



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL
CENTRO DE TECNOLOGIA - CTEC
CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO



JANAÍNA FIGUEIREDO PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA PARA AVALIAÇÃO DE
INTEGRIDADE NA FASE DE INÍCIO DE POÇO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Orientador: Prof. Dr. João Paulo Lima Santos

Maceió - AL

2021

JANAÍNA FIGUEIREDO PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA PARA AVALIAÇÃO DE
INTEGRIDADE NA FASE DE INÍCIO DE POÇO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao colegiado do Curso de Engenharia de
Petróleo como requisito total para a obtenção
do título de Engenheiro de Petróleo.

Maceió - AL

2021

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

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

P436d Pereira, Janaína Figueiredo.

Desenvolvimento de uma ferramenta para avaliação de integridade na fase de início de poço. / Janaína Figueiredo Pereira. – Maceió, 2021.
49 f. : il.

Orientador: João Paulo Lima Santos.

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

Bibliografia: f. 45-49.

1. Engenharia de poço. 2. Revestimentos. 3. Revestimento condutor. 4. Capacidade de carga lateral. 5. Efeito setup. I. Título.

CDU: 622.276

RESUMO

A construção de um poço de petróleo é uma tarefa complexa e multidisciplinar, uma vez que envolve áreas distintas, não apenas da Engenharia de Petróleo. A fase de início de poço gira em torno das operações realizadas para assentamento do revestimento condutor, perfuração da fase seguinte e o assentamento e cimentação do revestimento de superfície. O revestimento condutor permite o retorno de fluidos durante a perfuração e cimentação do revestimento de superfície, além de evitar o colapso do solo solto perto da superfície. A etapa de revestimento é uma das mais onerosas e é de extrema importância para a segurança operacional do poço durante sua perfuração, bem como em toda sua vida produtiva. Diante disso, é necessário um grande controle de segurança na construção de um poço, através de técnicas e barreiras primárias e secundárias, para prevenção de acidentes. Dentre algumas ferramentas tecnológicas já existentes, o SAEP (Sistemas de Aplicação para Engenharia de Petróleo) é um aplicativo *web* criado por pesquisadores do Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV), que auxilia docentes da área de Engenharia de Poço, principalmente nesta etapa de revestimento. A presente proposta tem como objetivo a avaliação integrada da estabilidade de poços de petróleo por meio de análise de falhas em barreiras de segurança, em cenários da fase de início de poço, especialmente para avaliação da integridade do conjunto solo-revestimento, incluindo métodos como revestimento por jateamento e cravação, objetivando a incorporação de ferramentas auxiliaadoras do processo. Para concretizar esse objetivo, a pesquisa prevê a inserção de uma nova ferramenta no SAEP, nomeada “GWELL”, com ênfase na relação solo-revestimento, em que o usuário será capaz de inserir seus dados de resistência do solo trabalhado e terá o resultado sobre a estabilidade do sistema. Com o desenvolvimento da nova ferramenta, foi possível obter resultados a respeito da Resistência ao Atrito Lateral do solo e do ganho de capacidade de carga ao longo do assentamento do revestimento do poço (efeito *setup*), o que resultou em grande auxílio à segurança operacional do projeto de poço de petróleo.

Palavras-chave: Revestimento condutor, Solo, Capacidade de carga.

ABSTRACT

The construction of an oil well is a complex and multidisciplinary task, as it involves different areas, not just Petroleum Engineering. The well start phase revolves around the operations carried out for laying the conductive casing, drilling the next phase, and laying and cementing the surface casing. Conductive casing allows for the return of fluids when drilling and cementing the surface casing, and prevents loose soil from collapsing near the surface. The casing step is one of the most costly and is extremely important for the operational safety of the well during its drilling, as well as throughout its productive life. Therefore, it is necessary a great safety control in the construction of a well, through techniques and primary and secondary barriers, to prevent accidents. Among some existing technological tools, SAEP (Application Systems for Petroleum Engineering) is a web application created by researchers from the Scientific Computing and Visualization Laboratory (LCCV), which helps professors in the field of Well Engineering, especially in this stage of casing. The present proposal aims at the integrated assessment of the stability of oil wells through the analysis of failures in safety barriers, in scenarios of the well start phase, especially to assess the integrity of the soil-cladding set, including methods such as coating by blasting and crimping, aiming at the incorporation of auxiliary tools in the process. To achieve this goal, the research foresees the insertion of a new tool in the SAEP, named "GWELL", with an emphasis on the soil-casing relationship, in which the user will be able to enter their resistance data of the worked soil and will have the result on the stability of the system. With the development of the new tool, it was possible to obtain results regarding the Resistance to Lateral Friction of the soil and the gain in load capacity during the settlement of the well casing (setup effect), which resulted in a great aid to the operational safety of the oil well project.

Key words: Conductor casing, Ground, Carrying capacity.

SIGLAS E ABREVIATURAS

SAEP – Sistemas de Aplicação para Engenharia de Petróleo

GWELL – *Ground Well*

H₂S - Sulfeto de Hidrogênio

BOP – *Blowout Preventer*

ROV – Veículo Operado Remotamente

DAT – *Drill Ahead Tool*

LMRP – *Lower Marine Riser Package*

BHA – *Bottom Hole Assembly*

ESCP – Equipamentos de Segurança de Cabeça de Poço

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de forças da estaca.	13
Figura 2 – Menu do site SAEP.	14
Figura 3 - Processo de revestimento.	17
Figura 4 - Conexão entre duas juntas de revestimento.	18
Figura 5 - Aranha ou <i>spider</i> usado para sustentar o revestimento.	18
Figura 6 - Programa de revestimento.	21
Figura 7 - Alojador de baixa pressão.	22
Figura 8 - Esquema de revestimento por jateamento.	24
Figura 9 - Martelo durante etapa de cravação.	26
Figura 10 - Curvas representando o solo.	31
Figura 11 - Sistema convencional de BOP.	34
Figura 12 - Código implementado para obtenção da Resistência ao Atrito Lateral.	37
Figura 13 - Código completo com equação de <i>setup</i> .	39
Figura 14 - Entrada do site SAEP - ferramenta “GWELL”.	39
Figura 15 - Dados de entrada para obtenção da Resistência ao atrito lateral.	40
Figura 16 - Resultados da ferramenta “GWELL”.	40
Figura 17 - Área do “GWELL” direcionada ao efeito <i>setup</i> .	41
Figura 18 - Resultado da ferramenta de ganho de capacidade de carga.	41
Figura 19 - Gráfico da Resistência ao atrito lateral pela Profundidade.	42
Figura 20 – “Resultados” do 1º estudo de caso.	42
Figura 21 - Gráfico do resultado do 1º estudo de caso.	43
Figura 22 - Resultado do ganho de capacidade de carga no tempo <i>t</i> .	44
Figura 23 - Gráfico do resultado do 2º estudo de caso.	44

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Classificação da profundidade das águas	25
Tabela 2 - Valores utilizados para o coeficiente adimensional	36
Tabela 3 - Dados de entrada para obtenção do efeito <i>setup</i>	44
Quadro 1 - Parâmetros das equações de Winkler	35
Quadro 2 - Parâmetros da equação de <i>setup</i>	38
Quadro 3 - Parâmetros da Equação 4.0	38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Poços de petróleo	15
2.2 Revestimento	15
2.2.1 Revestimento condutor	22
2.2.2 Jateamento	22
2.2.3 Cravação	25
2.2.4 Solo-revestimento	28
2.2.5 Efeito <i>setup</i>	31
2.3 Segurança operacional do poço	32
3. METODOLOGIA	34
3.1 Modelo de Winkler	35
3.2 Efeito <i>setup</i>	37
4. RESULTADOS	39
4.1 Estudo de caso	41
4.1.1 Resistência ao Atrito Lateral	41
4.1.2 Efeito <i>setup</i>	43
5. CONCLUSÕES	46
6. REFERÊNCIAS	48

1. INTRODUÇÃO

A perfuração de poços de petróleo é primordial para o sucesso exploratório de hidrocarbonetos e, durante a fase de perfuração de um poço, a segurança da operação é um elemento indispensável nos projetos de desenvolvimento de campos petrolíferos. São utilizados equipamentos e técnicas para controle de segurança no processo de construção desses poços de petróleo, formando barreiras primárias e secundárias para prevenção de acidentes.

Segundo Tavares (2006), a perfuração está sempre sujeita a anomalias durante sua ocorrência. Para evitar alguns problemas de segurança, foram criadas boas práticas e evolução de técnicas, que diminuíssem a falta de segurança no processo.

A etapa de revestimento ocorre durante a construção desses poços. De acordo com Costa (2016), o revestimento condutor é uma das fases que garante a segurança operacional do sistema de poço, além de ser uma etapa bastante onerosa e de grande importância. Por isso, é necessário um maior destaque nesse processo, para que se suceda de forma eficaz e satisfatória. Assim, surge a necessidade da criação de novas ferramentas que auxiliem e contribuam nesta fase de revestimento.

Existem algumas técnicas de instalação de revestimento condutor, que estão atreladas à necessidade do determinado projeto ou das características do solo. As técnicas estudadas neste trabalho englobam a instalação por jateamento e cravação, as quais são amplamente utilizadas.

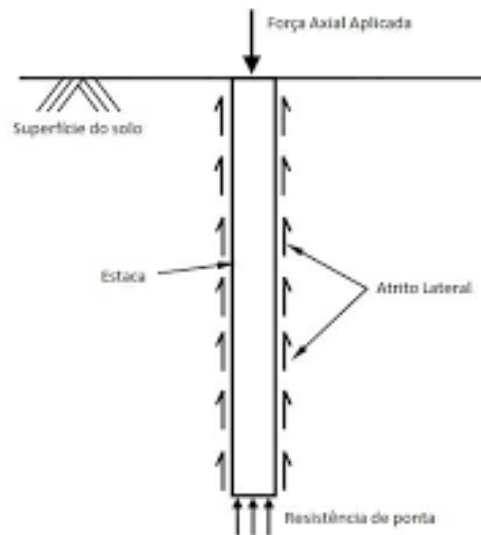
“A cravação consiste em um estágio inicial para a instalação do revestimento condutor. A instalação por jateamento é geralmente realizada em solos com camadas de sedimentos não consolidados. Com o impacto do jato estes sedimentos são carreados, abrindo espaço para a passagem do condutor” (SANTOS *et al.*, 2018).

Diante desse cenário, surge também a importância de se estudar a relação entre solo-revestimento. Um dos modelos mais utilizados para o conjunto baseado em estaca cravada no solo é criado por Winkler (1897) e será utilizado neste trabalho. A capacidade de carga do solo é um limitante essencial para a análise da estabilidade do sistema solo-revestimento.

A estaca, material que se crava no solo para servir de marco em levantamentos topográficos, funciona de forma semelhante à física do condutor, como ilustrado na Figura 1.

Por isso, como os estudos e ensaios realizados são majoritariamente feitos com estacas, essas últimas serão mencionadas como apologia ao revestimento condutor.

Figura 1 – Distribuição de forças da estaca



Fonte: Estivalett (2016).

A análise do sistema solo-estaca é complexa e isso se deve principalmente pelo fato do solo apresentar uma mobilidade não linear, consequência da heterogeneidade do solo, dependendo de características como o tipo de solo, as deflexões da estaca e do nível de carregamento ao longo da estaca. Uma vez conhecidos os esforços que hão de ser suportados pelo solo, podem-se inferir algumas características e viabilizar o projeto, tornando-o mais seguro e viável.

Já existem algumas aplicações tecnológicas que abrangem o tema da Engenharia de Poço. Entre elas, o sistema SAEP (Sistema de Aplicações de Engenharia de Petróleo) é um aplicativo web, criado por pesquisadores do Laboratório de Computação Científica e Visualização, em constante desenvolvimento, que serve como auxílio em projetos de colunas de revestimento de poços de petróleo.

O SAEP, de acordo com Costa (2016), é um sistema que abrange diversos ramos da engenharia de petróleo, como área offshore, poço, reservatório, economia, além de conter apoio, que auxilia em outras áreas não citadas. O site (<https://saep.pythonanywhere.com/>) permite um suporte aos docentes na administração das aulas relacionadas com a Engenharia de Petróleo e,

então, funciona como aprimoramento de aprendizagem e fixação das aulas oferecidas. A Figura 2 mostra a interface principal do SAEP.

Figura 2 - Menu do site SAEP



Fonte: Autora (2021).

Dessa forma, a pesquisa prevê a inserção de uma nova ferramenta no aplicativo web SAEP (Sistemas de Aplicação para Engenharia de Petróleo), nomeada “GWELL”, com ênfase nessa relação solo-revestimento, em que o usuário será capaz de inserir seus dados de resistência do solo trabalhado e terá o resultado sobre a estabilidade do sistema, bem como a avaliação de ganho de resistência do solo ao longo do tempo (efeito *setup*). A aba “GWELL” encontra-se disponível no endereço eletrônico (https://saep.pythonanywhere.com/apps_teste/gwell/), ainda de teste, para utilização dos criadores e pesquisadores, ainda em formato de aprimoramento.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Criação de ferramenta para avaliar a estabilidade de poços de petróleo em instalações de revestimento condutor, especialmente para estudo da integridade do conjunto solo-revestimento, incluindo métodos como jateamento e cravação, objetivando a incorporação de ferramentas auxiliaadoras do processo.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Desenvolvimento de uma ferramenta no aplicativo web SAEP (Sistemas de Aplicação para Engenharia de Petróleo), nomeada “GWELL”, para obtenção de informações acerca da estabilidade solo-revestimento;
- b) Inclusão do efeito *setup* na ferramenta, para projetos de acoplamento através de jateamento ou cravação.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Poços de petróleo

Para a exploração de hidrocarbonetos, é necessário o estudo de rochas sedimentares porosas e permeáveis (além de levantamentos geofísicos nas regiões de interesse), como arenitos, por exemplo, ou cavidades interconectadas de rochas como calcário, como discorreu Branco (2014).

Segundo Branco (2014), todos esses estudos definem se existem, na área estudada, estruturas geológicas favoráveis à concentração de petróleo. Ainda cita que, quando ainda existe uma área pouco conhecida geologicamente, pode ser feito um poço estratigráfico, com a finalidade apenas de conhecer a sequência de rochas da área. Após essa primeira etapa, são feitos os furos de sonda, chamados poços exploratórios, que serão capazes de confirmar ou não a existência do petróleo.

Além da classificação entre exploratório e estratigráfico, existem outras classificações para os poços de petróleo em relação à direção da perfuração, como poço vertical, em que a sonda e o alvo estão na mesma reta; poço direcional, quando a perfuração não é feita na vertical e o poço horizontal, que é um tipo de perfuração feita na horizontal (PETROBRÁS, 2015).

A construção desses poços de petróleo envolve diversos cenários essenciais. Um deles é o processo de instalação de revestimento, que requer cuidados específicos que serão abordados neste trabalho.

2.2 Revestimento

“A construção dos poços de petróleo ocorre por fases, onde ao final de cada fase, desce uma coluna de aço para seu revestimento. Essa coluna consiste em um acoplamento de tubos com o mesmo diâmetro externo” (COSTA, 2016).

De acordo com Mitchell e Miska (2011), os produtos tubulares petrolíferos são formados por revestimento, tubulação, coluna e tubo de perfuração. O revestimento atende a funções muito importantes na perfuração e completação do poço, impedindo seu colapso e, hidraulicamente, isola os fluidos do poço das formações subterrâneas e dos fluidos de formação.

Segundo Thomas *et al.* (2001), o número de fases e o comprimento das colunas de revestimento são determinados através das pressões de poros e de fraturas, que indicam

ocorrência de prováveis kicks e até blowouts, o risco de prisão da coluna por diferencial de pressão, desmoronamento das paredes do poço ou perda de fluido de perfuração para as formações.

Ainda de acordo com Thomas *et al.* (2001), dentre as inúmeras funções das colunas de revestimento, destacam-se a possibilidade de retorno do fluido de perfuração à superfície, prevenção do desmoronamento das paredes, sustentação dos equipamentos de segurança da cabeça do poço, o controle de pressão dos fluidos e o impedimento da migração de fluidos das formações. Para isso, é necessário que as colunas de revestimento sejam resistentes a vários tipos de materiais e/ou situações esperadas e que tenham algumas características como, por exemplo, ser resistente à corrosão e à abrasão, ter a menor espessura possível e facilidade de conexão.

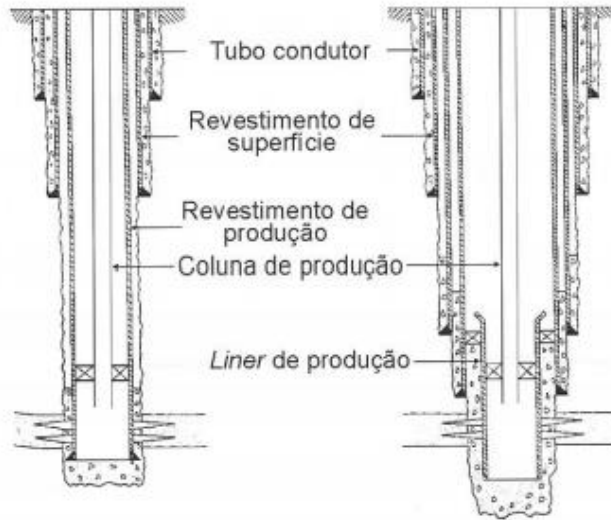
As colunas de revestimento são necessárias, uma vez que, quando a profundidade do poço aumenta, as pressões tornam-se cada vez maiores. Assim, para evitar um kick é preciso usar um fluido de perfuração mais denso, o que cria uma pressão hidrostática maior no interior do poço. Dessa forma, é necessário que o poço seja revestido, de maneira que a densidade da lama aumente, chegando às camadas mais profundas sem ocorrência de possíveis problemas nas formações mais rasas (MALOUF, 2013).

“Como existem diversos tipos de poços, como ultra profundos, altas pressões, com presença de H₂S, entre outros, os revestimentos devem atender às especificidades de cada poço, por este motivo, há diversos tipos de revestimentos para as necessidades de projeto. Diferentes comprimentos, diâmetros, espessuras, composição química e tipos de conexão estão entre as principais características que irão conferir as propriedades desejadas para o poço a ser perfurado.” (KOEHLER, 2018).

Segundo Koehler (2018), as colunas de revestimento são compostas por fases, que são formadas por juntas tubulares que são conectadas umas às outras. Uma fase compreende várias juntas de mesmo diâmetro que pode ser passada para outra fase de menor diâmetro e, assim, alcançar o reservatório.

Na Figura 3, está esquematizado um processo de revestimento. De acordo com Costa (2016), esse processo deve atender às mínimas condições necessárias de viabilidade operacional e financeira do poço, sendo capaz de garantir segurança em todas as suas etapas.

Figura 3 - Processo de revestimento



Fonte: THOMAS *et al.* (2004).

Inicialmente, é necessário que o poço esteja livre de cascalhos para que o assentamento do revestimento seja feito corretamente. Por esse motivo, é essencial circular o fluido pelo poço por algum tempo, o que possibilita o carreamento dos cascalhos para fora do poço. As juntas de revestimento possuem, aproximadamente, 12 metros. A conexão entre as juntas depende da tecnologia dominada pelo fabricante (MALOUF, 2013).

Após tal circulação, o revestimento é descido no poço. Antes de especificar e classificar a etapa de revestimento, é importante aprofundar um pouco mais sobre a coluna de revestimento como um todo.

A Figura 4 mostra a conexão entre duas juntas de revestimento, que normalmente é feita através de um acoplamento.

Figura 4 - Conexão entre duas juntas de revestimento



Fonte: Premium Connections Catalog – Tenaris Hydril (2018).

A descida do revestimento é similar à descida da coluna de perfuração em si, divergindo-se nos equipamentos utilizados.

“No caso da descida de revestimentos, os equipamentos utilizados tendem a ser mais robustos devido ao grande diâmetro das juntas e ao enorme peso da coluna. Em alguns casos, as tradicionais cunhas são substituídas por um equipamento conhecido como aranha ou spider, em inglês.” (MALOUF, 2013).

A Figura 5 ilustra o equipamento “*spider*” utilizado para o assentamento.

Figura 5 - Aranha ou *spider* usado para sustentar o revestimento



Fonte: On ECPlaza (2008).

A etapa de revestimentos pode ser classificada em revestimento condutor, de superfície e revestimento intermediário.

O primeiro revestimento a ser descido é o condutor e o de superfície é o segundo a ser assentado. De acordo com Koehler (2018), o BOP - Blowout Preventer - é anexado no revestimento de superfície, sendo o primeiro a ser submetido a altas pressões. Por esse motivo, ele contém um alojador de alta pressão, com capacidade de evitar kicks e blowouts.

“O revestimento de superfície também suporta e protege da corrosão quaisquer colunas de revestimento subsequentes que funcionem no poço” (BOURGOYNE JR. *et. al*, 1986).

O revestimento de superfície é, ainda, responsável por isolar os fluidos provenientes da formação, além de prevenir o declínio de formação não consolidada e prevenir perdas de circulação devido aos maiores pesos de fluidos subsequentes (KOEHLER, 2018).

Já o revestimento intermediário tem função de proteger, principalmente, as zonas de alta ou baixa pressão. Segundo Iramina (2016), protege também as zonas de perda de circulação, formações desmoronáveis, formações portadoras de fluidos corrosivos ou contaminantes de lama. Dependendo da estrutura e das características do poço, pode haver mais de um revestimento intermediário e não há necessidade desta coluna quando os poços são mais rasos.

“Seu assentamento é na faixa entre 1.000 e 4.000 metros. É cimentado somente na parte inferior ou, em alguns casos, em algum trecho intermediário” (OLIVEIRA, 2018).

2.2.1 Revestimento Condutor

O revestimento condutor é o foco do trabalho atual e, de acordo com Thomas *et. al* (2004), é o primeiro revestimento do poço, descido a profundidades menores e tem a finalidade de garantir a sustentação de sedimentos superficiais ainda não consolidados, podendo ser assentado através de jateamento, cravação ou cimentação em poço perfurado.

O papel do condutor é essencial, uma vez que, no geral, sustenta o peso das colunas de revestimento que ainda serão assentadas. De acordo com Malouf (2013), o revestimento condutor é instalado de acordo com características do solo, poço e condições estruturais. Para operações terrestres, o condutor pode ser cravado no solo, no caso de a formação superficial ter baixa competência estrutural. Em formações mais firmes, é necessário perfurar a rocha de maneira convencional e cimentar o condutor.

Já em situações offshore, usualmente opta-se por realizar o jateamento do condutor, que será descrito mais profundamente na seção 2.2.3.

“O condutor suporta estruturalmente a cabeça de poço de baixa pressão, pois não é submetido a altas pressões, e é cimentado em todo seu comprimento, onde costuma-se utilizar um ROV - Veículo Operado Remotamente” (KOEHLER, 2018).

As juntas do revestimento condutor são, em geral, de 30’’ ou 36’’. Em seu interior, passarão todos os equipamentos que serão posteriormente instalados durante todo o processo (MALOUF, 2013).

“Um sistema desviador pode ser instalado no revestimento condutor para desviar o fluxo do pessoal da plataforma e do equipamento, no caso de um influxo inesperado de fluidos de formação, durante a perfuração, para a profundidade de revestimento de superfície” (BOURGOYNE JR. *et. al*, 1986).

Dessa forma, no geral, o objetivo principal do condutor é atuar como uma linha de fluxo, para que a lama (fluido de perfuração) retorne aos poços e estabilize a parte superior, que pode ser composto de solo solto, como afirma Azar e Robello (2007).

“A profundidade do tubo condutor está geralmente na faixa de 50-250 pés e é definida pelo comportamento das rochas superficiais e do solo. Ele também fornece um ponto para a instalação de um blowout preventer (BOP) ou outro tipo de sistema de desvio. Isso permite que qualquer fluxo de fluido raso seja desviado para longe da plataforma e é um fator de segurança necessário em quase todas as áreas. Em áreas com sedimentos muito moles e não consolidados, um cordão externo temporário, chamado chaminé, pode ser colocado no lugar para segurar o sedimento próximo à superfície” (AZAR; ROBELLO, 2007).

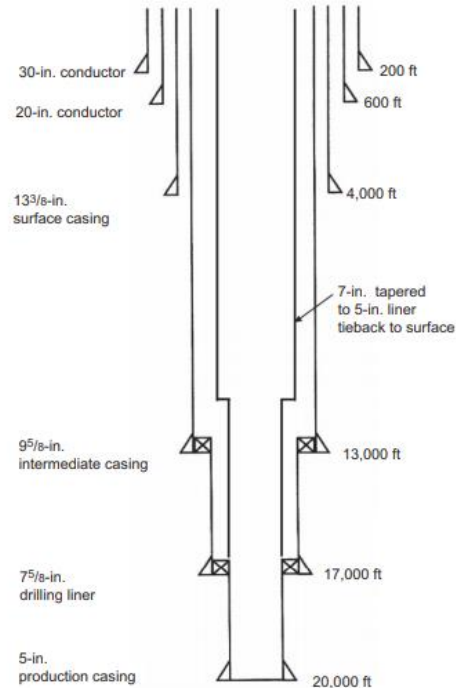
Também é importante analisar os fatores de resistência e vedação, que estão relacionados com a conexão do revestimento ou tubulação.

Segundo Azar e Robello (2007), essas conexões são vasos de pressão isolados que contêm roscas, vedações e travas. A vedação de fluido produzida por uma conexão pode ser criada nas roscas por um “*pipe dope*” ou por um selo de metal ou elastômero dentro da conexão. A resistência pode variar de menos que a resistência do corpo do tubo até a eficiência de tração de mais de 115% da resistência do corpo do tubo.

A Figura 6 ilustra um sistema de revestimento para um poço ao longo da Costa do Golfo dos Estados Unidos, como mostram Mitchell e Miska (2011). Este é um poço que,

provavelmente, não encontrará gradientes de pressão de poros de formação anormais ou zonas de circulação perdida, que poderá ser necessário apenas o revestimento condutor e revestimento de superfície para perfurar até o objetivo do poço.

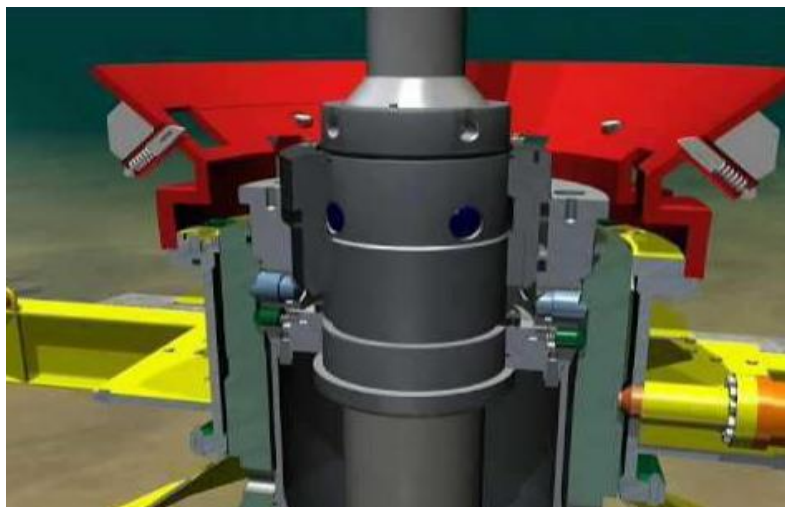
Figura 6 - Programa de revestimento



Fonte: Mitchell e Miska (2011).

Comumente, de acordo com Malouf (2013), o revestimento condutor é descido simultaneamente com o alojador de baixa pressão (uma das estruturas que compõem a cabeça do poço) e esse alojador ficará assentado a 2 ou 3 metros acima do solo marinho. A Figura 7 mostra um alojador de baixa pressão conectado à coluna de perfuração.

Figura 7 - Alojador de baixa pressão



Fonte: Malouf (2013).

2.2.2 Jateamento

O processo pelo qual o revestimento é instalado é primordial para a quantificação da resistência mecânica do conjunto solo-revestimento. Segundo Santos *et al.* (2018), a principal maneira de instalação do revestimento é feita por perfuração seguida de cimentação e o segundo processo mais executado consiste no jateamento.

Em projetos marinhos, é muito comum encontrar os sedimentos do solo na forma de uma lama fina, com baixa competência estrutural. Nessa situação, é comum proceder para uma operação de jateamento, na qual uma broca será utilizada para circular fluidos de modo a remover os sedimentos, permitindo a penetração do revestimento no solo marinho (MALOUF, 2013).

Os sedimentos não consolidados são carreados através do efeito do jato, abrindo espaço para a passagem do condutor (SANTOS *et al.*, 2018).

DAT (Drill Ahead Tool) é um equipamento que liga o condutor e a coluna de perfuração. Segundo Malouf (2013), esse aparelho é capaz de desconectar o *drill pipe* do revestimento quando for assentado da forma esperada, o que permite que a coluna de perfuração seja liberada. Dessa maneira, no fim do assentamento do revestimento, é possível continuar a perfuração imediatamente, sem que seja necessário retirar a coluna do poço.

Segundo Yang *et al.* (2010), a possibilidade de desconectar a broca ao final do jateamento pode economizar manobras que seriam necessárias para iniciar a etapa seguinte (de superfície). Com o impacto dos jatos, o solo é erodido pela retirada de seus sedimentos e escoado pelo interior do revestimento ou, dependendo da vazão, pelo espaço anular (o que pode levar a perturbações estruturais reduzindo a resistência da formação).

Os sedimentos removidos são lançados para fora do poço após passarem por entre a coluna de perfuração e o condutor. É importante que o processo não seja feito com uma vazão muito alta, já que isso pode fazer com que os sedimentos passem a ser removidos do poço passando por entre o condutor e o solo. Segundo Malouf (2013), isso gera uma perturbação das formações, podendo diminuir sua capacidade de segurar o condutor no lugar.

Segundo Malouf (2013), o revestimento condutor deverá ser capaz de sustentar todo o peso dos equipamentos utilizados, tanto dentro do poço quanto acima dele (BOP e LMRP). Assim, é preciso que o jateamento seja realizado com sucesso, permitindo o assentamento correto do condutor, para um total sucesso da perfuração.

Segundo Kan *et al.* (2018), o jateamento fornece uma grande eficiência de instalação, prevenção de falhas estruturais e, ainda, boa adaptação a diferentes resistências de solo.

A profundidade do condutor influencia a resistência da estrutura, pois um jateamento mais profundo exige mais tempo e é mais suscetível a riscos. Por outro lado, uma estrutura mais rasa não terá resistência suficiente, podendo desmoronar (KAN *et al.*, 2018).

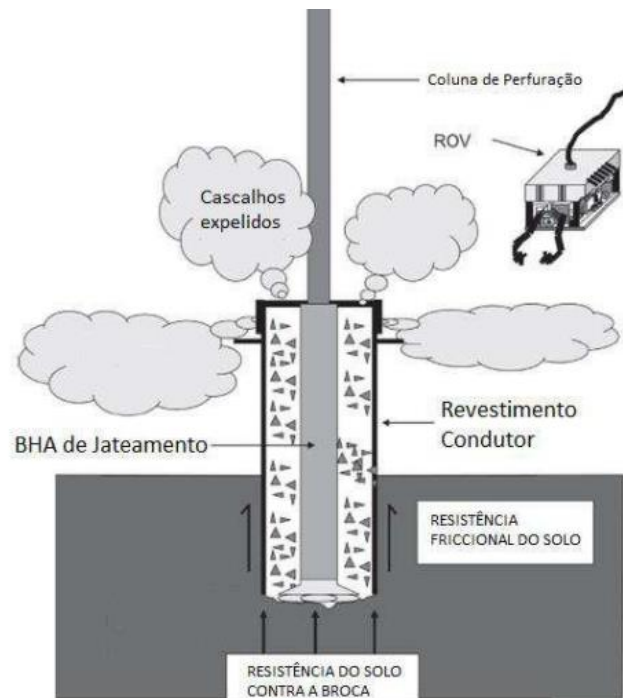
Segundo Santos *et al.* (2018, *apud* Machado, 2016), no Brasil, normalmente é descido um tubo condutor conectado a uma coluna com broca de diâmetro adaptável à camada do revestimento superficial, podendo ficar dentro ou fora do condutor a depender da estratégia adotada pelos operadores. Logo após, o tubo é injetado no solo. Nas técnicas mais atuais, não é permitida a formação de um anular entre o revestimento condutor e o solo adjacente, de maneira que o primeiro se adere à formação por meio de forças de fricção lateral.

“Outros aspectos relevantes envolvidos no jateamento é o volume de sedimentos que é expelido de dentro do poço e se acumula ao redor da cabeça do poço. A quantidade de sedimentos que será removida deve ser cuidadosamente calculada antes do início da operação. Isso é muito importante pois determinará a altura do revestimento condutor que deverá ficar acima da linha de lama. Se o volume de sedimentos for subestimado na etapa de projeto do poço, a cabeça do poço pode acabar sendo soterrada, o que tornaria a perfuração inviável. Por outro lado, se o volume de sedimentos for superestimado, a

cabeça do poço ficará muito acima da linha de lama. Essa altura excessiva é prejudicial pois aumenta o momento fletor oriundo dos movimentos da sonda” (MALOUF, 2013).

Em operações de revestimento condutor através de jateamento, de acordo com Malouf (2013), a coluna de perfuração é montada com um BHA específico e é assentada junto com o revestimento condutor e o alojador de baixa pressão. Na Figura 8 está sendo representada esquematicamente uma operação de jateamento.

Figura 8 - Esquema de revestimento por jateamento



Fonte: Akers (2008).

É muito importante deixar o revestimento em repouso por algumas horas após o jateamento do condutor. De acordo com Malouf (2013), esse processo é conhecido como *soak* e permite que os sedimentos possam se expandir e assentar ao redor da coluna, conferindo assim uma maior força de fricção entre o condutor e os sedimentos. Essa força de fricção tem a função de sustentar o peso dos outros revestimentos e das demais fases do processo.

“A cimentação de revestimentos de 30” é complicada para plataformas do tipo jackup” segundo Garcia (1997), uma vez que o peso da pasta de cimento ultrapassa a resistência das formações superficiais.

Como comentou Santos (2018), na década de 80 a ferramenta Drill-ahead foi desenvolvida. Esta última permitia a perfuração do poço de 26” simultaneamente ao jateamento

do revestimento de 30”, porém ainda havia alguns problemas operacionais que viriam a ser solucionados pelo projeto JET-CAM.

Houve posteriores estudos na área de cimentação, em 1993, que indicaram que o atrito lateral da formação no revestimento jateado seria suficiente para suportar todos os esforços da cabeça de poço, com melhor efeito que a cimentação com alterações operacionais.

É importante conhecer o valor da força de fricção entre o condutor e o solo, uma vez que essa força está inteiramente ligada ao dimensionamento do número de sessões de revestimento que serão assentadas posteriormente. Dessa forma, Akers (2008) determinou alguns pontos essenciais para calculá-la, como resistência ao cisalhamento do solo não afetado pelo jateamento; resistência ao cisalhamento do solo afetado pelo jateamento e a variação da resistência ao cisalhamento ao longo do tempo.

2.2.3 Cravação

Outro método de assentamento do revestimento condutor é a cravação. O método de cravamento é muito utilizado quando o poço possui lâmina d’água rasa.

Para melhor visualização e entendimento, a Tabela 1 mostra a classificação de águas rasas, profundas e ultra profundas, de acordo com a divisão da Petrobrás (2021).

Tabela 1- Classificação da profundidade das águas

Águas rasas	0 a 300 metros
Águas profundas	300 a 1500 metros
Águas Ultra profundas	Acima de 1500 metros

Fonte: Autora (2021).

O método de cravação, de acordo com Malouf (2013), “consiste na utilização de um martelo hidráulico com o objetivo de cravar o condutor no solo de maneira análoga ao que é feito com estacas na construção civil”.

Nesses casos de mares pouco profundos, é muito comum que se faça uso de sondas como plataforma jackup, que usam estruturas apoiadas no fundo marinho (MALOUF, 2013).

“Nestas situações específicas, o processo de jateamento poderia causar uma perturbação no solo próximo às pernas da plataforma, o que poderia comprometer sua estabilidade estrutural. Essa é a principal razão para não se fazer jateamento

nestas circunstâncias e, como nas formações mais rasas e não consolidadas a perfuração convencional não é um processo eficiente no que se refere ao tempo, opta-se pelo processo de cravamento” (MALOUF, 2013).

A técnica, no geral, pode ser realizada de várias maneiras, mas principalmente tanto por martelamento, em que gera essa força axial cíclica sobre a broca, quanto por base torpedo.

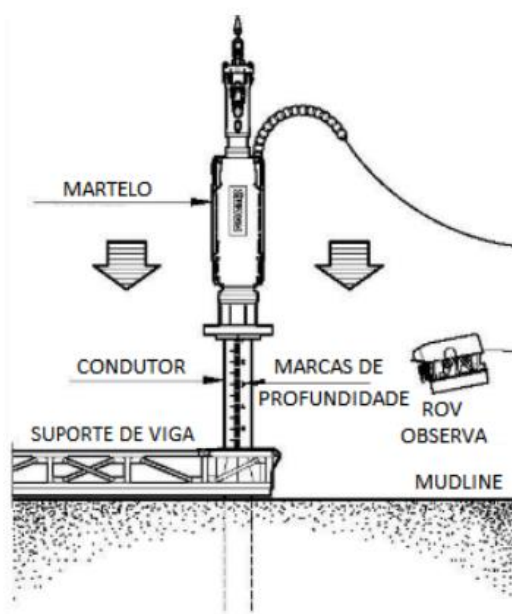
De acordo com Cavalcante (2019), o uso do martelo provoca uma força compressiva, através da transferência da sua energia para o revestimento pelo impacto no seu topo.

Masoumi (2008) também afirma que a cravação por impacto, mais conhecida como martelamento, está relacionada à energia que provém do impacto do martelo, que atinge o topo do condutor com velocidade de impacto descendente.

“Essa energia é transferida por impulso da tampa do condutor para a cabeça do condutor, por isso parte da energia é absorvida pela tampa ou se perde na área de contato entre a tampa e a cabeça do condutor” (SANTOS *et al.*, 2018).

Pode-se observar na Figura 9 a posição do martelo durante a etapa de cravação.

Figura 9 - Martelo durante etapa de cravação



Fonte: Van Noort *et al.* (2009).

A força compressiva atuante pelo martelo, como explicou Cavalcante (2019), tem a função de empurrar gradualmente o revestimento para as formações superficiais, para que seja possível economizar o tempo de perfuração da sonda.

A operação de cravação apresenta diversas vantagens como, principalmente, perturbações menores no solo. De acordo com Malouf (2013), desse modo não é preciso esperar pela expansão dos sedimentos para que haja condições estruturais de se seguir adiante com as perfurações das fases seguintes e é dessa forma que é possível a economia de tempo citada. Além disso, afirma que o cravamento também é benéfico já que possibilita a retirada do condutor do caminho crítico da sonda, deixando uma margem menor para riscos e atrasos.

“Existem padrões muito bem aceitos pela indústria no sentido de determinar a capacidade de suporte de carga pelo condutor assentado através do método de cravamento. A resistência ao peso pode ser facilmente derivada da energia gerada pelo martelo e do número de batidas que foram necessárias para se chegar à profundidade final de assentamento” (MALOUF, 2013).

O martelo é escolhido através da consideração dos danos causados pela fadiga induzida pela cravação. Os danos devido à cravação são mais sensíveis à magnitude das ondas de tensão do que ao número total de golpes (DOYLE, 1999).

“Considera-se fadiga o fenômeno da diminuição da resistência mecânica de material sujeito a variações cíclicas de carregamento. 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. Os valores dessas tensões podem estar abaixo da tensão de escoamento elástico, porém a aplicação cíclica de tensões ocasiona maior deslocamento do condutor” (ZAKERI *et al.*, 2016).

Inicialmente, o equipamento é transportado por meio de uma barcaça especializada. Em seguida, é instalado um template, para que os revestimentos sejam instalados no local exato em que se deseja começar o poço. No caso do martelamento, na sequência, o revestimento, com o martelo acoplado à sua extremidade, é descido através de um barco até o leito marinho - no caso de aplicações em águas profundas isso seria sobre várias centenas de metros de coluna de água. Nessa fase, o revestimento é deixado para penetrar o leito marinho sob ação de seu próprio peso. Finalmente, o martelo hidráulico entra em ação, aplicando golpes à extremidade superior do revestimento de modo a cravá-lo por fim (MALOUF, 2013).

Já a cravação por base torpedo, consiste em permitir que uma estaca com um grande peso seja lançada em queda livre. A Petrobras desenvolveu um sistema de assentamento de revestimento condutor baseado na queda livre desta estaca. Nesse caso, o condutor é cravado pela força gravitacional gerada com a queda (NOGUEIRA *et al.*, 2005).

“A base torpedo possui 30" de diâmetro externo e 26" de diâmetro interno. O equipamento pesa em torno de 43 toneladas

e é descido até cerca de 30m a 60 m de distância do leito marinho, de onde é liberado” CAVALCANTE (2019, *apud*. ROCHA; AZEVEDO, 2009).

As operações de cravamento também podem ser realizadas, algumas vezes, eficiência em lâminas d'água profundas, não sendo mais tão restritas às águas rasas como eram antigamente.

Como exemplo, Santos (2018), mencionou o estudo desenvolvido por Van Noort *et al.* (2009), que se baseou em transportar revestimentos condutores de forma horizontal, em mares profundos, assentando-os em movimento pendular. Dessa forma, os tubos foram soltos em queda livre para cravação no solo com peso próprio e martelados até a profundidade necessária para o projeto.

MALOUF (2013) também discutiu sobre o projeto do parque das conchas no BM-C-10. Este projeto foi precursor neste aspecto e foi realizado o cravamento de um condutor de 36” a uma profundidade de 1929 metros, considerada ultra profunda. No projeto, foram assentados 37 condutores, todos dentro das especificações e com tempo médio de instalação de 9 horas.

Já como outro exemplo, Henke e Grabe (2006) realizaram um estudo tridimensional em “Abaqus”, que é um pacote de software comercial para análise por elementos finito, para diferentes métodos de instalação de estacas (incluindo martelamento) para comparar as implicações da cravação nos parâmetros do solo, como, por exemplo, índice de vazios e tensões. Os pesquisadores utilizaram o modelo Mohr-Coulomb e evidenciaram que o índice de vazios do solo aumentava até uma distância de aproximadamente 0.5 a 1 diâmetro da estaca. Além disso, inferiram que a região afetada pela cravação era superior para outros métodos de instalação.

Como o revestimento condutor é a base na qual serão afixados todos os revestimentos seguintes, além de dar sustentação e segurança para os demais equipamentos e processos, é muito importante o estudo de sua relação com o solo, suas características e resistências.

2.2.4 Solo-Revestimento

A interação entre o revestimento e o solo no qual foi instalado é um aspecto crítico no projeto de um poço de petróleo, já que o colapso do solo pode comprometer a capacidade estrutural de todo o poço e, conseqüentemente, sua segurança operacional.

“Uma análise de interação solo-estrutura tem por objetivo fornecer os deslocamentos reais da fundação, da estrutura e seus

esforços internos. Esses esforços podem ser obtidos diretamente pela análise da interação ou, indiretamente, por meio das pressões de contato. As pressões de contato são as pressões na interface estrutura/solo” (VELLOSO; LOPES, 2004).

“A avaliação de integridade do revestimento condutor deve ser realizada a partir de uma análise acoplada entre a capacidade de carga do solo e a integridade mecânica do sistema de revestimento do poço” (SANTOS *et al.*, 2018).

Segundo Seminotti (2016, *apud* VELLOSO; LOPES, 2010), quando o dimensionamento do projeto é realizado de maneira correta, deve apresentar segurança tanto para os possíveis modos de colapso quanto para deslocamentos que sejam aceitáveis quando em serviço. Assim, um projeto deve levar em conta a segurança para modos de colapso como capacidade de carga e para deslocamentos quando estiverem atuando as cargas de serviço.

Paraíso e Costa (2010) inferem que a capacidade de carga de estacas cravadas é avaliada através de cálculos semiempíricos tendo como base a litologia e parâmetros geomecânicos do solo local.

A capacidade de carga é obtida pelo menor dos valores entre a resistência estrutural do material que compõe o elemento de fundação e a resistência do próprio solo em que se trabalha, como indica Alonso (1991).

“O revestimento condutor deve resistir aos esforços conjuntos provocados pelo peso do próprio sistema, bem como pelos esforços adicionais transferidos pelo riser de perfuração. Para tanto, a capacidade de resistência é função das propriedades mecânicas do solo e da força de fricção lateral entre o revestimento e o solo marinho adjacente” (SANTOS *et al.*, 2018).

Como já dito anteriormente, o estudo do solo relacionado com um sistema de estaca/revestimento é complexo e isso se deve à dependência do tipo de solo, das deflexões da estaca e do nível de carregamento ao longo da estaca.

Os esforços axiais estão relacionados ao próprio peso estático da coluna de revestimento, o que causa uma carga de tensão. Existem também casos de cargas de compressão, devido ao peso da cabeça de poço e BOP e mudança de temperatura (KOCIAN, 1990).

A pressão chamada de Burst existe no interior de um tubo, gerando forças de dentro para fora que são resistidas pela parede do mesmo. Esta pode ser crítica em situações em que se tenha ausência de fluidos no anular ou até mesmo a presença de fluidos muito leves, ou então

em situações em que haja uma pressão predominante de burst associada com compressão do tubo (KOEHLER, 2018).

De acordo com Koehler (2018), os esforços de colapso existem quando a pressão externa supera a interna gerando tensões radiais e tangenciais na parede do revestimento em questão.

“Há quatro categorias, que de acordo com seus índices de esbeltez, são: Colapso de Resistência ao Escoamento, Colapso Plástico, Colapso de Transição e Colapso Elástico” (KOEHLER, 2018).

A transferência de carga da estaca para o solo pode se dar de diversas maneiras, a depender do comprimento e esbeltez das estacas, e do tipo de carregamento a que está sujeita, como define Cabral (2016).

Para carregamentos axiais, para estacas longas, esta começa a se deslocar em sua parte superior. Quando os níveis de carregamento aumentam, outras partes começam a se deslocar e assim o atrito lateral é mobilizado de cima para baixo. A mobilização do atrito lateral independe de deslocamentos grandes, portanto a ponta começa a ser mobilizada (VELOSO; LOPES, 2002).

“Para carregamentos laterais em estacas longas e esbeltas, o comportamento é semelhante, isto é, os deslocamentos vão se desenvolvendo inicialmente na parte superior” (CABRAL, 2016).

Para representar a interação solo-revestimento é geralmente utilizado o modelo proposto por Winkler (1867), consiste no emprego de modelo baseado em estaca cravada no solo.

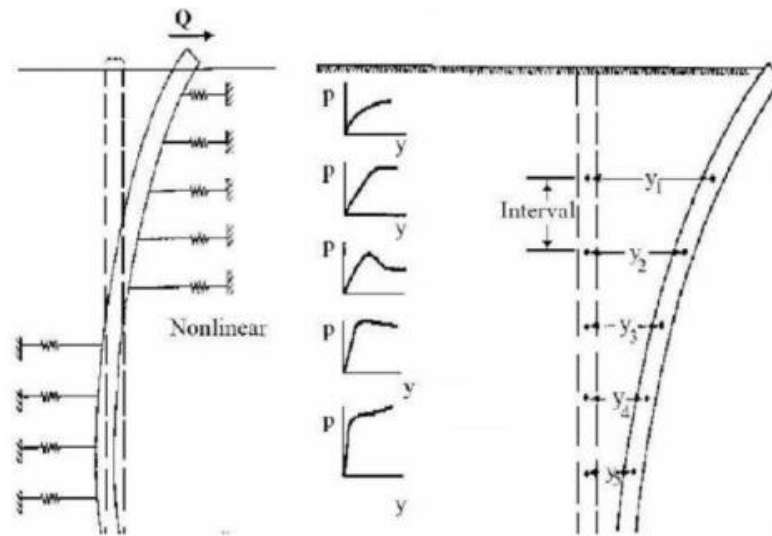
Esse modelo consiste em representar o solo como um sistema de molas elásticas lineares (comportamento elástico), de forma que as reações do solo são proporcionais aos deslocamentos, com coeficientes de reação constante ou variável ao longo da profundidade. Este será o método utilizado no presente trabalho, através da linguagem computacional Python, que facilitará a interface com o SAEP, site educacional em que será trabalhado.

“Winkler foi quem primeiro propôs a representação do solo como um sistema de molas lineares, independentes entre si, com pequenos espaçamentos entre elas, trabalhando no regime elástico. Essa representação é conhecida como Modelo de Winkler, Hipótese de Winkler, Modelo de Molas, ou ainda Modelo do Fluido Denso, uma vez que o comportamento é

similar ao de uma membrana assente sobre um fluido denso.” (CABRAL, 2016).

De acordo com Templeton (2009), o modelo de Winkler representa o comportamento não-linear do solo usando curvas P-y que reproduzem graficamente a relação entre a resistência lateral do solo, representada por P, e o deslocamento (y) lateral correspondente. A Figura 10 ilustra como Winkler consegue representar de forma unidimensional o comportamento do solo empregando uma série de molas independentes com, descritas pelas curvas P-y.

Figura 10 - Curvas representando o solo



Fonte: Santos (2018, *apud.* Sanomia, 2016).

2.2.5 Efeito *setup*

Além da análise dos métodos de assentamento do revestimento condutor, tanto por jateamento ou cravação, é de suma importância estudar o que ocorre após essa instalação, tanto no revestimento, quanto no solo.

Como afirmam Santos *et al.* (2018), o solo apresenta reações em relação à resistência do solo e sofre alterações em relação a sua condição inicial. Essa mudança se dá através de um aumento da capacidade de carga do conjunto solo-revestimento ao longo do tempo. Esse ganho de resistência em função do tempo no final da instalação é chamado de efeito *setup*.

Para enfatizar o conceito do termo, segundo os pesquisadores Silva (2016), Titi e Wathugala (1663), o termo efeito *setup* é definido como o ganho de capacidade de carga de estacas com o tempo, também conhecido por cicatrização do solo ou pelo termo *freeze* em inglês.

Outros diversos estudos foram feitos, a exemplo de autores consagrados na literatura, como Yang (1956) e McClelland (1969), que indicaram acréscimo da capacidade de carga das estacas com o tempo em suas documentações (SILVA, 2016).

Quando a estaca é assentada no solo, o solo adjacente sofre deslocamento e é submetido a tensões. A resistência do solo aumenta à medida que ocorre a dissipação de poropressões, para casos de solos saturados e um excesso de poropressões positivo. Além disso, em solos argilosos, à medida do movimento da estaca, o solo é remoldado e a poropressão aumenta, o que diminui a tensão efetiva. A dissipação do excesso de poropressões é iniciada quando chega o final do processo, a tensão efetiva aumenta e o solo adjacente é consolidado novamente, alcançando um ganho de resistência (LONG *et al.*, 1999).

Alguns autores consideram que o atrito lateral é a responsável pelo aumento da capacidade de carga ao longo do tempo, enquanto outros apontam que a resistência de ponta é o que influencia mais nesse aspecto.

Levando em conta essas considerações, Silva (2016) afirma, então, que são utilizados diferentes conceitos para realmente definir o efeito *setup*, sendo, efeito *setup* a relação entre a capacidade de carga total e a capacidade de carga no final da cravação e o *setup lateral* a relação entre o atrito lateral total e o atrito lateral no final da cravação.

“Os estudos realizados sobre efeito “*Set-up*” apresentam valores muito variáveis em função das características de cada obra; no entanto, observa-se que valores acima de 2 são relativamente comuns e os valores máximos são da ordem de 10” (SILVA, 2016).

No caso de argilas, o *setup* pode variar entre 1,0 a 6,0 e ocorre uma estabilização do ganho de resistência após 100 dias, aproximadamente. Para o caso de areias, o *setup* em muitos casos chega a 2 e, em alguns casos, as estacas ganham capacidade de carga ainda depois de 500 dias (LONG *et al.*, 1999).

2.3 Segurança operacional do poço

Existem inúmeros fatores que podem causar acidentes indesejáveis em um poço de petróleo. Portanto, é necessário um sistema de segurança ainda mais precavido e certo. No caso de um poço, são criadas barreiras de segurança para impedir alguns fatores importunos.

O *kick*, por exemplo, é um fenômeno que ocorre quando os fluidos de formação penetram no poço de maneira não planejada. O *kick* pode evoluir para uma explosão, conhecido

Blowout, se o sistema de segurança não for capaz de manter sua pressão, anulando a integridade e estabilidade do poço.

“Ocorreram muitos acidentes pelo mundo devido a perda de integridade de poço, então surgiu a motivação e a necessidade para o desenvolvimento de regulamentos técnicos e diretrizes que tratassem do gerenciamento de integridade de poço e dessa forma pudessem alinhar as atividades realizadas durante toda a vida do poço com as melhores práticas industriais” (AZEVEDO, 2016).

O sistema de segurança do poço é formado por Equipamentos de Segurança de Cabeça de Poço (ESCP), além de outros equipamentos auxiliares que permitem controlar o poço (THOMAS *et al.*, 2001).

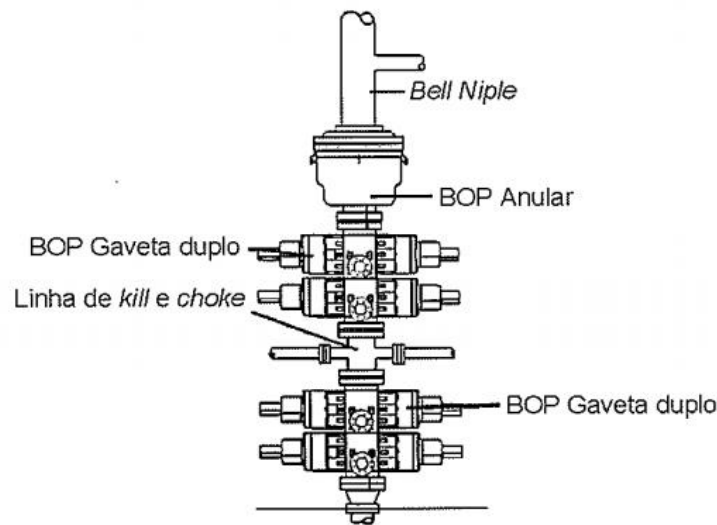
Os equipamentos e técnicas utilizados para completar a segurança operacional do poço são conhecidos como barreiras primárias e secundárias. A barreira primária é determinada como elemento principal na prevenção de acidentes do poço, enquanto a barreira secundária atua como elemento de reforço para atuação em caso de falha da primária.

Para ocorrência de um *Blowout*, o *kick* teria que superar as barreiras primárias que são instaladas nas seções profundas. No caso dessas barreiras falharem e não conterem o *kick* inicial, um sistema de barreira secundária pode impedir que o fluido de formação alcance o ambiente externo. Uma vez que nenhuma dessas barreiras não resistirem, a integridade do poço é perdida, chegando a ocorrer o *Blowout* (ROCHA; SANTOS, 2017).

“A norma NORSOK D-010 (2004) afirma que o sistema de barreira de poço primário é composto pela coluna de fluido de perfuração e o secundário pela coluna de revestimento, o cimento, a cabeça do poço, *riser* de alta pressão e o BOP de perfuração” (ROCHA; SANTOS, 2017).

Como afirmaram Thomas *et al.* (2001), o equipamento mais importante das barreiras é o BOP (*Blowout Preventer*), que consiste em um conjunto de válvulas capazes de fechar o poço. Pode-se conferir um sistema de BOP na Figura 11.

Figura 11 - Sistema convencional de BOP



Fonte: THOMAS *et al.* (2001).

Esses preventores serão acionados sempre que houver a ocorrência do *kick* e, caso venha a ocasionar o *Blowout*, o poço pode sofrer consequências como danos aos equipamentos da sonda, acidentes pessoais, danos ao meio ambiente e perda do poço (THOMAS *et al.*, 2001).

Na perfuração do poço, quando ocorre um *kick*, a primeira barreira que o fluido encontra é o fluido de perfuração. A coluna de fluido de perfuração deve ter pressão suficiente para evitar o fluxo na direção interna do sistema, para que o sistema de barreira do poço primário não venha a falhar. Se em um poço, a última coluna de revestimento ainda não foi cimentada, a possível falha da coluna de revestimento pode expor a formação ao fluido intruso (ROCHA; SANTOS, 2017).

Por tal importância, o presente trabalho tem objetivo de analisar os parâmetros de revestimento do poço, respeitando a integridade e segurança do sistema.

3. METODOLOGIA

O trabalho foi dividido em etapas. Inicialmente, foi necessário analisar qual método seria mais eficaz para alcançar os objetivos principais. As etapas foram:

- Definição do método – Modelo de Winkler;
- Escolha da linguagem computacional – Python;

- Montagem do código;
- Interface gráfica para o SAEP – Winkler;
- Interface gráfica para o SAEP – Efeito *setup*.

A interface gráfica para o SAEP foi realizada com apoio de outros pesquisadores do Laboratório LCCV, equipe da Engenharia de Computação, que utilizaram para seu front-end basicamente a linguagem HTML, CSS e JavaScript

3.1 Modelo de Winkler

Como dito, o modelo utilizado no presente trabalho foi o de Winkler. Foram determinadas metodologias para o prosseguimento da pesquisa, como, por exemplo, as equações do modelo para terrenos argilosos. Para o caso de assentamento de revestimento condutor em tais terrenos, no modelo de Winkler (1867) a capacidade axial última do revestimento condutor (Q) é influenciada à expressão de resistência ao atrito lateral, uma vez que o sistema de fundação do poço-revestimento é considerado perfil aberto, desprezando-se a contribuição de ponta na resistência axial. Dessa forma, têm-se as Equações 1.0 e 2.0, com obtenção final da Resistência ao Atrito Lateral, em que os parâmetros estão especificados no Quadro 1.

$$Q = \pi D \int_0^L f dx \quad (1.0)$$

$$f = \alpha S_u \quad (2.0)$$

Quadro 1 - Parâmetros das equações de Winkler

D	Diâmetro externo
S_u	Resistência ao cisalhamento não drenada do solo
α	Coefficiente adimensional
f	Resistência ao Atrito Lateral
L	Comprimento da coluna

Fonte: Autora (2021).

Percebe-se, através das Equações 1.0 e 2.0, que a capacidade de carga axial última está altamente relacionada à resistência ao cisalhamento não drenada do solo S_u e do coeficiente adimensional. Neste contexto, será utilizado a norma API/RP 2A-WSD:2005, que define o valor do parâmetro adimensional com base nos seguintes intervalos limites da resistência ao cisalhamento não drenada do solo, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Valores utilizados para o coeficiente adimensional

<i>Coeficiente adim.</i>	<i>Condição</i>
1	$S_u < 23,95 \text{ kPa}$
$[1,25 - (0,01 * S_u)]$	$23,95 < S_u < 71,85 \text{ kPa}$
0,5	$S_u > 71,85 \text{ kPa}$

Fonte: Autora (2021).

É necessário avaliar com rigor os mecanismos e parâmetros do modelo, uma vez que podem ser alterados em função da interação solo-revestimento.

A metodologia de Winkler foi desenvolvida através da linguagem Python, sendo o código implementado através das equações matemáticas apresentadas, utilizando, principalmente, o parâmetro de Resistência não Drenada do Solo, como dado de entrada do problema, para a obtenção da Resistência ao Atrito Lateral (f). O Python foi usado para implementar a nova ferramenta no site SAEP e parte do código está ilustrada na Figura 12.

Figura 12 - Código implementado para obtenção da Resistência ao Atrito Lateral

```

1  # -*- coding: utf-8 -*-
2  """
3  Created on Thu Jul 16 08:37:23 2020
4
5  @author: Janaína Figueiredo
6  """
7  #Resistência ao atrito lateral - f
8  #Su = Resistência não drenada do solo (kPa)
9  try:
10     #Usuário insere a resistência não drenada do solo
11     Su=float(input('Digite a Resistência não drenada do solo:'))
12
13     #Condições para a fórmula
14     if Su <= 23.95:
15         f = Su
16         print ('Resistência ao atrito Lateral:', f , ' kPa')
17     elif Su >= 71.85:
18         f= 0.5*Su
19         print ('Resistência ao atrito Lateral:', f, ' kPa')
20     else:
21         f = (1.25-0.01*Su)*Su
22         print ('Resistência ao atrito Lateral:', f, ' kPa')
23
24     #Condições de erro
25 except ValueError:
26     print ('ERRO! Digite novamente:')

```

Fonte: Autora (2021).

3.2 Efeito *setup*

Como foi dito na seção 2.2.5, o efeito *setup* está relacionado ao ganho de carga da estaca ao longo do tempo. Visto isso, o trabalho visa implementar o fator do efeito *setup* na ferramenta criada.

Dentre outros estudos e consequentes equações, Lee *et al.* (2019) expôs equações para indicação do efeito *setup* em estacas instaladas no solo e levou em consideração dados de estudos passados. A Equação 3.0 representa uma dessas equações correspondentes à capacidade de carga, sendo as variáveis esclarecidas no Quadro 2.

$$Q = Q_o + Q_o \cdot A \cdot \log (t/t_o) \quad (3.0)$$

Quadro 2 - Parâmetros da equação de *setup*

Q	Capacidade de carga no tempo final
Q_o	Capacidade de carga no tempo inicial
A	Fator empírico
t_o	Tempo inicial
t	Tempo final

Fonte: Autora (2021).

Além desta, a Equação que será utilizada para o desenvolvimento da ferramenta também relaciona a capacidade de carga com o tempo e está descrita na Equação 4.0, com seus parâmetros especificados no Quadro 3.

$$Q_t = Q_{f.c.} \cdot 1,1 \cdot t^\beta \quad (4.0)$$

Quadro 3 - Parâmetros da Equação 4.0.

Q_t	Capacidade de carga no tempo t
$Q_{f.c.}$	Capacidade de carga no final da cravação
β	Fator empírico

Fonte: Autora (2021).

O Python foi usado novamente para acrescentar o efeito *setup* na ferramenta, utilizando a Equação 4.0 para completar o código, como mostra a Figura 13.

Figura 13 - Código completo com equação de *setup*

```

58 """
59 * entradas:
60 qfc = capacidade de carga no final da cravacao
61 beta = fator empirico
62 t = tempo
63
64 * retorno:
65 Capacidade de Carga no tempo t
66 """
67
68 def equacaoDeSetup(qfc, beta, t)
69     return qfc * 1.1 * t**beta
70 """

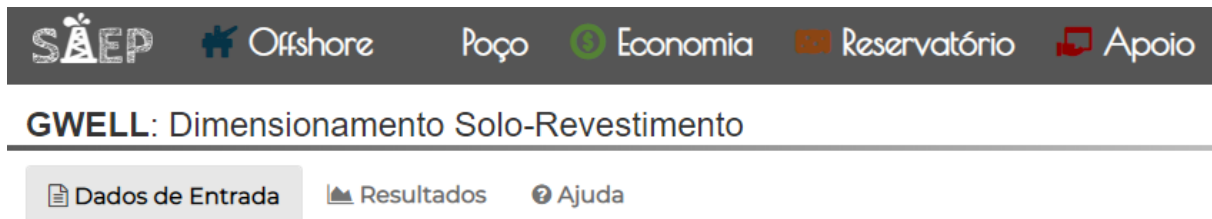
```

Fonte: Autora (2021).

4. RESULTADOS

Como foi comentada ao longo do trabalho, a nova ferramenta “GWELL” foi adicionada ao site SAEP, como mostra a Figura 14, para o dimensionamento solo-revestimento, sendo a letra G remetida a solo, “*ground*” em inglês.

Figura 14 - Entrada do site SAEP - ferramenta “GWELL”



Fonte: Autora (2021).

Para cada Resistência (S_u) do Solo, há uma correspondente profundidade deste. Portanto, no SAEP, na ferramenta “GWELL”, o usuário do site também deverá digitar a profundidade correspondente como dado de entrada, além do número de amostras que o usuário deseja, como mostra na Figura 15.

Figura 15 - Dados de entrada para obtenção da Resistência ao atrito lateral.

The screenshot shows the 'Dados de Entrada' tab of the GWELL software. At the top, there are three tabs: 'Dados de Entrada', 'Resultados', and 'Ajuda'. Below the tabs, there is a section for 'Número de Amostras' (Number of Samples) with a text input field containing the value '5' and a button labeled 'Enviar'. Below this is a section for 'Dados Operacionais' (Operational Data) which is a table with two columns: 'Su' and 'Profundidade'. The table has five rows, each with empty input fields for data entry.

Fonte: Autora (2021).

Após a inserção dos dados, o usuário obterá os resultados na aba “Resultados” (Figura 16) ao lado, em que o site devolve as determinadas Resistências ao Atrito Lateral para cada profundidade inserida, além do gráfico Resistência x Profundidade.

Figura 16 - Resultados da ferramenta “GWELL”

The screenshot shows the 'Resultados' tab of the GWELL software. At the top, there are three tabs: 'Dados de Entrada', 'Resultados', and 'Ajuda'. Below the tabs, there is a section for 'Resultados' with a table. The table has two columns: 'Resistência ao atrito lateral (kPa)' and 'Profundidade'. The table is currently empty. At the bottom of the interface, there is a footer that reads 'Sistema de Aplicações de Engenharia de Petróleo - SAEP.'

Fonte: Autora (2021).

Além disso, em outra aba foi adicionado o parâmetro que se relaciona ao efeito *setup*, através do acréscimo da equação no código do Python.

Para tal, foi acrescentado os dados de entrada $Q_{f.c.}$ e o tempo t que o usuário deseja analisar a capacidade de carga do solo, além do parâmetro adimensional β . A Figura 17 mostra a aba relacionada ao efeito *setup*, com os devidos campos para os dados de entrada serem preenchidos.

Figura 17 - Área do “GWELL” direcionada ao efeito *setup*

Equação de Setup

QFC β Tempo

Redefinir **Enviar**

Fonte: Autora (2021).

Após a inserção dos dados de entrada na ferramenta, o site retorna o resultado pedido, mostrando o ganho de carga da estaca ao longo do tempo, na configuração mostrada na Figura 18.

Figura 18 - Resultado da ferramenta de ganho de capacidade de carga

Resultados

Resistência ao atrito lateral (kPa)

Resultado Setup

Fonte: Autora (2021).

4.1 Estudo de Caso

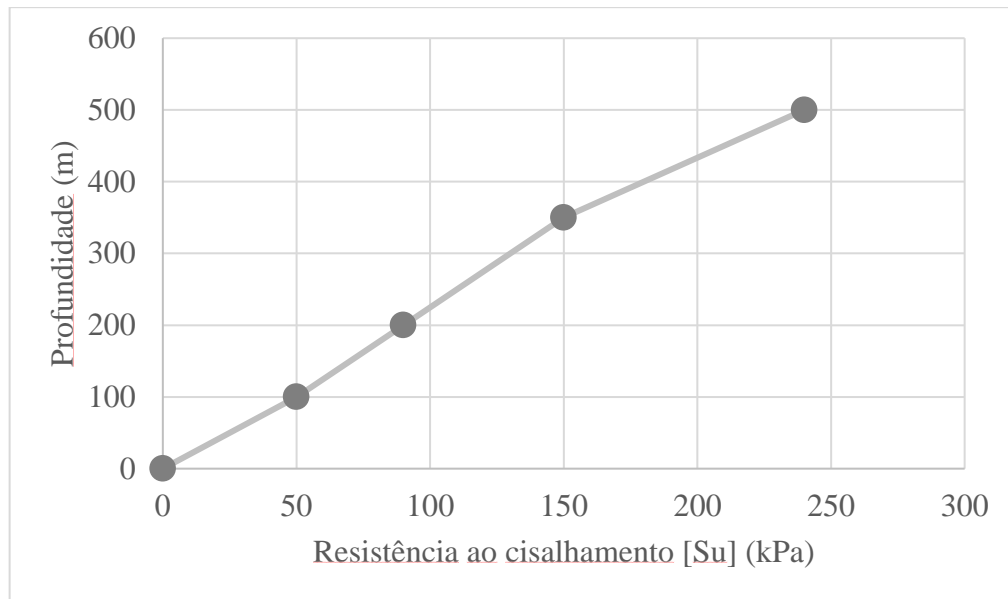
Para ilustrar a potencialidade da ferramenta, foi avaliado um estudo de caso, inicialmente para a seção relacionada ao conjunto solo-revestimento, para obtenção da Resistência Lateral ao Atrito.

Posteriormente, foi feito um novo estudo de caso para avaliar o efeito *setup* através da ferramenta.

4.1.1 Resistência ao Atrito Lateral

Para o primeiro estudo, foram consideradas 5 seções para 1 exemplo de poço, com 5 conjuntos de valores diferentes de S_u e de Profundidade, como se segue na Figura 19.

Figura 19 – Gráfico da Resistência ao atrito lateral pela Profundidade



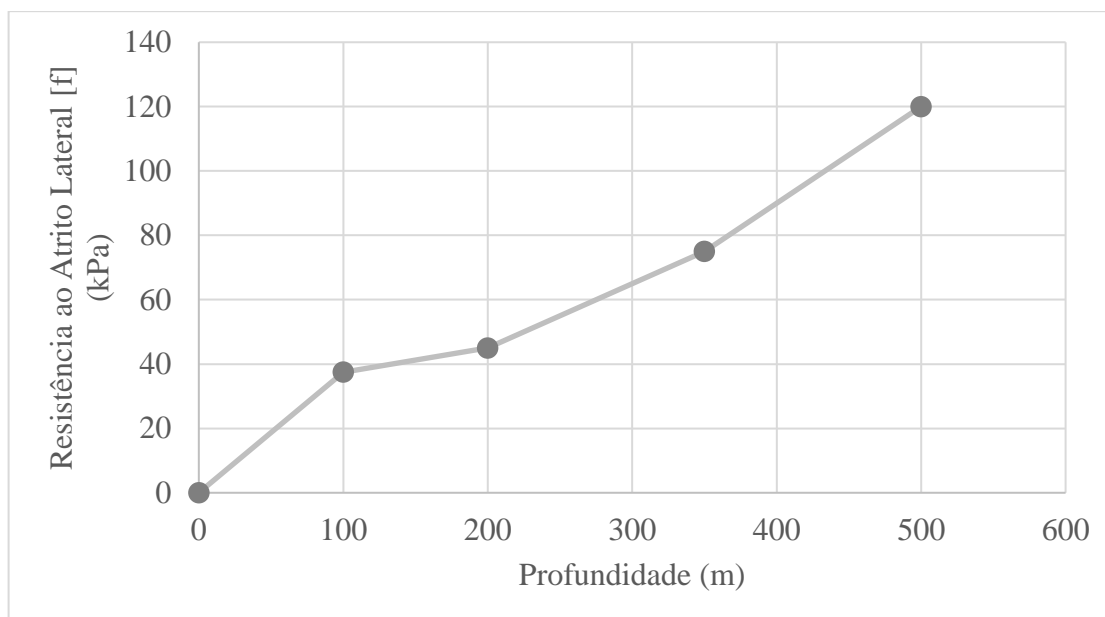
Fonte: Autora (2021).

Com esses dados inseridos no “GWELL”, o aplicativo gera o resultado para o usuário, na seção “Resultados”. Com os dados do estudo de caso, para cada conjunto de Resistência ao cisalhamento não drenada do solo S_u x Profundidade, tem-se a Resistência ao atrito lateral correspondente, mostrada nas Figuras 20 e 21.

Figura 20 - “Resultados” do 1º estudo de caso

Profundidade	Resultados
0 m	Resistência ao atrito lateral (kPa)
100 m	0 kPa
200 m	37.5 kPa
350 m	45 kPa
500 m	75 kPa
	120 kPa

Fonte: Autora (2021).

Figura 21 – Gráfico do resultado do 1º estudo de caso

Fonte: Autora (2021).

Assim, com a Resistência ao atrito lateral descoberta, pode-se concluir se o solo terá capacidade ou não para a carga que o usuário deseja utilizar. Por exemplo, na segunda seção, com a Resistência ao cisalhamento não drenada do solo sendo 50 kPa, obteve-se uma Resistência ao atrito lateral de 37.5 kPa. Isso significa que este determinado solo suporta uma carga de até 37.5 kPa.

Com isso, o usuário pode inferir qual é a carga segura para submeter seu solo. Assim, o sistema do poço estará em equilíbrio e estabilidade.

4.1.2 Efeito *setup*

Para o efeito *setup*, foram avaliados 2 casos com dados diferentes. Os dados de entrada utilizados para o estudo na Tabela 3, considerando o fator empírico alfa variando entre -0.006 até 6.25 para diversos tipos de solo.

Tabela 3 – Dados de entrada para obtenção do efeito *setup*

Cap. de Carga Inicial $Q_{f.c.}$ [kPa]	Fator empírico β	Tempo t [h]
50	1,25	1
70	1,6	1,5

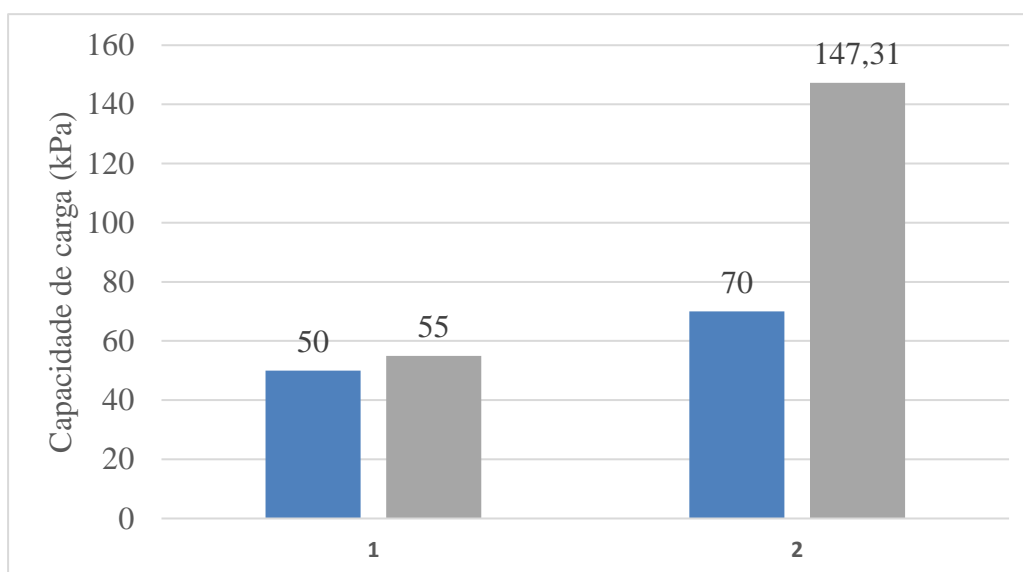
Fonte: Autora (2021).

Os conjuntos [$Q_{f.c.} \times \beta \times t$] descritos foram exatamente [50; 1,25; 1] e [70; 1,6; 1,5], sendo o tempo dado em horas e a capacidade de carga no final da cravação em kPa. Com esses dados inseridos no “GWELL”, o aplicativo retorna o resultado para o usuário, na seção “Resultados”, como já ilustrado. Com os dados do estudo de caso, para cada conjunto de $Q_{f.c.} \times \beta \times t$, tem-se a Capacidade de carga final (Q_t) correspondente, mostrado nas Figuras 22 e 23.

Figura 22 – Resultado do ganho de capacidade de carga no tempo t

```
Resultado Setup
55.00000000000001
147.31152982227886
```

Fonte: Autora (2021).

Figura 23 – Gráfico do resultado do 2º estudo de caso

Fonte: Autora (2021).

O “GWELL” calcula o valor da capacidade de carga final, Q_t . Com esse dado, é possível comparar a capacidade no início ($Q_{f.c.}$) e no final do ganho de carga (Q_t), fazendo a relação entre as duas, como mostra a Equação 5.0.

$$setup = \frac{Q_t}{Q_{f.c.}} \quad (5.0)$$

Dessa forma, no primeiro conjunto de dados, em que o $Q_{f.c.}$ é igual a 50 kPa, o efeito *setup* equivale a $55/50$, o que equivale a, aproximadamente, 10% de ganho de capacidade de carga (*setup* igual a 1,1).

No segundo caso, em que $Q_{f.c.}$ é igual a 70 kPa, o efeito *setup* pode ser definido por $147,31/70$, que equivale a, aproximadamente, o dobro de ganho de capacidade de carga em relação ao final da cravação (*setup* igual a 2,1).

5. CONCLUSÕES

A ferramenta “GWELL” desenvolvida no SAEP pode gerar informações muito importantes para as etapas de perfuração e instalação, além da etapa de produção de petróleo. A aplicação apresentou resultados claros a respeito da relação solo-revestimento, possibilitando que o usuário consiga obter dados ainda não conhecidos. Isso indica uma alta segurança para todo o sistema e projeto de poço, uma vez que possibilita ao usuário conhecer as características físicas do solo em que está trabalhando.

Na aba direcionada à Resistência ao Atrito Lateral, foi possível obter a carga máxima em que o solo suporta os carregamentos submetidos. Com esse dado, o usuário pode concluir qual tipo de material utilizar para o revestimento, de acordo com suas propriedades, garantindo uma alta segurança para o processo de assentamento e total construção do poço.

O modelo de Winkler foi suficientemente eficaz e trouxe o resultado esperado. A equação envolveu parâmetros simples e de fácil entendimento, de forma que usuário deva preencher dados facilmente conhecidos para obter a resistência procurada.

Normalmente, a resistência lateral do solo aumenta à medida que a profundidade aumenta. No estudo de caso, foi possível verificar o fato, uma vez que a Resistência ao Atrito Lateral aumentou à medida em que se aprofundava.

No incremento relacionado ao efeito *setup*, o usuário é capaz de analisar a capacidade de ganho de carga do solo trabalhado ao longo do tempo de produção. Quando a estaca é assentada no solo, o solo adjacente sofre deslocamento e é submetido a tensões. Foi possível perceber que à medida do movimento da estaca, o solo é remoldado e a poropressão aumenta, o que diminui a tensão efetiva. A dissipação do excesso de poropressões é iniciada quando chega ao final do processo, a tensão efetiva aumenta e o solo adjacente é consolidado novamente, alcançando um ganho de resistência.

Assim, obter informações sobre esse ganho de carga faz com que o usuário tenha um conhecimento ainda maior sobre o solo e suas alterações. Isso resulta em ainda mais segurança para o todo o sistema e projeto de poço, uma vez que será possível conhecer o solo em vários cenários, incluindo as configurações antes e depois do assentamento do revestimento.

Nos estudos de caso, os ganhos de capacidade de carga (*setup*) foram de 1,1 e 2,1, o que se encontra dentro do esperado. Normalmente, espera-se um aumento na ordem de 1,1, 1,5, podendo chegar até 6, dependendo do tipo de solo e/ou argila. Ocorre uma estabilização do ganho de resistência após, aproximadamente, 100 dias.

Em suma, toda a aplicabilidade teve como propósito, principalmente, o auxílio educacional, para que alunos relacionados à Engenharia de Petróleo, ou Engenharia correlata, possam testar e adquirir maiores conhecimentos sobre o processo de dimensionamento do revestimento de um poço relacionado à carga do solo.

Devido aos grandes benefícios que a ferramenta “GWELL” pode trazer para a área da Engenharia, é importante que a ferramenta ainda continue sendo implementada com demais métodos, efeitos e variáveis.

Como dito, a segurança operacional é um fator imprescindível para a construção de poços de petróleo. Esse processo requer tecnologias altíssimas, ampla necessidade de profissionais qualificados, o que traz a alta demanda de técnicas de segurança. Assim, a criação do “GWELL” teve como base o auxílio para maior segurança na etapa de instalação de revestimento.

Devido aos grandes benefícios que a ferramenta “GWELL” pode trazer para a área da engenharia, é importante que a ferramenta ainda seja implementada com demais métodos, efeitos e variáveis. Por exemplo, para o efeito *setup* pode-se inserir outras equações, de outros autores, para aumentar a eficácia e a precisão da análise. Para obtenção da Resistência ao Atrito Lateral, podem ser inseridos outros métodos, além do Modelo de Winkler, para oferecer ao usuário outras possibilidades de resposta, com possíveis comparações entre elas. Novos incrementos como estes, trariam uma aplicabilidade ainda maior para a ferramenta.

Por fim, pela eficácia e comprovação prática, a nova ferramenta web pode ser utilizada pelos professores nas salas de aula, em projetos de pesquisa, ou estudos correlatos, o que a tornará bastante favorável no meio educacional e trará benefícios para o conhecimento e a prática.

6. REFERÊNCIAS

ALONSO, U. R. **Previsão e Controle das Fundações**. Editora, Edgar Blucher Ltda., 1991, p. 108-130

Akers, Thomas Jay. "**Jetting of Structural Casing in Deepwater Environments: Job Design and Operational Practices.**" *SPE Drill & Compl* 23 (2008): 29–40. doi: <https://doi.org/10.2118/102378-PA>

AZAR, Jamal J.; ROBELLO, Samuel G. **Drilling engineering**. 2007. 251 p. ISBN: 978-1-59370-072-0.

AZEVEDO, Matheus Medeiros de. **ANÁLISE COMPARATIVA DE INTEGRIDADE DE POÇO ENTRE O REGULAMENTO TÉCNICO SGIP E A NORSOK STANDARD D-010**. 2016. 55 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Petróleo) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

BOURGOYNE JUNIOR, Adam T. *et al.* **Applied Drilling Engineering**. California: Society Of Petroleum Engineers, 1986. (ISBN: 1-55563-001-4).

BRANCO, Pércio de Moraes. **Petróleo**. 2014. 1 v., Cprm, Distrito Federal, 2014. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/CPRM-Divulga/Canal-Escola/Petroleo-1256.html>. Acesso em: 25 jun. 2021.

CABRAL, Flávia Emilia Siqueira. **ANÁLISE DA ESTABILIDADE E DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA APLICADA A ESTACAS DE UM PÍER**. 2016. 99 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

CAVALCANTE, Raíssa Victória de Melo. **CONDIÇÕES PARA CRAVAR UM REVESTIMENTO CONDUTOR**. Maceió, 2019. 21 p.

COSTA, Jeremias Christian Honorato. **SISTEMA DE APLICAÇÕES DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO (SAEP): MÓDULO POÇO**. 2016. 78 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Petróleo), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

DOYLE, E. H. “Pile installation performance for four TLP’s in the Gulf of Mexico”. Em: **Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference 1** (1999), pp. 393–401. doi: 10.2118/0899-0045-jpt.

ESTIVALET, Vinicius Martins de Oliveira. **COMPARAÇÃO DE MODELOS DE ANÁLISE DE ESTACAS CARREGADAS TRANSVERSALMENTE**. 2016. 56 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria Rs, 2016.

GARCIA, J. E. “**A completção de poços do Mar**”. Em: Apostila Petrobras (1977).

HENKE, S; Grabe, J. “Simulation of pile driving by 3-dimensional finite-element analysis”. Em: **Proceedings of 17th European Young Geotechnical Engineers’ Conference**, Zagreb, Croatia, ed. by V. Szavits-Nossan, Croatian Geotechnical Society. 2006, pp. 215–233.

IRAMINA, Wilson Siguemasa. **EXERCÍCIOS SOBRE PRESSÃO DE POROS**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2016. Color.

KOCIAN, E. M., *et al.*, Compressive Loading Casing Desing. **IADC/SPE Drilling Conference**, Texas, EUA, 1990.

KOEHLER, Leonardo Pereira. **PROJETO DE REVESTIMENTO DE POÇOS E SUAS ESPECIFICIDADES**. 2018. 80 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica}, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018.

LEE, L. M.; Ming, J. W. S.; Ti, K. S.; Leong, L. T.; Wai, Y. T. “Empirical equations for predicting pile/soil setup effect”. Em: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 527** (2019).

LONG, J. H.; Kerrigan, J. A.; Wysockey, M. H. “Measured time effects for axial capacity of driven piling”. Em: **Transportation research record 1663.1** (1999), pp. 8–15.

MASOUMI, H. “**Numerical modeling of free field vibrations due to pile driving**”. Tese de doutoramento. 2008.

MALOUF, Leonardo Rezende. **ANÁLISE DAS OPERAÇÕES DE PERFURAÇÃO DE POÇOS TERRESTRES E MARÍTIMOS**. 2013. 138 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Petróleo), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

MCCLELLAND B, FOCHT JA, EMRICH WJ (1969) Problems in design and installation of offshore piles. **Journal of soil mechanics foundation division** 95: 1491-1514

MEDEIROS, Caio Yuri da Silva; SANTOS, João Paulo Lima. AVALIAÇÃO INTEGRADA DA ESTABILIDADE DO REVESTIMENTO CONDUTOR DE POÇOS DE PETRÓLEO. In: CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 36., 2015, Rio de Janeiro. **CILAMCE**. Rio de Janeiro: Abmec, 2015. p. 1-5.

MITCHELL, Robert F; MISKA, Stefan Z. **FUNDAMENTALS OF DRILLING ENGINEERING**. 12. ed. Spe Textbook Series, 2011. 710 p. 12 v. (ISBN 978-1-55563-207-6).

NOGUEIRA, E. F.; BORGES, A. T.; JÚNIOR, C. J. M. et al. **BASE TORPEDO: Um novo método para instalação do revestimento condutor**. BOLETIM TÉCNICO DA PRODUÇÃO DE PETRÓLEO, Rio de Janeiro. Volume 3, nº 2, p. 327-350. Disponível em: http://www.pbpublishing.com.br/uploads/PublishedContent/BPPT/V3/V3N2/10-Emmanuel_Nogueira.pdf

ON ECPLAZA (China) (org.). **Yantai Chenhang Import & Export Co.,Ltd**. 2006. Disponível em: <https://lpyantai.en.ecplaza.net/>. Acesso em: 07 jul. 2021.

OLIVEIRA, Hermes. **Colunas de Revestimento**. Jorge Amado: Unijorge, 2017. 21 slides, color. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/43211839/aula-4-colunas-de-revestimento>. Acesso em: 01 jul. 2021.

PARAÍSO, Sérgio C.. A Eficácia do Ensaio de Carregamento Dinâmico na Avaliação do Efeito de “Setup” em Estacas Cravadas. **Cobramseg - ENGENHARIA GEOTÉCNICA PARA O DESENVOLVIMENTO, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE**, 8 f. Belo Horizonte, 2010.

PETROBRÁS (Rio de Janeiro) (org.). **Conheça os diferentes tipos de poços de petróleo e gás natural**. 2015. Disponível em: <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/conheca-os-diferentes-tipos-de-pocos-de-petroleo-e-gasnatural>. Acesso em: 22 jun. 2021.

ROCHA, Adriano da Silva; SANTOS, João Paulo Lima. COMPUTATIONAL MODULE FOR RELIABILITY CALCULATION OF WELL DRILLING FLUIDS AND CASING TUBES. In: **XXXVIII IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING**, 38., 2017, Florianópolis. Florianópolis: Abmec, 2017. 5 p.

SANTOS, João Paulo Lima; BARBOZA, Aline da Silva Ramos; LAGES, Eduardo Nobre *et al.* **Técnicas de modelagem numérica aplicadas a estimativa de propriedades de solo para projetos de poços de petróleo**. Maceió: Laboratório de Computação Científica e Visualização, Relatório interno, 2020.

SEMINOTTI, Pablo. **ESTACAS CARREGADAS TRANSVERSALMENTE: COMPORTAMENTO E DIMENSIONAMENTO QUANDO EXECUTADAS EM SOLOS RESIDUAIS**. 2016. 94 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

SILVA, Pedro Cavalheiro Ribeiro da. **Avaliação do efeito “set-up” em estacas cravadas em solos argilosos através da teoria da expansão da cavidade cilíndrica**. 2016. 193 f. Dissertação (Mestrado em Ciências), Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

TAVARES, Rogério Martins. **Interpretação e Análise de Dados de Perfuração em Poços de Petróleo**. 2006. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo), Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

TEMPLETON, J. S. “Finite element analysis of conductor/seafloor interaction”. Em: **Offshore Technology Conference**. Offshore Technology Conference. 2009.

THOMAS, José Eduardo. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 2ª Ed. Rio de Janeiro. Interciência: PETROBRAS, 2004. 143 p.

TITI HH, Wije Wathugala G. Numerical Procedure for Predicting Pile Capacity—Setup/Freeze. **Transportation Research Record**. 1999;1663(1):25-32. doi:10.3141/1663-04

VELLOSO, D.A., LOPES, F.R., 2002, **Fundações Profundas**. Vol2. Rio de Janeiro. COPPE-UFRJ.

VELLOSO, D.A., LOPES, F.R., 2004, **Fundações**. Vol.1-Nova edição. Rio de Janeiro. Oficina de textos.

YANG, J.; Liu, S. J.; Zhou, J.; Wang, P.; Tang, H.; Luo, J.; Zhang, B.; Zhou, C. et al. “Research of conductor setting depth using jetting in the surface of deepwater”. Em: **International Oil and Gas Conference and Exhibition in China**. Society of Petroleum Engineers. 2010.

YANG, NAI-CHEN (1956). Redriving Characteristics of Piles. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, Vol. 82, Paper 1026, SM 3, ASCE.

ZAKERI, A.; Clukey, E. C.; Kebabze, E. B.; Jeanjean, P. “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”. Em: **Applied Ocean Research** 57 (2016), pp. 78–95.