

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS A.C. SIMÕES
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA DE PETRÓLEO

SAYONARA CAVALCANTE BULANDEIRA

**ESTUDO NUMÉRICO DE INÍCIO DO TAMPONAMENTO NA CRAVAÇÃO DO
REVESTIMENTO CONDUTOR EM SOLOS ARGILOSOS**

Maceió/AL
Setembro de 2021

SAYONARA CAVALCANTE BULANDEIRA

**ESTUDO NUMÉRICO DE INÍCIO DO TAMPONAMENTO NA CRAVAÇÃO DO
REVESTIMENTO CONDUTOR EM SOLOS ARGILOSOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Colegiado de Engenharia do Petróleo da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial da obtenção do título de Engenheira de Petróleo.

Orientador: Prof. Dr. João Paulo Lima Santos

Coorientadora: Dr^a. Beatriz Ramos Barboza

Maceió/AL
Setembro de 2021

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

B933e Bulandeira, Sayonara Cavalcante.
Estudo numérico de início do tamponamento na cravação do revestimento condutor em solos argilosos / Sayonara Cavalcante Bulandeira. – Maceió, 2021. 59 f. : il., grafs. e tabs. color.

Orientador: João Paulo Lima Santos.

Co-orientadora: Beatriz Ramos Barboza.

Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Petróleo) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2021.

Bibliografia: f. 56-59.

1. Método dos elementos finitos. 2. Efeito tampão. 3. Cravabilidade 4. Revestimento - Poços de petróleo. I. Título.

CDU: 622.276

FOLHA DE APROVAÇÃO

SAYONARA CAVALCANTE BULANDEIRA

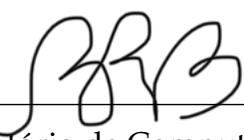
ESTUDO NUMÉRICO DE INÍCIO DO TAMPONAMENTO NA CRAVAÇÃO DO REVESTIMENTO CONDUTOR EM SOLOS ARGILOSOS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido aos Colegiado de Engenharia do Petróleo da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial da obtenção do título de Engenheiro de Petróleo.

Maceió, 10 de setembro de 2021.

(Prof. Dr. João Paulo Lima Santos, Universidade Federal de Alagoas)
(Orientador)

Banca Examinadora:



(Dr^a. Beatriz Ramos Barboza, Laboratório de Computação Científica e Visualização)
(Examinador Externo)



(Dr. Christiano Augusto Ferrario Várady Filho, Laboratório de Computação Científica e Visualização) (Examinador Externo)



(M. Sc. Lucas Pereira de Gouveia, Universidade Federal de Alagoas)
(Examinador Interno)

Dedico este trabalho à minha família, em especial meu irmão mais novo Jonas, que me fez ver a vida com outros olhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Jeová Deus, por ter me dado forças quando parecia não haver esperança, aos meus pais e irmãos, especialmente minha mãe, por seu apoio incondicional, motivação e por fazer de tudo para meu bem-estar. Sem essas pessoas não teria chegado à lugar algum.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr João Paulo Lima e co-orientadora, Dr^a. Beatriz Barboza, bem como à equipe SOLOS, a qual faço parte, com ênfase no grupo de Cravação, liderado por Msc. Aline Esteves, a qual me ajudou bastante durante minha passagem no grupo. Agradeço também ao Laboratório de Computação Científica e Visualização pelo financiamento.

Ao Prof. Dr. Leonardo Oliveira, meu muito obrigada, por todo o ensinamento, exemplo e paciência.

Aos meus amigos que fiz durante a graduação e quero levar para o resto da vida, Raniel Albuquerque, Raiza Alchaar, Victor Siqueira, Erivanio Santos, Marcos Mindelo, Andreza Moura, Erivelton Barros, Morgana Lima, Jennifer Ferreira, Joyce Tenório, Nathan Abdon, meu muito obrigada. Sem vocês minha graduação não teria tido tantas alegrias.

Agradeço ao Programa Especial de Capacitação Discente (PEC) por me proporcionar tanto desenvolvimento profissional e pessoal e aos amigos que lá formei, em especial Yané Mayanne, Hugo Azevedo e a Prof^a. Dayana de Gusmão. Passamos por muitos desafios, mas conseguimos vencê-los.

À todas as pessoas, dentro e fora da Universidade, que passaram na minha vida e me ajudaram a chegar até esse ponto, obrigada!

Para todas as coisas tenho forças graças àquele que me dá poder.

Filipenses 4:13

RESUMO

Devido à alta demanda energética e à contínua necessidade da sociedade, campos de petróleo de fácil acesso, como campo *onshore* e em águas rasas, estão sendo exauridos. Então surge a necessidade de exploração de novos campos em águas profundas. Para isso, é necessário tecnologia e entendimento dos fenômenos envolvidos. Na instalação de um poço de petróleo, uma das primeiras etapas é o assentamento dos revestimentos. A instalação do revestimento condutor pode ser realizada por cravação, jateamento ou perfurado com broca. Durante a cravação, quando o condutor está penetrando o solo, o revestimento pode ser obstruído parcialmente ou completamente. Esse tamponamento afeta negativamente a dinâmica da cravação e o comportamento do revestimento, pois, é necessário maior energia para continuar a penetração, acarretando maior custo e atraso do projeto. Sendo assim, esse trabalho visa estudar se há formação do tampão ao longo profundidade analisada e como o diâmetro do condutor afeta a formação do tampão durante a cravação em um solo argiloso. Para isso, utilizou-se o Método dos Elementos Finitos e a abordagem Euleriana-Lagrangiana Acoplada para a simulação, e o modelo de Mohr-Coulomb para a modelagem do solo. Como resultado, observou-se que não houve formação de tampão nos primeiros metros cravados e que o diâmetro influencia na formação do tampão, sendo proporcional o aumento do diâmetro com a formação do tampão.

Palavras-chave: Método de Elementos Finitos, efeito tampão, cravabilidade.

ABSTRACT

Due to high demand of energy and the continuous need of the society, oil fields that are easier to be explored, like onshore and shallow waters, are being exhausted. Hence, there is the need to explore new fields at deep waters, and requires technology and understanding of the phenomena. At the construction of a petroleum well, the conductor casing installation is one of the firsts steps. The installation of the conductor casing can be done by drilling, jetting or driving. During this process, the soil can obstruct the interior of the conductor, partially or completely, creating a soil plug. With the advancement of the pile penetration, the frictional resistance may increase, impeding further material entering the tube. It is called soil plug effect and can change the dynamic process and the casing behavior, once it will be needed more energy to complete the installation, thus this causes delay in the project and more cost. This work analysed the soil plug development during pile driving, at which depth the plug may be formed and how the diameter of the conductor influences the process. It was used Finite Element Method with the Coupled Eulerian-Lagrangian approach and Mohr-Coulomb model. And it was noticed that the conductor's diameter interferes directly in the driving and the formation of the plug. For the results found in the beginning of penetration there weren't any plug formed in the soil.

Keywords: Plugging effect, Finite Element Method, driveability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplificação das fases de revestimento de um poço de petróleo. Fonte: (LEPELEIRE, 2004).....	18
Figura 2 – Lançamento do condutor. Fonte: VAN NOORT <i>et al.</i> (2009).....	20
Figura 3 – Posicionamento do condutor. Fonte: VAN NOORT <i>et al.</i> (2009).	21
Figura 4 – Processo de instalação do martelo. Fonte: VAN NOORT <i>et al.</i> (2009). ...	24
Figura 5 – Desenvolvimento do efeito tampão. Fonte: Ko e Jeong (2015).	26
Figura 6 – Tensão horizontal durante a penetração de estaca de ponta aberta. Fonte: Henke e Grabe (2008)	28
Figura 7 – Tensão atuantes na estaca tamponada e desobstruída. Fonte: (PAI- KOWSKY, 1990)	29
Figura 8 – Estaca fechada-aberta utilizada por Fattah e Al-Soudani (2015). Fonte: Fattah e Al-Soudani (2015).....	30
Figura 9 – Sistema de martelamento e prensão para teste de cravação. Fonte: Fattah, Al-Soudani e Omar (2016)	31
Figura 10 –Exemplo de subdivisão do domínio em finitos elementos. Fonte:Bellet e Deville (2003).	32
Figura 11 –Sequência de etapas para a construção de um modelo. Fonte: Autora (2021).	34
Figura 12 –Representação do domínio do solo. Fonte: Autora (2021).	38
Figura 13 –Posicionamento inicial do condutor no solo. Fonte: Autora (2021).....	39
Figura 14 –Condições de contorno do modelo. Fonte: Autora (2021).	40
Figura 15 –Malha Numérica do Solo, (a)Vista superior da malha e (b) vista frontal da malha. Fonte: Autora (2021).	41
Figura 16 –Malha numérica do condutor, (a) Vista frontal do condutor e (b) vista superior do condutor. Fonte: Autora (2021).....	42
Figura 17 –Tampão dentro do condutor D1. Fonte: Autora (2021).	45
Figura 18 –Tampão dentro do condutor D2. Fonte: Autora (2021).	46
Figura 19 –Tampão dentro do condutor D3. Fonte: Autora (2021).	47
Figura 20 –PLR do condutor D1. Fonte: Autora (2021).	48
Figura 21 –IFR do condutor D1. Fonte: Autora (2021).	48
Figura 22 –PLR do condutor D2. Fonte: Autora (2021).	49
Figura 23 –IFR do condutor D2. Fonte: Autora (2021).	49
Figura 24 –PLR do condutor D3. Fonte: Autora (2021).	50
Figura 25 –IFR do condutor D3. Fonte: Autora (2021).	50
Figura 26 –Tensão lateral dentro e fora do condutor com distância de 0,12 metros ao condutor D1. Fonte: Autora (2021).....	51

Figura 27 –Tensão lateral dentro e fora do condutor com distância de 0,15 metros no condutor D2. Fonte: Autora (2021).	52
Figura 28 –Tensão lateral dentro e fora do condutor com distância de 0,19 metros no condutor D3. Fonte: Autora (2021).	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diâmetros dos condutores	37
Tabela 2 – Propriedades do solo	39
Tabela 3 – Propriedades do condutor	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AHC	Compensação de elevação ativa (<i>Active Heave Compensation</i>)
AHV	Navio de manuseio de âncora (<i>Anchor Handling Vessel</i>)
ALMs	<i>Artificial Lift Manifold</i>
API	Intituto Americano de Petróleo (<i>American Petroleum Institute</i>)
BOP	(<i>Blow Out Preventer</i>)
CEL	Euleriano-Lagrangeano acoplado <i>Coupled Eulerian–Lagrangian</i>
DGPS <i>Position System</i>)	Sistema de Posicionamento Global Diferencial (<i>Diferencial Global Position System</i>)
IFR	Razão de enchimento incremental (<i>Incremental Filling Ratio</i>)
LBL	Linha de base longa (<i>Long Base Line</i>)
MEF	Método dos Elementos Finitos
OCV	Navio de construção em mar (<i>Offshore Construction Vessel</i>)
PLR	Razão de tamponamento (<i>Plug Length Ratio</i>)
ROV	Veículo de operação remota (<i>Remotely Operated Vehicle</i>)
STS	Sucção para estabilidade (<i>Suction-to-stability head tool</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

Penetração por peso próprio

α	Coefficiente de aderência
D	Diâmetro externo do condutor
d_{aco}	Densidade do aço
d_{mud}	Densidade do fluido
f	Resistência ao atrito lateral
f_b	Coefficiente de flutuabilidade do condutor no fluido de perfuração
$f(t)$	Força de atrito lateral entre o condutor e o solo
h	Comprimento do elemento da função
h_{minX}	Profundidade mínima
L	Distancia entre o fundo do mar e a cabeça do poço
P_f	Pressão de fratura da formação
P_l	Perda de pressão no anular
P'_o	Pressão de sobrecarga efetiva
n	Coefficiente de segurança
N_f	Força de atrito na lateral do condutor
N_{fundo}	Força axial ascendente no fundo do condutor
N_{topo}	Força axial sobre o condutor na cabeça do poço
S	Área da seção transversal do anular

S_u	Resistência ao cisalhamento não drenado no solo
W_c	Peso do condutor
$W_{c-mudliner}$	Peso do condutor acima da superfície do <i>mudliner</i>
W_s	Peso do revestimento de superfície

Sucção

ΔP	Diferencial de pressão
A	Área da seção transversal do condutor
D_s	Diâmetro do condutor
$F_{sucção}$	Força de sucção
R_{pe}	Resistências da parede externa
R_{pi}	Resistência da parede interna
R_{ponta}	Resistência na ponta
R_{solo}	Resistência à penetração do solo

Martelamento

A	Área da seção transversal do condutor
e	Profundidade de penetração por impacto
D	Dano causado pelo acúmulo de fadiga
K	Fator de segurança
n	Número de ciclos em determinada faixa de tensão

N	Número de ciclos
P_a	Capacidade de carga suportada pelo condutor
q	Peso da estaca
Q	Peso do martelo

Tamponamento

A_i	Área interna da estaca
A_o	Área externa da estaca
A_p	Áreas da ponta
L_i	Altura da coluna de solo no interior do condutor
D_i	Profundidade de penetração
ΔL_i	Incremento da altura da coluna de solo
ΔD_i	Incremento da profundidade de penetração
f_{si}	Atrito lateral interno
f_{so}	Atrito lateral externo
q_p	Capacidade de carga final unitária

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo	16
1.1.1 Objetivo específico.....	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 Instalação de poço	17
2.1.1 Tipos de Revestimento	17
2.1.2 Instalação por Cravação	19
2.2 Tamponamento	26
2.3 Método de Elementos Finitos	32
2.3.1 Tipos de análise	33
2.3.2 Geometria e Malha	33
2.3.3 Propriedades dos Materiais	35
2.3.4 Condições de Contorno e Carregamento	35
3 ANÁLISE NUMÉRICA	37
3.1 Geometria	37
3.2 Propriedade dos Materiais	37
3.3 Condições de Contorno e Carregamento	39
3.4 Malha Numérica	40
3.5 Método Numérico	41
3.6 Custo Computacional	42
3.7 Quantificação do Tamponamento	43
3.8 Resultados e Discussões	44
3.8.1 Análise do PLR e IFR.....	44
3.8.2 Análise da Tensão lateral	51
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
4.1 Principais Conclusões	54
4.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	54
REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda energética mundial, seguido pela depletação de reservas de hidrocarbonetos em águas rasas e em campos *onshore*, faz-se necessário o desenvolvimento de tecnologias para exploração de reservatórios em ambientes desafiadores, como é o caso de campos *offshore* em águas profundas. Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) 96% da produção de óleo e 81% da produção de gás em 2019 decorreram de atividades *offshore*. Em 2020, os valores subiram para 96,8% da produção de óleo e 83,9% da produção de gás nacional (ANP, 2021). Nesse cenário, é fundamental entender os processos que englobam a instalação de elementos estruturais no poço, responsáveis por garantir uma produção segura nestes ambientes.

Na construção de poços de petróleo, o assentamento dos revestimentos é uma das primeiras operações a ser realizada, podendo ser executada por cravação, jateamento ou perfuração (ROCHA; AZEVEDO, 2009). O revestimento condutor, primeiro a ser instalado, varia entre 10 e 80 metros de comprimento em ambientes *offshore*. Por sua vez, a instalação do revestimento por cravação consiste em três etapas: penetração por peso próprio, sucção e martelamento.

Considerando o revestimento uma peça tubular de ponta aberta, durante as fases da cravação pode ocorrer a obstrução do seu interior pelo solo ao longo da descida. O bloco de solo que penetra o condutor causa atrito na parede interna, aumentando a resistência à cravação ao ponto de impedir a entrada adicional de solo. Esse fenômeno é chamado de efeito tampão ou *soil plug* (PAIKOWSKY; WHITMAN; BALIGH, 1989; PAIK; SALGADO, 2003).

O efeito tampão dificulta a instalação do condutor devido ao aumento da resistência à penetração (WANG *et al.*, 2020) que, por sua vez, exige maior energia do sistema para prosseguir com a cravação. Eventos como estes, quando não identificados previamente, podem acarretar em atrasos no cronograma de perfuração, afetando diretamente o custo do projeto. O estudo do processo de formação do efeito tampão e o entendimento de como a tensão é distribuída no solo contribui como auxílio prévio à instalação, a fim de minimizar custos e aumentar a eficiência da operação.

Com o auxílio da simulação computacional, no presente trabalho analisou-se a influência do condutor na formação do tampão, buscando identificar se houve a formação nos primeiros metros de penetração. A escolha da simulação se deve à sua facilidade de acesso uma vez que é muito dispendioso e complicado a realização de testes em campo com escala real. A modelagem computacional permite variação de parâmetros rapidamente e a análise de diferentes cenários.

A análise numérica é feita com o Método de Elementos Finitos (MEF), utilizando a formulação Euleriana-Lagrangiana Acoplada, devido o alto dinamismo do problema

e não linearidade. Para representar as deformações elastoplásticas do solo utiliza-se o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. Quanto as diâmetros, utilizou-se de 20", 26" e 30", e todas as simulações foram feitas para etapa de peso-próprio, com 4 segundos simulados, devido as limitações atrelado ao custo computacional da formulação empregada.

1.1 Objetivo

O presente trabalho delimita-se a modelar tridimensionalmente o revestimento condutor sendo cravado por peso próprio no domínio de solo e pretende estudar a formação do efeito tampão durante a instalação do revestimento condutor por cravação em solos argilosos. Objetiva-se reproduzir, através de um modelo computacional, como se desenvolve a formação do tampão e analisar como o diâmetro do condutor afeta tal formação.

1.1.1 Objetivo específico

- Estudar as etapas necessárias para a cravação de um revestimento condutor;
- Simular computacionalmente o processo de cravação de um revestimento condutor utilizando o Método dos Elementos Finitos;
- Estudar como a variação de diâmetro do condutor afeta a formação de tampão;
- Apontar a que profundidade de penetração do revestimento o tampão começa a se formar com diferentes diâmetros;
- Utilizar o *Plug Length Ratio* (PLR), *Incremental Filling Ratio* (IFR) e análise de tensão horizontal para a quantificação do tamponamento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Instalação de poço

O projeto de revestimentos é uma etapa importante na construção de um poço de petróleo. As colunas de revestimento precisam ser estanques, ter resistência compatível com as solicitações, corrosão e abrasão, além de facilitarem a instalação de conexões. As colunas também são responsáveis por impedir a migração de fluidos da formação, prevenir o desmoronamento das paredes do poço, evitar a contaminação de lençóis freáticos próximos à superfície, entre outras funções (THOMAS, 2001).

Logo, o dimensionamento das colunas deve considerar a resistência mínima que os tubos apresentam para suportar solicitações de tração, pressão interna e colapso, durante a instalação e produção dos equipamentos. Para isso deve-se levar em conta a poropressão e pressão de fratura na região perfurada, o volume de gás que poderá invadir o poço, o tipo de fluido de perfuração e completação que será usado, variações na inclinação do poço, composição do fluido de perfuração, entre outros (API, 2014).

2.1.1 Tipos de Revestimento

A escolha dos revestimentos é feita com base nos padrões do Instituto de Americano de Petróleo (*American Petroleum Institute*, API). A API especifica propriedades como a resistência, as dimensões físicas e os procedimentos de testes de controle de qualidade. Para o dimensionamento são analisados o grau do aço, diâmetro nominal, espessura da parede, tipo de conexão, *drift* de passagem entre outras especificações. A Figura 1 mostra a sequência de fases do revestimento usadas na construção de um poço de petróleo.

2.1.1.1 Revestimento Condutor

O revestimento condutor é o primeiro a ser assentado, em profundidades de 3 a 20 metros em poços *onshore* e de 10 a 80 metros em poços *offshore*. Normalmente, pode ter diâmetro de 36", 30", 20", 13 3/8". Esse tipo de revestimento tem como objetivo isolar sedimentos não consolidados e aquíferos próximos. (ROCHA; AZEVEDO, 2009).

Como essa estrutura é responsável por transmitir as cargas provenientes do poço, é necessário que toda sua extensão seja cimentada. O condutor pode ser assentado por jateamento, normalmente feito em poços *offshore*, perfurado com broca ou cravado (LEPELEIRE, 2004).

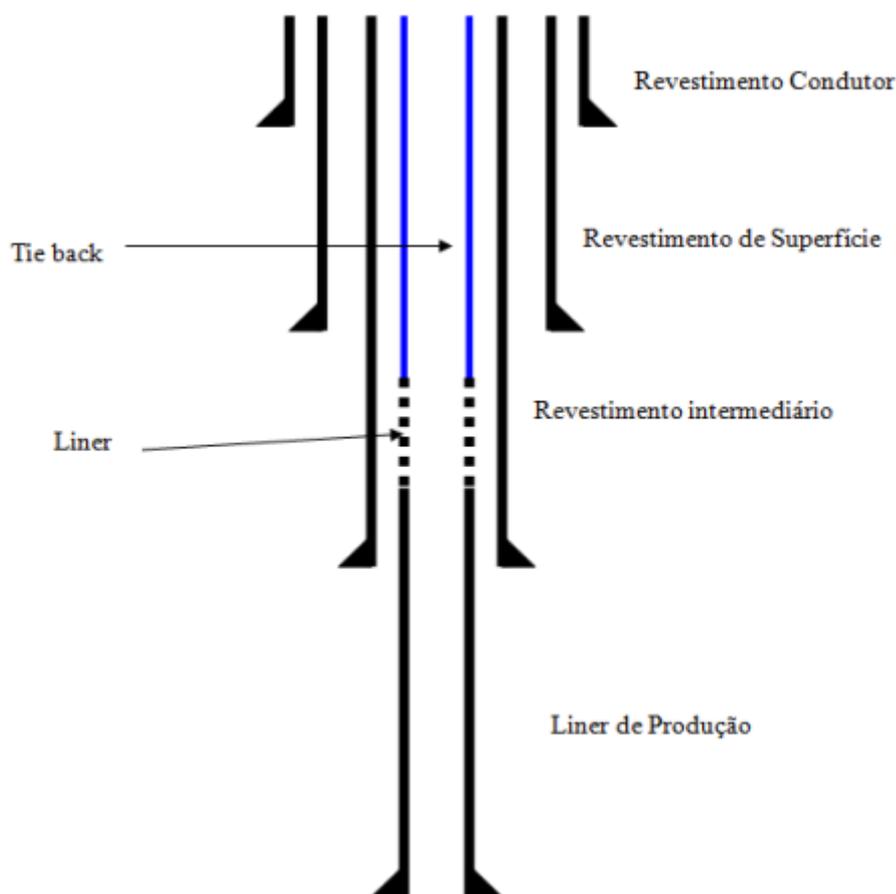


Figura 1 – Exemplificação das fases de revestimento de um poço de petróleo. Fonte: (LEPELEIRE, 2004).

2.1.1.2 Revestimento de Superfície

O comprimento de um revestimento de superfície varia de 100 a 600 metros e tem normalmente o diâmetro de 22", 20", 18 5/8", 16", 13 3/8", 10 3/4" ou 9 5/8". Esse revestimento tem como objetivo proteger zonas superficiais pouco consolidadas e de água, prevenir desmoronamento e suportar as demais colunas de revestimento, o BOP (*Blow Out Preventer*) e outros equipamentos de segurança. Por isso também o revestimento de superfície é cimentado, para segurar o peso e evitar flambagem (THOMAS, 2001).

2.1.1.3 Revestimento Intermediário

Após o revestimento de superfície, é assentado o revestimento intermediário. Esse pode ser instalado variando de 1000 a 4000 metros, a fim de isolar zonas de alta ou baixa pressão, zonas de perda de circulação, formações contendo hidrocarbonetos e zonas que podem desmoronar. Os diâmetros típicos são 13 3/8", 9 5/8" e 7" polegadas (THOMAS, 2001; ROCHA; AZEVEDO, 2009).

2.1.1.4 Revestimento de Produção

Como o nome sugere, a função desse revestimento é permitir a produção do poço, abrigando a coluna de revestimento de produção. Para isso, esse tipo de revestimento deve permitir a passagem de hidrocarbonetos até a superfície e isolar a passagem entre os intervalos produtores. O diâmetro varia entre 9 5/8", 7" e 5 1/2" (ROCHA; AZEVEDO, 2009).

2.1.1.5 Liner

Podendo substituir o revestimento intermediário ou de produção, o *liner* é uma opção econômica, versátil e de rápida instalação. Normalmente, essa coluna fica ancorada acima da extremidade inferior do último revestimento assentado e é independente do sistema de cabeça de poço. Quando é necessária a proteção do revestimento anterior, o *liner* pode ser complementado até a superfície, nesse caso é chamado de *tie back* (ROCHA; AZEVEDO, 2009).

2.1.1.6 Revestimentos Expansíveis

Existem ainda os revestimentos expansíveis, os quais podem alcançar profundidades desejadas com um diâmetro maior que o previsto. Esse revestimento é descido com determinado diâmetro e expandido. Pode ser usado como *liner*, revestimento intermediário ou como reparo de uma coluna danificada (LEPELEIRE, 2004).

2.1.2 Instalação por Cravação

A instalação do condutor pode ser realizada por cravação, jateamento ou perfuração com broca. A cravação, após o posicionamento do condutor no local do assentamento, ocorrem em três fases. Essas fases são: penetração por peso próprio, sucção e martelamento (VAN NOORT *et al.*, 2009).

2.1.2.1 Posicionamento do condutor

O primeiro passo para iniciar a cravação é o posicionamento do condutor. Após a confirmação de segurança de todos os aspectos, são utilizados três métodos para assegurar o posicionamento corretamente: Sistema de Posicionamento Global Diferencial, (*Differential Global Position System*, DGPS), na superfície, matriz acústica submarina *Long Base Line* (LBL) e equipamentos mecânicos. LBL usa sensores instalados no fundo do mar, enquanto o DGPS calibra os sensores submarinos e o conjunto acústico (SILVIO; RUIZ; PEREIRA, 2013).

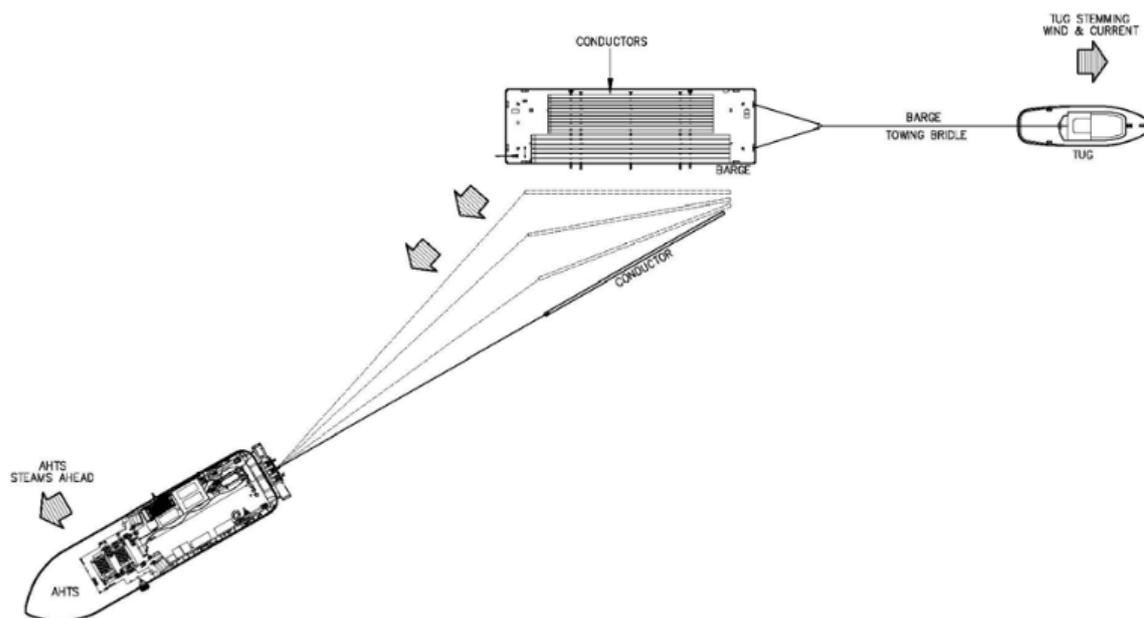


Figura 2 – Lançamento do condutor. Fonte: VAN NOORT *et al.* (2009).

Para minimizar o tempo gasto durante a instalação e a confirmação do lugar no qual o condutor será instalado, são postas boias para identificar o local para cabeça de poço e os *Artificial Lift Manifolds* (ALMs) (VAN NOORT *et al.*, 2009).

Para mover o condutor para a posição de instalação, a barcaça lança o condutor por meio das rampas pelo *Shuttle System* (SILVIO; RUIZ; PEREIRA, 2013), que é um veículo compacto usado para transporte de carga em área de armazenamento (Fig. 2). Por sua vez, o *Offshore Construction Vessel* (OCV) segura a carga pelo fio de trabalho, a qual fica suspensa na posição vertical (SILVIO; RUIZ; PEREIRA, 2013; VAN NOORT *et al.*, 2009) (Fig. 3). A carga peso é passada do cabo de trabalho por *Active Heave Compensation* (AHC), por ser mais adequada para a descida e pouso. AHC é uma técnica usada para levantamento de equipamentos para reduzir a influência das ondas em construções *offshore* (SILVIO; RUIZ; PEREIRA, 2013).

2.1.2.2 Penetração por peso próprio

A penetração inicial ocorre pelo peso do condutor. A profundidade final na qual o condutor será instalado deve garantir que a pressão da coluna de fluido seja menor do que a pressão de fratura da formação (XIE *et al.*, 2019). Além disso, também deve ser a profundidade final assentada em que há estabilidade lateral e estrutural suficiente para passar para as demais etapas, sem que ocorra tombamento (VAN NOORT *et al.*, 2009). Assim, para estimar essa profundidade, são feitas análises de acordo com o tipo de solo (VAN NOORT *et al.*, 2009), da capacidade de circulação de fluidos e de suporte de cargas (XIE *et al.*, 2019).

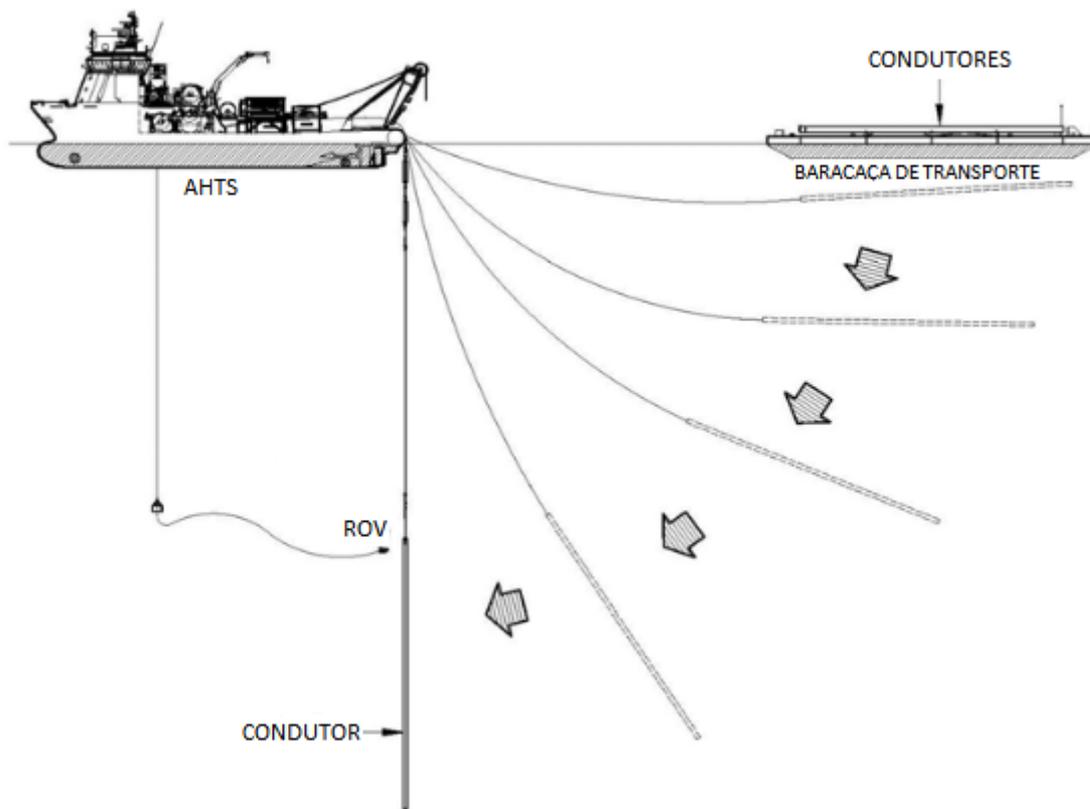


Figura 3 – Posicionamento do condutor. Fonte: VAN NOORT *et al.* (2009).

Uma vez que a posição é confirmada, o condutor pousa entre as boias e é continuamente rebaixado pelo guindaste preso ao *Anchor Handling Vessel* (AHV), até penetrar o solo. O processo é acompanhado por um *Remotely Operated Vehicle* (ROV) para garantir a verticalidade do tubo. A descida tem em média velocidade de 1 ft/s (DOYLE, 1999).

A profundidade que o condutor será assentado é importante no projeto de poço, pois, se for muito baixa, pode causar recalque da cabeça de poço ou abandono do poço. Por outro lado, destaca-se que a instalação em grandes profundidades leva mais tempo e aumenta o custo, além do risco de deformação da coluna (XIE *et al.*, 2019).

Para calcular a profundidade de assentamento em relação à capacidade de circulação de fluidos, existem fatores que devem ser respeitados, como a profundidade final do poço. Também deve-se garantir que a pressão da coluna de líquido é menor que a pressão de fratura da formação, levando em consideração a densidade do fluido d_{mud} . A profundidade de assentamento h_{min} pode ser obtida pela Equação 1 (XIE *et al.*, 2019),

$$h_{min} = \frac{nP_f - P_l}{\rho * d_{mud}} - L \quad (1)$$

onde P_f , em Pascal, é pressão de fratura da formação na profundidade final, onde será

assentada; P_l é perda da pressão no anular, em Pascal; L , em metros, é a distância entre o fundo do mar e a cabeça do poço e n o coeficiente de segurança (XIE *et al.*, 2019).

Considerando a estrutura de cabeça de poço, o condutor pode manter a estabilidade sem que ocorra subsidência quando, a força axial sobre o condutor na cabeça do poço (N_{topo}) somada ao peso do condutor (W_c) e ao peso do revestimento de superfície (W_s) forem maiores ou iguais a soma da força axial ascendente no fundo do condutor (N_{fundo}) e a força de atrito na lateral do condutor (N_f), conforme pode ser observado na Equação 2,

$$N_{topo} + W_c + W_s \geq N_{fundo} + N_f \quad (2)$$

Portanto, para garantir a capacidade de suportar o condutor, a profundidade mínima H_{min} pode ser encontrada pela Equação 3,

$$H_{min} = \frac{N_{topo} + W_s + W_{c-mudline} - N_{fundo}}{\pi * D * f(z) - S d_{aco} f_b} \quad (3)$$

onde $W_{c-mudline}$ é o peso do condutor acima da superfície da *mudline*, em Newton, D é o diâmetro externo do condutor, em metros. Já S é a área da seção transversal do anular, em metro quadrado, d_{aco} é a densidade do aço, em quilograma por metro quadrado e f_b é o coeficiente de flutuabilidade do condutor no fluido de perfuração, adimensional. Além disso, $f(z)$ é a força de atrito lateral entre o condutor e o solo, em quilopascal (XIE *et al.*, 2019).

Para encontrar o atrito lateral, quando o método de assentamento é a cravação, deve-se primeiro saber o tipo de solo. Quando o solo é argiloso, a resistência unitária por atrito lateral f pode ser calculada pela Equação 4 (ZWERNEMAN; DIGRE, 2010),

$$f = \int_0^h \alpha S u(z) dz \quad (4)$$

em que Su é a resistência ao cisalhamento não drenado no solo em função da profundidade, em quilopascal; h é o comprimento do elemento de fundação e α é o coeficiente de aderência, adimensional, com as condições descritas nas Equações 5 e 6, onde P'_o é a pressão de sobrecarga efetiva,

$$\begin{aligned} \Psi \leq 1; \alpha &= 0,5\Psi^{-0,5} \\ \Psi > 1; \alpha &= 0,5\Psi^{0,25} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\Psi = \frac{Su}{P'_o} \quad (6)$$

O atrito lateral unitário de solos arenoso, não coesivo, pode ser calculado pela Equação 7 (API, 2014),

$$f = \beta p'_0(z) \quad (7)$$

onde, β é o fator adimensional de atrito no fuste do elemento de fundação para areias; $p'_0(z)$ é a tensão vertical efetiva em uma profundidade z .

2.1.2.3 Sucção

Após a confirmação de que o condutor está penetrando o solo verticalmente, o ROV fecha as válvulas de respiro na cabeça da ferramenta de sucção para estabilidade (*Suction-to-stability head tool* - STS) e se conecta à porta de sucção (VAN NOORT *et al.*, 2009). O ROV cria um gradiente de pressão negativa com uma bomba submarina, por meio da cabeça do STS (SILVIO; RUIZ; PEREIRA, 2013). O gradiente de pressão é produzido devido a retirada da água no interior do tubo (MAGEE *et al.*, 2017). Também pode ser usada uma bomba ejetora, ou Venturi, para substituir a bomba submarina. A pressão de sucção (ou diferencial entre pressão interna na estrutura e externa) deve ser menor que a pressão de cavitação, para que o solo no fundo não seja sugado para o interior do condutor sem que ocorra penetração (FAUL; AUDIBERT; HAMILTON, 1998).

Esse diferencial de pressão, que tem em média 500 a 800 psi, provoca uma força descendente. O diferencial de pressão entre o interior e exterior do condutor é limitado pela pressão mínima do vácuo no interior, enquanto a pressão máxima é a profundidade da água (SPARREVIK, 2002). Em águas profundas, essa força equivale a milhares de libras, pois corresponde à pressão hidrostática no leito marinho (FAUL; AUDIBERT; HAMILTON, 1998).

A pressão máxima pode ser aumentada pela relação entre o comprimento e o diâmetro do condutor (SPARREVIK, 2002). Para determinar a força de sucção necessária para penetração, deve-se considerar a resistência à penetração e o peso próprio do tubo. A resistência à penetração é linearmente proporcional ao diâmetro da estaca (SPARREVIK, 2002). A força de sucção $F_{sucção}$ é dada pela Equação 8 (FAUL; AUDIBERT; HAMILTON, 1998),

$$F_{sucção} = \Delta P * A \quad (8)$$

onde ΔP é o diferencial de pressão e A é a área da seção transversal do condutor.

A resistência à penetração do solo (R_{solo}) é dada pela Equação 9,

$$R_{solo} = R_{pi} + R_{pe} + R_{ponta} \quad (9)$$

onde R_{pi} e R_{pe} são resistências da parede interna e externa respectivamente e R_{ponta} é a resistência na ponta. A resistência na ponta é descartada por ser muito pequena,

enquanto as demais resistências são calculadas usando o fator de atrito. Considerando que o fator de atrito interno é muito próximo do fator de atrito externo, assume-se que eles sejam iguais (FAUL; AUDIBERT; HAMILTON, 1998). Então, a resistência à penetração ou capacidade de carga é dada pela Equação 10,

$$R_{solo} = \pi D_s f \quad (10)$$

nos quais D_s é o diâmetro do condutor e f é o atrito lateral, dado pela Equação 4. Os valores de α são encontrados experimentalmente, podendo variar de 0,15 a 0,36, a depender do autor (TJELTA T. I.; GUTTOMSN, 1986).

2.1.2.4 Martelamento

Após o término da fase de sucção, ocorre a instalação do condutor por martelamento. A energia necessária provém do impacto do martelo, que atinge o topo do condutor com velocidade de impacto descendente (Figura 4) (MASOUMI, 2008). Essa energia é transferida por contato ao capacete acoplado à cabeça do condutor para a cabeça do condutor, por isso parte da energia é absorvida pelo capacete ou se perde na área de contato entre o capacete e a cabeça do condutor.

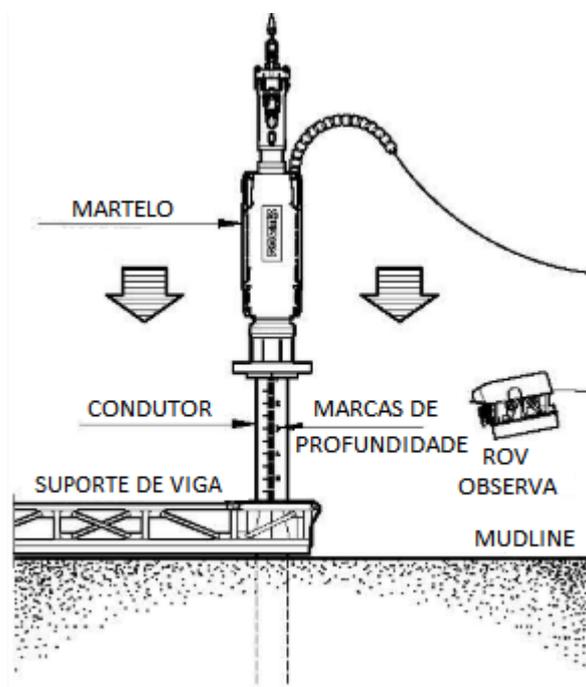


Figura 4 – Processo de instalação do martelo. Fonte: VAN NOORT *et al.* (2009).

A energia transmitida pode variar entre 5 e 300 kJ por golpe e apenas 30% a 50% é transferido para o condutor (SVINKIN, 2008). Para que o condutor possa adentrar o solo, é necessário que a força induzida pelo golpe do martelo seja maior que a resistência estática do solo (ROMPAEY D.; LEGRAND, 1995).

O martelo pode usar como fonte de energia vapor, óleo diesel ou força hidráulica (ZWERNEMAN; DIGRE, 2010), tendo diferentes funcionamentos. Podem ser leves ou pesados, o que varia a energia transmitida ao condutor. É dito pesado o martelo com massa maior que a massa do condutor, atingindo entre 30 a 60 impactos por minuto, enquanto martelos leves atingem entre 300 a 1000 impactos por minuto (DECKNER, F., 2013).

O tipo do martelo a ser usado deve ser escolhido de forma a minimizar os danos causados pela fadiga proveniente do ciclo de impactos. Assim a vida útil da estrutura será maior. É importante levar em consideração que os danos, que podem ser causados na instalação, são mais sensíveis à magnitude das ondas de tensão do que ao número total de golpes (DOYLE, 1999).

A fadiga ocorre quando um material é enfraquecido devido a repetidas mudanças nas tensões de forma cíclica. O dano causado por fadiga é progressivo e localizado. Para evitar esses danos, é necessária a análise de forças e tensões às quais o condutor está exposto. Para isso, é necessário analisar a mudança de impactos e tensões axiais. Mesmo que a intensidade das tensões estejam abaixo da tensão de escoamento elástico, a aplicação cíclica do carregamento pode gerar maiores deslocamentos locais do condutor (ZAKERI *et al.*, 2016).

O dano causado pelo acúmulo de fadiga D pode ser calculado pela Equação 11,

$$D = \frac{n}{N} \quad (11)$$

em que n é o número de ciclos em determinada faixa de tensão e N é o número de ciclos em que a tensão indicada seria permitida. Para garantir que não haverá dano ao condutor, a Equação 12 deve ser satisfeita (API, 2014),

$$SF_i D_i < 1 \quad (12)$$

em que, D_i é a razão de fadiga para o tipo de carregamento e SF_i é o fator de segurança.

Para calcular a profundidade que o condutor deve atingir na fase de martelamento, pode-se usar a Equação 13,

$$e = \delta \frac{cAQH}{KP_a(KP_a + cA)} * \frac{Q + 0,2q}{Q + q} \quad (13)$$

onde e é a profundidade de penetração por impacto, em centímetros, K é o fator de segurança, P_a é a capacidade de carga suportada pelo condutor, em Newtons, c é o coeficiente que varia a depender do material, em Newtons por centímetros quadrados. A é a área da seção transversal com condutor, em centímetros quadrados, Q é o peso do martelo, em Newtons, e q é o peso da estaca, também em Newtons (XIE *et al.*, 2019).

2.2 Tamponamento

Durante o processo de instalação de um condutor por cravação, ocorre a entrada de solo no interior do tubo. A medida que a instalação continua, o aumento do atrito entre o solo e a parte interna do cilindro desenvolve resistência, suficiente para impedir a entrada adicional de solo. Esse efeito é chamado de "efeito tampão" ou *soil plug* (PAIKOWSKY; WHITMAN, 1990).

Paik e Salgado (2003) empregam o termo para se referir ao estado em que o solo dentro do condutor gera atrito suficiente para superar a resistência de ponta e impedir a entrada adicional de solo. O efeito tampão pode ser dividido em três fases: com elemento de fundação desobstruído, parcialmente obstruído e completamente obstruído.

A primeira fase ocorre no começo da cravação, quando a profundidade da coluna de solo é igual à profundidade do condutor que foi assentado. À medida que a penetração do tubo continua, ocorre o aumento da resistência entre a parte interna do condutor e o tampão. Inicialmente, a altura da coluna de solo é menor que a profundidade assentada do revestimento, condição esta onde o condutor está parcialmente obstruído. Por outro lado, última fase se dá quando o assentamento continua, mas a altura da coluna de solo dentro do revestimento não muda, de maneira que o condutor está completamente obstruído (KO; JEONG, 2015). A Figura 5 representa o desenvolvimento do efeito.

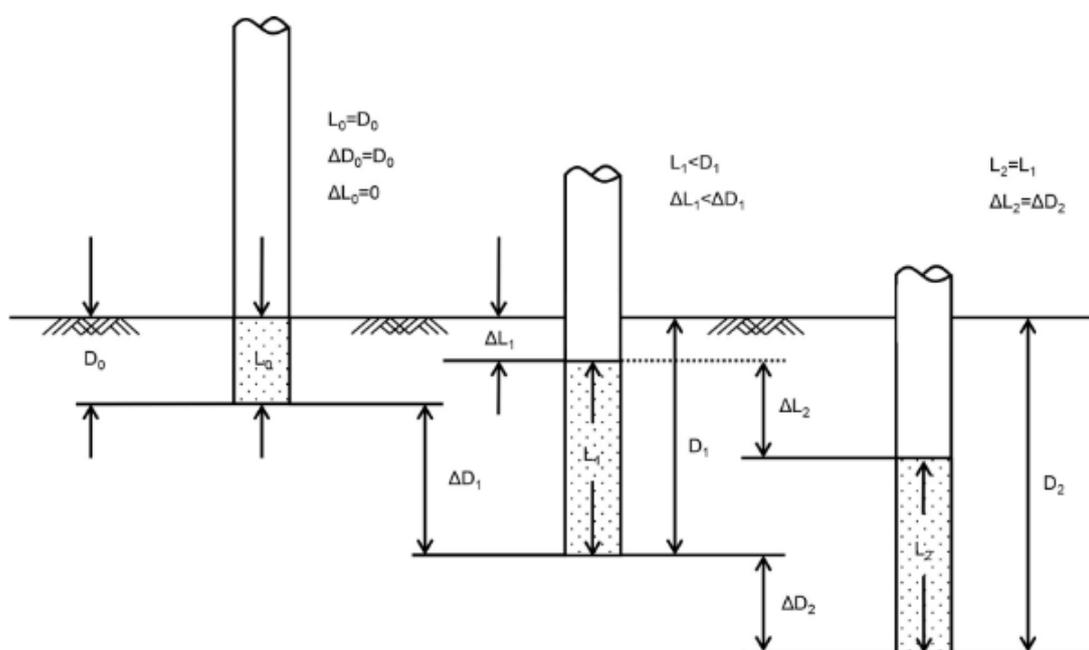


Figura 5 – Desenvolvimento do efeito tampão. Fonte: Ko e Jeong (2015).

Para quantificar o efeito tampão pode-se usar o *Plug Length Ratio* (PLR), e *Incremental Filling Ratio* (IFR). O PLR é a razão da altura da coluna de solo em relação à

profundidade de penetração durante a instalação (Eq. 14) (KO; JEONG, 2015; MILLER; LUTENEGGER, 1997; PAIKOWSKY; WHITMAN; BALIGH, 1989),

$$PLR = \frac{L_i}{D_i} \quad (14)$$

onde L_i é altura da coluna de solo no interior do condutor e D_i é a profundidade de penetração. PLR tendendo a zero indica que o condutor está completamente obstruído, não permitindo a entrada adicional de solo no condutor. E $PLR=1$ indica que o condutor está completamente desobstruído, ou seja, que a altura do solo no interior do condutor é igual à profundidade cravada. Valores de PLR entre 0 e 1 significam que o há obstrução parcial.

O IFR é razão entre o incremento da altura da coluna de solo e o incremento da profundidade de penetração durante a cravação, descrito na Eq. 15 (KO; JEONG; LEE, 2016),

$$IFR = \frac{\Delta L_i}{\Delta D_i} \quad (15)$$

sendo ΔL_i é o incremento da altura da coluna de solo e ΔD_i é o incremento da profundidade de penetração. Analogamente ao PLR, $IFR=0$ significa que o condutor está completamente tamponado, $IFR=1$ indica que o condutor está desobstruído e valores entre 0 e 1 indicam que o condutor está parcialmente tamponado. Quando o IFR tende a 0 significa que pouco solo está entrando no condutor.

Outra forma de quantificar o tampão é analisando a tensão horizontal. Picos de tensão horizontal indicam a formação de tampão. A Figura 6 exemplifica um pico de tensão, próximo à profundidade de 4,5 metros, indicando que houve tamponamento da estaca (HENKE; GRABE, 2008; CHOW, 1997; LEHANE, 1992).

Paikowsky, Whitman e Baligh (1989) analisaram o tamponamento e sua influência na capacidade de carga. Analisou-se que em solo granular, a estaca de ponta aberta quando completamente obstruída atinge a resistência de ponta como uma estaca de ponta fechada. Em solos argilosos, é necessário mais tempo para a estaca de ponta aberta ter o mesmo comportamento de uma de ponta fechada, uma vez que o excesso de poropressão demora mais tempo para ser dissipado.

Os autores concluíram que não há tamponamento em areia até a profundidade igual a vinte vezes o diâmetro da estaca, durante a etapa de peso próprio. Utilizando dados do Golfo do México, em condições de penetração dinâmica, estima-se que a profundidade crítica para a formação do tampão é de 75 vezes o diâmetro da estaca. Também foi destacada a variação da espessura, em que conjuntos de estacas com espessura variável têm menos tendência de obstruir do que estacas com espessura uniforme (PAIKOWSKY; WHITMAN; BALIGH, 1989).

Paikowsky (1990) quantifica a capacidade de carga estática de estacas obstruídas

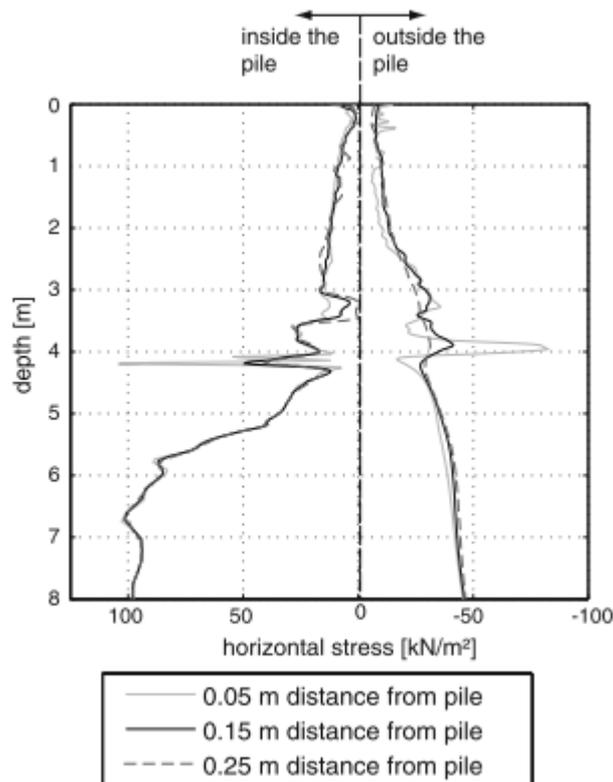


Figura 6 – Tensão horizontal durante a penetração de estaca de ponta aberta. Fonte: Henke e Grabe (2008)

e desobstruídas (Eqs. 16 e 17),

$$Q_{desobstruida} = \Sigma f_{so} * A_o + \Sigma f_{si} * A_i + q_p * A_T \quad (16)$$

$$Q_{tamponada} = \Sigma f_{so} * A_o + \Sigma q_p * A_p = Q_{pontafechada} \quad (17)$$

em que, f_{so} e f_{si} são os atritos unitários externo e interno, respectivamente; A_o e A_i são as áreas externa e interna dos eixos da estaca, respectivamente; A_p e A_T são as áreas externa e interna do fuste da estaca, respectivamente e da ponta e q_p é a capacidade de carga. A Figura 7 retrata a tensão atuante na estaca obstruída e desobstruída.

Leong e Randolph (1991) modelaram em elementos finitos um carregamento em uma estaca aberta considerando um modelo elástico perfeitamente plástico (Mohr-Coulomb) e um elastoplástico (Cam clay modificado), nas condições de obstrução e desobstrução da estaca. O estudo mostrou que o tampão, sob condições de carregamento relevantes, é capaz de fornecer uma capacidade de carga limite, semelhante ao de uma estaca de ponta fechada. Essa capacidade de carga depende do ângulo de atrito, taxa de carregamento, adensamento e permeabilidade do solo e razão altura/diâmetro do tampão.

O estudo também relata que o tampão feito pelo solo é mais vantajoso do que o

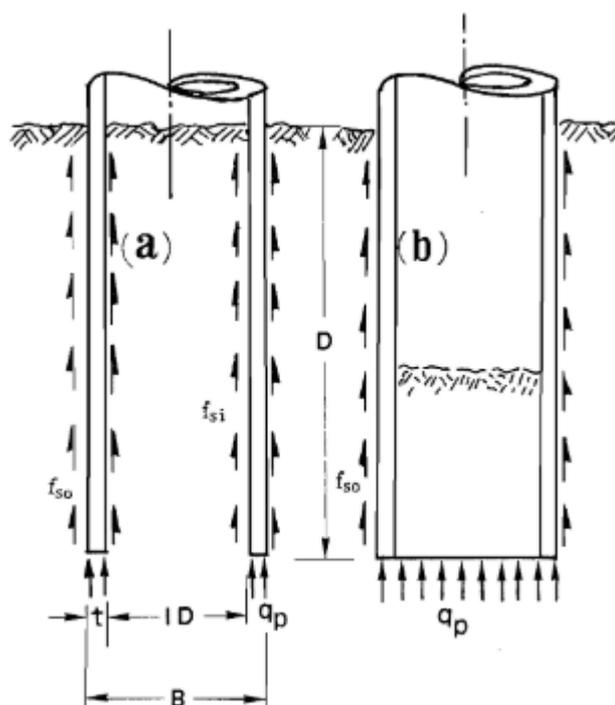


Figura 7 – Tensão atuantes na estaca tamponada e desobstruída. Fonte: (PAIKOWSKY, 1990)

tampão de argamassa, ambos usados para aumentar a capacidade de carga da estaca. Supondo que o coeficiente de atrito externo e interno da estaca é o mesmo, porém essa visão ignora que altas tensões podem se desenvolver no interior da estaca. Os autores desenvolveram as equações para a capacidade de carga em condições de carregamento drenado e não drenado (LEONG; RANDOLPH, 1991).

Paik e Lee (1993) analisaram a tensão lateral na parede externa da estaca e normalizada pela pressão lateral do ambiente para várias condições de solo. Usando uma câmera de calibração para compreender o mecanismo de transferência de carga do tampão para o solo, notaram que a tensão lateral externa é diferente da tensão lateral inicial, ou pressão lateral do ambiente, e que a tensão lateral é mais afetada pela densidade do que pela profundidade.

Os autores também concluem que a resistência do tampão é maior ou igual a resistência lateral externa, que sua capacidade é afetada pela densidade do solo e pela tensão lateral na ponta da estaca e que se a densidade do tampão for reduzida, seu tamanho também será reduzido (PAIK; LEE, 1993).

Liyanapathirana, Deeks e Randolph (2000b), estudaram a resposta da cravação com múltiplos golpes de martelo e observaram que, ao fim do primeiro golpe, o IFR na ponta da estaca é maior que no topo do tampão. E, após vários golpes, o IFR tende a se tornar uniforme ao longo do comprimento do tampão.

Henke e Grabe (2008) analisaram numericamente a influência do método de instalação de estacas abertas na formação do tampão com areia medianamente compacta.

Os métodos de instalação utilizados foram martelamento, instalação por vibração e levantamento quase-estático. Nesse último, a estaca é induzida ao solo com um dispositivo de controle até chegar a profundidade de 5 metros.

Os autores concluíram ser improvável a formação de tampão quando utilizados os métodos dinâmicos, ou seja, martelamento e instalação por vibração. Por outro lado, na instalação quase-estática, houve picos de tensão lateral, o que é um indicador de formação do tampão (HENKE; GRABE, 2008).

Fattah e Al-Soudani (2015) investigaram o impacto no tampão na resistência à compressão final de estacas abertas e fechadas, assim como um novo de tipo de estaca chamada de fechada-aberta. A cravação foi realizada por martelamento e pressurização em areia medianamente compacta e compacta. A estaca fechada-aberta tem abertura somente até determinada altura, que varia entre duas a quatro vezes o diâmetro do revestimento do condutor.

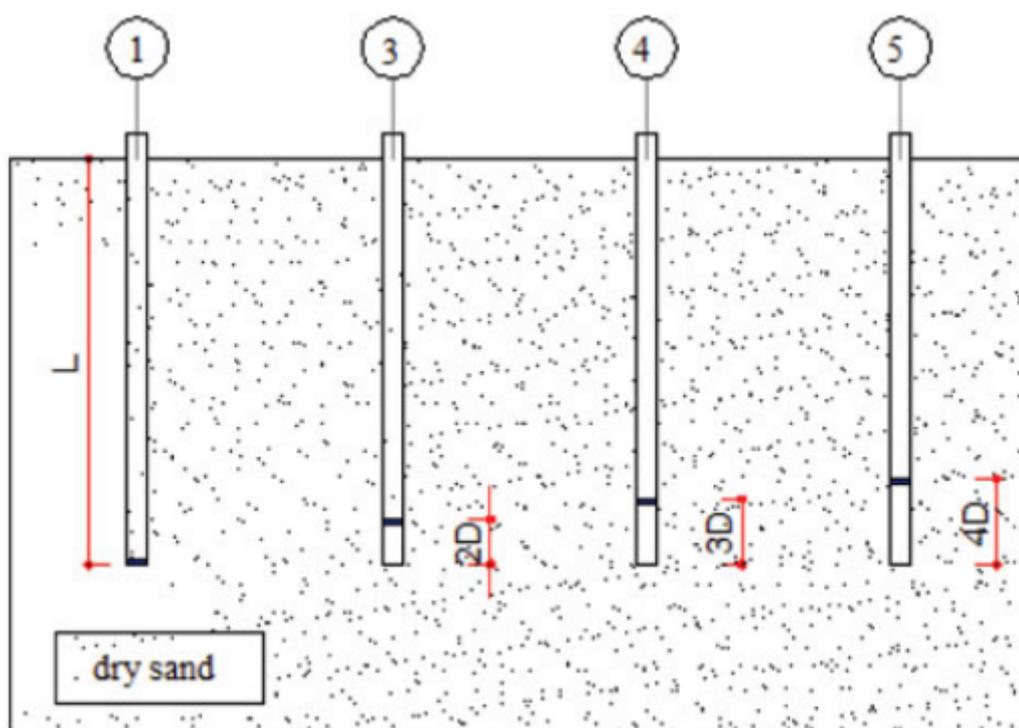


Figura 8 – Estaca fechada-aberta utilizada por Fattah e Al-Soudani (2015). Fonte: Fattah e Al-Soudani (2015).

Os autores concluíram que a capacidade de carga da estaca em areia compacta é maior que em areia medianamente compacta, provavelmente por a areia compacta produzir maior atrito na parte externa e interna. Outra conclusão é que a altura do tampão depende da forma de instalação do revestimento e da densidade relativa do solo. E que a estaca fechada-aberta com melhor desempenho é a com 3D entre a distância da ponta até o fechamento. Além de que, apesar do PLR estar relacionado com

a tensão total, a resistência lateral não é afetada pela forma de penetração(FATTAH; AL-SOUDANI, 2015).

Fattah e Al-Soudani (2015) também observaram que a retirada do tampão de dentro da estaca diminui a sua capacidade de carga. Sendo essa diminuição de 45% à 63% em areia fofa, 55% à 63% em areia medianamente compacta e 51% à 79% em areia compacta.

Fattah, Al-Soudani e Omar (2016) empregaram um sistema (Fig. 9) para a instalação de estacas, contendo um martelo para cravação e uma prensa. No estudo, conclui-se que a capacidade de carga da estaca aumenta com o aumento do PLR e em que em areias compactas a taxa de aumento do PLR é maior que em areias medianamente compacta e fofas, por causa dos altos valores de atrito e resistência na formação de tampões com areias compactas. Analisou-se também que as estacas instaladas por cravação em areia tendem a diminuir o IFR em areias medianamente compactas e fofas devido a densificação do solo na cravação e aumenta o IFR em areias compactas devido à dilatância.

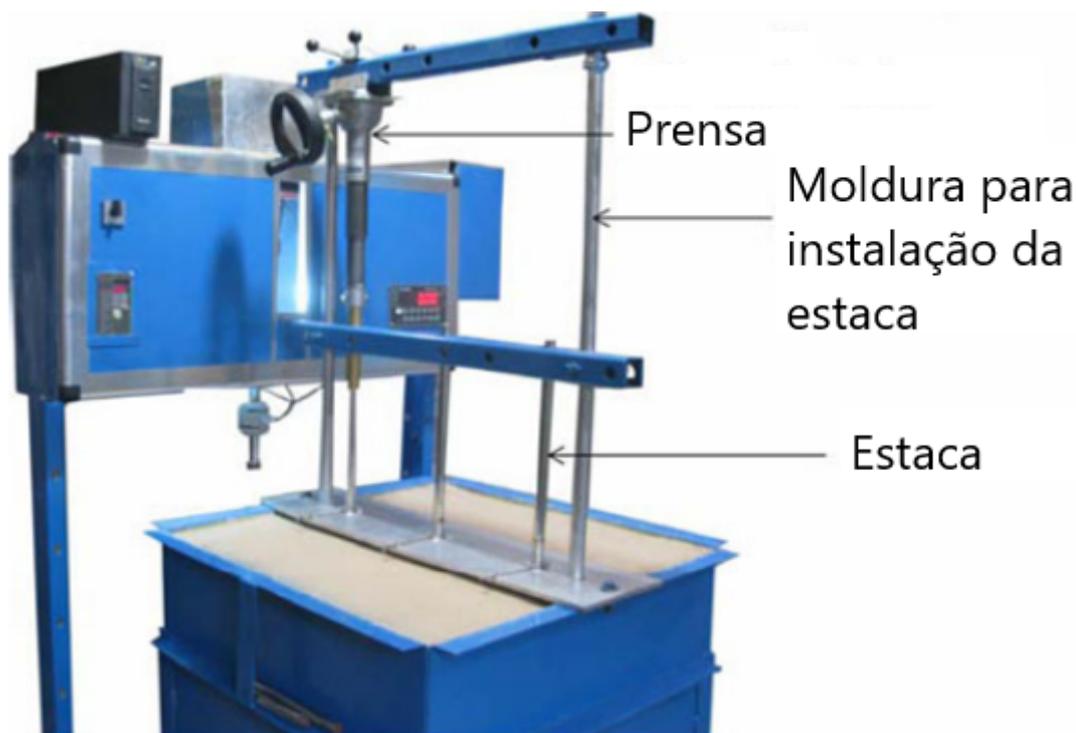


Figura 9 – Sistema de martelamento e prensão para teste de cravação. Fonte: Fattah, Al-Soudani e Omar (2016)

A capacidade de carga diminui com a remoção do tampão. Em areia fofa a redução de 25%, 50% e 100% do tampão gera redução de 2.2, 75 e 81.8% de capacidade de carga da estaca. Por isso desenvolveu-se uma relação para estimativa da capacidade de carga com o IFR e PLR (Eq. 18) (FATTAH; AL-SOUDANI; OMAR, 2016).

$$IFR = 117.8PLR - 30.2 \quad (18)$$

Ko, Jeong e Lee (2016) utilizaram a abordagem Euleriana-Lagrangiana acoplada, em inglês *Coupled Eulerian–Lagrangian* (CEL), para analisar a formação do tampão em areia, comparando os resultados com os obtidos em campo. Para isso, fizeram um estudo paramétrico variando o diâmetro da estaca, a energia de penetração, módulo de elasticidade do solo, entre outros parâmetros.

Ko, Jeong e Lee (2016) observaram que a utilização de CEL foi bem sucedida para análise. Além de que tanto o PLR como a tensão horizontal aumentam linearmente com o aumento da energia de penetração, e diminuem com o aumento do diâmetro.

A formação de tampões no interior de estacas é um aspecto positivo para fundações habituais, principalmente no quesito de capacidade de carga (FATTAH; AL-SOUDANI, 2015; PAIK; LEE, 1993; LEONG; RANDOLPH, 1991). No caso do cenário *offshore* de instalação de um revestimento do condutor, a formação do tampão não é vantajosa, uma vez que aumenta a energia necessária para a instalação do revestimento (HENKE; GRABE, 2008). E o condutor precisa ser desobstruído para a continuação da instalação do poço e assentamento dos demais revestimentos.

2.3 Método de Elementos Finitos

Método de Elementos Finitos, em inglês *Finite Element Method* (FEM), consiste em um método capaz de apresentar soluções aproximadas de equações diferenciais que regem problemas de engenharia. Para isso, divide-se o domínio em análise em um número finito de elementos e calcula-se a distribuição aproximada das variáveis de campo. A Figura 10 exemplifica como o método de aproximação funciona (LIU; QUEK, 2003).

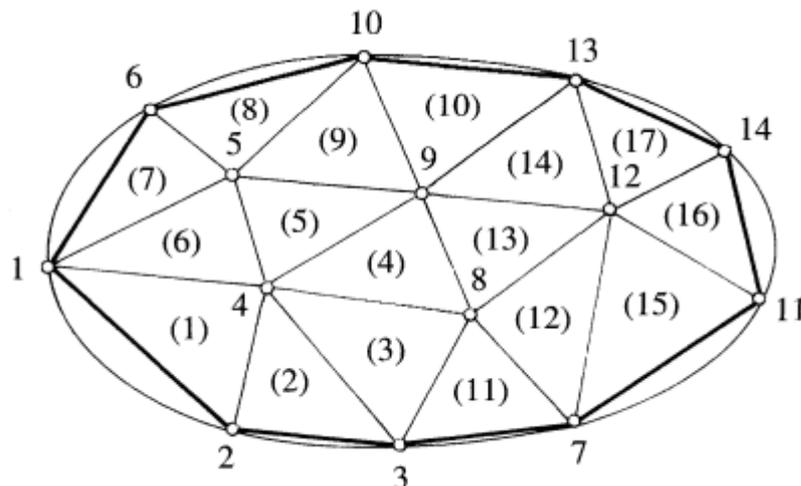


Figura 10 – Exemplo de subdivisão do domínio em finitos elementos. Fonte: Bellet e Deville (2003).

A fim de representar o problema real empregando equações diferenciais, leva-se em conta a descrição física e matemática do caso. No modelo físico, considera-se a geometria, constituição do material e a interação entre o corpo e o meio circundante. Essa etapa visa identificar as leis físicas envolvidas no problema e a relevância de cada uma para a análise.

O modelo matemático é função do modelo físico, uma vez que o fenômeno físico pode ser representado com valores e condições de contorno. Então o modelo matemático traduz essas condições para a linguagem matemática (AZEVEDO, 2003).

A modelagem numérica é feita em etapas, idealização da geometria, definição das propriedades dos materiais, condições de contorno e carregamentos, discretização do domínio com a malha numérica, simulação e visualização (Fig. 11).

2.3.1 Tipos de análise

Para o desenvolvimento de uma análise deve-se considerar sua classificação quanto à geometria, modelo do material, condições de contorno e carregamento. Por isso, existem diferentes tipos de análise, variando com a relação constitutiva, natureza das forças aplicadas, tipo de estrutura, entre outras (AZEVEDO, 2003).

A análise pode ser estática ou dinâmica. Quando há solicitações atuantes no sistema que produzem acelerações e não dá para desprezar as forças de inércia associadas a tais acelerações, tem-se um sistema dinâmico (VAZ, 2011). Contudo, quando considera-se que as cargas são aplicadas lentamente, podendo-se desprezar as forças de inércia, tem-se um sistema estático (AZEVEDO, 2003).

Na abordagem Euleriana, as fases são tratadas como contínuas e interdependentes umas das outras. Por meio da resolução de equações diferenciais, considerando o balanço de conservação de massa, energia e quantidade de movimentos, são obtidas as soluções numéricas. Por outro lado, na abordagem Lagrangeana, as partículas são acompanhadas individualmente, assim, a aplicação do balanço de forças considera as interações com as demais partículas e com os contornos sólidos, por meio das leis de contato (NASCIMENTO, 2018).

Há ainda a classificação quanto à linearidade, que refere-se ao tipo de relação constitutiva. Quando há proporcionalidade entre as grandezas, a relação entre tensão e deformação segue a Lei de Hooke, é considerado uma análise linear. Quando a relação entre tensão e deformação não segue a mesma proporcionalidade, é uma análise não linear (MENDONÇA, 2005).

2.3.2 Geometria e Malha

Em simulações utilizando o MEF, os corpos estruturais são representados através da geometria. Tais geometrias são construídas de forma que representem o caso real

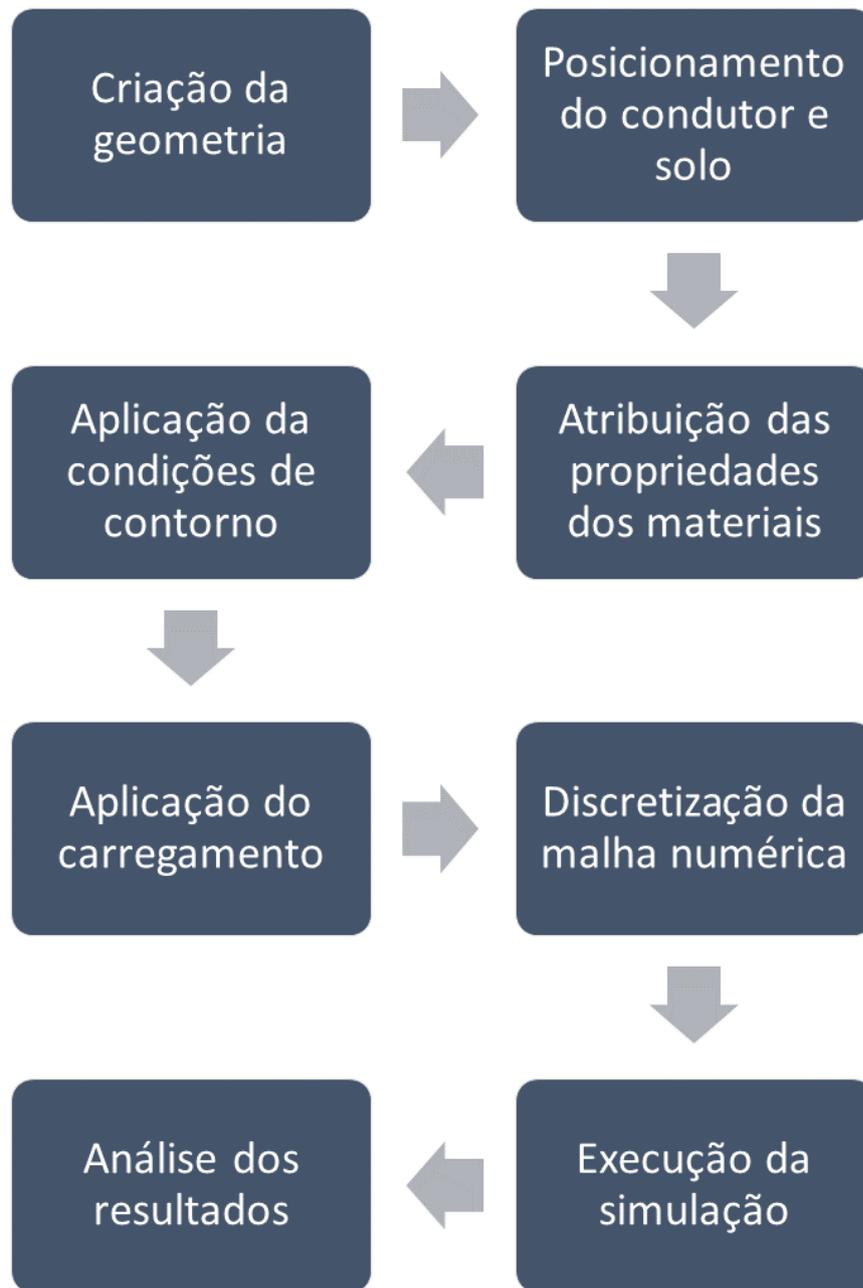


Figura 11 – Sequência de etapas para a construção de um modelo. Fonte: Autora (2021).

a ser analisado, mas apenas com complexidades essenciais para o desenvolvimento do modelo pois afetam a discretização posterior. Assim, a precisão das geometrias depende da quantidade de elementos e o tipo. Embora a alta precisão seja desejada, deve-se levar em conta que, quanto maior o número de elementos, mais tempo é necessário para o processamento (LIU; QUEK, 2003; KONKOL, 2013).

Discretização é o processo de subdividir a geometria em pequenos elementos e nós. O domínio deve ser dividido em formatos específicos, como triângulos ou quadriláteros, em casos bidimensionais, e de acordo com o tipo de elemento, que pode ser Lagrangiano ou Euleriano. Na formulação Lagrangiana os elementos deformam-se

com o material, enquanto na Euleriana o material passa através do elemento (KONKOL, 2013).

A quantidade de elementos de uma malha está relacionada a precisão da solução e ao custo computacional necessário para a simulação. Por isso, é de extrema importância encontrar a relação ideal entre qualidade de solução e número de elementos. Cada tipo de problema utiliza diferentes estratégias para a definição desta razão. (LIU; QUEK, 2003).

2.3.3 Propriedades dos Materiais

A representação matemática do comportamento de tensão-deformação de um material sob condições de carregamento é realizada usando modelos constitutivos. Estes são baseados em dados experimentais ou princípios teóricos (LADE, 2005). Escolher o modelo usado pode ser uma parte complexa da modelagem na avaliação de regimes constitutivos para análise mecânica do solo, e no caso da caracterização de deformação de solos é ainda mais complexa, pois, uma vez que na geotecnia, em problemas de cravação de condutores, as deformações são grandes e manifestam-se em função do tempo. Mohr-Coulomb, Drucker-Prager e Cam-Clay, assim como suas derivações, são alguns dos modelos presentes na literatura utilizados para representar o comportamento plástico de solos.

O critério de resistência de Mohr-Coulomb é bastante utilizado para modelagem de solo e é o escolhido para este trabalho. Tal escolha se deu pela facilidade de obtenção dos parâmetros e pela sua consolidação perante a comunidade científica na modelagem de solos. A envoltória do método define a ruptura do material por uma combinação de tensões normais e cisalhantes e o comportamento pode ser descrito pela Equação 19 (DAS *et al.*, 2007),

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (19)$$

onde τ é a tensão cisalhante no plano de falha; c' é o intercepto efetivo de coesão do solo; σ' é a tensão normal efetiva no plano de ruptura e ϕ' é o ângulo de atrito interno efetivo.

O modelo de Mohr-Coulomb considera o solo como sendo elastoplástico, considerando as regiões elásticas e plásticas como lineares (TI *et al.*, 2009).

2.3.4 Condições de Contorno e Carregamento

Condições de contorno tem como função descrever a precisão de previsões teóricas do caso a ser simulado (BUSSE; KACH; WAGNER, 2017). Condições de contorno e carregamento variam a depender do sistema. As condições de contorno são fixas e restringem certos graus de liberdade no domínio do problema.

Existem dois tipos de condição de contorno, de deslocamento e de força. A condição de contorno de deslocamento é usada para descrever os suportes e constantes atreladas ao sistema (LIU; QUEK, 2003). E a condição de contorno de força, que é um carregamento fixo, pode ser a tensão geostática ou um carregamento específico quando cabível. Um engaste, por exemplo, é uma condição de contorno de deslocamento (BUSSE; KACH; WAGNER, 2017).

Enquanto o carregamento pode ser fixo ou cessar após um tempo determinado, pode-se simular o vento em certo horário do dia, por exemplo. E a interação entre os elementos também deve ser definida, uma vez que pode mudar com o tipo de contato entre eles (KONKOL, 2013).

3 ANÁLISE NUMÉRICA

Tomando como ponto de partida o estudo da formação do tampão no processo de cravação do revestimento, o presente trabalho delimita-se a modelar tridimensionalmente o revestimento condutor sendo cravado por peso próprio no domínio de solo. A Figura 11 apresenta a metodologia realizada para o desenvolvimento do modelo e simulação da instalação do revestimento condutor por cravação no *software* ABAQUS para o presente trabalho.

3.1 Geometria

Foi adotado o domínio tridimensional do solo como um quarto de um círculo com diâmetro de 5 metros e altura de 32 metros, conforme a Figura 12. O ângulo de 90° foi escolhido por ser um problema simétrico e a fim de diminuir o custo computacional (KO; JEONG; LEE, 2016).

O condutor também segue a mesma ideia so solo em relação ao ângulo escolhido para geometria, sendo representado apenas por um quarto da geometria real, com espessura de 0,625", altura de 20 metros e diâmetros variando de acordo com a Tabela 1 para o estudo paramétrico.

A posição do condutor em relação ao solo é ilustrada na Figura 13. A posição inicial foi definida para que a estrutura estivesse imediatamente acima do domínio do solo a fim de eliminar efeitos de colisão e impacto, o que acarretariam em mais instabilidade para a solução ao juntar-se às grandes deformações e a natureza dinâmica do caso.

Tabela 1: Diâmetros dos condutores

Condutor	Diâmetro
D1	20"
D2	26"
D3	30"

Fonte: Autora (2021).

3.2 Propriedade dos Materiais

O solo modelado é um solo argiloso com propriedades obtidas a partir de um campo localizado no Brasil. A divulgação detalhada da localização do campo é vedada por questões de sigilo de dados. A Tabela 2 reúne tais propriedades, o coeficiente de Poisson que se manteve 0,4.

Pode-se notar que há variação de valores conforme a profundidade aumenta. A atribuição desta variação no modelo do ABAQUS foi feita através de um *script* em

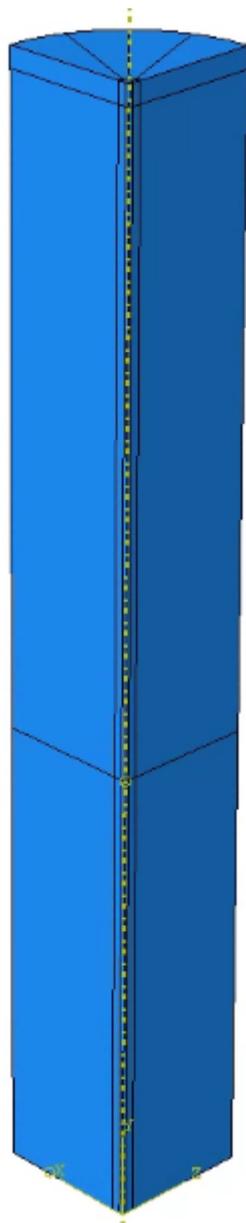


Figura 12 – Representação do domínio do solo. Fonte: Autora (2021).

Fortran, uma vez que a interface padrão do Abaqus não permite essa variação de propriedades nas camadas de solo. O modelo constitutivo utilizado para representar as deformações plásticas do solo foi o Mohr-Coulomb.

Para a caracterização do condutor, o material empregado foi o aço com as características descritas na Tabela 3. Considerou-se o modelo constitutivo do solo puramente elástico visto que as deformações do solo sobressaiam diante do condutor, e o condutor é um componente rígido.

Por fim, a interação entre os elementos do solo e do condutor foi definida pelo algoritmo de contato geral presente no programa, o qual exige a utilização método de contato de penalidade. O método de penalidade permite que o domínio sofra grandes deformações, mostrando-se assim apto para modelagem proposta. Nessa configura-

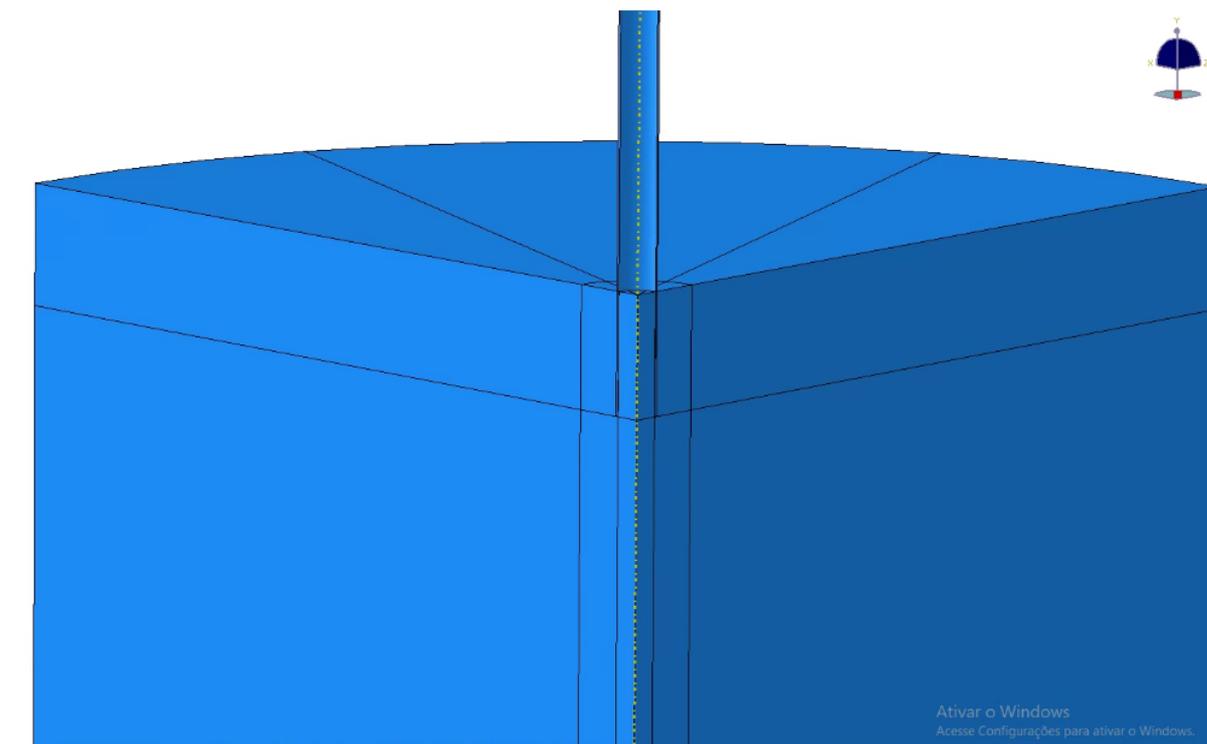


Figura 13 – Posicionamento inicial do condutor no solo. Fonte: Autora (2021).

ção, o coeficiente de fricção foi de 0,35.

3.3 Condições de Contorno e Carregamento

A fim de que o condutor se movimentasse apenas verticalmente foram impostas condições de contorno que impediam a movimentação na direção dos outros eixos. No solo, também foram impostas as mesmas condições de contorno, liberando apenas a movimentação vertical, e engastando o domínio na parte inferior do solo. Na superfície curva do domínio foi utilizada uma condição de contorno euleriana, a fim de evitar o efeito de borda (Fig. 14).

Tabela 2: Propriedades do solo

Profundidade (m)	Densidade (kg/m ³)	Módulo de elasticidade (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Coesão (kPa)
0 - 0,5	1347,7	1637,6	46,8	2,9
0,5 - 1,5	1350,3	2476,7	32,4	2,7
1,5 - 2,5	1409,2	3912,6	33,1	4,8
2,5 - 3,5	1478,3	5977,8	35,2	7,9
3,5 - 4,5	1511,4	7529,3	35,6	10,3
4,5 - 5,5	1540,4	9135,9	35,2	12,3

Fonte: Napoles Neto (1998).

Tabela 3: Propriedades do condutor

Parâmetros	Valores
Densidade (kg/m^3)	7860
Módulo de elasticidade (MPa)	414.000
Coefficiente de Poisson	0.25

Fonte: Autora (2021).

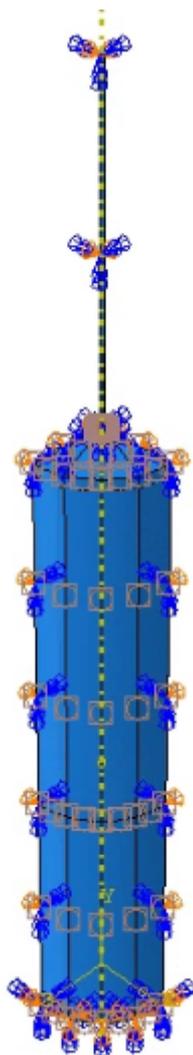


Figura 14 – Condições de contorno do modelo. Fonte: Autora (2021).

Quanto ao carregamento, no topo do condutor foi aplicada a apenas a aceleração da gravidade, a fim de simular a etapa de peso próprio da instalação por cravação.

3.4 Malha Numérica

O solo foi discretizado progressivamente em relação à distância de contato do solo com o condutor. Nesse aspecto, o objetivo foi reduzir o número de elementos a medida que não fosse perdido a precisão da simulação. As regiões próximas a borda não são

afetadas pelo carregamento na mesma magnitude que as próximas ao condutor, por isso apresentam elementos maiores. O total de elementos foi de 396 mil, trazendo na Figura 15 o detalhamento da malha adotada. O tipo de elemento empregado foi EC3D8R.

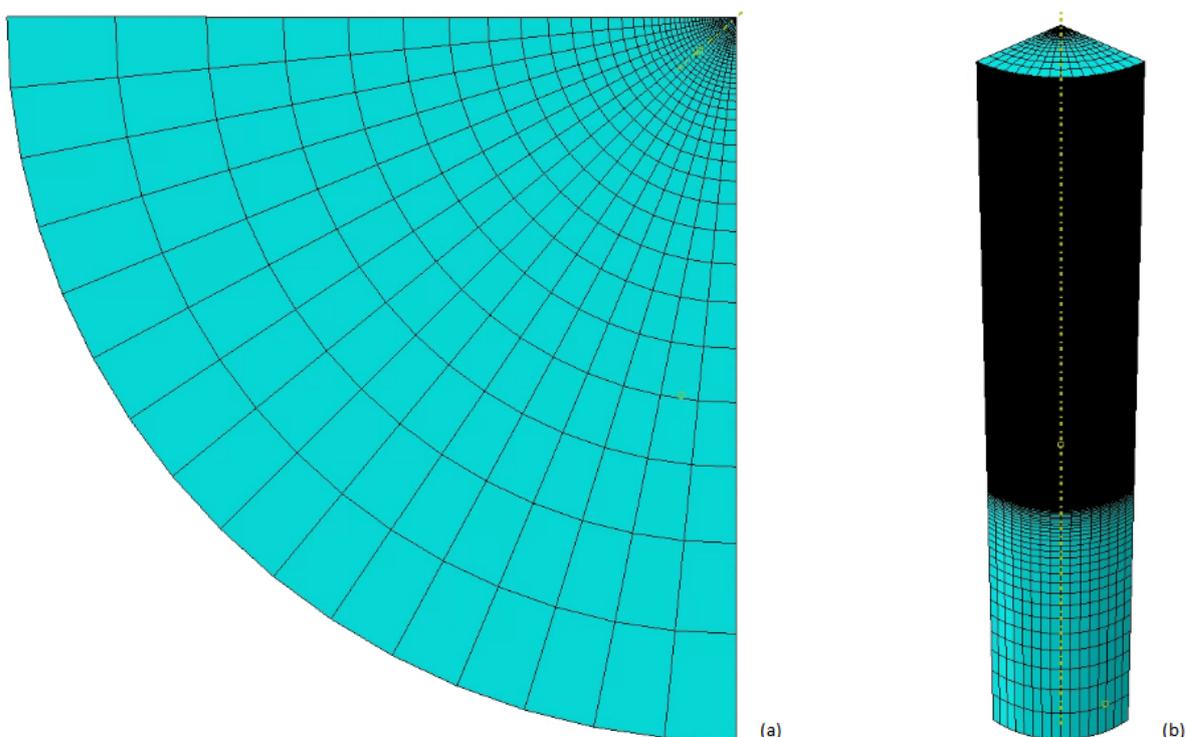


Figura 15 – Malha Numérica do Solo, (a) Vista superior da malha e (b) vista frontal da malha. Fonte: Autora (2021).

Para a malha do condutor, a Figura 16a mostra que todos os elementos possuem o mesmo tamanho. Uma vez que o foco da análise é no solo, não se faz necessário maior refinamento na malha. O número total de elementos na malha do condutor foi de aproximadamente 23 mil e o tipo de elemento utilizado foi C3D8R.

3.5 Método Numérico

Para a modelagem numérica utilizou-se a abordagem Euleriana-Lagrangiana Acoplada, *Coupled Eulerian-Lagrangian* (CEL). A escolha desta abordagem se deu após a tentativa de simular a cravação do condutor utilizando a combinação de abordagem Lagrangeana e da técnica de remalhamento ALE *Arbitrary Lagrangian Eulerian* disponível no *software*.

Quando somente a abordagem lagrangeana é usada, a interface entre as duas partes (condutor e solo) são bem definidas e controladas. Nesse tipo de simulação, grandes deformações, como no caso problema do presente trabalho, distorcem a malha de forma a não obter resultados confiáveis. Outros agravantes responsáveis por inviabilizar o processo de remalhamento capaz de lidar com grandes deformações foram:

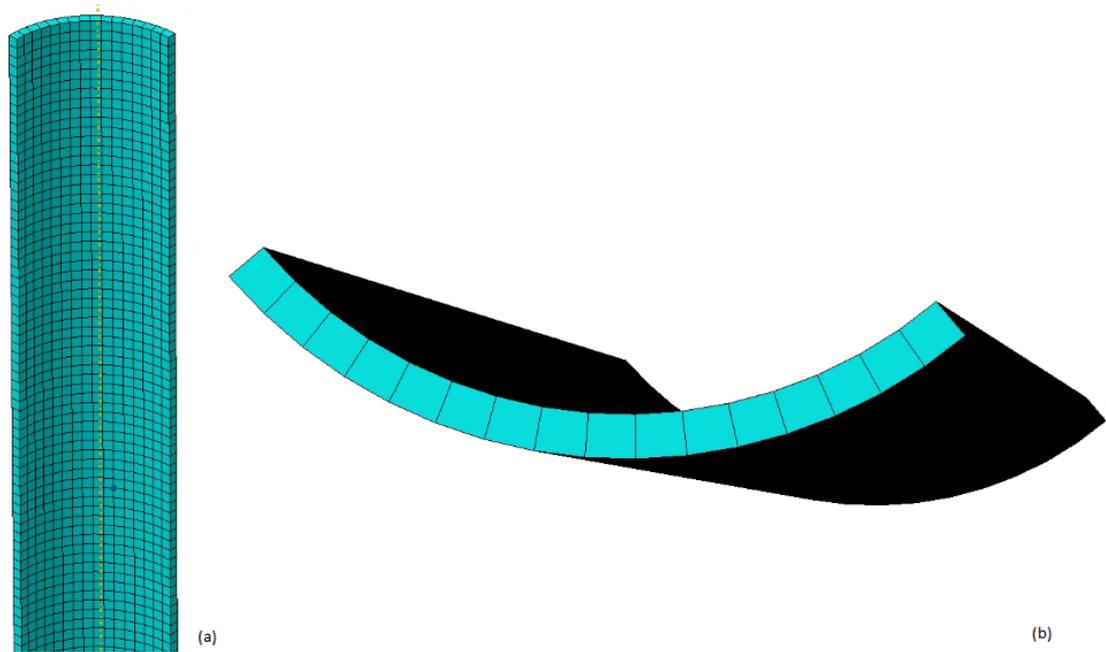


Figura 16 – Malha numérica do condutor, (a) Vista frontal do condutor e (b) vista superior do condutor. Fonte: Autora (2021).

o caráter altamente dinâmico devido a velocidade de cravação por peso próprio e o elementos de contato.

Já na abordagem Euleriana não há distorção de elementos, porém a interface entre as partes não é descrita detalhadamente como a formulação Lagrangiana (QIU; HENKE; GRABE, 2009). A abordagem CEL contempla as vantagens das duas formulações, ou seja, a interação entre as partes pela abordagem Lagrangeana e a malha do solo pela abordagem Euleriana. Para isso, a malha Lagrangeana é utilizada para o condutor. A interface entre os domínios é representado pela fronteira da parte Lagrangiano. Desta forma, a malha Euleriana pode sofrer grandes deformações sem comprometer a simulação (QIU; HENKE; GRABE, 2009; HENKE; GRABE, 2008; LIYANAPATHIRANA; DEEKS; RANDOLPH, 2000a).

3.6 Custo Computacional

Embora apresente vantagens, a abordagem CEL apresenta um alto custo operacional, o que muitas vezes impossibilita seu uso. Como esse modelo é resolvido dinamicamente, o tempo de resolução é afetado pelo incremento de tempo estável. Para a simulação prosseguir, o incremento de tempo deve ser menor ou igual ao incremento de tempo instável do menor elemento da malha, definido na equação 20,

$$\Delta t \leq \min \left(L_e \sqrt{\frac{\rho}{\hat{\lambda} + 2\hat{\mu}}} \right) \quad (20)$$

em que L_e comprimento associado ao elemento; ρ é a densidade do material do elemento e $\hat{\lambda}$ e $\hat{\mu}$ são constantes de Lamé efetivas, função do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson (ABAQUS, 2020). Para a simulação prosseguir, o incremento de tempo deve ser menor ou igual ao incremento de tempo instável do menor elemento da malha.

Por isso, para diminuir o custo computacional pode-se aumentar a densidade do material, mas essa opção para o problema em questão não é viável, uma vez que as propriedades já foram estabelecidas e validadas. Outra forma de otimizar o tempo seria por aumentar as dimensões do menor elemento (ABAQUS, 2020). Porém, o menor elemento da simulação está no condutor, e devido o tamanho do condutor, especialmente sua espessura, não é possível fazer essa mudança também, uma vez que, que a espessura foi padronizada com valores reais do mercado.

Portanto, devido ao tipo de problema analisado, é necessário bastante tempo para a conclusão da simulação, uma vez que é uma modelagem robusta e que exige alto custo computacional. A fim de comparação, todas as simulações tiveram o mesmo tempo de simulação de 4 segundos.

Analisou-se a possibilidade de usar um menor ângulo do domínio do solo, utilizando um modelo assimétrico, para diminuir o custo operacional. Porém, devido a limitações do Abaqus, não é possível a utilização das condições de contorno necessárias ao condutor em um modelo assimétrico, bem como não é possível a utilização do CEL nesse modelo. Assim, para fazer essas mudanças, seria necessário mudar a abordagem para o ALE. Entretanto, testes realizados no ALE não obtiveram bons resultados. Logo, devido ao alto dinamismo e não linearidade do problema e por apresentar resultados mais acurados com o CEL, optou-se por continuar a modelagem com o CEL, mesmo significando aumento no custo computacional.

3.7 Quantificação do Tamponamento

Para a quantificação do tamponamento foram utilizados o PLR, IFR e análise das tensões horizontais. Classifica-se que houve tamponamento por meio da tensão horizontal quando houve um pico de tensão lateral interna, com seus valores muito maiores que a média nas regiões próximas e da tensão lateral externa. A tensão lateral é observada pois, uma vez que o atrito entre o solo e a parede do condutor é fator impeditivo de entrada adicional de solo, logo, a tensão impeditiva atuante na região é a tensão horizontal (HENKE; GRABE, 2008; LEONG; RANDOLPH, 1991).

Os valores de PLR e IFR quando estão próximos de zero indicam que houve tamponamento, e valores próximos de 1, indicam que o condutor está desobstruído. Quanto mais próximo de 1 menor a tendência ao tamponamento, uma vez que ainda é permitido a entrada do solo.

3.8 Resultados e Discussões

Foram realizadas simulações de três casos distintos nos quais o parâmetro variando é o diâmetro do condutor (ver Tabela 1). A fim de garantir a qualidade da comparação entre os três modelos, os resultados foram coletados nos mesmos instante de tempo de simulação.

As Figuras 17 (a) a (f) mostram o avanço da cravação do condutor D1, o condutor de menor diâmetro, até as profundidades de 49 centímetros, 98 centímetros, 1,53 metros, 2,05 metros, 3,27 metros e 3,77 metros, respectivamente. A profundidade final da cravação no tempo de análise é a retratada na Figura 17(f).

O desenvolvimento do tampão no condutor D2 é exibido na Figura 18. As Figuras 18 (a) a (f) mostram a profundidade cravada do condutor ao longo da penetração em 55 centímetros, 1,14 metros, 2,66 metros, 3 metros, 4,4 metros e 4,97 metros, respectivamente.

A Figura 19 apresenta o desenvolvimento da cravação bem como o desenvolvimento do tamponamento dentro do condutor D3. As profundidades de cravação do condutor D3 são, respectivamente, 80 centímetros, 1,12 metros, 2,8 metros, 3,54 metros, 4,25 metros e 5,15 metros.

Em comparação com a profundidade final das três simulações, nota-se que o condutor D1 é o que apresenta menor profundidade de penetração considerando o mesmo tempo de instalação. Isso pode ser explicado pelo peso do condutor, o condutor de menor diâmetro tem menor peso em comparação com um de maior diâmetro e mesma altura. Tal fato foi mencionado por Leong e Randolph (1991) em seu estudo com estacas. Isso também pode ser notado pela profundidade final do condutor D3, que apresenta melhor resultado com relação à cravabilidade.

3.8.1 Análise do PLR e IFR

A formação do tampão ao longo da profundidade no condutor D1 é mostrada na Figura 20 com o PLR e IFR na Figura 21.

Nota-se que no começo da cravação de D1, ainda nos primeiros centímetros, o PLR tem valores baixos e que o IFR tende a zero. Os baixos valores de PLR indicam que muito solo entrou no condutor em um curto período de tempo. Já o rápido declínio de IFR confirma que o solo está entrando rapidamente no condutor ao longo da cravação. Tais valores indicam que nos primeiros centímetros da instalação, o condutor apresenta comportamento parcialmente tamponado e tamponado nas regiões próximas aos 50 a 60 centímetros. À medida que o processo avança os valores de PLR e IFR aumentam, pois desenvolveu-se resistência ao atrito suficiente para controlar a entrada de mais solo.

Entretanto, a partir dos 3 metros de cravação de D1 até a profundidade final, ob-

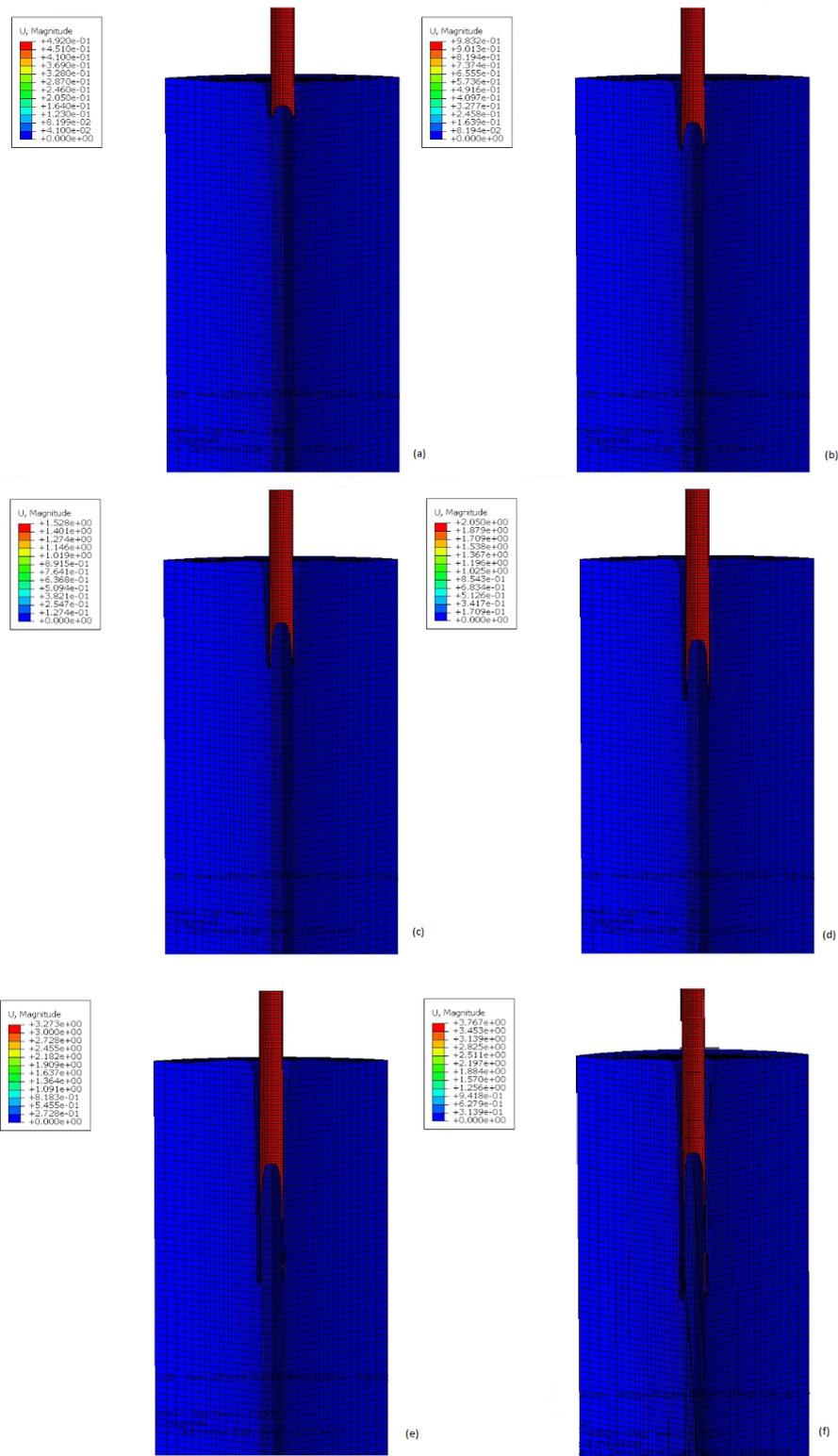


Figura 17 – Tampão dentro do condutor D1. Fonte: Autora (2021).

tida no término dos 4 segundos de análise, os valores oscilam, mas não avançam significativamente, uma vez que os valores de resistência ao atrito já estão altos para que a instalação prossiga com a mesma velocidade inicial. Esse fator também justifica a

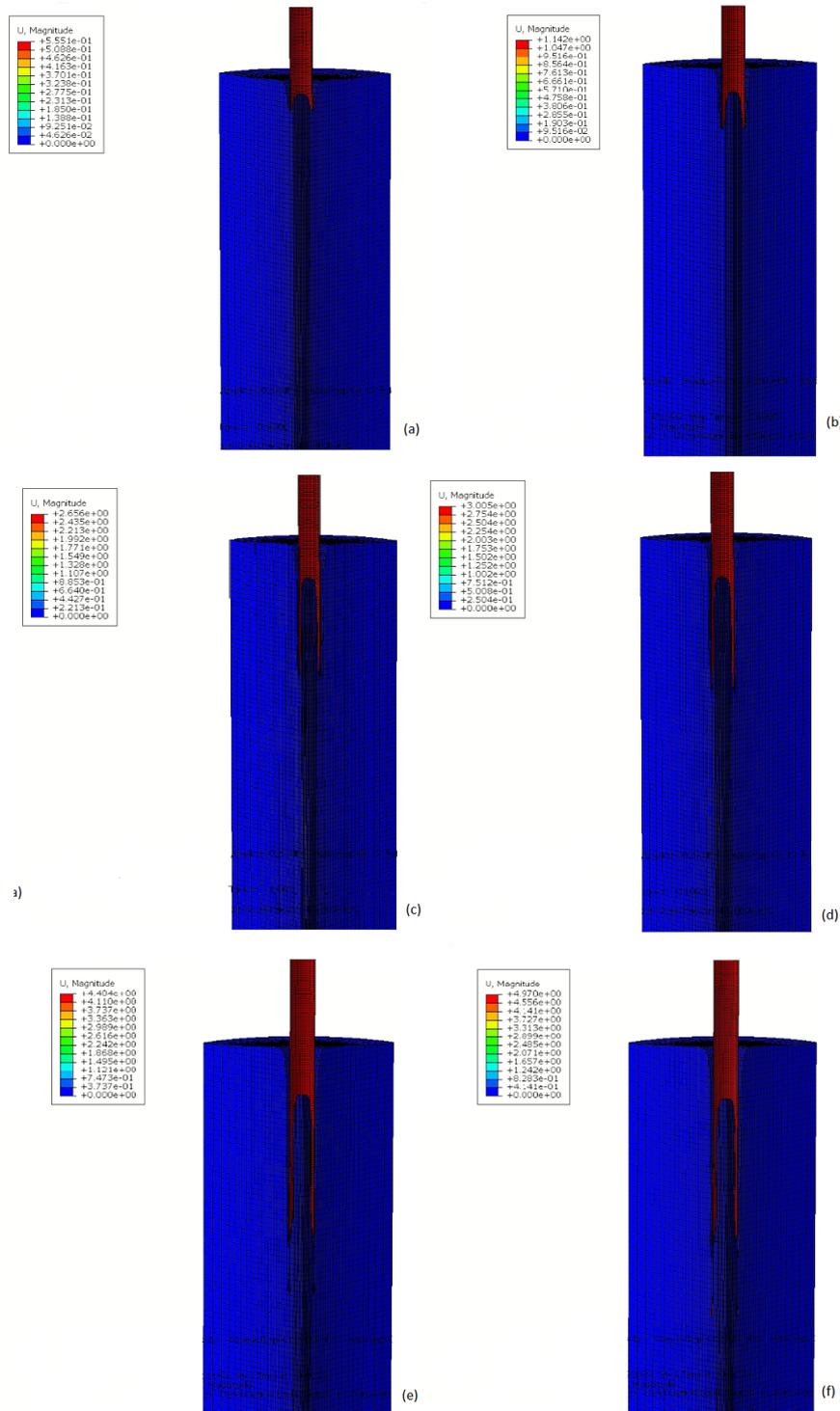


Figura 18 – Tampão dentro do condutor D2. Fonte: Autora (2021).

profundidade final diferente dos demais condutores (Fig. 17).

As Figuras 22 e 23 apresentam o PLR e o IFR do condutor D2, respectivamente.

No começo da penetração, é esperado a diminuição no valores de PLR e consequentemente de IFR, uma vez que estão relacionados, como acontece no condutor D2 (WANG *et al.*, 2020). Nesta etapa, a resistência ao atrito ainda não é grande o suficiente

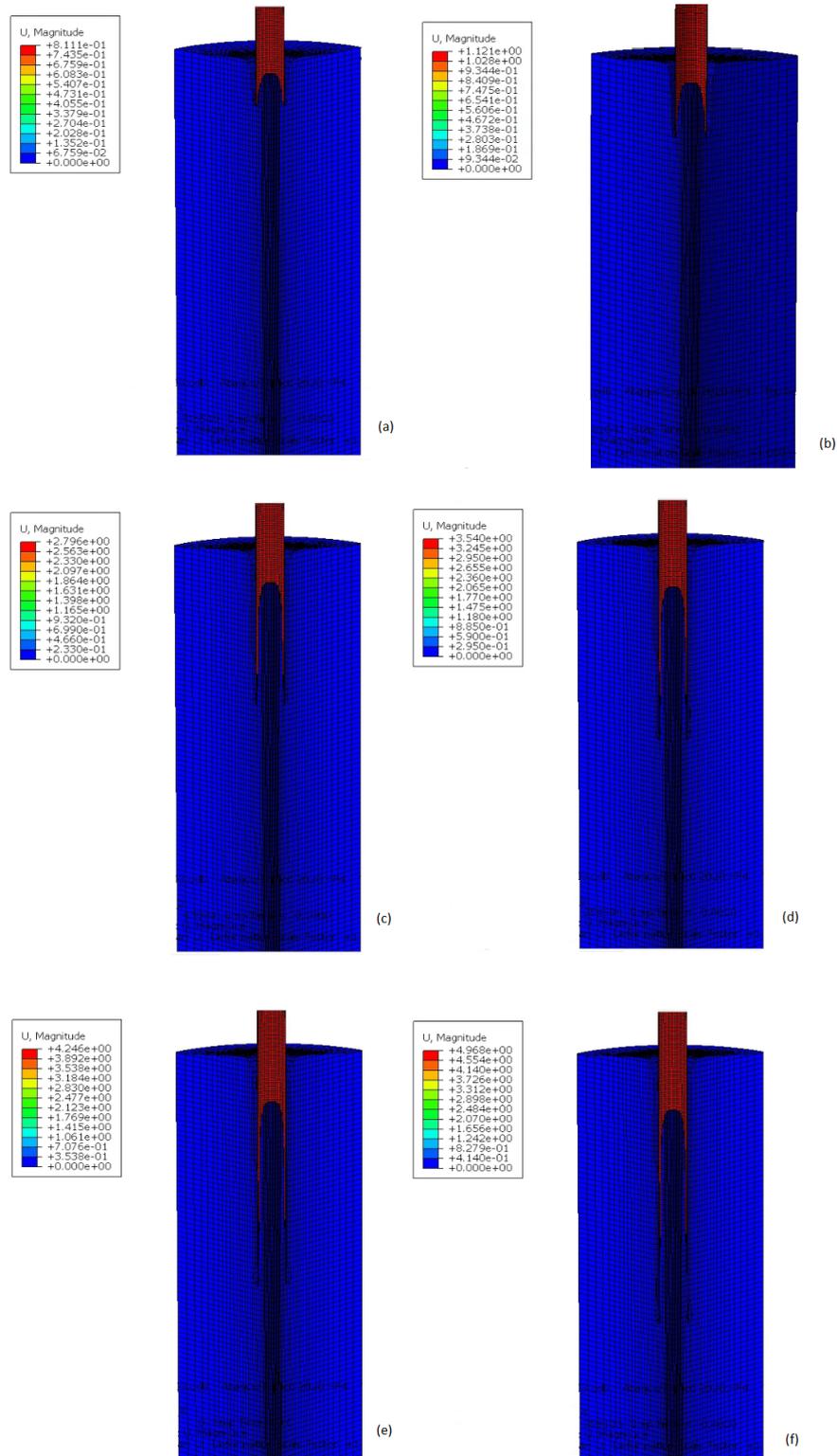


Figura 19 – Tampão dentro do condutor D3. Fonte: Autora (2021).

para evitar a entrada de solo.

Ao longo da instalação de D2, o PLR aumenta indicando um condutor parcialmente tamponado. Na região entre 70 centímetros e 1,5 metros, o IFR aumenta, che-

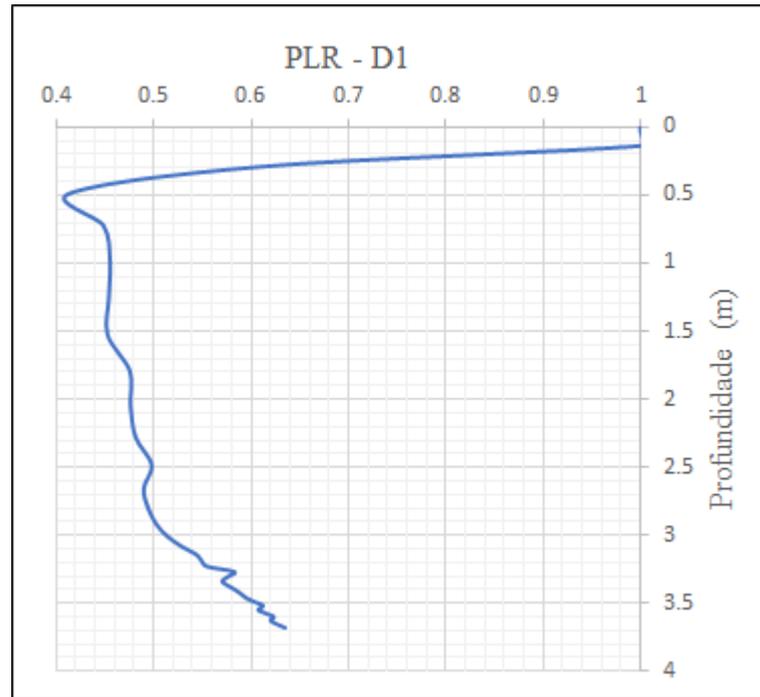


Figura 20 – PLR do condutor D1. Fonte: Autora (2021).

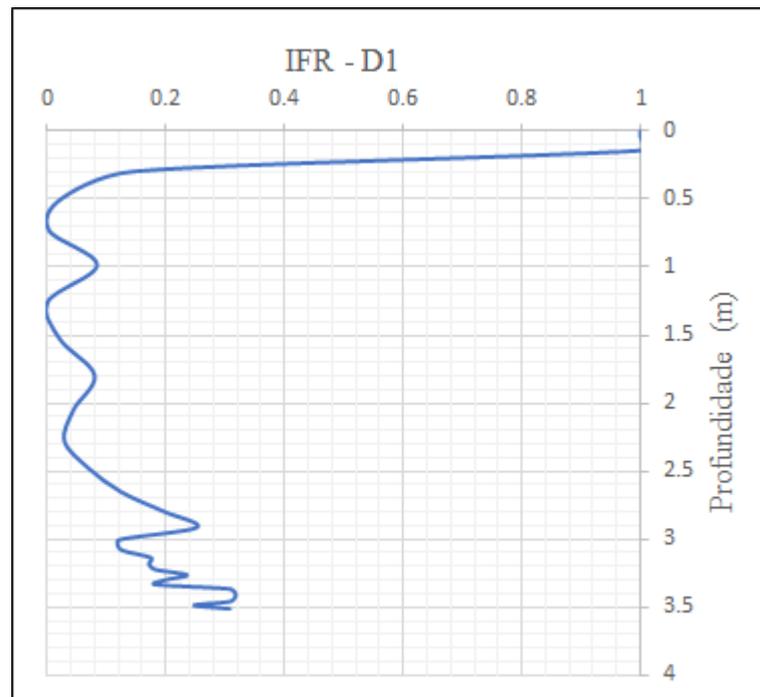


Figura 21 – IFR do condutor D1. Fonte: Autora (2021).

gando próximo de 1, indicando que entrou grande quantidade de solo nessa região, aumentando o tampão significativamente em relação a profundidade cravada.

Após D2 atingir 2,70 metros, o PLR se mantém entre 0,8 e 0,9, indicando um condutor parcialmente tamponado, mas que ainda permite a entrada de muito solo nessa região. O aumento da resistência ao atrito na região próxima aos 4,5 metros é exposto

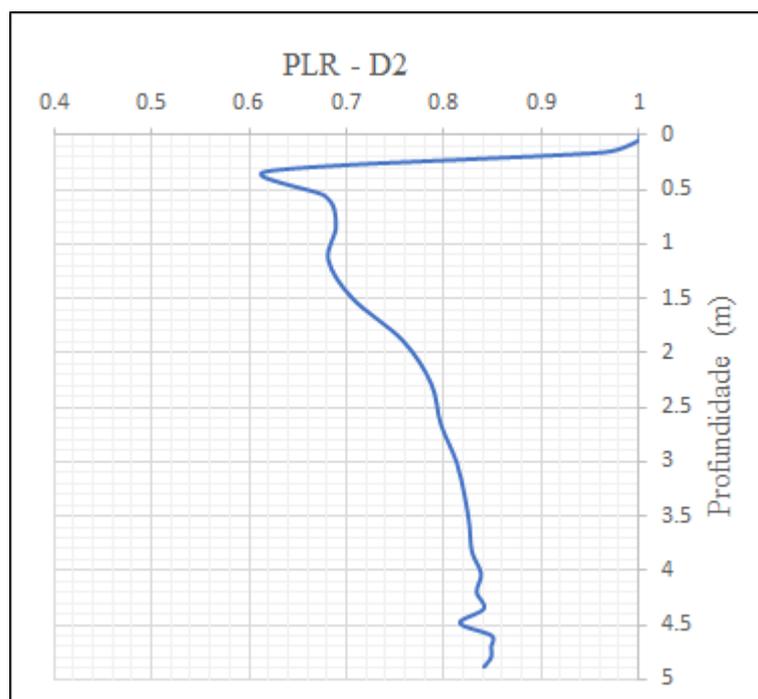


Figura 22 – PLR do condutor D2. Fonte: Autora (2021).

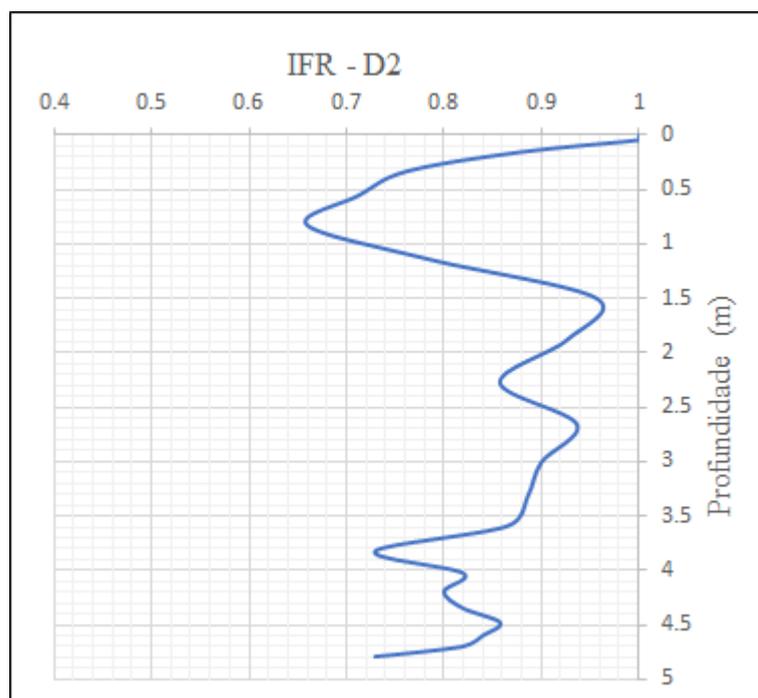


Figura 23 – IFR do condutor D2. Fonte: Autora (2021).

no IFR, uma vez que o IFR diminui. Contudo, o desempenho da instalação não foi afetado, uma vez que os valores de IFR e PLR voltam aos padrões anteriores depois de passar essa região.

O PLR e IFR do condutor D3 são exibidos na Figura 24 e 25, respectivamente.

Na Figura 24 é possível observar a diminuição do PLR no começo da cravação de

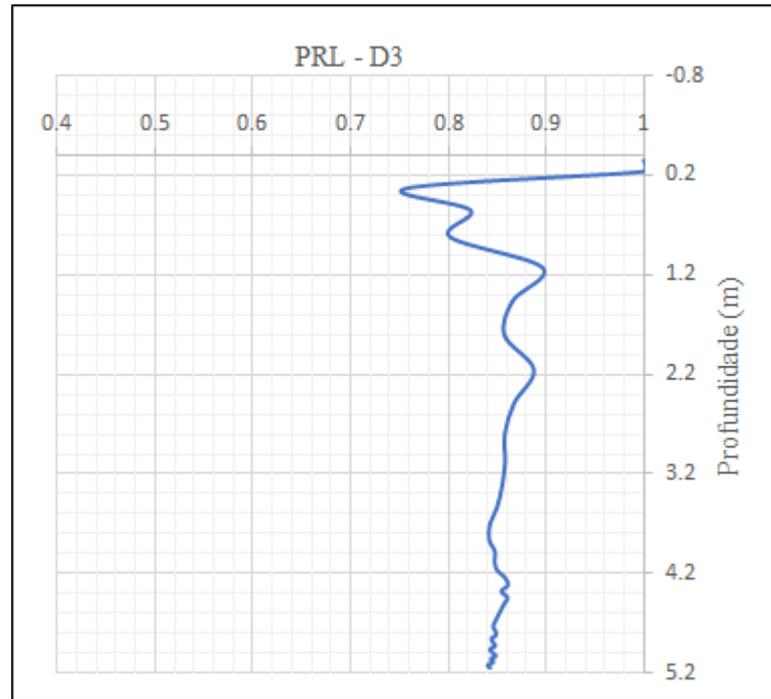


Figura 24 – PLR do condutor D3. Fonte: Autora (2021).

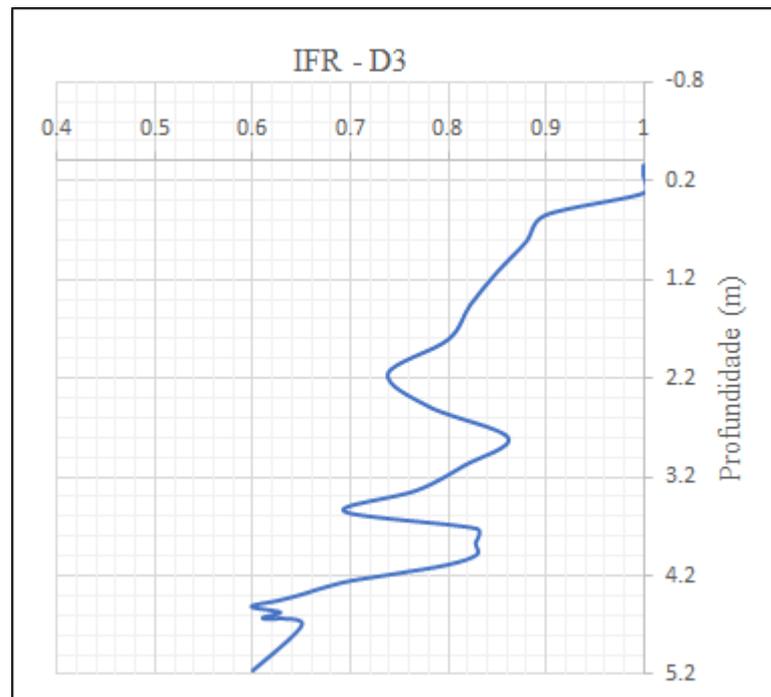


Figura 25 – IFR do condutor D3. Fonte: Autora (2021).

D3. Esse comportamento é esperado, uma vez que não há resistência ao atrito suficiente para impedir a entrada de solo. Por isso, o solo entra rapidamente no condutor, porém esses valores não são tão altos como no condutor D1 e D2 e logo há o aumento dos valores de PLR.

Quando analisa-se o IFR de D3 (Figura 25) nota-se que a partir dos 2 metros há

uma diminuição dos valores, indicando um solo parcialmente tamponado. Nessa mesma região, analisando o PLR nota-se que o condutor também está parcialmente tamponado, porém ainda com possibilidade de entrada maior de solo, maior que a possibilidade do IFR. Isso acontece pois o PLR mostra quão tamponado está o solo e o IFR mostra o aumento da altura do tampão com o aumento da profundidade cravada naquela região. Então os valores menores de IFR comparado com o PLR indicam que nessa região houve um aumento significativo do tamanho do tampão, mas que o solo continua parcialmente tamponado com grande possibilidade de entrada adicional de solo.

3.8.2 Análise da Tensão lateral

Como mencionado na seção de Referencial Teórico, outra forma de analisar o tamponamento do revestimento é comparando as tensões horizontais dentro e fora do condutor ao longo da profundidade. A Figura 26 mostra as tensões laterais internas e externas a uma distância de 0,12 metros do condutor D1. A distância de 0,12 metros foi escolhida por ser a distância média entre a parede interna e o eixo central do condutor.

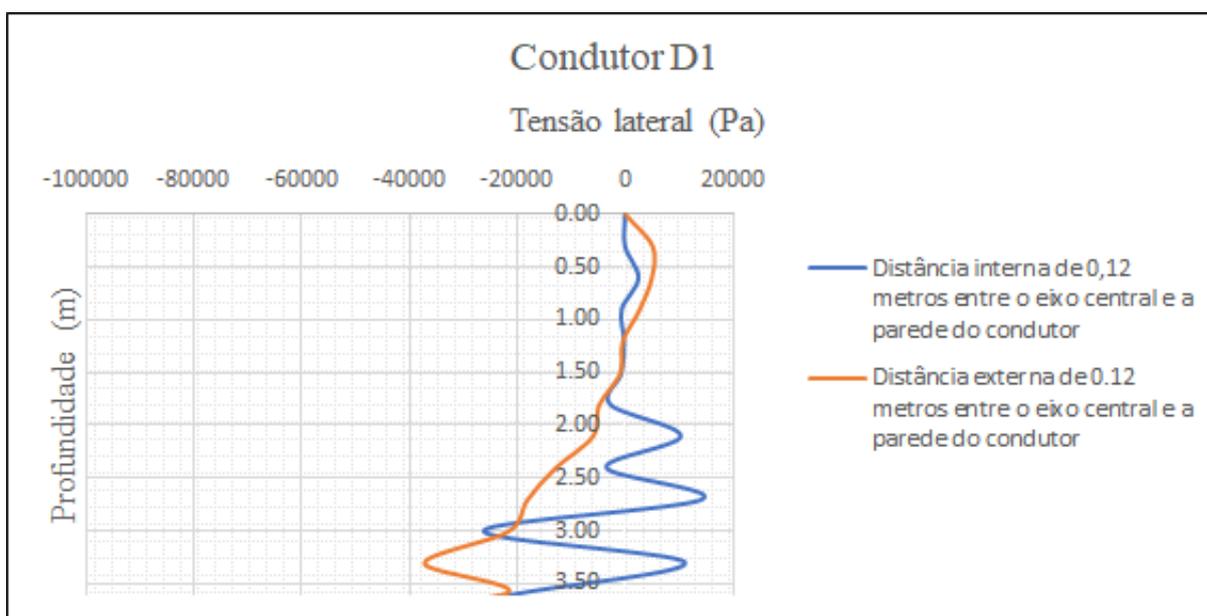


Figura 26 – Tensão lateral dentro e fora do condutor com distância de 0,12 metros ao condutor D1. Fonte: Autora (2021).

Nota-se que, no começo da instalação, não há grandes perturbações, não havendo dificuldade de penetração do solo pela estaca. Na região próxima aos 3,5 metros, há um aumento da tensão lateral, dentro e fora do condutor, porém não o suficiente para indicar que houve tamponamento nessa região pois os valores encontrados não diferem significativamente dos valores de tensão das outras regiões próximas. Além de que, quando comparado com o PLR e IFR, nessa região próxima aos 3,5 metros os valores indicam que o condutor está apenas parcialmente tamponado.

A Figura 27 mostra a tensão lateral interna e externa do condutor com distância de 0,15 metros ao condutor D2. O valor de 0,15 metros também foi escolhido devido sua localização intermediária entre o eixo central e a parede do condutor.

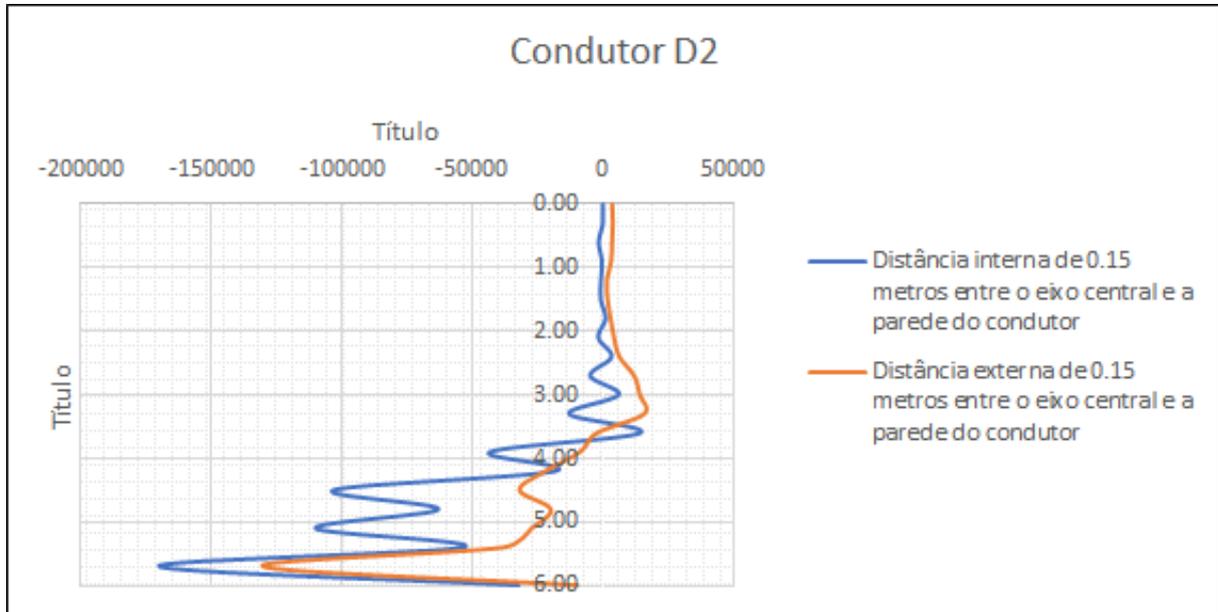


Figura 27 – Tensão lateral dentro e fora do condutor com distância de 0,15 metros no condutor D2. Fonte: Autora (2021).

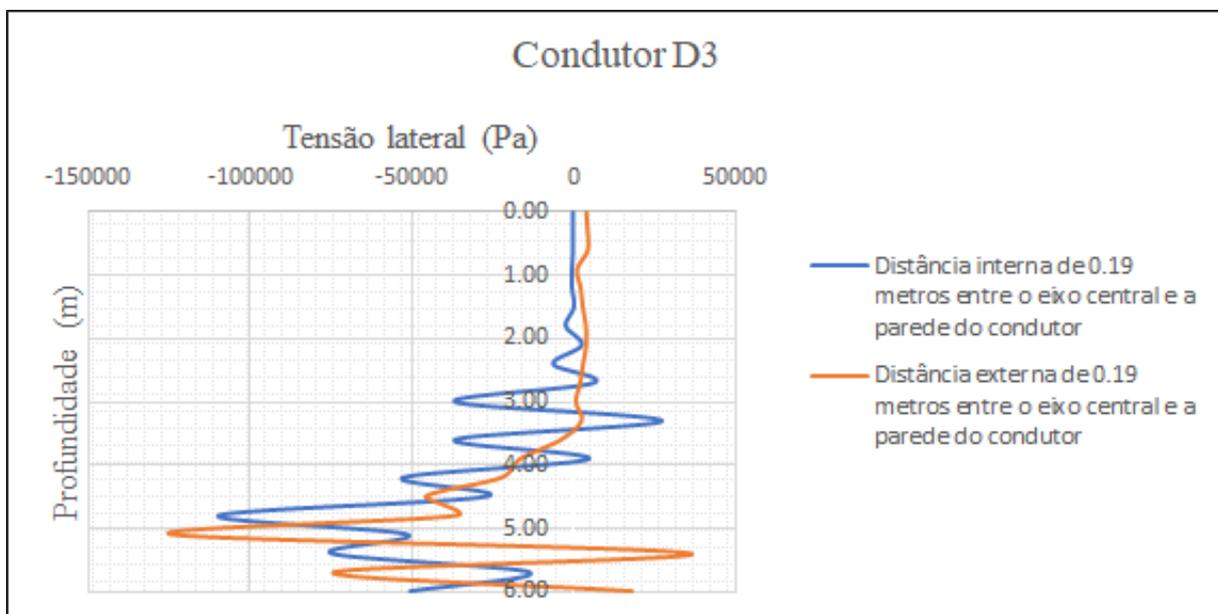


Figura 28 – Tensão lateral dentro e fora do condutor com distância de 0,19 metros no condutor D3. Fonte: Autora (2021).

Na Figura 27, nota-se que, no começo da instalação, não há grandes variações nos valores de tensão lateral, tanto interna ao condutor como externa. Na região próxima à profundidade final, há um aumento de tensão lateral compressiva. Porém seus valores não são tão significativos a ponto de considerar que houve tamponamento na região,

considerando que, apesar do aumento, os valores do pico da parte interna e externa são próximos (HENKE; GRABE, 2008; LEONG; RANDOLPH, 1991).

A Figura 28 mostra a tensão lateral interna e externa com distância de 0,19 metros até a parede do condutor D3. Da mesma forma que os condutores D1 e D2, o valor de 0,19 metros foi escolhido por ser a localização média entre a parede do condutor e seu eixo central.

O resultado da análise da tensão lateral no condutor D3 (Figura 28) é análogo ao do condutor D, não havendo indícios de tamponamento na profundidade observada. Esse resultado pode ser confirmado ao comparar com os valores de PLR e IFR do condutor D3 (Fig. 24 e 25).

Através dos resultados apresentados considerando as três metodologias (PLR, IFR e tensão lateral) para a identificação do tamponamento, pode-se notar a compatibilidade com o resultado visto na simulação computacional no ABAQUS.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho simulou o processo de instalação dos primeiros metros de um revestimento condutor na etapa de cravação por peso próprio. Foram utilizados diferentes diâmetros para avaliação da influência desse parâmetro na formação do tampão de solo no condutor, empregando o mesmo tempo de simulação. Analisou-se também se houve tamponamento durante esses primeiros metros da cravação.

4.1 Principais Conclusões

Após a análise dos resultados da simulação e quantificação do tamponamento, conclui-se que:

- A utilização da abordagem CEL traz resultados acurados, em relação ao ALE, devido sua formulação, porém exige um grande custo computacional. É necessário bastante tempo para que um pequeno passo de tempo de simulação seja concluído. Com isso, torna-se é uma abordagem lenta e dispendiosa, sendo esta a razão de ter sido simulado apenas os primeiros metros de cravação;
- Com a variação dos diâmetros, foi possível analisar a cravabilidade de condutores com diferentes diâmetros. Notou-se que a cravabilidade do revestimento é diretamente proporcional ao seu peso. Logo, com o aumento do diâmetro, o condutor penetra o solo em menos tempo que um condutor com menor diâmetro. Vale ressaltar que tal comportamento acontece em solo argiloso;
- Com a quantificação do tamponamento por meio da tensão horizontal, PLR e IFR, concluiu-se que não houve tamponamento nas profundidade analisadas para o solo argiloso em estudo;
- Embora nas três cravações não houve tamponamento, nota-se também que em condutores de menores diâmetros há maior tendência à formação do tampão, uma vez que os valores de PLR e IFR para condutores com menor diâmetro foram mais próximos de 0 do que aquele de maiores diâmetros.

4.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

A fim de aumentar o conhecimento acerca dos fenômenos que acontecem na instalação de um poço de petróleo em ambiente *offshore*, ficam as seguintes sugestões os próximos trabalhos:

- Avaliação de novo método numérico para a abordagem de problemas com grandes deslocamentos e grandes deformações;

- Simulação da continuação da cravação nas demais etapas, sucção e martelamento, para análise do tamponamento em maiores profundidades;
- Análise da variação das propriedades do solo e sua influência na cravabilidade e tamponamento.

REFERÊNCIAS

ABAQUS, A. Computer software for finite element analysis. *Dassault Systems Simulia: Johnston, RI, USA*, 2020.

ANP. *Painel Dinâmico de Produção de Petróleo e Gás Natural*. 2021.

API. API RP 2A - Recommended Practice for Planning , Designing , and Constructing Fixed Offshore Platforms — Working Stress Design API RP 2A - Recommended Practice for Planning , Designing , and Constructing Fixed Offshore Platforms — Working Stress Design. p. 1–8, 2014.

AZEVEDO, Á. F. M. *O Método Dos Elementos Finitos*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 1.

BELLET, M.; DEVILLE, M. *Numerical Modeling in Materials Science and Engineering*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 6. 53 p. ISSN 13697021. ISBN 9783540426769.

BUSSE, C.; KACH, A. P.; WAGNER, S. M. *Boundary Conditions: What They Are, How to Explore Them, Why We Need Them, and When to Consider Them*. [S.l.: s.n.], 2017. v. 20. 574–609 p. ISSN 15527425. ISBN 1094428116.

CHOW, F. Investigations into displacement pile behaviour for offshore foundations. *Ph. D Thesis, Univ. of London (Imperial College)*, 1997.

DAS, B. M. *et al. Fundamentos de engenharia geotécnica*. [S.l.]: Thomson Learning São Paulo, 2007.

DECKNER, F. Ground vibrations due to pile and sheet pile driving – influencing factors, predictions and measurements. p. 123, 2013.

DOYLE, E. H. Pile installation performance for four TLP's in the Gulf of Mexico. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, v. 1, p. 393–401, 1999. ISSN 01603663.

FATTAH, M. Y.; AL-SOUDANI, W. H. Bearing capacity of open-ended pipe piles with restricted soil plug. *Ships and Offshore Structures*, v. 11, n. 5, p. 501–516, 2015. ISSN 17445302.

FATTAH, M. Y.; AL-SOUDANI, W. H.; OMAR, M. Estimation of bearing capacity of open-ended model piles in sand. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 9, n. 3, p. 1–14, 2016. ISSN 18667538.

FAUL, G. L.; AUDIBERT, J. M. E.; HAMILTON, T. K. Using suction technology for deep installation of structural pipe in deepwater. *Proceedings of the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference, APDT*, p. 417–425, 1998.

HENKE, S.; GRABE, J. Numerical investigation of soil plugging inside open-ended piles with respect to the installation method. *Acta Geotechnica*, v. 3, n. 3, p. 215–223, 2008. ISSN 18611125.

KO, J.; JEONG, S. Plugging effect of open-ended piles in sandy soil. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 52, n. 5, p. 535–547, 2015. ISSN 12086010.

KO, J.; JEONG, S.; LEE, J. K. Large deformation FE analysis of driven steel pipe piles with soil plugging. *Computers and Geotechnics*, Elsevier Ltd, v. 71, p. 82–97, 2016. ISSN 18737633.

KONKOL, J. Numerical Analysis of Pile Installation Effects in Cohesive Soils. *Journal of Chemical Information and Modeling*, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2013. ISSN 1098-6596.

LADE, P. V. Overview of constitutive models for soils. In: *Soil constitutive models: Evaluation, selection, and calibration*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–34.

LEHANE, B. *Experimental investigations of pile behaviour using instrumented field piles*. Tese (Doutorado) — University of London (Imperial College), 1992.

LEONG, E. C.; RANDOLPH, M. F. Finite element analyses of soil plug response. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, v. 15, n. 2, p. 121–141, 1991. ISSN 10969853.

LEPELEIRE, R. D. *Revestimento e Cimentação - Apostila*. [S.l.: s.n.], 2004.

LIU, G. R.; QUEK, S. S. *The Finite Element Method A Practical Course*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 4. 57–71 p.

LIYANAPATHIRANA, D. S.; DEEKS, A. J.; RANDOLPH, M. F. Application of stress smoothing methods to a finite element pile driving analysis. *Engineering Computations (Swansea, Wales)*, v. 17, n. 2-3, p. 218–234, 2000. ISSN 02644401.

LIYANAPATHIRANA, D. S.; DEEKS, A. J.; RANDOLPH, M. F. Numerical modelling of large deformations associated with driving of open-ended piles. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, v. 24, n. 14, p. 1079–1101, 2000. ISSN 03639061.

MAGEE, R. V. *et al.* *ABA Journal*, v. 102, n. 4, p. 24–25, 2017. ISSN 07470088.

MASOUMI, H. *Numerical modeling of free field vibrations due to pile driving*. Tese (Doutorado), 2008.

MENDONÇA, H. M. X. *A modelagem de problemas da engenharia geotécnica pelo método dos elementos finitos*. 2005.

MILLER, G. A.; LUTENEGGER, A. J. Influence of pile plugging on skin friction in overconsolidated clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 123, n. 6, p. 525–533, 1997. ISSN 10900241.

Napoles Neto, A. D. F. Medida de resisntência à penetração dos solos em sondagens de reconhecimento. *Estado Atual do Problema do Brasil*, 1998.

NASCIMENTO, S. M. Estudo Da Dinâmica De Partículas Em Tambor Rotatório Com Suspensores: Análise Experimental E Numérica Utilizando Abordagens Euleriana E Lagrangeana. p. 110, 2018.

PAIK, K.; SALGADO, R. Determination of Bearing Capacity of Open-Ended Piles in Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 129, n. 1, p. 46–57, 2003. ISSN 1090-0241.

PAIK, K. H.; LEE, S. R. Marine Georesources Geotechnology Behavior of soil plugs in open - ended model piles driven into sands. n. April 2015, p. 37–41, 1993.

PAIKOWSKY, S. G. The mechanism of pile plugging in sand. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, v. 1990-May, p. 593–604, 1990. ISSN 01603663.

PAIKOWSKY, S. G.; WHITMAN, R. V. The effects of plugging on pile performance and design. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 27, n. 4, p. 429–440, 1990. ISSN 00083674.

PAIKOWSKY, S. G.; WHITMAN, R. V.; BALIGH, M. M. A new look at the phenomenon of offshore pile plugging. *Marine Geotechnology*, v. 8, n. 3, p. 213–230, 1989. ISSN 03608867.

QIU, G.; HENKE, S.; GRABE, J. Applications of Coupled Eulerian-Lagrangian Method to Geotechnical Problems with Large Deformations. *SIMULIA Customer Conference*, n. 2001, p. 1–16, 2009.

ROCHA, L. A. S.; AZEVEDO, C. T. de. *Projetos de Pocos de Petroleo*. 2º. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2009.

ROMPAEY D.; LEGRAND, C. H. A. V. A prediction method for the installation of vibratory driven piles. *Transactions on the Built Environment*, v. 14, p. 533–542, 1995.

SILVIO, A.; RUIZ, J. C.; PEREIRA, M. F. Deepwater conductor pre-installation for first TLWP in Brazil. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, v. 1, n. October, p. 180–187, 2013. ISSN 01603663.

SPARREVIK, P. Suction Pile Technology and Installation in Deep Waters. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, p. 2171–2179, 2002. ISSN 01603663.

SVINKIN, M. R. Soil and Structure Vibrations from Construction and Industrial Sources. *6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, p. Paper 8, 2008.

THOMAS, J. E. *Fundamentos de engenharia de petróleo*. 1º. ed. [S.l.]: Interciência, 2001.

TI, K. S. *et al.* Modeling of passive piles—an overview. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 14, p. 415–426, 2009.

TJELTA T. I.; GUTTOMSN, T. H. J. Large-Scale Penetration Test at a Deepwater Site. In: *Offshore Technology Conference*. [S.l.: s.n.], 1986.

VAN NOORT, R. *et al.* Conductor Pre-Installation, Deepwater Brazil. n. May, p. 4–7, 2009.

VAZ, L. E. *Método dos Elementos Finitos em Análise de Estruturas*. [S.l.: s.n.], 2011. 284 p. ISBN 9788535239294.

WANG, T. *et al.* Mechanisms of soil plug formation of open-ended jacked pipe pile in clay. *Computers and Geotechnics*, Elsevier, v. 118, n. June 2019, p. 103334, 2020. ISSN 18737633. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103334>>.

XIE, R. *et al.* A coming ISO standard – offshore drilling conductor driving depth design and operation guideline. *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, p. 1372–1378, 2019. ISSN 15551792.

ZAKERI, A. *et al.* Fatigue analysis of offshore well conductors: Part I - Study overview and evaluation of Series 1 centrifuge tests in normally consolidated to lightly over-consolidated kaolin clay. *Applied Ocean Research*, Elsevier B.V., v. 57, p. 78–95, 2016. ISSN 01411187.

ZWERNEMAN, F. J.; DIGRE, K. A. 22nd edition of API RP 2A recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms - Working stress design. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, v. 3, n. December 2002, p. 2364–2372, 2010. ISSN 01603663.