

# Fundações offshore: perspetiva geral

**Paulo Lopes Pinto**



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Organização



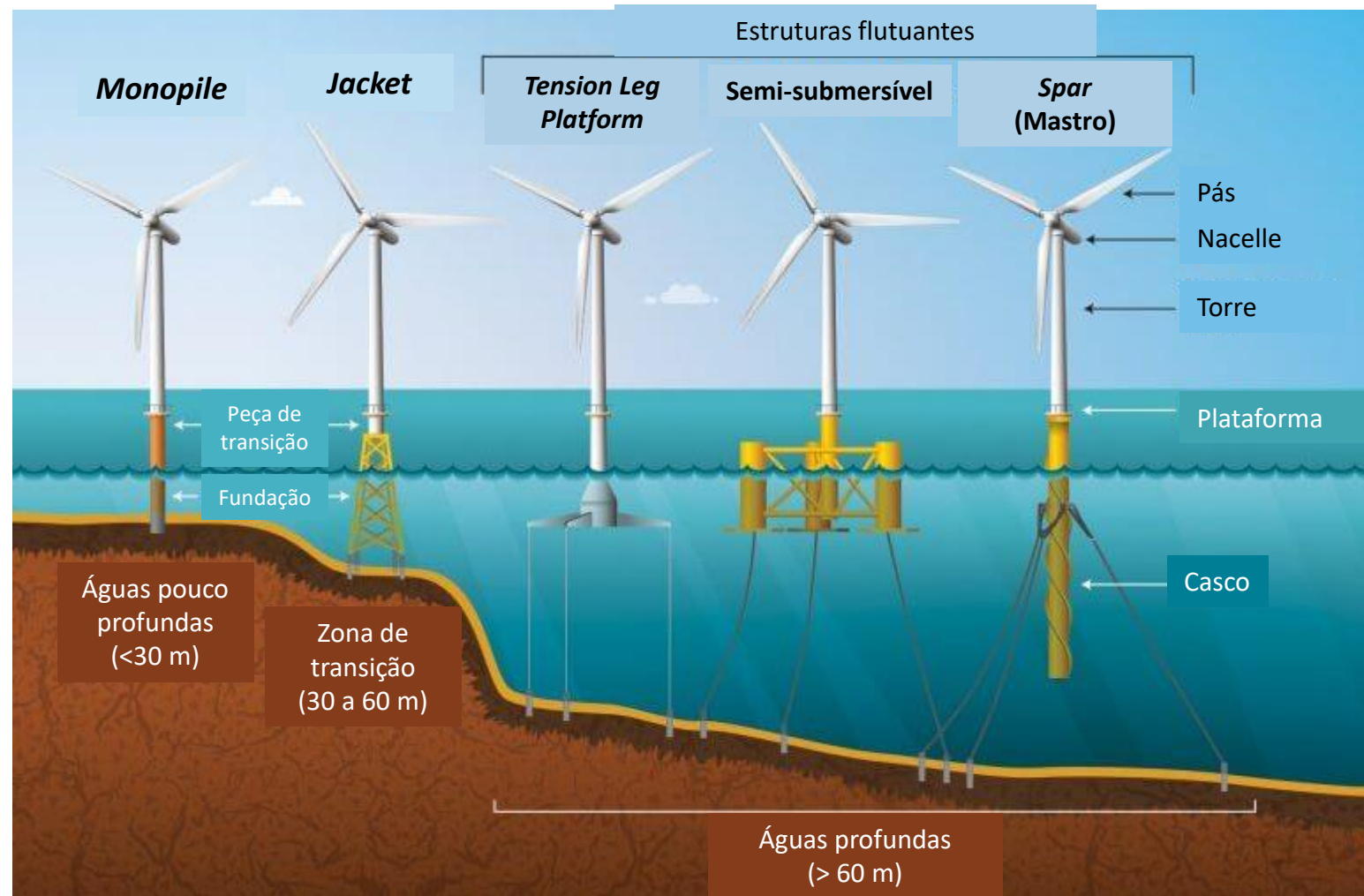
## ÍNDICE

1. Tipos de fundações para estruturas offshore
  - 1.1 - Fundações de torres eólicas offshore apoiadas no terreno
  - 1.2 - Fundações de torres eólicas offshore flutuantes
2. Âncoras para estruturas offshore flutuantes
  - Gravidade
  - Embebidas
3. Estruturas apoiadas no terreno
  - 3.1 - Fundações por sucção (*suction buckets*)
  - 3.2 - Estacas

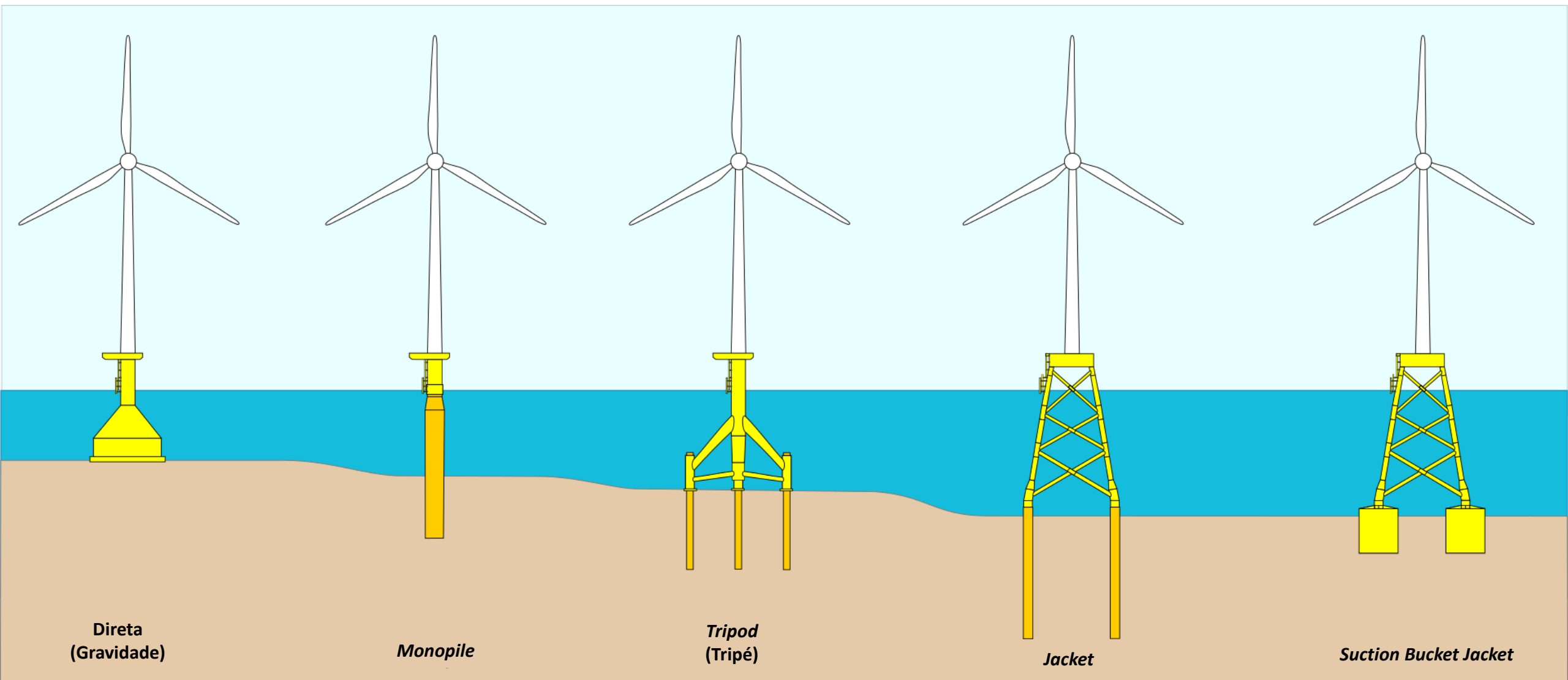


# 1 - Fundações de torres eólicas offshore

## 1 - Fundações de torres eólicas offshore



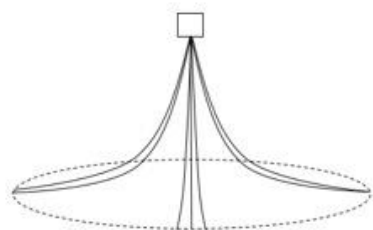
## 1.1 - Fundações de torres eólicas offshore apoiadas no terreno



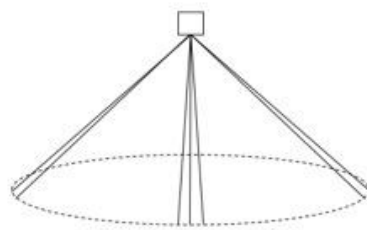
## 1.2 - Fundações de torres eólicas offshore flutuantes

As estruturas flutuantes requerem sistemas de fixação cujo funcionamento depende do tipo de cabo/corrente:

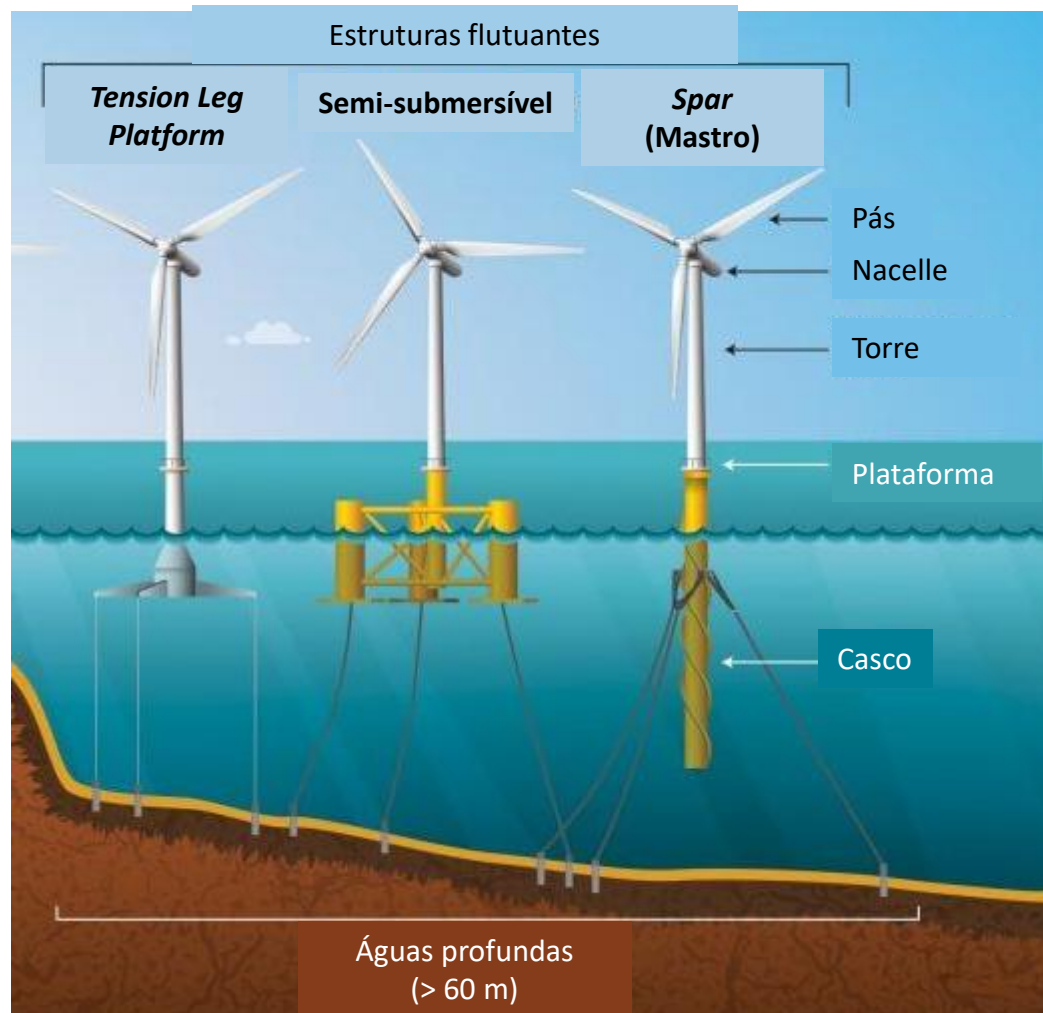
- Linha tensa
- Catenária



Catenária

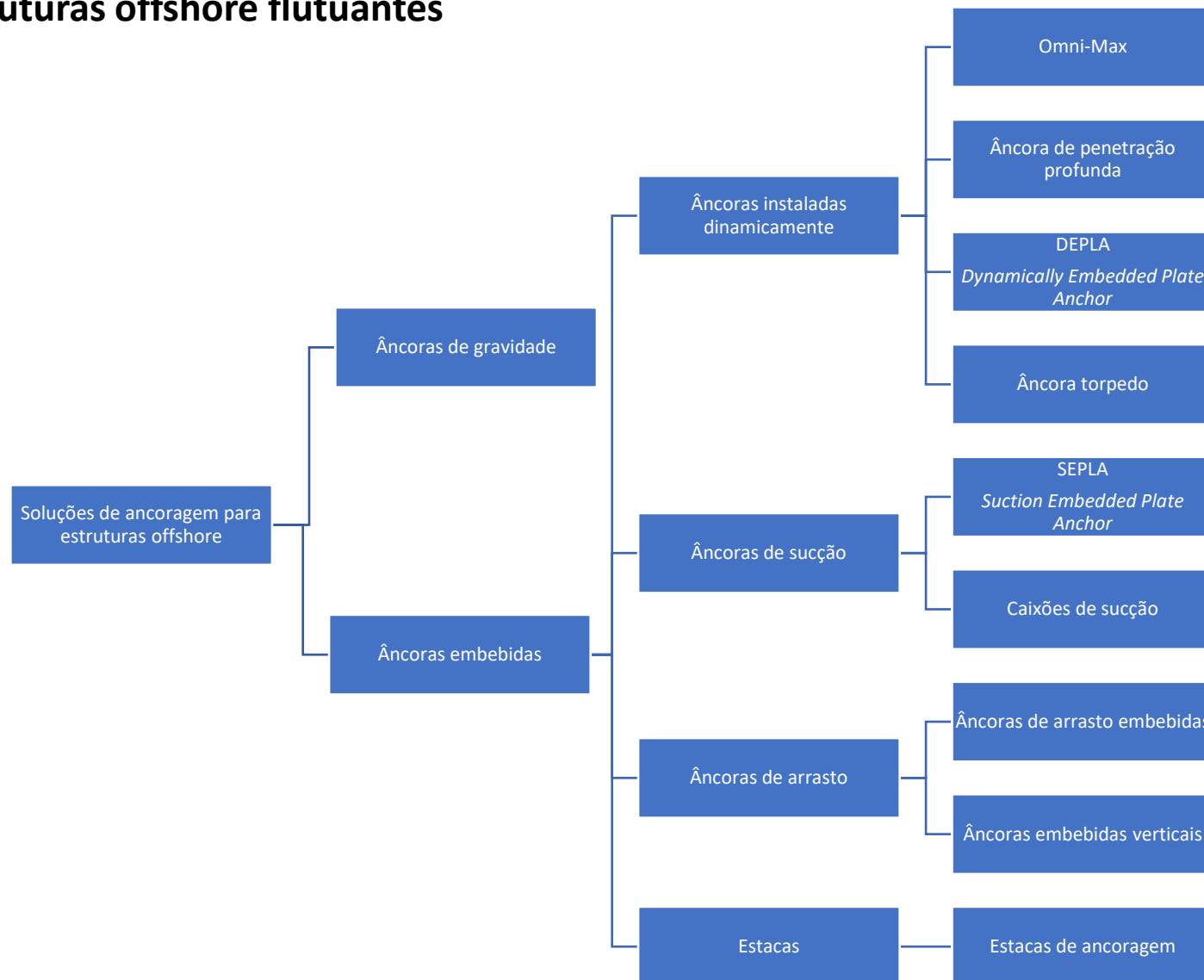


Linha tensa



## 2 - Âncoras para estruturas offshore flutuantes

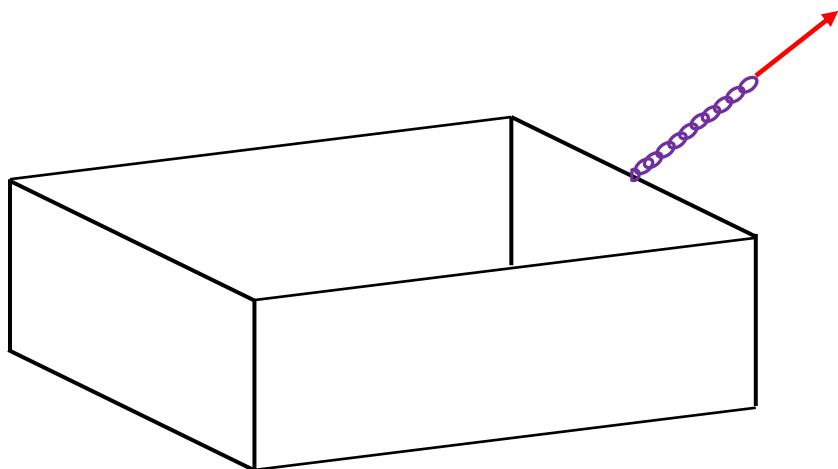
## 2 – Âncoras para estruturas offshore flutuantes



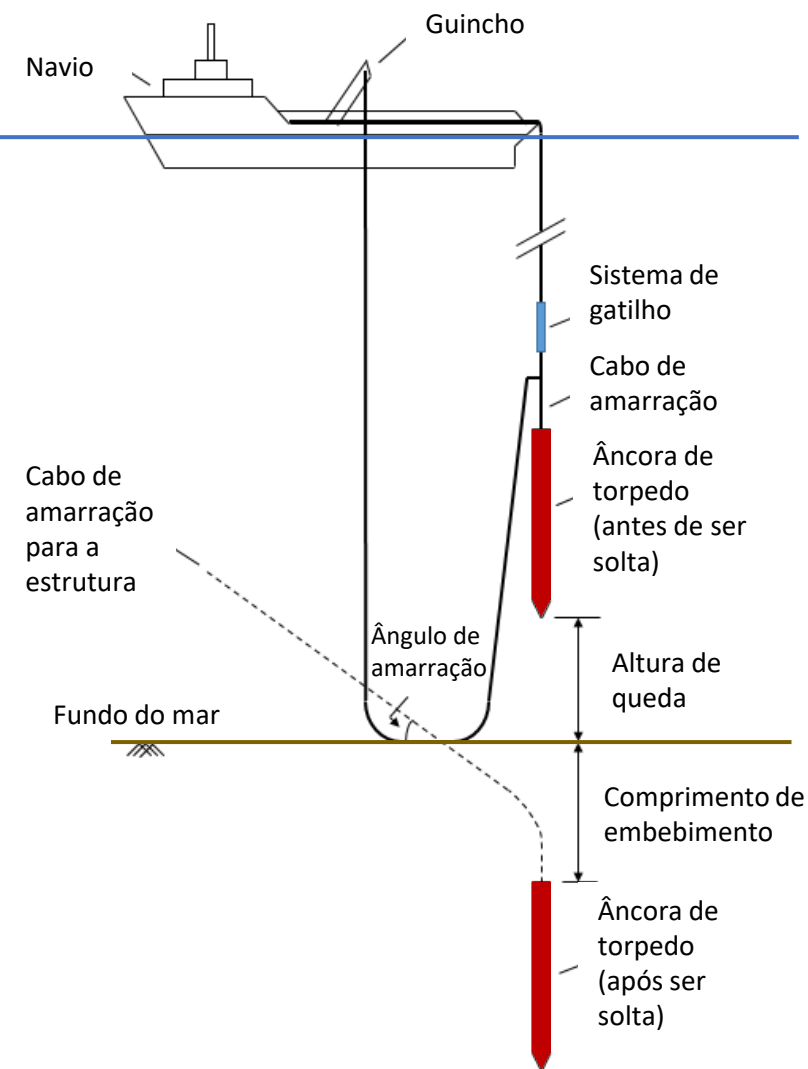
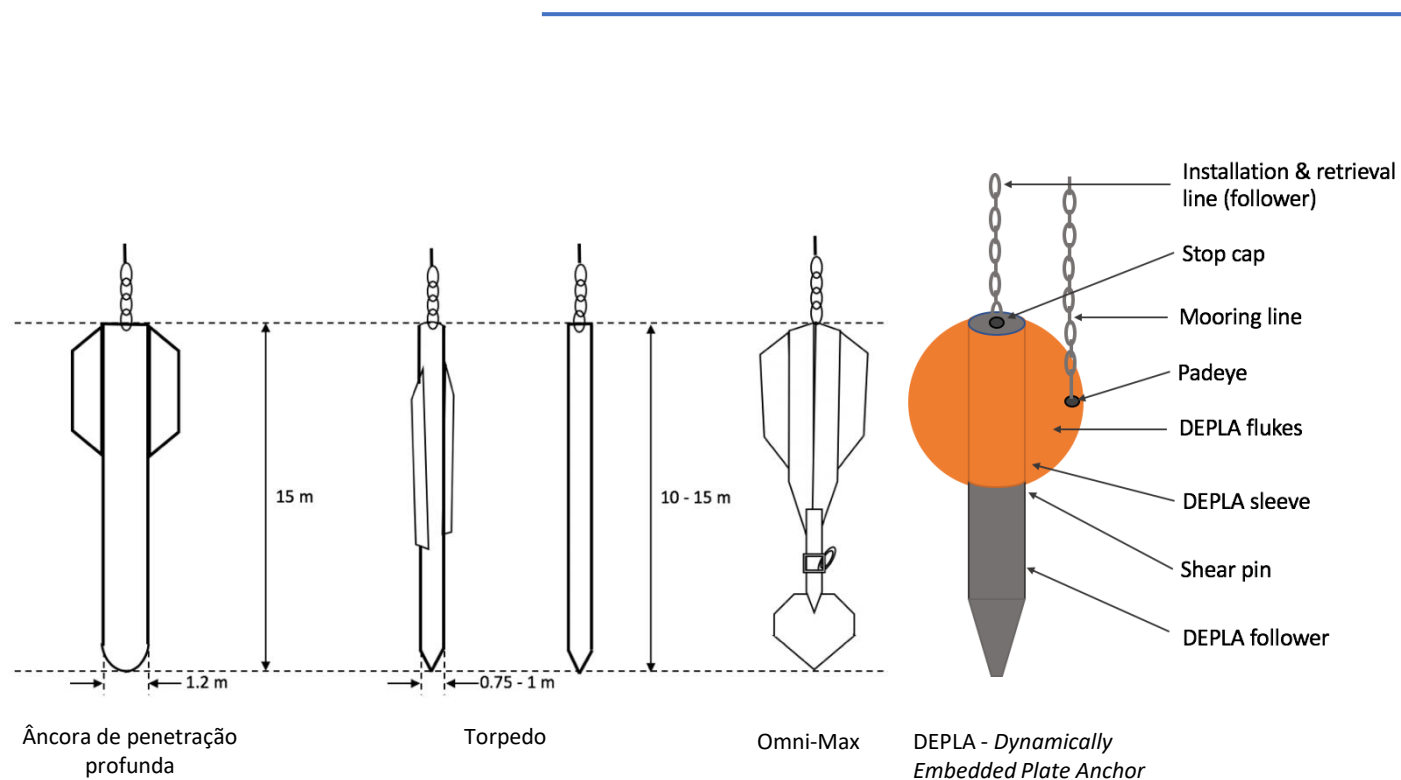


## 2.1 - Âncoras de gravidade

São habitualmente constituídas por caixas ou grelhas preenchidas com enrocamento.



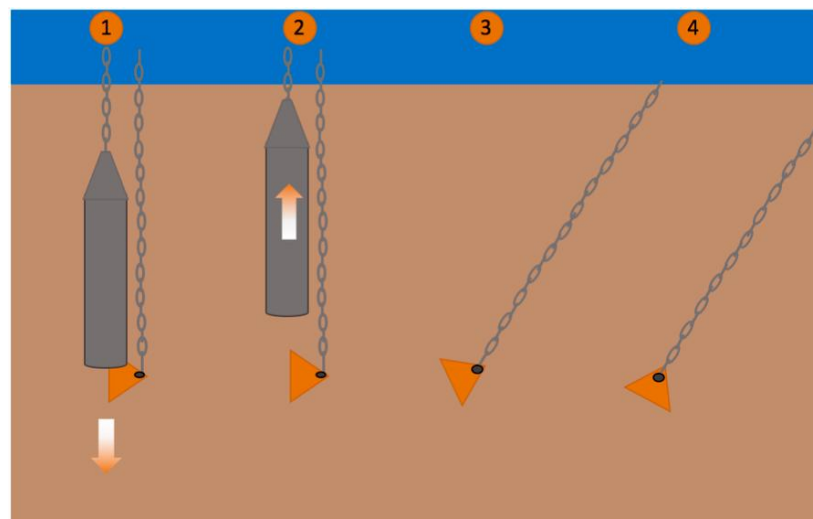
## 2.2 - Âncoras instaladas dinamicamente



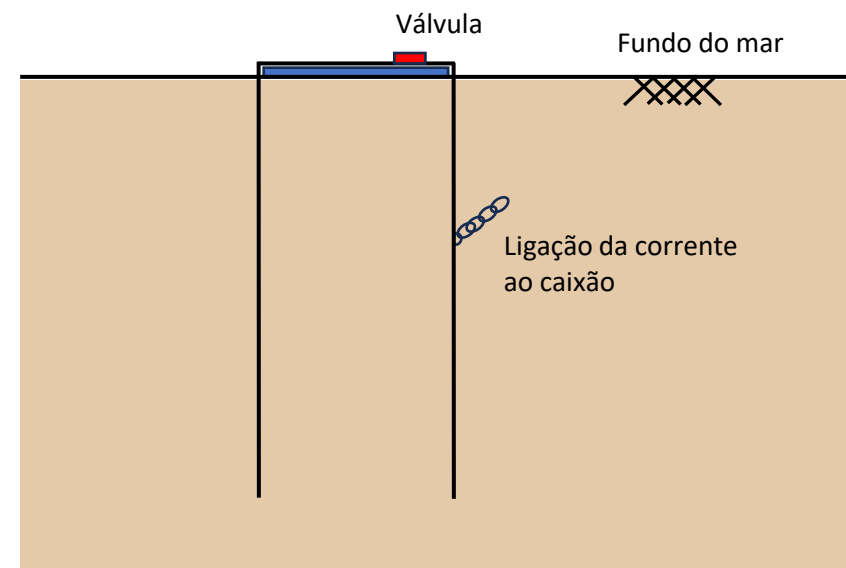
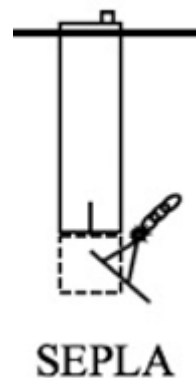
(adaptado de Lopes et al., 2021)



## 2.3 - Âncoras de sucção

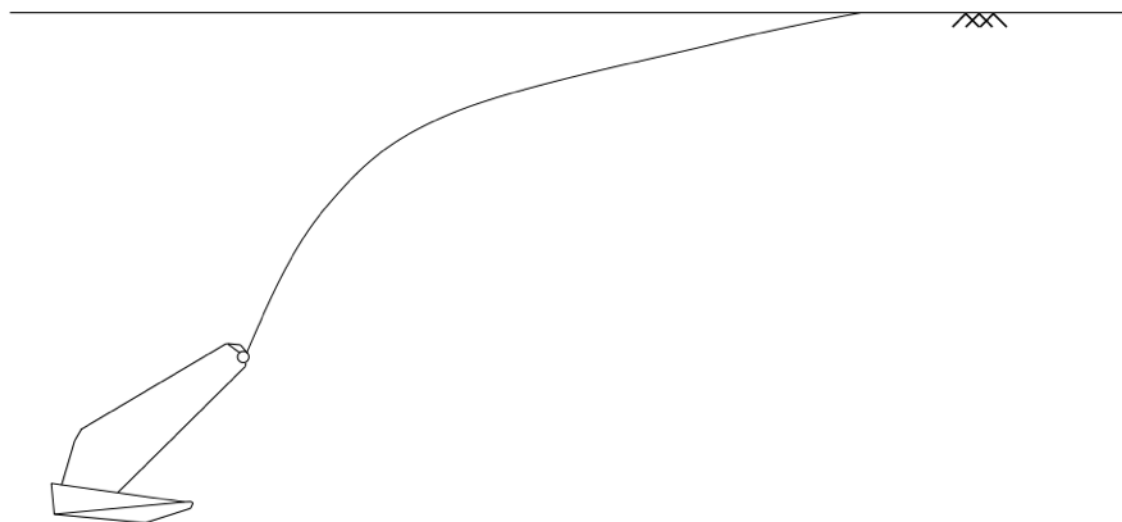
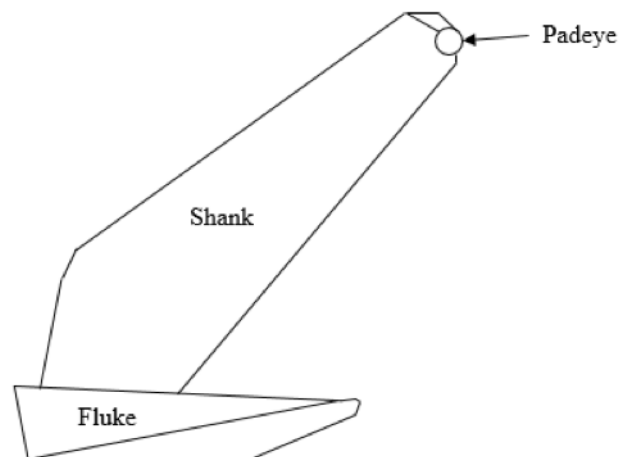


SEPLA - *Suction Embedded Plate Anchor*

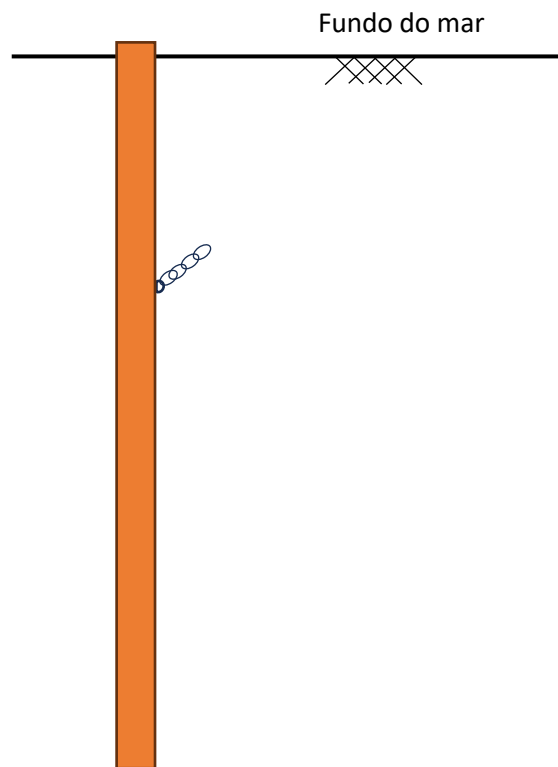


Caixões de sucção

## 2.3 - Âncoras de arrasto embebidas



## 2.4 - Estacas de ancoragem



## 3 - Estruturas apoiadas no terreno

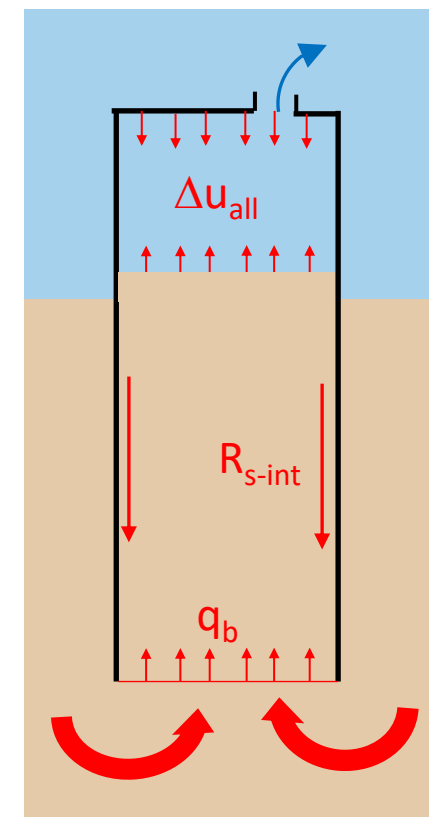
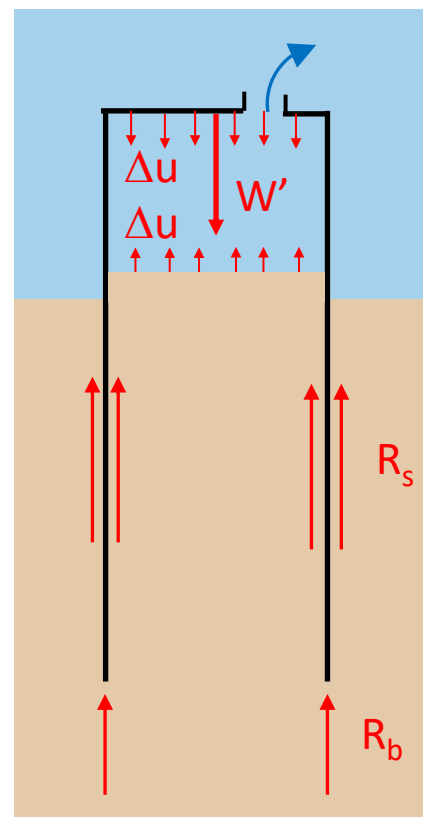
### 3.1 – Caixões de sucção (*Suction Buckets*)



### 3.1 – Suction buckets

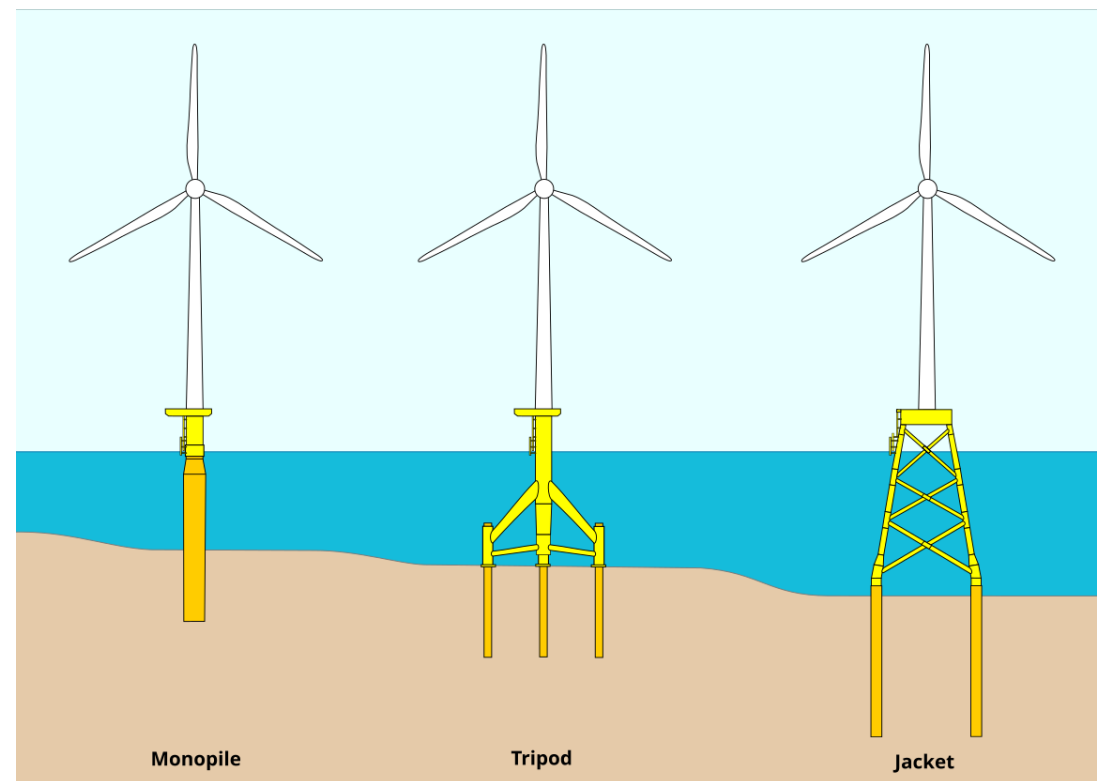
São instalados usando o peso próprio e sucção para fazer penetrar o caixão no terreno

A sucção tem de ser suficiente para vencer a resistência à penetração mas sem provocar o colapso do terreno no interior do caixão.



## Estruturas apoiada no terreno

### 3.2 - Estacas



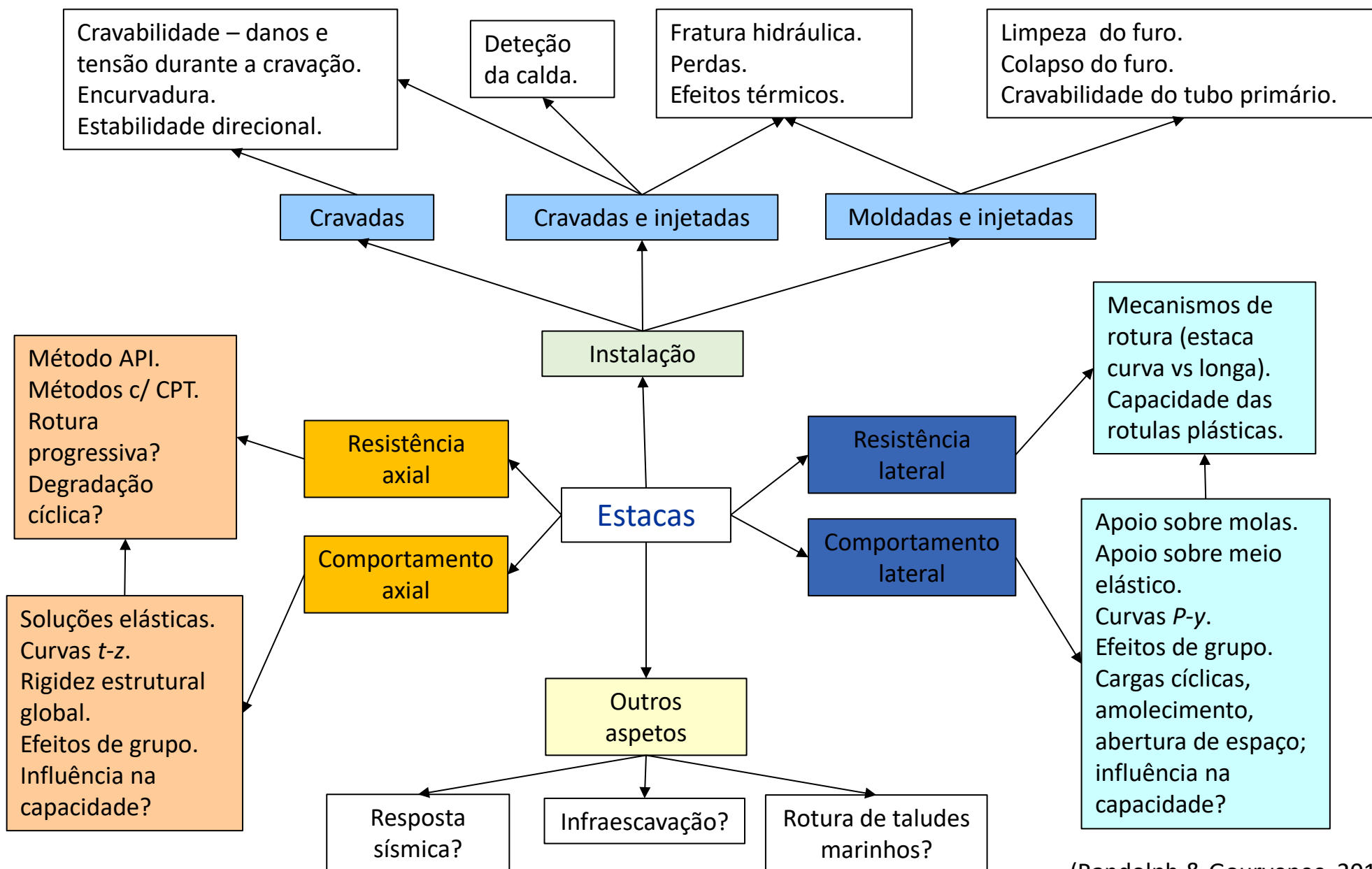


# Aspetos relativos ao projeto de estacas

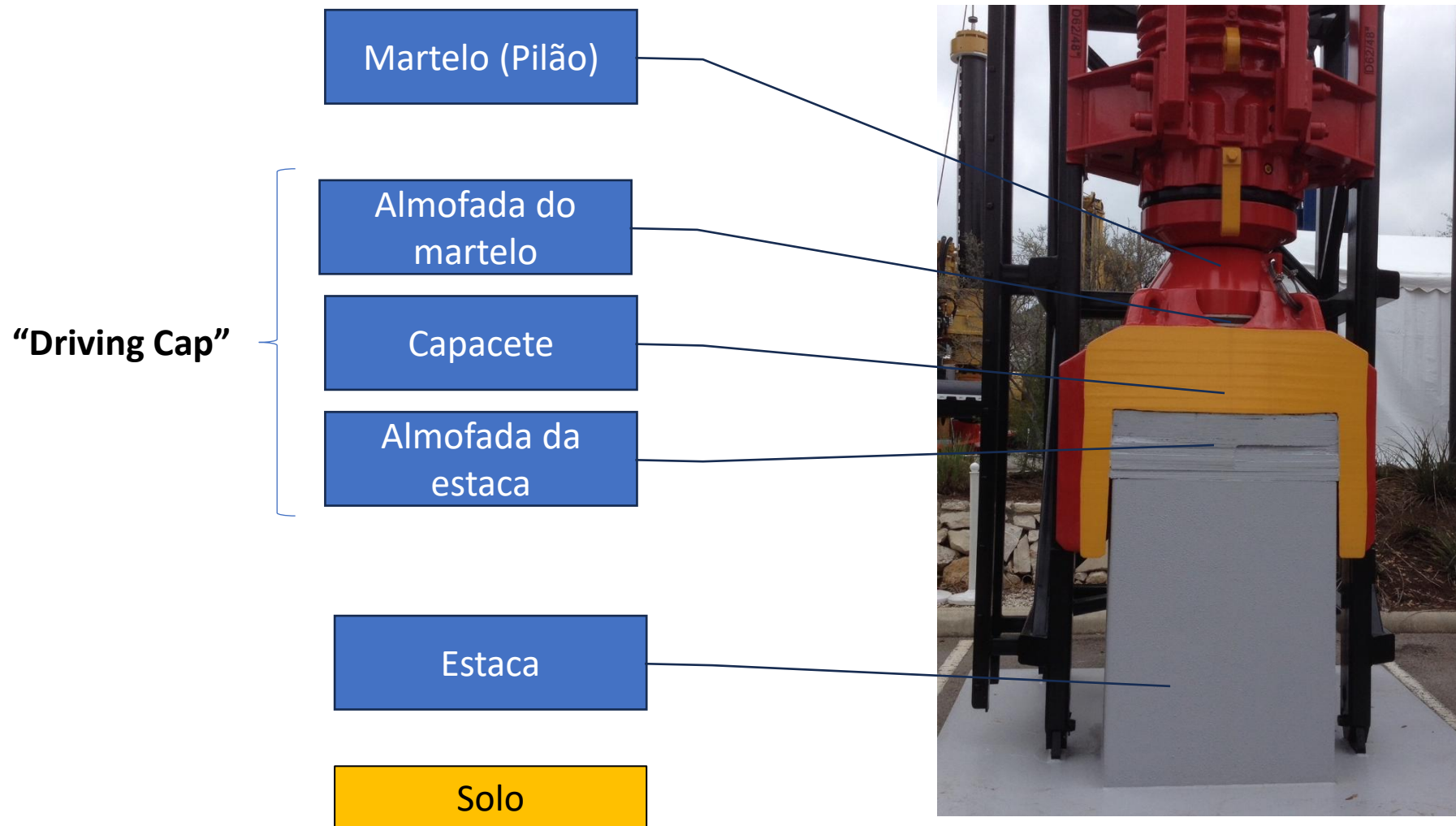
**Inputs:**

Caracterização geológica/geotécnica

Solicitações, coeficientes parciais / LRFD

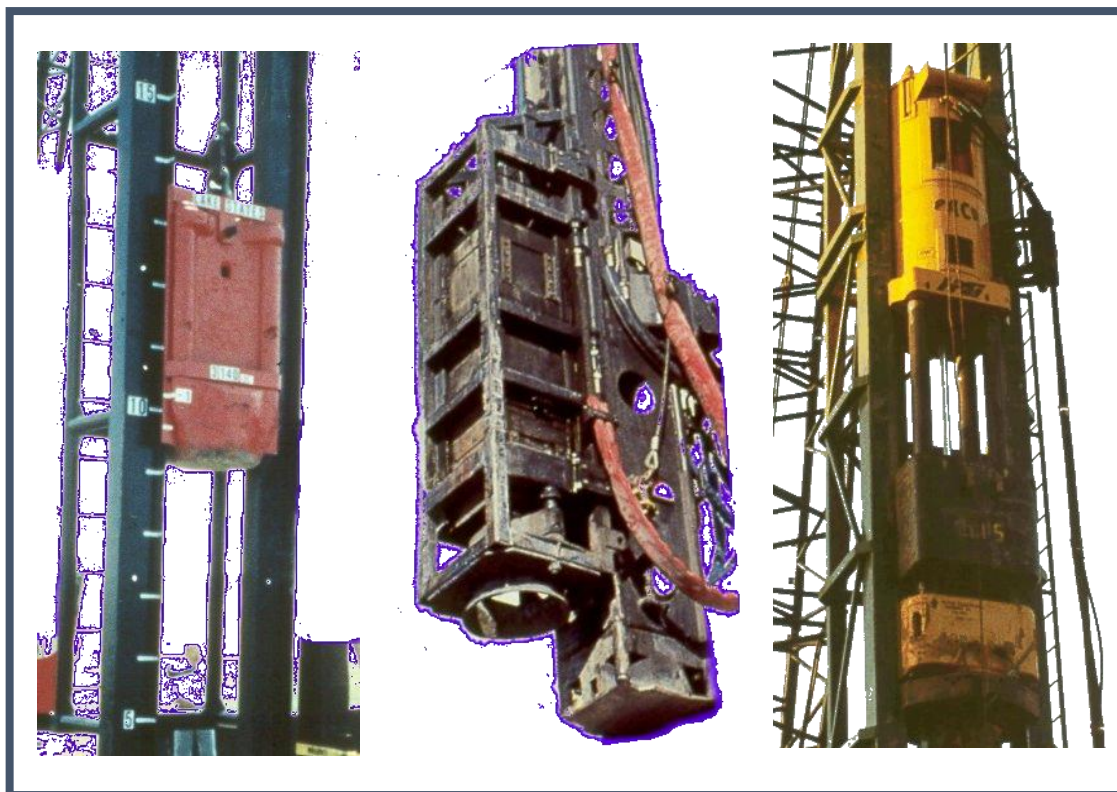


# Componentes da cravação de estacas



# Tipos de martelos

## *Combustão externa*

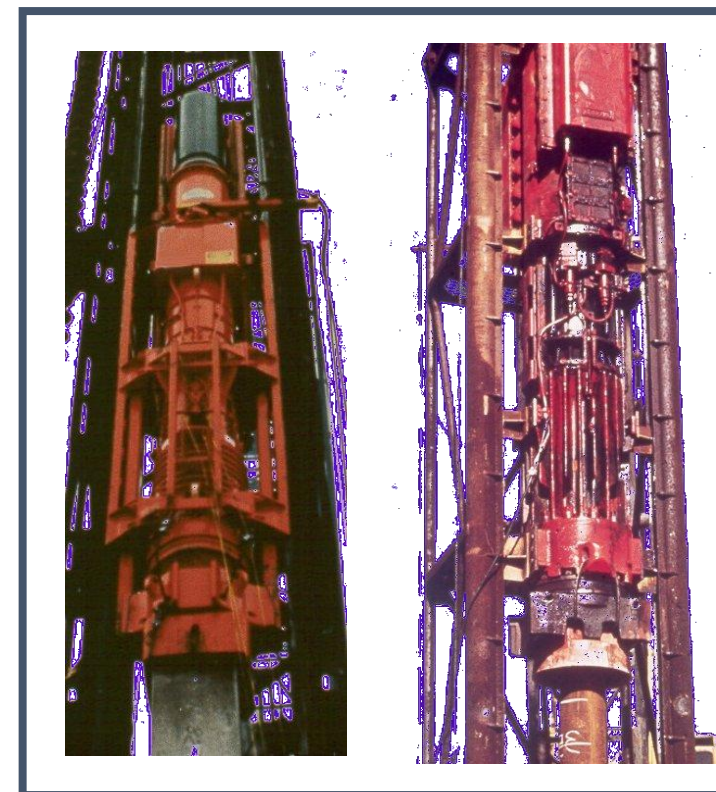


***“Drop Hammer”***

***Martelo hidráulico***

***Martelo ar/vapor comprimido***

## *Combustão interna*



***Diesel aberto***

***Diesel fechado***



## Cravação de estacas Offshore

- A maioria dos martelos em obras offshore são hidráulicos, com a vantagem de poderem funcionar submersos.
- Os martelos a vapor e diesel continuam a ser usados mas necessitam de extensores para poderem atuar acima da linha de água.



([www.menck.com](http://www.menck.com))



# Martelos hidráulicos



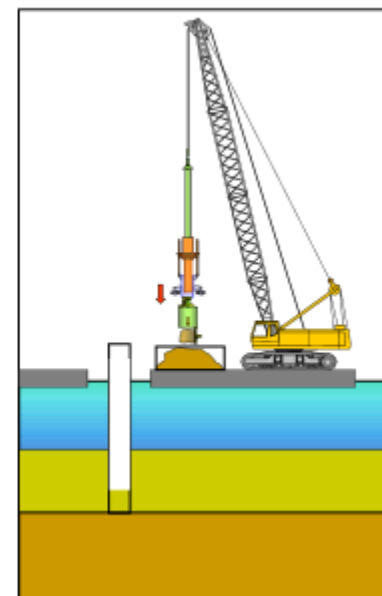
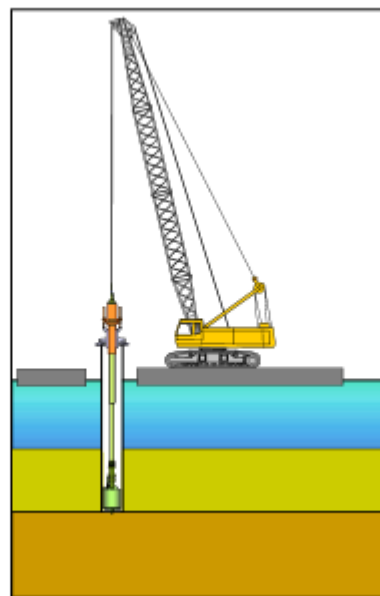
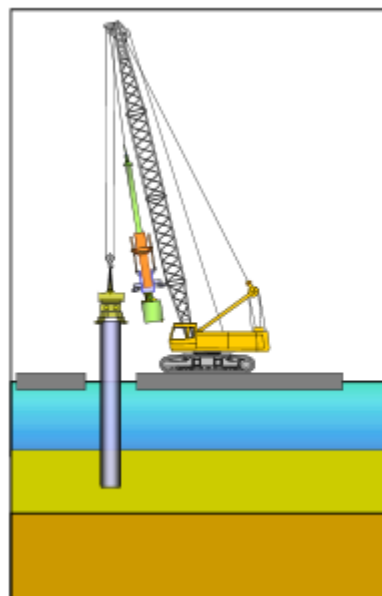
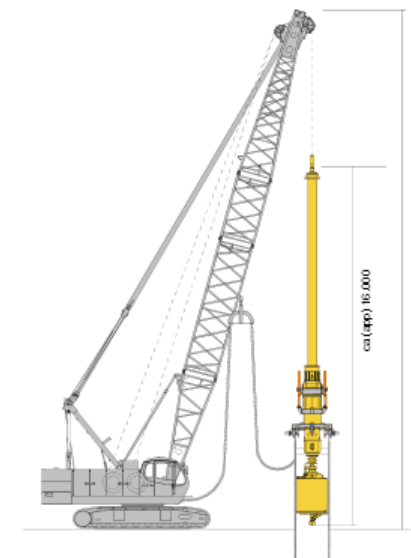
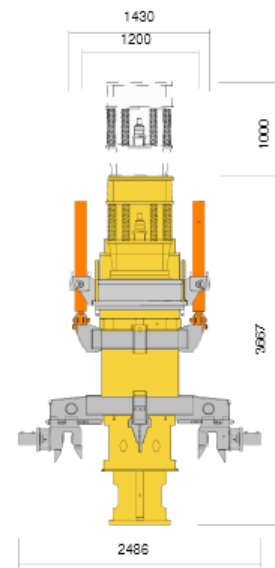


## Martelos vibratórios



(<http://www.cape-holland.com>)

# Furação com Flydrill



(Bauer)



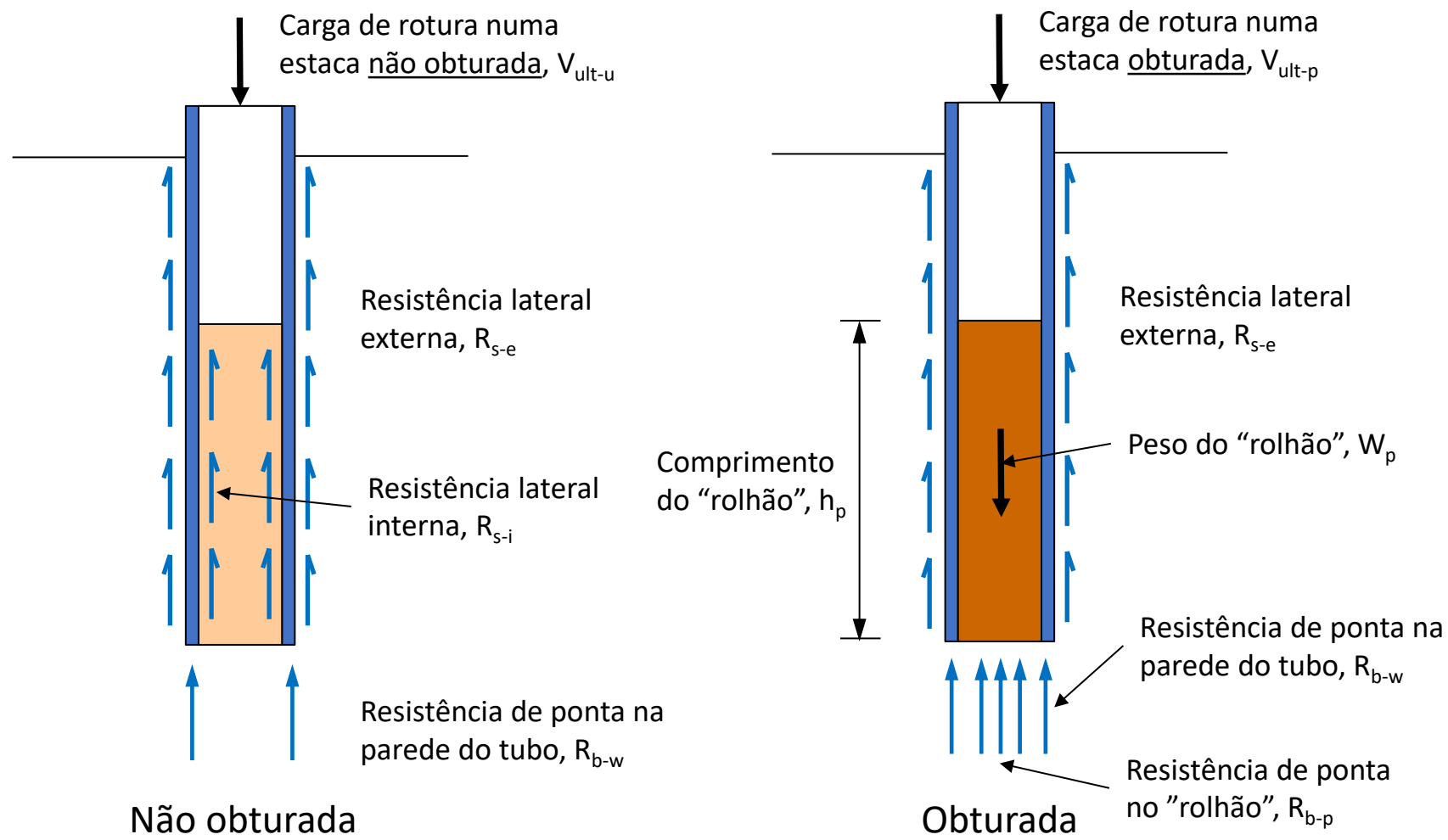
# Estacas

- As dimensões da estacas cravadas em estruturas offshore variam entre  $\phi 762$  mm (30") e diâmetros superiores a  $\phi 4000$  mm para fundações *monopile*, com rácios de espessura de parede / diâmetro entre 25 a 100.
- A ponta da estaca pode ser aberta ou fechada com uma chapa soldada ou um ponteira cónica.





# Obturação de estacas tubulares abertas

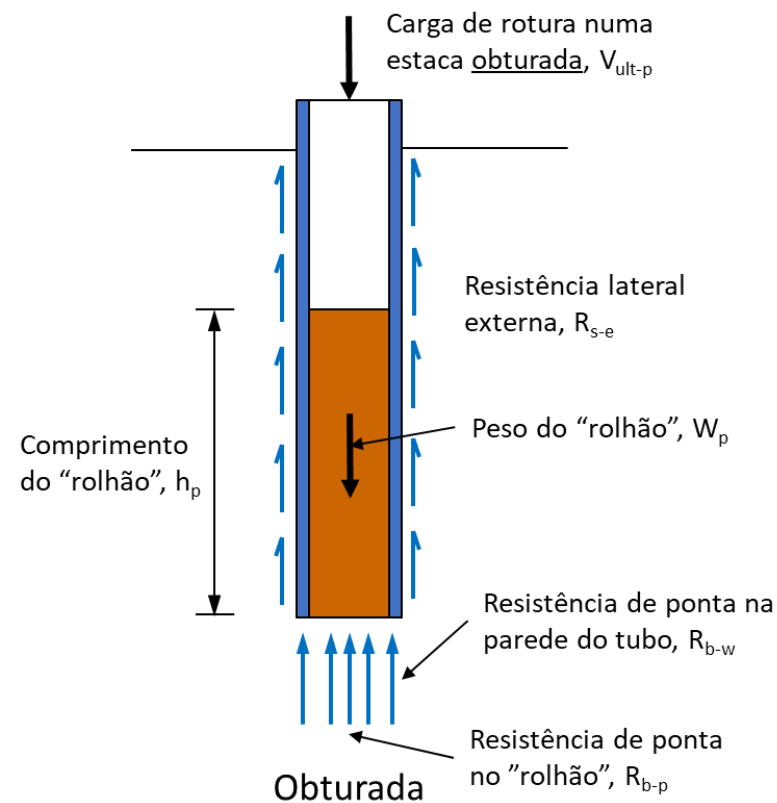


# Obturação de estacas tubulares abertas

A obturação ocorre quando:

$$R_{s-i} > R_{b-p} - W_p$$

Habitualmente as estacas mantêm-se não obturadas durante a cravação, mas sob solicitação estática comportam-se como obturadas.



## Variação da resistência axial ao longo do tempo

- Quando as estacas são cravadas em argila, a sua capacidade de carga aumenta frequentemente com o tempo.

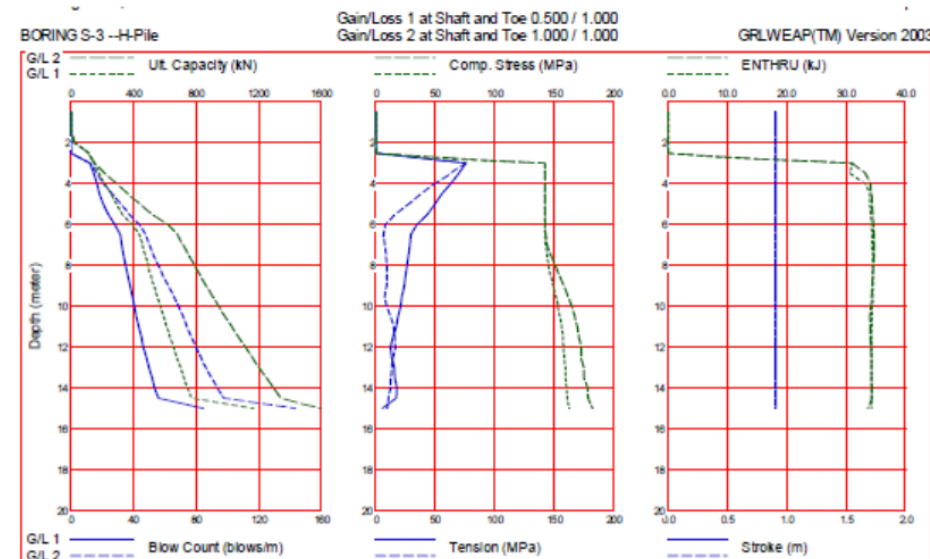
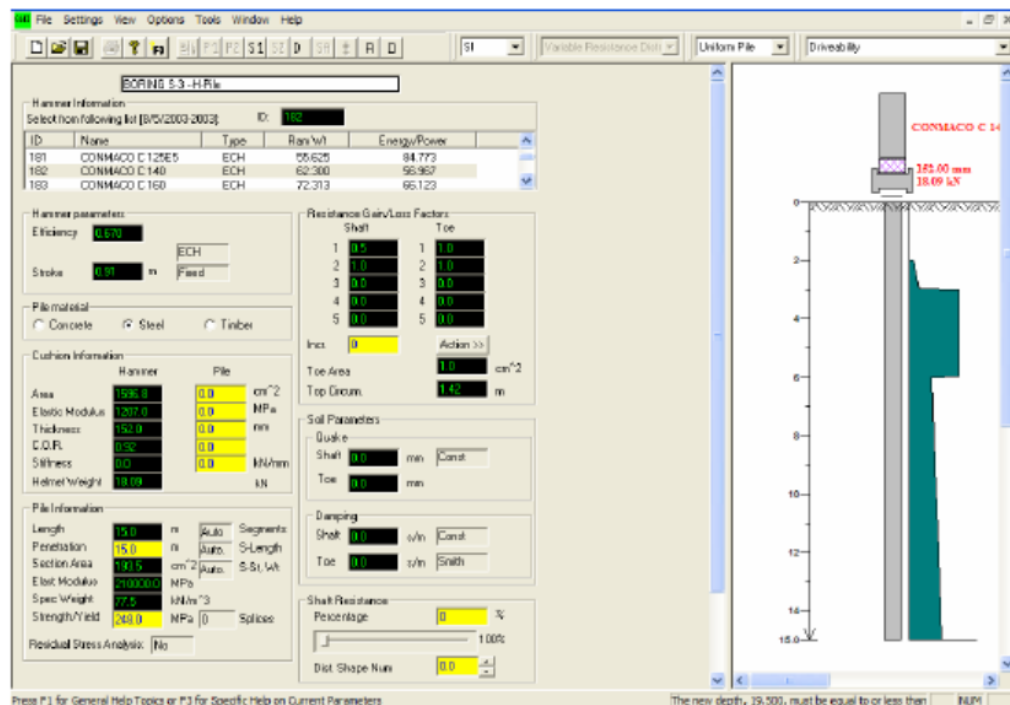
TABLE 9-20 SOIL SETUP FACTORS (after Rausche <i>et al.</i> , 1996)			
Predominant Soil Type Along Pile Shaft	Range in Soil Set-up Factor	Recommended Soil Set-up Factors*	Number of Sites and (Percentage of Data Base)
Clay	1.2 - 5.5	2.0	7 (15%)
Silt - Clay	1.0 - 2.0	1.0	10 (22%)
Silt	1.5 - 5.0	1.5	2 (4%)
Sand - Clay	1.0 - 6.0	1.5	13 (28%)
Sand - Silt	1.2 - 2.0	1.2	8 (18%)
Fine Sand	1.2 - 2.0	1.2	2 (4%)
Sand	0.8 - 2.0	1.0	3 (7%)
Sand - Gravel	1.2 - 2.0	1.0	1 (2%)

\* Confirmation with Local Experience Recommended

(FHWA, 2016)



# Análise de cravabilidade através do modelo de equação da onda (GRLWEAP)



# Análise de cravabilidade através do modelo de equação da onda

- Objetivos:
  - Seleção de um martelo que possa cravar a estaca de modo eficiente, até atingir a capacidade especificada, sem causar danos na estaca.
- Input:
  - Capacidade resistente do terreno
  - Assentamento necessário para mobilizar a resistência lateral e de ponta, amortecimento
  - Estaca
  - Sistema de cravação (martelo, almofadas, capacete)
- Output
  - Gráfico de capacidade e tensões na estaca (para um comprimento)
  - Gráfico de capacidade e tensões na estaca (para uma gama de comprimentos)

# Análise de cravabilidade – GRLWEAP input

GRLWEAP 2010-6.DEMO-Universidade Coimbra-NO COMMERCIAL USE - [22-Sl.gww]

File Edit View Options Tools Window Help

SI Variable Resistance Distr Non Uniform Pil Driveability

### Example 22: Offshore Wave Input

Hammer Information:  
Select from following list [29/02/2016-2003]: ID: **468**

ID	Name	Type	Ram Wt	Energy/Power
467	MENCK MHU 600T	ECH	357.747	660.043
468	MENCK MHU 800S	ECH	444.692	820.012
469	MENCK MHU1200S	ECH	648.386	1200.162

Hammer parameters:  
Efficiency: **0.95**  
Stroke: **1.84** m  
Type: **ECH**  $\times 0.98$

Pile material:  
☐ Concrete ☒ Steel ☐ Timber

Cushion Information:

	Hammer	Pile	Unit
Area	<b>0.</b>	<b>0.</b>	cm <sup>2</sup>
Elastic Modulus	<b>0.</b>	<b>0.</b>	MPa
Thickness	<b>0.</b>	<b>0.</b>	mm
C.O.R.	<b>0.8</b>	<b>0.</b>	
Stiffness	<b>0.</b>	<b>0.</b>	kN/mm
Helmet Weight	<b>307.</b>		kN

Pile Information:

Length	<b>181.5</b> m	Auto	Segments
Penetration	<b>126.9</b> m	Auto	S-Length
Section Area	<b>2796.02</b> cm <sup>2</sup>	Auto	S-St, Wt
Elast Modulus	<b>210000.</b> MPa	0	Splices
Spec Weight	<b>77.5</b> kN/m <sup>3</sup>		
Toe Area	<b>3336.37</b> cm <sup>2</sup>	Pile Type:	
Perimeter	<b>5.749</b> m	Pipe	
Pile Size	<b>1830.</b> mm		

Resistance Gain/Loss Factors:

Shaft		Toe	
1	<b>0.33</b>	1	<b>1.0</b>
2	<b>1.0</b>	2	<b>1.0</b>
3	<b>0.0</b>	3	<b>0.0</b>
4	<b>0.0</b>	4	<b>0.0</b>
5	<b>0.0</b>	5	<b>0.0</b>

Incr. **0** Action >>

Soil Parameters: **2nd Toe - No**

Quake:

Shaft	<b>2.54</b> mm	Const
Toe	<b>2.54</b> mm	

Damping:

Shaft	<b>0.588</b> s/m	Const
Toe	<b>0.49</b> s/m	Smith

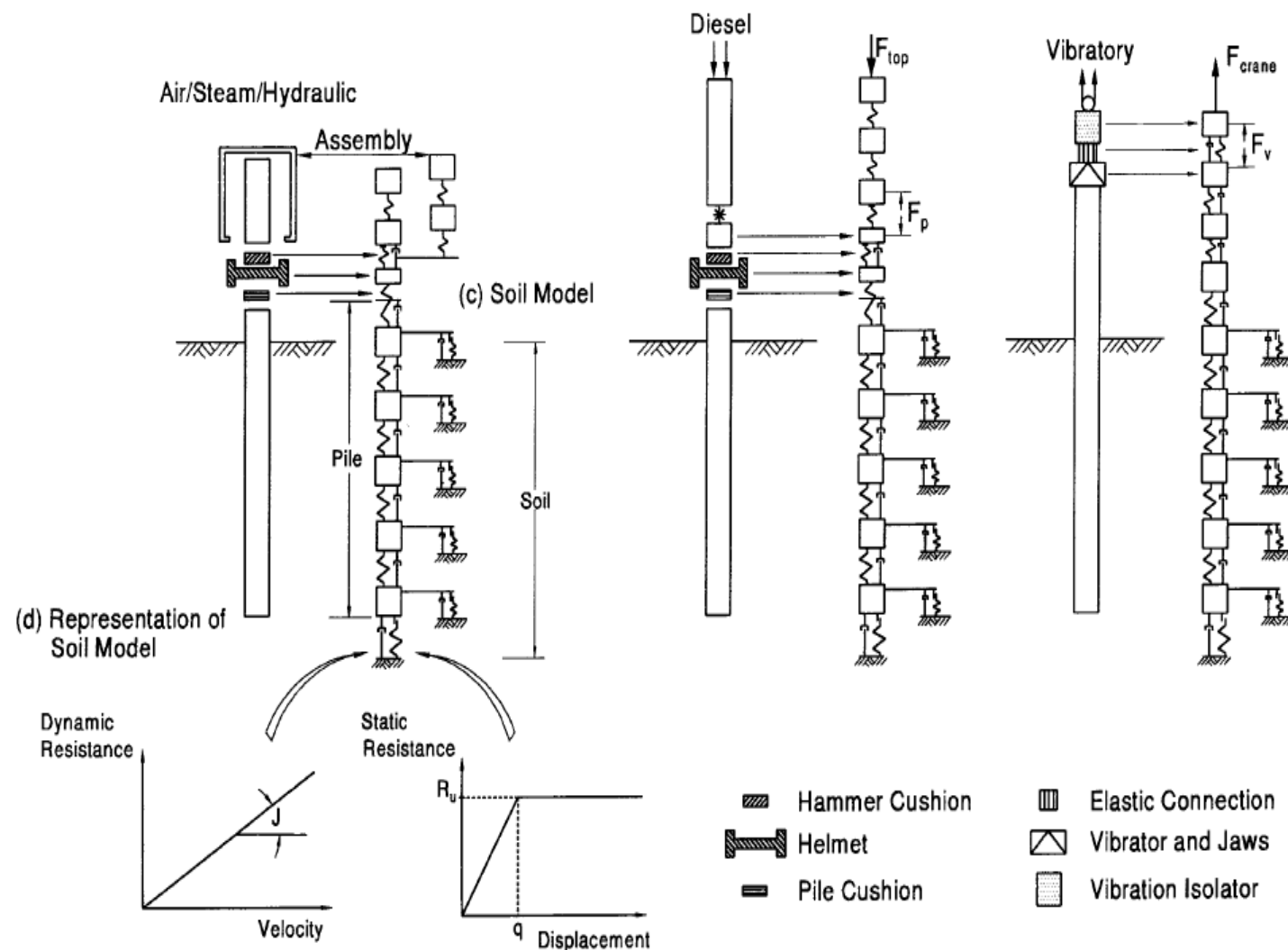
Shaft Resistance Percentage: **10** %

Dist. Shape Num: **0.0**

Residual Stress Analysis: **No**



# Análise de cravabilidade – Modelo da equação da onda (*Wave equation model*)



# Análise de cravabilidade – Tensões máximas admissíveis

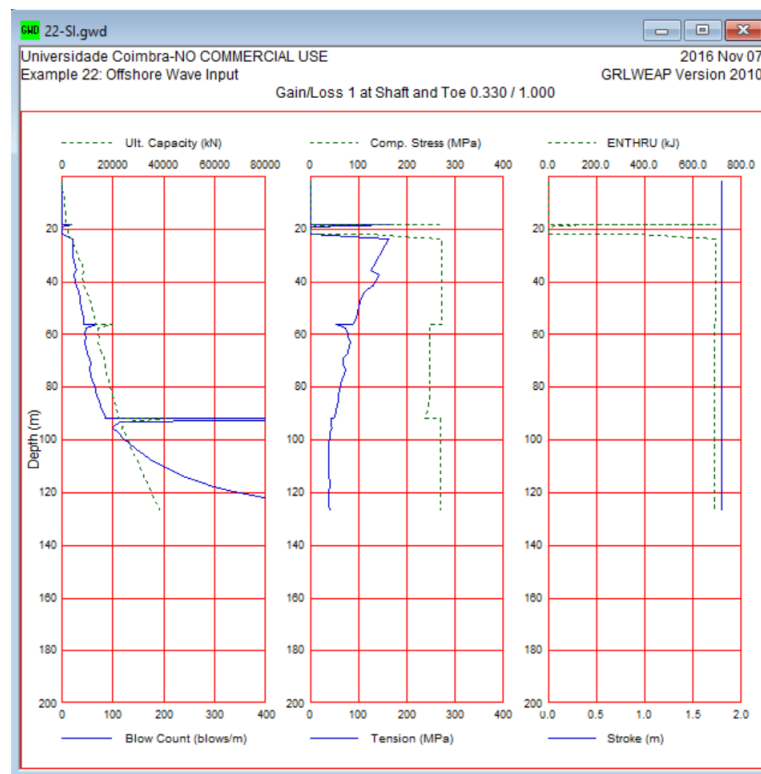
TABLE 10-2 MAXIMUM ALLOWABLE STRESSES FOR UNFILLED STEEL PIPE PILES	
	AASHTO (2002) Standard Specification Articles 4.5.7.3 and 4.5.11
Design Stresses	$0.25 f_y$  $0.33 f_y$ If damage is unlikely, and confirming static and/or dynamic load tests are performed and evaluated by engineer.
Driving Stresses	$0.9 f_y$  186 MPa (27.0 ksi) for ASTM A-252, Grade 1 ( $f_y = 207$ MPa; 30 ksi) 217 MPa (31.5 ksi) for ASTM A-252, Grade 2 ( $f_y = 241$ MPa; 35 ksi) 279 MPa (40.5 ksi) for ASTM A-252, Grade 3 ( $f_y = 310$ MPa; 45 ksi)

(AASHTO, 2002)





# Análise de cravabilidade – GRLWEAP output



Other outputs:

- Bearing graphs
- Inspector's charts



Outros aspetos relevantes no projeto e execução de estacas offshore:

- Estimativa da capacidade de carga axial
- Resposta ao carregamento axial (assentamentos)
- Resposta ao carregamento lateral
- Ensaios de carga (axial e lateral)

## Referências

FHWA (2016). *GEC No. 12 – Design and Construction of Driven Pile Foundations*. FHWA-NHI-16-009

G. Kronemberger Lopes, J. Sousa and G. Ellwanger (2021). *Numerical investigation of setup effects in the vertical holding capacity of finless torpedo anchors*, Rev. int. métodos numér. cálc. diseño ing. Vol. 37, (3), 34. URL [https://www.scipedia.com/public/Lopes\\_et\\_al\\_2020a](https://www.scipedia.com/public/Lopes_et_al_2020a).

Randolph, M. & Gouvernec, S. (2011). *Offshore Geotechnical Engineering*. Spon Press.

Obrigado pela atenção. Questões?

ppinto@dec.uc.pt

