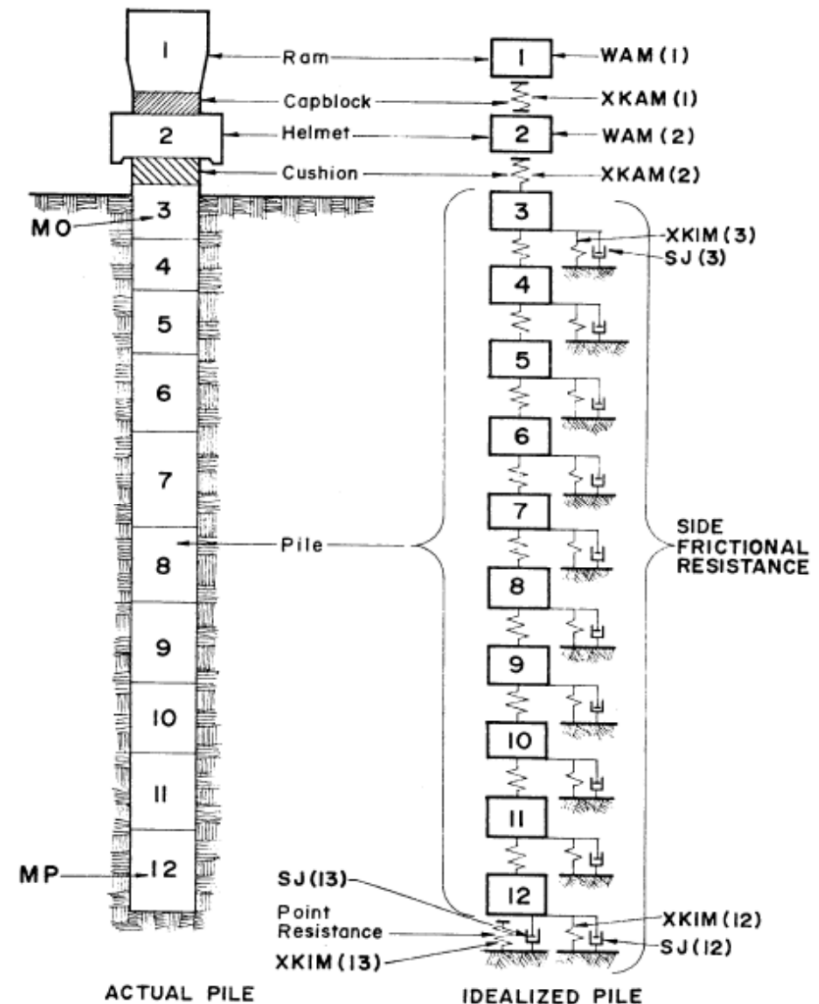


### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

#### Analisi di battitura

L'analisi di battitura del palo nel terreno viene solitamente eseguita per mezzo di programmi di **calcolo in grado di simulare la propagazione nel palo delle onde generate dal battipalo (Teoria di Smith)**. Si utilizza un modello discreto del sistema battipalo-palo-terreno:

- **Battipalo modellato con:**
  - Energia, Efficienza
  - Massa battente (Ram)
  - Rigidezza Cushion e coefficiente di restituzione (per battipali aerei)
  - Massa Pile cap
- **Palo discretizzato** in conci, ciascuno modellato come **massa e rigidezza**.
- **Terreno modellato come:**
  - Componente di resistenza statica tramite **molle elastiche distribuite su ogni elemento e alla base del palo**.
  - Componente dinamica tramite **smorzatori distribuiti su ogni elemento e alla base del palo**.



### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

---

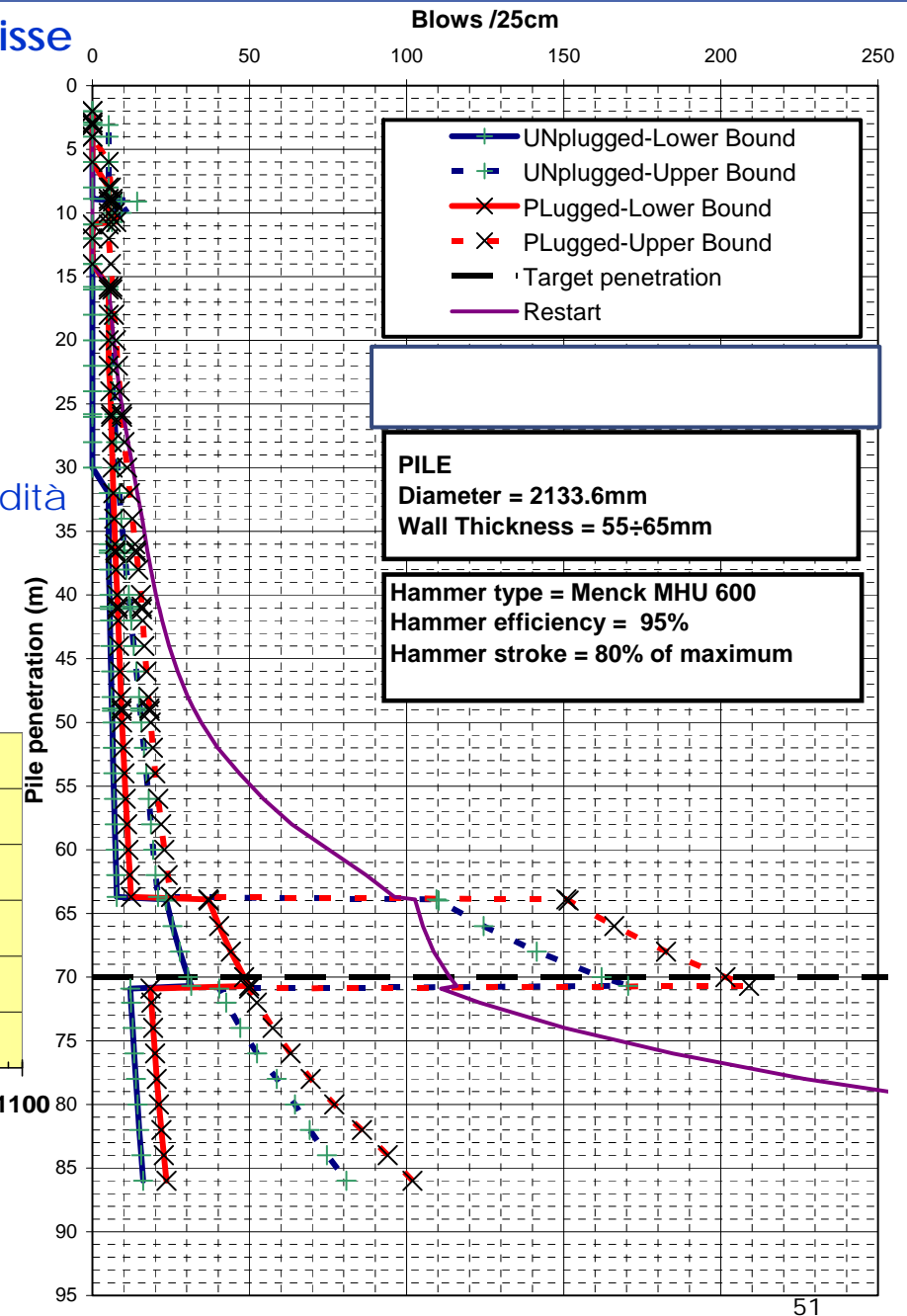
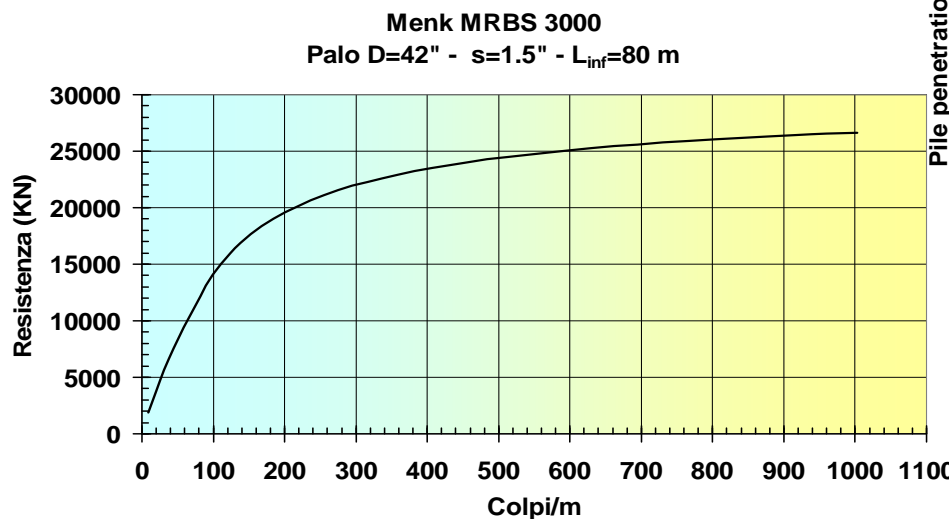
#### Analisi di battitura

- **Risoluzione dell'equazione di moto del sistema così discretizzato**
- Viene calcolata la **velocità del martello (ram)** e la risposta del palo sotto il singolo colpo
- Vengono valutati gli **spostamenti, le velocità e le accelerazioni di ogni singola massa**
- Vengono valutate le **azioni in tutte le molle e le sollecitazioni nel palo**

### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

## Pali battuti – Analisi di battitura

- I principali risultati ottenuti dall'analisi sono:
  - Blow count in funzione della profondità di infissione
  - Andamento delle massime sollecitazioni dinamiche nel palo in funzione della profondità d'infissione raggiunta

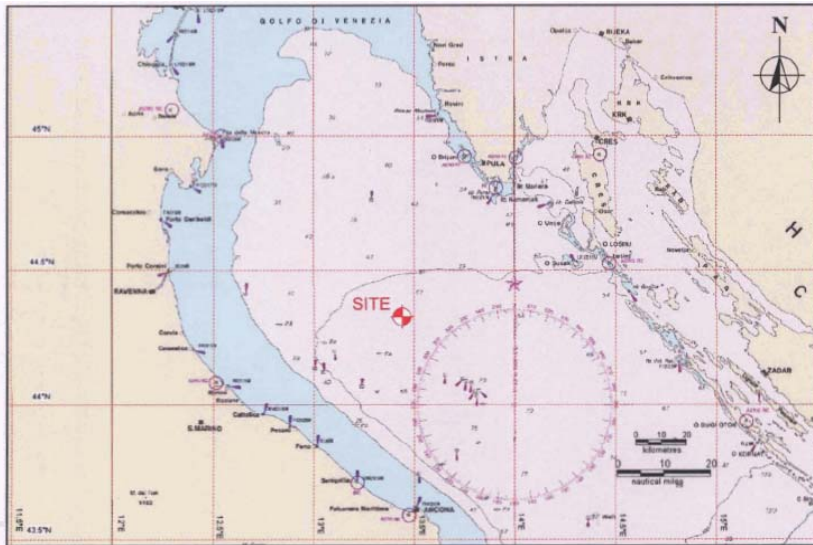


## **Caso pratico e conclusione**

### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

#### MARE ADRIATICO (INDAGINE GEOTECNICA)

- Stratigrafie relativamente poco variabili lateralmente, localmente; variabilità da un sito all'altro dello spessore degli strati principali



Indagini localizzate sul baricentro della piattaforma:

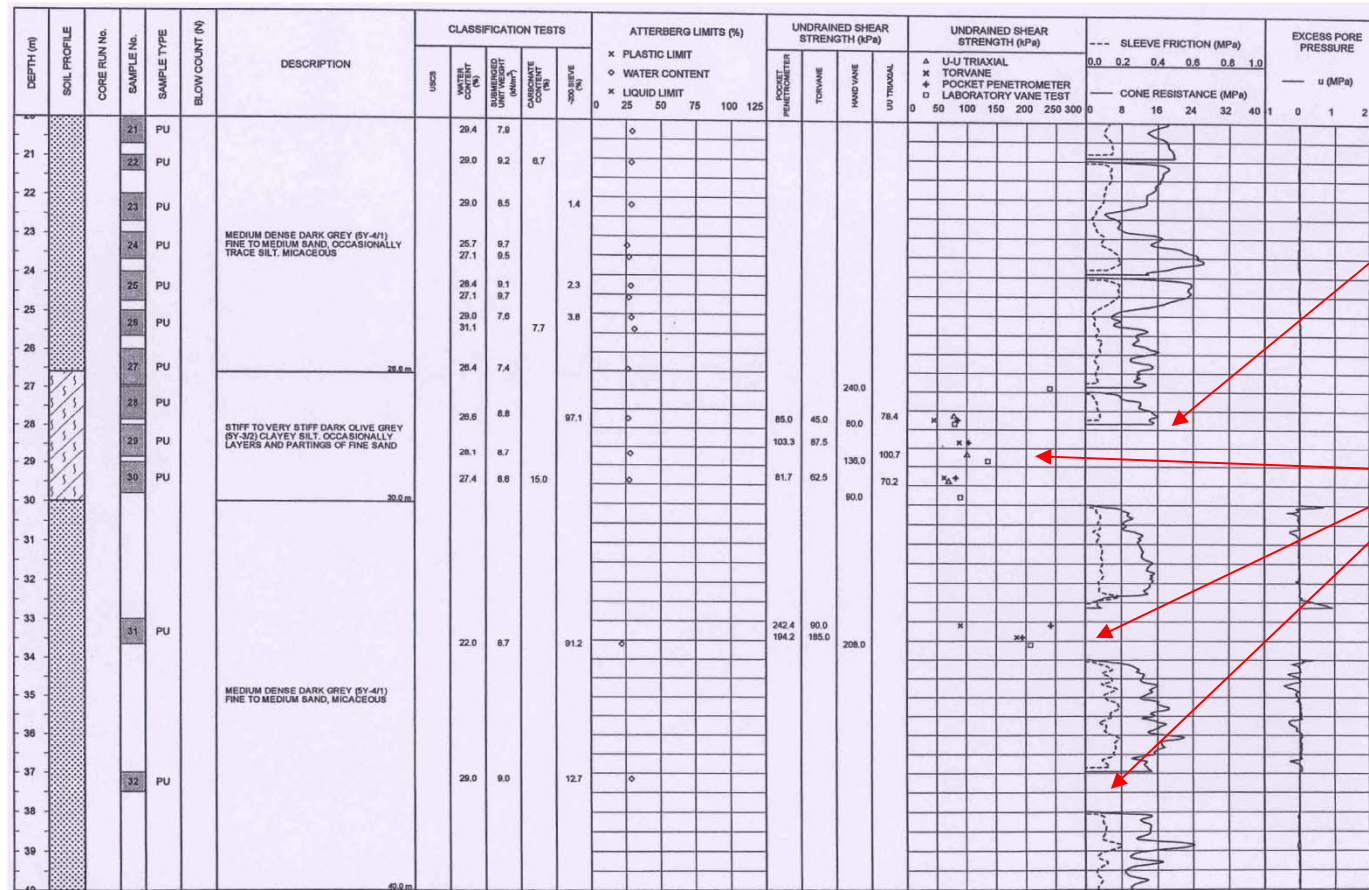
- N. 1 sondaggio profondo da 100÷120m con i primi 30m a carotaggio continuo, mentre i restanti con alternanza di carotaggio/CPTU;
- N.1 CPT continua da 0m fino a 30m di profondità posizionata a poca distanza dal sondaggio (5÷10m)

SONDAGGIO+CPT: progettazione geotecnica dei pali di fondazione e delle fondazioni dirette

CPT (da 30m): progettazione geotecnica delle fondazioni dirette (per la determinazione delle resistenze dei terreni superficiali presenti sul fondale) e dei pali per la risposta a carichi orizzontali

### 3. Il progetto dei pali battuti di piattaforme fisse (jacket)

#### MARE ADRIATICO (INDAGINE GEOTECNICA)



COLONNA  
STRATIGRAFICA

DESCRIZIONE  
STRATIGRAFIA

RISULTATI PROVE DI LABORATORIO

PROVA CPT

CAMPIONI  
RACCOLTI

### 3. Il progetto dei pali di fondazioni offshore

ES: MARE ADRIATICO (INDAGINE GEOTECNICA)

55

INDAGINI → PROFILO STRATIGRAFICO DI PROGETTO → DIMENSIONAMENTO FONDAZIONI

Depth (m)		Thickness (m)	Layer No.	Soil Type (brief description)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$S_u$ (kPa)		$\delta$ (°)	$\phi$ (°)	$N_q$ (-)	$f_{smax}$ (kPa)	$q_{max}$ (kPa)
from	to					from	to					
0.0	5.6	5.6	1	Clay	8.5	40	40					
5.6	7.2	1.6	2	Silt	8.5			20	25	12	67.00	2900
7.2	26.6	19.4	3	Sand	8.5			27	32	28	87.06	6720
26.6	30.0	3.4	4	Clay	8.5	80	80					
30.0	47.7	17.7	5	Sand	8.5			25	30	20	81.30	4800
47.7	67.0	19.3	6	Silt	8.5	75	100					
67.0	99.2	32.2	7	Clay	8.0	100	140					
99.2	106.0	6.8	8	Sand	8.0			25	30	20	81.30	3000

CARICHI DI PROGETTO

DETERMINAZIONE DELLE RESISTENZE ASSIALI DEI PALI

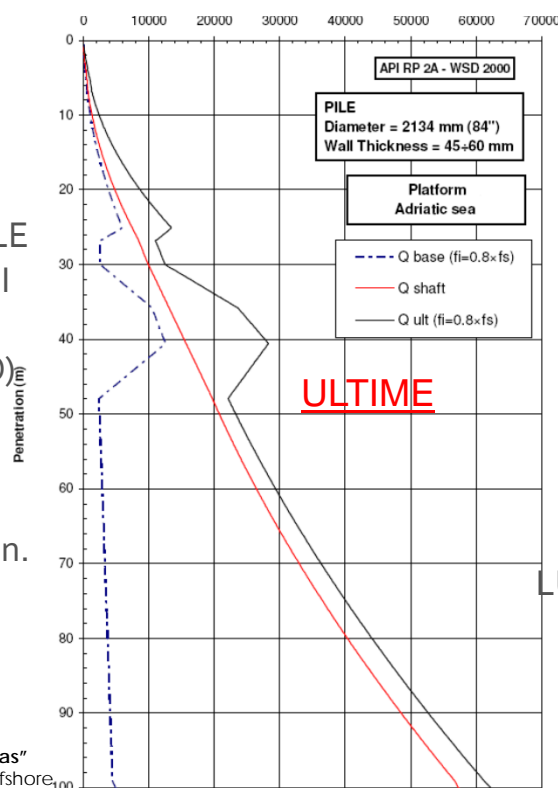
(ULTIME E DI PROGETTO)

Palo : 84"=2.134m;

Spessore: 45-60 mm

CARICO OPER: 1900 ton;

CARICO STORM: 2800 ton.

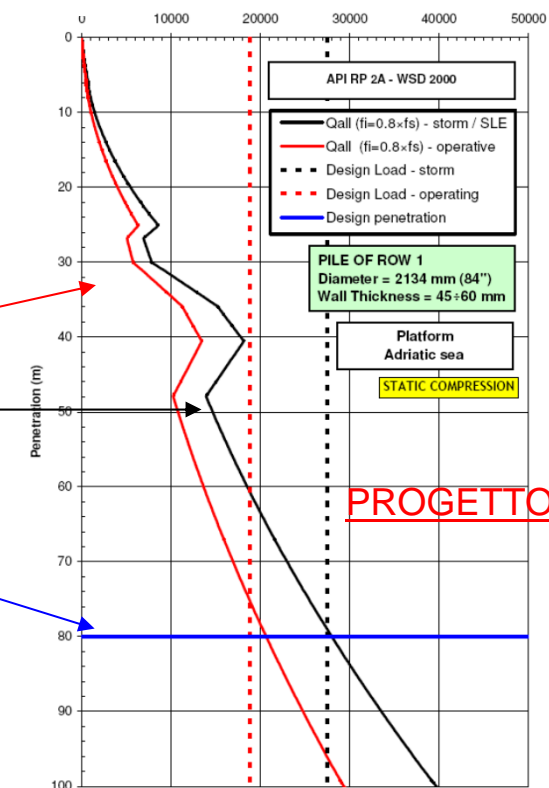


CASI (API RP 2A):

OPERATIVE:  $F_s = 2$

STORM:  $F_s = 1.5$

LUNGHEZZA PALI



### 3. Il progetto dei pali di fondazioni offshore

INDAGINI → PROFILO STRATIGRAFICO DI PROGETTO → DIMENSIONAMENTO FONDAZIONI

#### COMPORTAMENTO DEI PALI A CARICHI ORIZZONTALI

Programma di calcolo Lpile Ensoft

Palo impedito di ruotare in testa

SPOSTAMENTO

12 a 55 mm

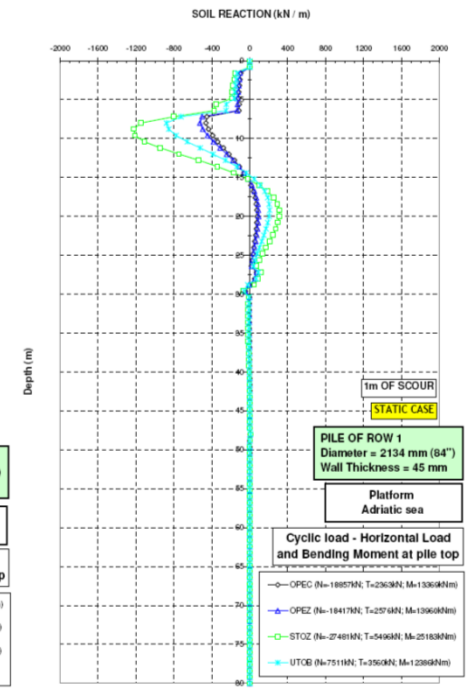
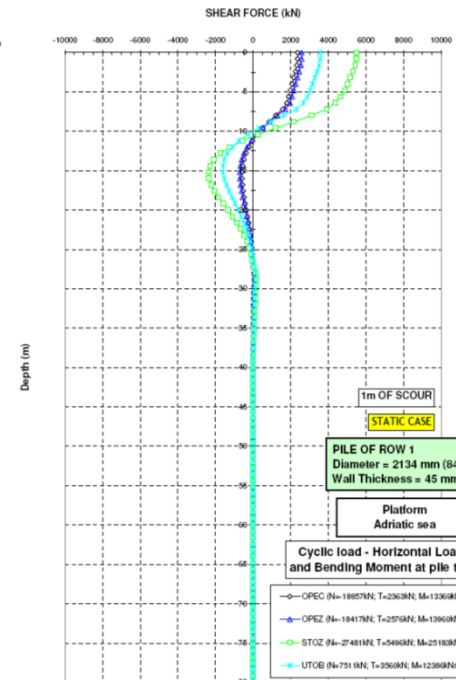
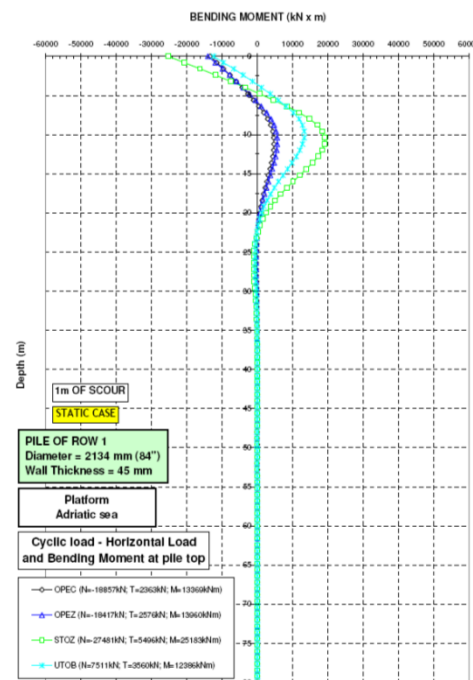
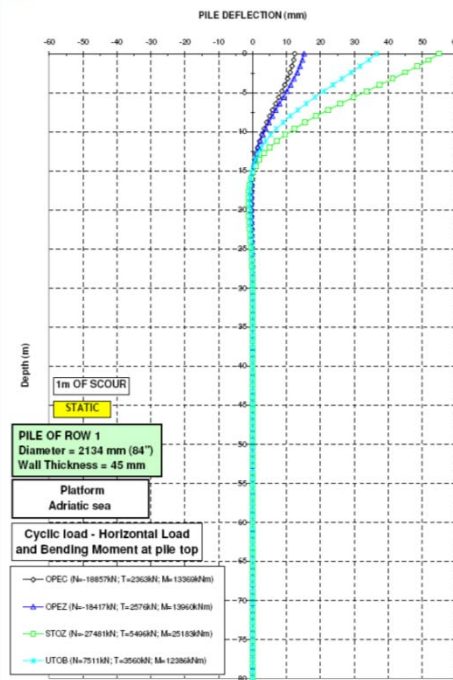
MOMENTO

$M_{max}$ : 28000 kNm

TAGLIO

Da 2000 kN a 5800 kN

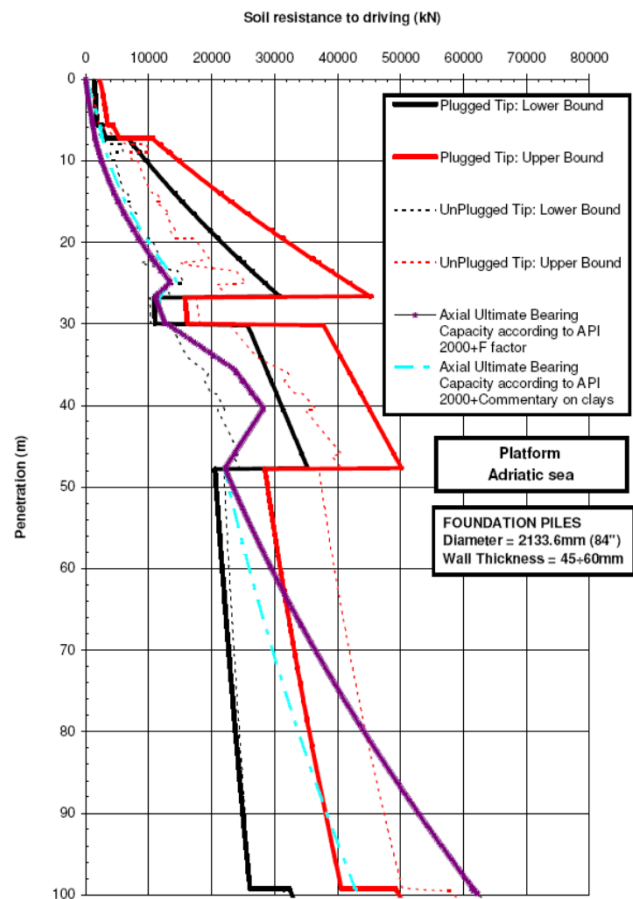
REAZIONE DEL  
TERRENO



### 3. Il progetto dei pali di fondazioni offshore

#### VERIFICA INSTALLAZIONE - ANALISI DI BATTITURA

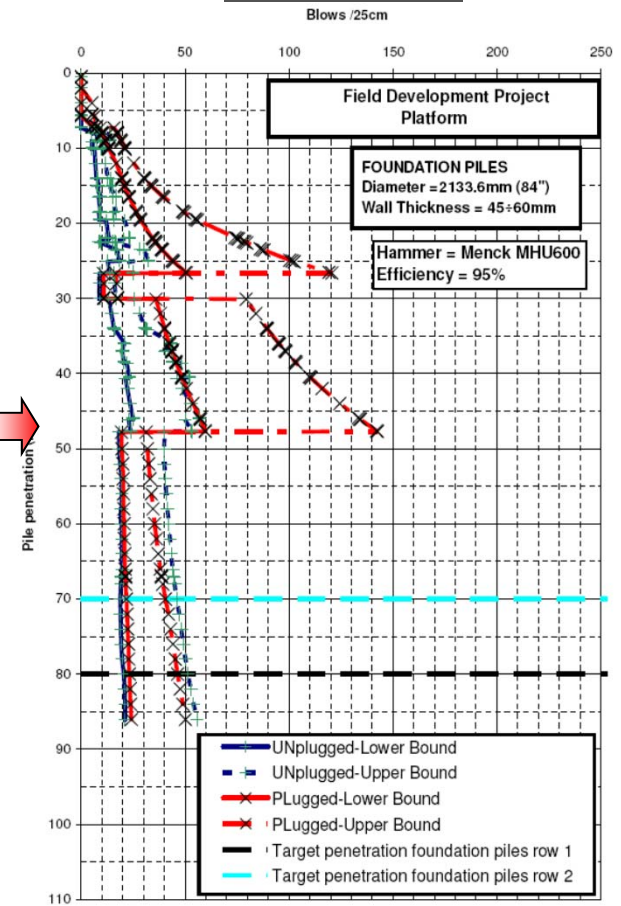
##### RESISTENZA DEL TERRENO



##### ANALISI DI BATTITURA



##### NUMERO DI COLPI DURANTE L'INFISSIONE



**GRAZIE A TUTTI PER L'ATTENZIONE !!!!!**

