



Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

DANIEL PINHO DE PAULA

DIEGO DONELLI DE OLIVEIRA MARTINS

GUILHERME LOURES MARTINS

MARINA DA SILVA GONÇALVES

**ESTUDO DE TÉCNICAS CONSTRUTIVAS E EXECUÇÃO DE
FUNDAÇÕES SUBMERSAS NO BRASIL**

BELO HORIZONTE

2023

DANIEL PINHO DE PAULA
DIEGO DONELLI DE OLIVEIRA MARTINS
GUILHERME LOURES MARTINS
MARINA DA SILVA GONÇALVES

**ESTUDO DE TÉCNICAS CONSTRUTIVAS E EXECUÇÃO DE
FUNDAÇÕES SUBMERSAS NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Pontifícia
Universidade Católica de Minas Gerais como
requisito parcial à obtenção do título de
Engenheiro Civil.

Orientador (a): Prof.^a Dr^a. Juliana Torres de Oliveira Bonaldo

BELO HORIZONTE
2023

DANIEL PINHO DE PAULA
DIEGO DONELLI DE OLIVEIRA MARTINS
GUILHERME LOURES MARTINS
MARINA DA SILVA GONÇALVES

**ESTUDO DE TÉCNICAS CONSTRUTIVAS E EXECUÇÃO DE
FUNDAÇÕES SUBMERSAS NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil da
Pontifícia Universidade Católica de Minas
Gerais como requisito parcial à obtenção do
título de Engenheiro Civil.

APROVADO EM: _____ / _____ / _____

Banca Examinadora

Juliana Torres de Oliveira Bonaldo

Kelson Pothin Wolff

Felipe Souza Abreu

BELO HORIZONTE

2023

RESUMO

As fundações submersas são técnicas construtivas que consistem na elaboração de estruturas utilizadas em construções que exigem suporte em solos de baixa capacidade de carga e em ambientes subaquáticos, como rios, mares, lagos ou áreas alagadiças. Essas fundações são projetadas para resistir aos esforços da água e do solo e proporcionar uma base segura e estável para a construção de estruturas como obras portuárias, obras offshore, píeres, entre outras. Neste trabalho foram abordados os diferentes tipos e usos de fundações submersas, incluindo estacas cravadas, estacas escavadas e tubulões, que são escolhidos sempre com base no contexto da construção, considerando-se as condições do solo e das águas em que serão assentados, bem como as técnicas construtivas dessas fundações e procedimentos.

Palavras-chave: Tubulão a ar comprimido, Estacas cravadas, Estaca por Circulação Reversa

ABSTRACT

Submerged foundations are constructive techniques that consist in the construction of structures used in constructions that require support in soils with low load capacity and in underwater environments, such as rivers, seas, lakes or wetlands. These foundations are designed to resist water and soil efforts and provide a safe and stable base for the construction of structures such as port works, offshore works, piers, among others. This work will address the different uses of submerged foundations, the different types of foundations, including driven piles, excavated piles, caissons, among others, which are chosen based on the soil and water conditions in which they will be built, as well as the techniques constructive, procedures and quality control acceptance.

Keywords: Caissons foundations, Driven Piling, Reverse Circulation Drilling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Bloco de fundação.	15
Figura 2 - Sapata Isolada.	15
Figura 3 - Sapata Corrida.	16
Figura 4 - Sapata Associada.	16
Figura 5 - Radier.	17
Figura 6 - Tubulão a céu aberto.	18
Figura 7 - Tubulão Ar Comprimido.	20
Figura 8 - Cravação de Estacas Centrifugadas Pré-fabricadas.	22
Figura 9 - Cravação de Estacas Metálica Tubular.	23
Figura 10 - Horatius Cocles defendendo a ponte	24
Figura 11 - Prova de Carga Dinâmica (PDA) em Estacas Escavadas com camisa metálica.	26
Figura 12 - Estaca escavada por Circulação Reversa.	29
Figura 13 - Estaca Hélice Contínua Monitorada.	30
Figura 14 - Ponte Chepstow Bridge.	32
Figura 15 - Ponte de Igapó.	33
Figura 16 - Ponte Rio-Niterói.	34
Figura 17 - Limpeza da Camada Vegetal.	37
Figura 18 - Aterro Provisório.	38
Figura 19 - Escavação dos Poços Primários.	38
Figura 20 - Montagem da Armação.	39
Figura 21 - Fechamento da Forma Externa.	39
Figura 22 - Concretagem da 1 ^a Seção de Camisa de Concreto Armado.	40
Figura 23 - Término da Concretagem e Desforma.	41
Figura 24 - Estrutura de Carga para Apoio na Descida dos Colaboradores.	42
Figura 25 - Escavação do Tubulão.	42
Figura 26 - Instalação do Gabarito.	43
Figura 27 - Montagem da Armação da Próxima Seção.	44

Figura 28 - Instalação da Campânula	45
Figura 29 - Campânula Montada.....	45
Figura 30 - Portinhola de Entrada para Trabalhos Hiperbáricos	46
Figura 31 - Local de saída de material da campânula.....	47
Figura 32 - Descida a base do tubulão.....	47
Figura 33 - Montagem da campânula com caminhão Munck.....	48
Figura 34 - Escoramento da base.	49
Figura 35 - Acoplagem metálica.....	50
Figura 36 - Detalhe externo das campânulas montadas	55
Figura 37 - Campânula dupla acoplada	56
Figura 38 - Início da compressão	57
Figura 39 - Coleção de Pedro Corre: fotografia do hipódromo da Gávea	63
Figura 40 - Hipódromo da Gávea	64
Figura 41 - Ponte Prefeito Paulo Osny May.....	65
Figura 42 - Estacas pré-moldadas utilizadas para construção da ponte sobre o Rio Tubarão.....	65
Figura 43 - Preparo da área de trabalho e marcação dos furos de estacas pré-moldada	67
Figura 44 - Içamento e Posicionamento de estaca pré-moldada.	68
Figura 45 - Cravação de estaca pré-moldada	69
Figura 46 - Medição de Nega e Repique em estaca pré-moldada	70
Figura 47 - Componentes de um bate estaca	71
Figura 48 - Bate Estaca no Porto de Suape	72
Figura 49 - Estacas pré-moldadas no Porto de Suape.....	72
Figura 50 - Martelo automático hidráulico de cravação.....	74
Figura 51 - Componentes da base da estaca	75
Figura 52 - Componentes da base da estaca	77
Figura 53 - Embarcação de transporte de estacas.....	78
Figura 54 - Gráfico da Evolução da Produção após implantação da estaca Wirth....	80
Figura 55 - Obra execução do Porto do Pecém	81
Figura 56 - Cravação da camisa metálica	82
Figura 57 - Colocação da perfuratriz e escavação em rocha por circulação reversa.	83

Figura 58 - Perfuração interna do pino com tricone de asas com circulação reversa dotado de Widea.....	84
Figura 59 - Foto da limpeza do interior da camisa	84
Figura 60 - Colocação da armação	85
Figura 61 - Armadura sendo colocada	85
Figura 62 - Execução de uma concretagem submersa	86
Figura 63 - Martelo vibrocravador	87
Figura 64 - Perfuratriz hidráulica rotação reversa, Wirth	88
Figura 65 - brocas com botões de roletes	89
Figura 66 - Broca com botões de tungstênio.....	89
Figura 67 - Cantitraveller.....	90
Figura 68 - içamento de camisa metálica com diâmetro de 2,00m	92
Figura 69 - Perfuratriz Wirth PBA 818	93
Figura 70 - Montagem da perfuratriz	94
Figura 71 - Equipamento de perfuração Wirth montado para operação.....	95
Figura 72 - Observatório Automático Abrangente Azumigawa-Oki da Agência Japonesa de Recursos Hídricos.....	97
Figura 73 - WINDFALL ENGINEERING NO TRABALHO OFFSHORE NIGÉRIA.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de compressão e descompressão para trabalhos sob ar comprimido	58
--	----

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABEF – Associação Brasileira de Engenharia de Fundações e Geotecnica

EPI – Equipamento de Proteção Individual

NR – Norma Regulamentadora

PCE – Prova de Carga Estática

ISO – Organização Internacional para Padronização

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	OBJETIVO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	ESTRUTURAS DE FUNDAÇÕES	13
2.2	TIPOS DE FUNDAÇÕES	14
2.2.1	FUNDAÇÕES RASA.....	14
2.2.2	FUNDAÇÕES PROFUNDAS.....	17
2.3	TIPOS DE FUNDAÇÕES SUBMERSAS	18
2.3.1	TUBULÕES A AR COMPRIMIDO	19
2.3.2	FUNDAÇÕES CRAVADAS	21
2.3.3	ESTACAS ESCAVADAS.....	25
3	METODOLOGIA	31
3.1	TUBULÕES A AR COMPRIMIDO	31
3.1.1	CONTEXTO HISTÓRICO	31
3.1.2	PROCEDIMENTO	35
3.1.3	EQUIPAMENTO NECESSÁRIO.....	50
3.1.4	MÃO DE OBRA.....	54
3.1.5	CONDIÇÕES DE TRABALHO.....	55
3.2	ESTACA CRAVADA PRÉ-MOLDADA DE CONCRETO	62
3.2.1	CONTEXTO HISTÓRICO	62
3.2.2	PROCEDIMENTO	66
3.2.3	EQUIPAMENTO NECESSÁRIO.....	70
3.2.4	MÃO DE OBRA.....	75
3.2.5	CONDIÇÕES DE TRABALHO.....	78
3.3	ESTACA CRAVADA E ESCAVADA POR CIRCULAÇÃO REVERSA	79
3.3.1	CONTEXTO HISTÓRICO	79
3.3.2	PROCEDIMENTO	81
3.3.3	EQUIPAMENTO NECESSÁRIO.....	86
3.3.4	MÃO DE OBRA.....	90
3.3.5	CONDIÇÕES DE TRABALHO.....	96
4	CONCLUSÃO.....	98
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

1 INTRODUÇÃO

As fundações de pontes e portos são exemplos de fundações submersas e que são executadas superficialmente ou totalmente abaixo do nível da água, o que dificulta o uso de soluções tradicionais, exigindo que se busque alternativas que permitam que as fundações sejam executadas com segurança, qualidade e que atendam as especificações de projeto. Na literatura ao se buscar sobre fundações submersas e exemplos construtivos os autores direcionam para soluções de técnicas construtivas utilizando as fundações profundas, podendo ser adotado um tipo ou mais de técnica para o projeto.

O tema de fundações submersas apesar de ser amplamente usada em grandes obras nacionais como a ponte Rio-Niterói que foi realizada com fundações de tubulão e estaca escavada de circulação reversa, a Ponte de Porto Nacional em Tocantins e a ponte Anita Garibaldi em Santa Catarina que utilizou o método de estaca de circulação reversa, na literatura ainda é pouco explorada, sendo mais aprofundada quando necessário um estudo de caso para solução especial em uma nova construção ou intervenção. Antes de aprofundar nas fundações submersas é necessário um conhecimento geral de todas as fundações para assim determinar quais fundações são adequadas para cada projeto, seu processo de fabricação, método de execução, equipamentos necessários, a mão de obra e as normas técnicas envolvidas.

As fundações submersas, também definidas como infraestruturas executadas em ambientes marítimos ou fluviais, são técnicas com grande relevância na construção civil, permitindo cada vez mais o aprimoramento e a inovação na execução de grandes obras. Isso se comprova na evolução da execução de fundações que antes demandavam maior tempo de execução, atenção as etapas de construção, grande volume de mão de obra e inevitavelmente causavam problemas de saúde aos trabalhadores envolvidos como no caso de tubulões a ar comprimidos, que atualmente podem ser realizadas com grandes equipamentos garantindo agilidade e segurança na execução como exemplo estacas escavadas e cravadas.

Dentre as fundações a serem apresentadas neste trabalho optou-se por dar ênfase ao estudo das seguintes fundações: tubulão a ar comprimido, por ser uma das fundações que mais utilizadas no passado; a estaca pré-fabricada por ser uma estaca cravada e pela otimização no canteiro de obra e a estaca Wirth, estaca mista

envolvendo método de cravação e escavação e considerada a fundação mais usual em ambientes totalmente submersos em água.

1.1 OBJETIVO

O objetivo do referente trabalho é estudar as metodologias e procedimentos, de forma concisa e bem estruturada, para a execução de fundações especiais, projetadas para estarem parcialmente ou totalmente submersas. Assim este trabalho tem como objetivo apresentar o estudo da análise literária sobre a metodologia de execução de fundações submersas, fundações especiais projetadas para estarem parcialmente ou totalmente em presença de água, descrevendo de maneira estruturada o método de execução, envolvendo os procedimentos, equipamentos, treinamentos dos trabalhadores envolvidos em cada tipo de fundação, como também as condições de trabalho e os critérios de segurança para a execução das fundações submersas. Pretende-se descrever os métodos de execução e as devidas peculiaridades de algumas das soluções utilizadas para vencer os desafios de se construir nessas condições, abordando questões pertinentes aos procedimentos e metodologias que são as bases para a execução das devidas fundações, bem como equipamentos e treinamentos que deverão estar à disposição da equipe executora. Além disso, serão abordadas as condições de trabalho em que estes estarão expostos, levando em conta os critérios de segurança que devem ser atendidos, para garantir a integridade do trabalhador.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Fundações são elementos que têm por finalidade transmitir as cargas de uma edificação para as camadas resistentes do solo, sem provocar ruptura do terreno, tombamentos, deslizamentos, recalques parciais ou totais, evitando danificar ou até inutilizar a superestrutura apoiada.

2.1 ESTRUTURAS DE FUNDÇÕES

A ABNT NBR 6122:2022 (Projeto e Execução de Fundações), permite a compreensão sobre a definição de fundações. As fundações rasas (diretas ou superficiais) são estruturas que tem sua base assentada em profundidade inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação, esse tipo de fundação recebe tensões

distribuídas equilibrando a carga aplicada da edificação ao solo. Enquanto, as fundações profundas são estruturas onde ocorre a transmissão de carga ao terreno pela sua base (ponta) ou pela sua superfície lateral ou pelas duas. A base da fundação profunda é apoiada em uma profundidade superior a oito vezes a sua menor dimensão em planta e no mínimo 3 metros.

O tipo de fundação a ser utilizada em uma edificação ou obra especial é definido através do estudo do solo por meio de uma sondagem do terreno, atividade essa regida pela ABNT NBR 6484/2020 (Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio) e ABNT NBR 8036/1983 (Programação de sondagens de simples reconhecimento para fundações de edifício), para classificação dos solos deve-se empregar a ABNT NBR 6502/2022 (Rochas e solos).

Devido a relação solo estrutura, as fundações estão sujeitas a recalque devido aos carregamentos ao qual serão submetidas, pois o solo é um material deformável, que varia de volume, movimentando a fundação.

2.2 TIPOS DE FUNDAÇÕES

As fundações conforme citado no item 2.1 se subdividem, a seguir é apresentada uma breve descrição de cada tipo de fundação para maior conhecimento de todas as fundações, em relação às fundações indicadas para ambiente submerso, estas serão abordadas no item 2.3 e no item 3.

2.2.1 FUNDAÇÕES RASA

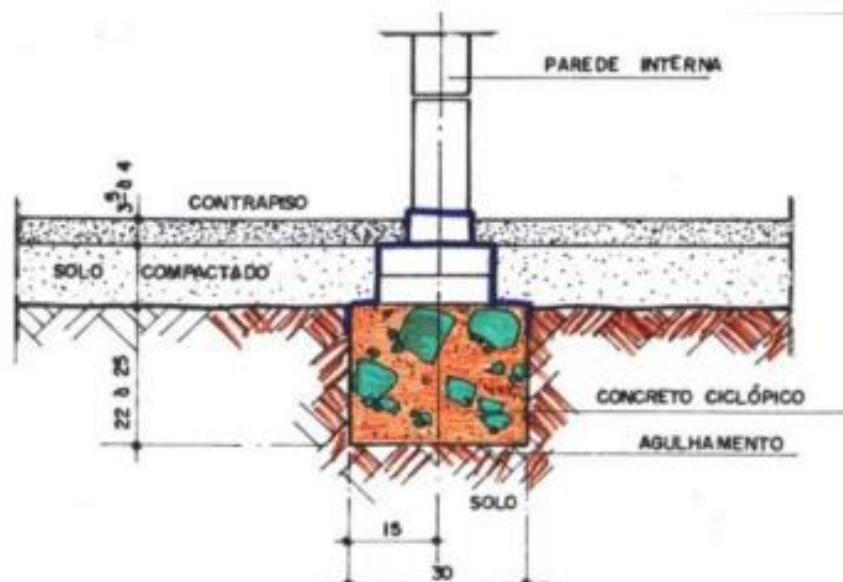
As Fundações rasas também são conhecidas como fundações diretas ou superficiais, portanto são realizadas nas primeiras camadas do solo e não costumam demandar a utilização de grandes equipamentos para a cravação ou escavação dos elementos de fundação. Os tipos de fundações conhecidas são Blocos, as sapatas e os Radiers.

2.2.1.1 Blocos:

Estruturas de concreto simples, os blocos de fundações são dimensionados para que as tensões de tração atuantes sejam resistidas pela estrutura sem a

necessidade de armação. Quanto a sua forma, os blocos de fundações podem ser quadrados ou retangulares, ver Figura 1.

Figura 1 - Bloco de fundação.



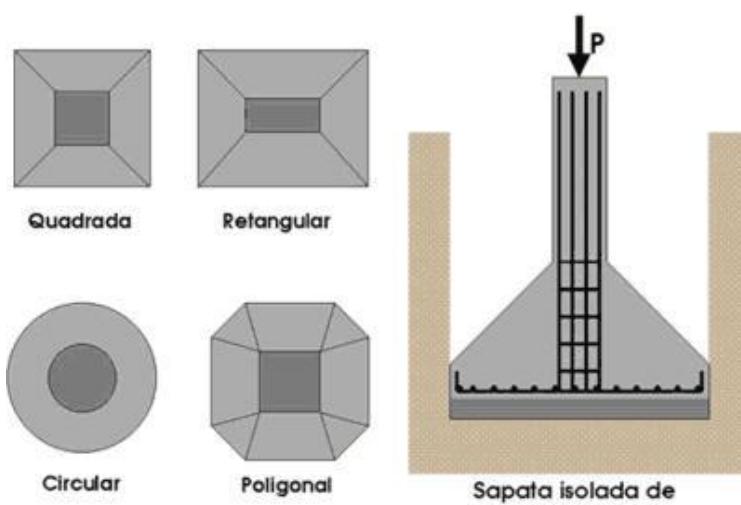
Fonte: PEREIRA, Caio (2017).

2.2.1.2 Sapatas:

As sapatas são estruturas em concreto armado, podendo ser:

- a) Sapata isolada, estrutura que transmite as ações de um único pilar ao solo em formato quadrado, retangular, circular e poligonal, conforme Figura 2.

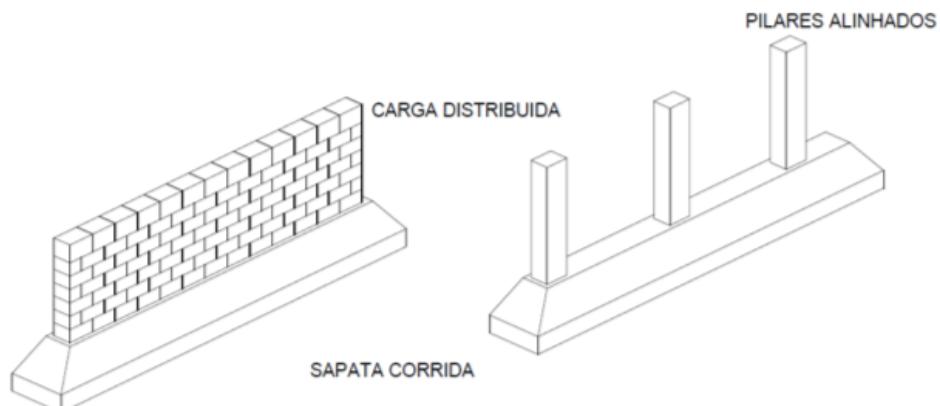
Figura 2 - Sapata Isolada.



Fonte: Tecnologia da Construção (2009)

- b) Sapata corrida, Figura 3, estrutura que transmite as ações de pares ou de dois ou mais pilares ao solo em um mesmo alinhamento.

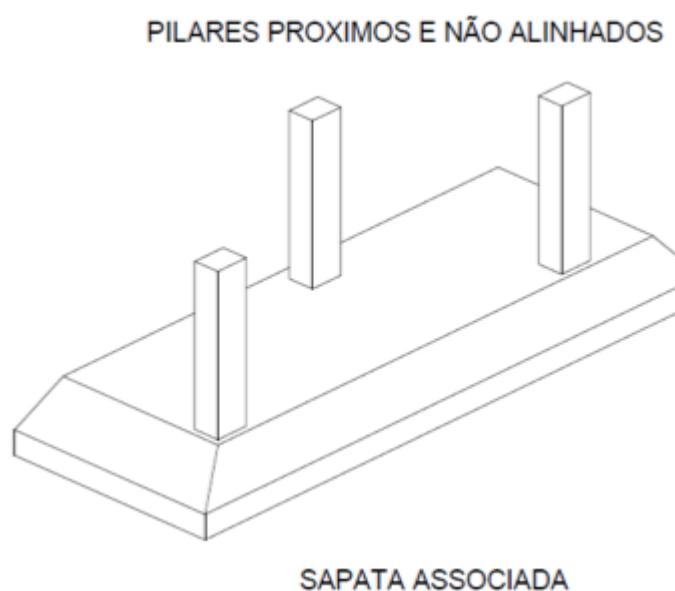
Figura 3 - Sapata Corrida.



Fonte: SODARELLO, Fabiana (2019).

- c) Sapata associada, ou sapata combinada (ver Figura 4), que é uma estrutura de fundação usada quando a proximidade entre pilares não permite dimensionar como sapata isolada ou estas se sobrepõem, assim é dimensionado uma única sapata para dois ou mais pilares, normalmente os pilares não estão em um mesmo alinhamento.

Figura 4 - Sapata Associada.

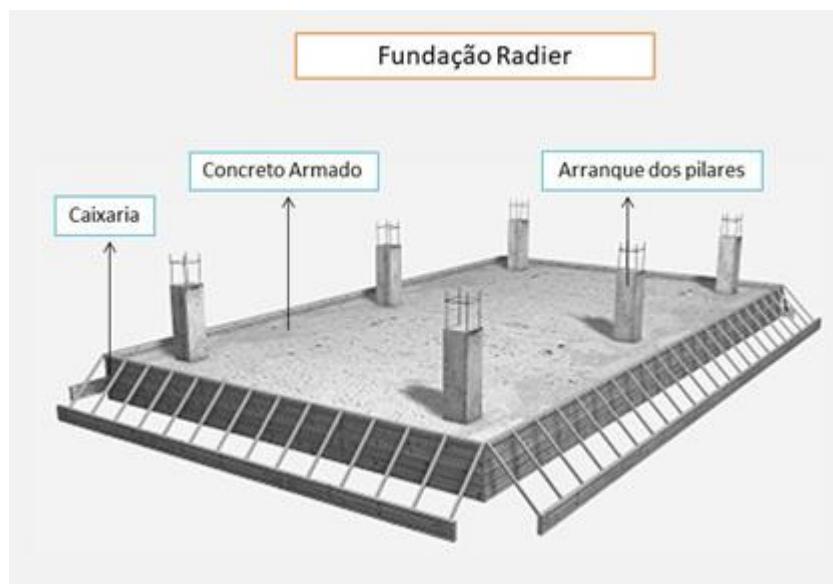


Fonte: SODARELLO, Fabiana (2019).

2.2.1.3 Radier:

Estrutura que se apresenta em concreto armado ou protendido, o radier, Figura 5, se assemelha à uma laje e recebe todo o carregamento da edificação por meio dos pilares, distribuindo homogeneousmente ao solo. O radier pode ser liso, com pedestais, nervuras ou formato de caixão.

Figura 5 - Radier.



Fonte: SCHNNEIDER, Nelson (2020).

2.2.2 FUNDAÇÕES PROFUNDAS

Fundações profundas são aquelas cuja carga da estrutura deve ser transmitida ao solo por meio da resistência de fuste (lateral) ou resistência de ponta (base) ou por ambas. No caso a fundação deve ser assentada a uma grande profundidade, por isso o nome de fundações profundas.

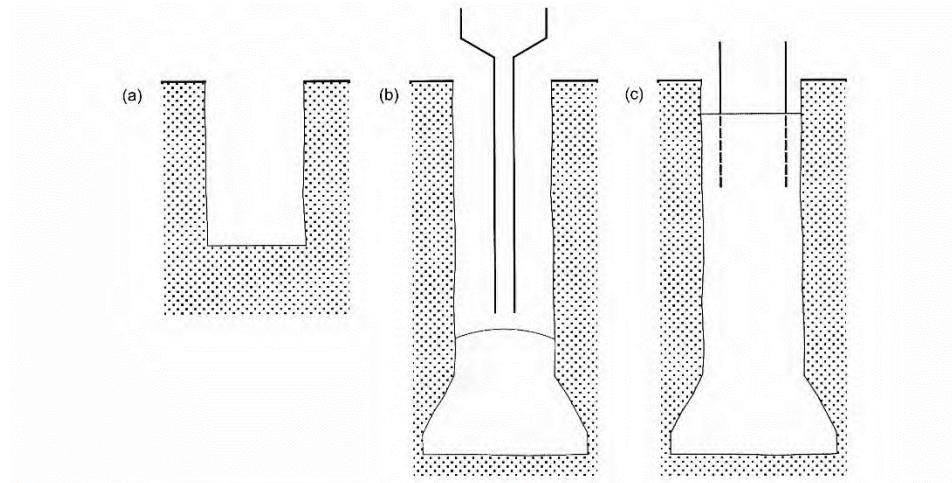
Como exemplo de fundações profundas podemos incluir os tubulões e as estacas.

2.2.2.1 Tubulão:

Estrutura escavada no terreno e que utiliza uma das etapas de execução manual: a escavação da base ou limpeza. A fundação em tubulão pode ser a céu aberto, figura 6, sem revestimento quando o solo está acima do nível d'água ou a ar

comprimido (pneumático); com revestimento com camisa de concreto armado ou metálica, quando o terreno ou a profundidade definida para a base do tubulão está abaixo do nível d'água, o equipamento de tubulão ar comprimido permite a entrada e saída do operário enquanto mantém a água fora da estrutura. O tubulão a ar comprimido por se tratar de uma fundação indicada para ambiente submerso será detalhado no item 3.

Figura 6 - Tubulão a céu aberto.



Fonte: VELLOSO, Dirceu de Alencar (2012).

2.2.2.2 Estacas:

Estruturas executadas por equipamentos ou ferramentas, resistindo às solicitações de carregamento axial pela resistência ao cisalhamento pelo fuste ou tensões normais pela ponta da estaca. As estacas ainda podem ser classificadas quanto ao seu processo de execução, escavadas ou deslocadas. As estacas por se tratar de fundações indicadas para ambiente submerso serão detalhadas no item 2.3.

2.3 TIPOS DE FUNDAÇÕES SUBMERSAS

A construção de estruturas em ambientes submersos apresenta desafios únicos, especialmente quando se trata de execução de fundações em ambientes marítimos e fluviais, um dos fatores de uma obra submersa são as correntes marítimas que afetam diretamente a fundação em construções offshore, estruturas construídas em alto-mar, seja em águas rasas ou profundas, como plataformas de petróleo, píeres, pontes sobre rios ou áreas costeiras. Nesses casos, as fundações profundas são

frequentemente utilizadas para suportar cargas e garantir a estabilidade das estruturas.

A seguir, serão apresentados os tipos de fundações profundas indicadas para serem utilizadas como fundações submersas:

2.3.1 TUBULÕES A AR COMPRIMIDO

O tubulão a ar comprimido é um tipo de fundação profunda, de base alargada, apropriada a obras com grandes solicitações de carregamento ou quando existe água no subsolo, devido à presença do lençol freático, rios e mares, onde há grande perigo de desmoronamento das paredes. Assim, a injeção de ar comprimido nos tubulões impede a entrada de água no interior dos mesmos, permitindo que sejam executados os trabalhos de escavação, alargamento da base e a concretagem. De acordo com Peck et al. (2008), os tubulões ar comprimido são comumente utilizados em projetos de pontes, cais, túneis subaquáticos e fundações para estruturas marítimas. Essa técnica é particularmente aplicável a solos coesivos e argilosos, onde a remoção do solo por métodos convencionais é difícil ou impraticável.

Segundo Poulos e Davis (1980), durante a execução de um tubulão ar comprimido, a pressão interna de ar é ajustada para equilibrar a pressão hidrostática do solo e da água circundante. Isso cria uma "câmara de ar" dentro do tubulão, permitindo que os trabalhadores entrem e executem as atividades de escavação, colocação da armadura e concretagem.

A segurança é uma preocupação primordial na construção de tubulões a ar comprimido. Segundo Peck et al. (2008), é essencial manter a pressão interna de ar adequada para garantir a estabilidade do solo e evitar problemas como afundamentos ou desabamentos. Além disso, um sistema de ventilação adequado deve ser implementado para fornecer ar fresco e controlar a concentração de gases.

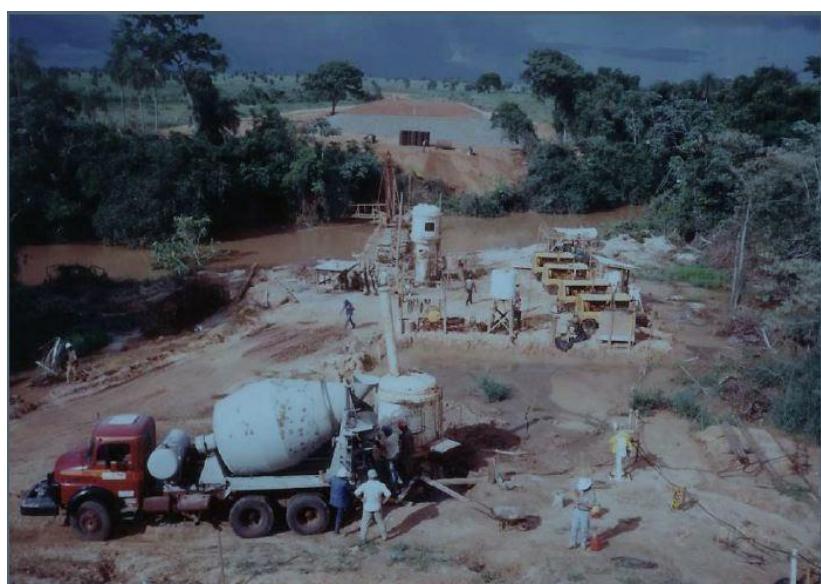
Os tubulões com ar comprimido (ver Figura 7) são construídos em duas etapas principais: escavação e concretagem. Durante a escavação, a água e os solos são removidos por meio de ar comprimido, que cria uma câmara de trabalho livre de água dentro do tubulão. Esse ar pressurizado impede que a água penetre na escavação, proporcionando um ambiente seco para a execução da fundação.

Existem diferentes tipos de tubulões com ar comprimido, que podem ser classificados de acordo com sua forma e função.

Alguns dos principais tipos incluem:

- a) Tubulões Pneumáticos Simples: Esses tubulões são utilizados quando a fundação é projetada para suportar cargas verticais. Eles são geralmente constituídos por uma camisa de aço, que é cravada no solo para evitar desmoronamentos, e uma base alargada para distribuir as cargas.
- b) Tubulões Pneumáticos Cilíndricos: Esses tubulões são semelhantes aos tubulões pneumáticos simples, mas possuem uma forma cilíndrica uniforme ao longo de todo o comprimento. São empregados quando há necessidade de escavações em solos coesivos e friccionais, proporcionando maior resistência à compressão lateral.
- c) Tubulões Pneumáticos Cônicos: Nesse tipo de tubulão, a base é alargada, enquanto o diâmetro diminui em direção ao topo. Essa forma cônica melhora a capacidade de resistência à carga vertical e permite a escavação em solos mais instáveis.
- d) Tubulões Pneumáticos Caixão: Esses tubulões são utilizados quando é necessário criar uma estrutura de fundação mais ampla e rasa. Eles são construídos por meio de uma caixa de aço, que é afundada no solo e preenchida com concreto. São adequados para situações em que há presença de camadas de solo rígidas ou rochas próximas à superfície.

Figura 7 - Tubulão Ar Comprimido.



Fonte: Acervo Eng. Luiz Antonio Naresi Júnior (1993).

2.3.2 FUNDAÇÕES CRAVADAS

As estacas cravadas, também chamadas de estacas deslocadas, são fundações executadas sem a escavação do solo, sendo essas cravadas no terreno até a profundidade definida em projeto para assentamento de sua base, as estacas pré-moldadas, estacas metálicas, estacas de madeira, estaca Franki e estaca de reação ou mega são as técnicas que compõe este grupo.

2.3.2.1 ESTACAS PRÉ-MOLDADAS EM CONCRETO

As estacas pré-moldadas são elementos de fundação amplamente utilizados na construção civil para transferir as cargas das estruturas para camadas mais profundas do solo. Elas são fabricadas previamente em uma fábrica, seguindo padrões e especificações técnicas, e posteriormente são transportadas e instaladas no local da obra. Existem dois tipos principais de estacas pré-moldadas: as estacas pré-moldadas em concreto armado e as estacas pré-moldadas em concreto protendido.

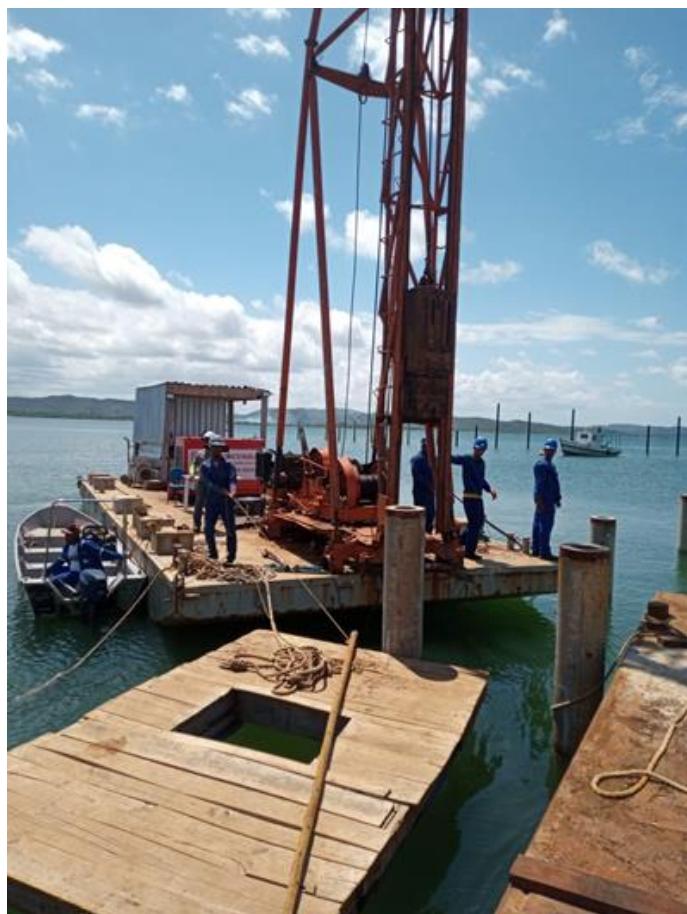
As estacas pré-moldadas em concreto armado são constituídas por uma armadura metálica envolta por concreto. Essa armadura confere às estacas uma maior capacidade de carga e resistência à tração. De acordo com a ABNT NBR 6122:2022 - Projeto e Execução de Fundações, as estacas pré-moldadas em concreto armado são definidas como "elementos de fundação constituídos por peças de concreto armado, moldadas e curadas fora do local de utilização".

O processo de fabricação das estacas pré-moldadas em concreto armado envolve várias etapas. Conforme Oliveira (2019), inicialmente, é montada a armadura metálica de acordo com as especificações do projeto estrutural. Em seguida, a armadura é inserida nas fôrmas adequadas e o concreto é lançado, garantindo o completo preenchimento do molde. Após a moldagem, as estacas são curadas adequadamente para garantir o desenvolvimento da resistência do concreto armado. Por fim, as estacas são transportadas e instaladas no local da obra utilizando equipamentos de cravação hidráulica ou mecânico.

As estacas pré-moldadas em concreto armado são amplamente utilizadas em diversas obras e projetos de fundação, ver Figura 8. Segundo Almeida (2017), elas são especialmente recomendadas em solos de baixa capacidade de carga e onde há

necessidade de resistência à tração. Essas estacas são aplicadas em fundações de pontes, viadutos e estruturas industriais.

Figura 8 - Cravação de Estacas Centrifugadas Pré-fabricadas.



Fonte: Geomec Engenheiros Consultores (2020).

As estacas pré-moldadas em concreto protendido são constituídas por concreto e possuem cabos de aço protendidos em seu interior. Esses cabos de aço são tensionados antes do concreto atingir sua resistência total, conferindo às estacas uma maior capacidade de carga e resistência. De acordo com a ABNT NBR 6122/2022 - Projeto e Execução de Fundações, as estacas pré-moldadas em concreto protendido são definidas como "elementos de fundação constituídos por peças de concreto protendido, moldadas e curadas fora do local de utilização".

O processo de fabricação das estacas pré-moldadas em concreto protendido envolve diversas etapas. Conforme Oliveira (2019), primeiramente, são montadas as bainhas metálicas que acomodam os cabos de aço protendidos. Em seguida, os cabos são inseridos nas bainhas e tensionados de acordo com o projeto estrutural.

Posteriormente, as fôrmas são preenchidas com concreto de alta resistência e as estacas são moldadas. Após a moldagem, ocorre o processo de cura para garantir o desenvolvimento adequado da resistência do concreto pretendido. Por fim, as estacas são transportadas e instaladas no local da obra por meio de equipamentos de cravação.

2.3.2.2 ESTACA METÁLICA

As estacas metálicas são compostas por perfis metálicos, como vigas ou tubos, que são cravados ou introduzidos por vibrador hidráulico no solo para proporcionar estabilidade e resistência. As estacas metálicas são fabricadas a partir de perfis de aço ou outros materiais metálicos de alta resistência. Elas são projetadas para suportar as cargas aplicadas pelas estruturas. De acordo com a ABNT NBR 6122/2022 - Projeto e Execução de Fundações, as estacas metálicas são definidas como "elementos de fundação constituídos por peças de aço cravadas ou introduzidas no solo".

O processo de instalação das estacas metálicas envolve diversas etapas. Segundo Albuquerque (2018), as estacas metálicas podem ser cravadas no solo por meio de martelos hidráulicos, vibratórios ou por percussão. A escolha do método de cravação depende das características do solo e das cargas a serem suportadas. Durante a cravação, é importante garantir a integridade do perfil metálico para evitar danos. A Figura 9 apresenta a imagem da cravação de uma estaca metálica tubular.

Figura 9 - Cravação de Estacas Metálica Tubular.



Fonte: Brasfix fundações de obras marítimas e fluviais (2014).

2.3.2.3 ESTACA DE MADEIRA

As estacas de madeira foram as primeiras estacas a serem utilizadas em fundações, antes do concreto e do aço, sendo utilizada para a construção das primeiras pontes.

A primeira ponte a se ter registro foi construída pelos romanos, em 642 a.C., conhecida como Ponte Suplicio e fica sobre o Rio Tibre, que foi representada por Charles Le Brun (Figura 10). Os romanos cravaram estacas de madeira pontiagudas no leito do rio profundo o suficiente para oferecer base firme e estável para travessia de carruagens

Classificada como “estaca cravada”, a estaca de madeira dispensa a necessidade de escavação, sendo cravada por percussão com a utilização de pilões de queda livre ou automáticos. Utilizada por ter um baixo custo, as estacas são leves e fáceis de se transportar, além de possuírem um grande período de vida útil quando executadas em ambiente submerso.

Geralmente são empregadas em obras provisórias, evitando terrenos com mazacões, e quando forem utilizadas em camadas resistentes à ponta é preciso utilizar ponteiras de aço para que ocorra a perfuração e cravação no solo.

Figura 10 - Horatius Cocles defendendo a ponte



Fonte: Charles Le Brun (c. 1643)

2.3.2.4 ESTACA FRANKI

O sistema de estacas de concreto armado moldados e cravados no solo para sustentar grandes construções foi aperfeiçoado por um engenheiro de Liège, Bélgica, Edgard Frankignoul (1882 - 1954) e patenteado como "estaca Franki".

São estacas moldadas no próprio local de sua execução, se caracteriza por utilizar uma base alargada com material granular (bucha seca) ou concreto.

A sua execução é feita com o auxílio do bate estaca que realiza a cravação de seus elementos por meio de golpes no solo.

Sua principal característica, a base alargada, faz com que aumente consideravelmente a capacidade de carga da estaca ou, reciprocamente, permite obter uma mesma capacidade de carga com profundidades sensivelmente menores se comparadas com estacas sem base alargada. Este acréscimo de capacidade de carga não resulta simplesmente de um aumento da seção da base, mas sobretudo, de uma melhoria das características mecânicas do solo fortemente compactado em torno da base.

2.3.3 ESTACAS ESCAVADAS

As estacas escavadas são executadas com remoção de solo, neste grupo se encontram as estacas Trado Vazado, com Fluido Estabilizante, Circulação Reversa, Hélice Contínua e Raiz.

2.3.3.1 ESTACAS TRADO VAZADO SEGMENTADO COM EMBUTIMENTO EM SOLO

As estacas escavadas com camisa metálica e embutimento em solo são elementos de fundação utilizados para transferir cargas das estruturas para camadas mais profundas do solo do leito de rios e/ou mar.

As estacas escavadas com camisa metálica são constituídas por uma escavação realizada no solo e revestida com uma camisa metálica, que tem como objetivo evitar desmoronamentos e garantir a estabilidade das paredes da escavação durante a execução. Segundo a norma brasileira ABNT NBR 6122:2022 - Projeto e Execução de Fundações, essas estacas são definidas como "elementos de fundação

constituídos por escavação, por penetração no solo ou por cravação de um tubo ou molde metálico, preenchido ou não com concreto".

De acordo com Almeida (2012), a escavação é realizada por meio de equipamentos como sondas ou trado mecânico. Em seguida, é inserida a camisa metálica, que pode ser constituída por aço ou outro material resistente. A camisa metálica é cravada ou executada por pressão hidráulica, proporcionando a estabilidade das paredes da escavação. Posteriormente, é feita a concretagem do interior da estaca, que pode ser realizada por meio de bombeamento de concreto. Essas estacas são indicadas em solos com baixa capacidade de suporte e para transferir cargas elevadas para camadas mais resistentes do solo. A Figura 11 apresenta uma imagem de prova de carga dinâmica realizada em estacas escavadas com camisa metálica.

Figura 11 - Prova de Carga Dinâmica (PDA) em Estacas Escavadas com camisa metálica.



Fonte: Geomec Engenheiros Consultores (2021)

2.3.3.2 ESTACAS TRADO VAZADO SEGMENTADO COM EMBUTIMENTO EM ROCHA.

As estacas escavadas com camisa metálica e embutimento em rocha são constituídas por uma escavação realizada no solo e na rocha subjacente, com o objetivo de criar um fuste na rocha para garantir a estabilidade estrutural.

O processo de execução das estacas escavadas com camisa metálica e embutimento em rocha envolve várias etapas. De acordo com Oliveira (2017), a escavação é realizada utilizando métodos como perfuração rotativa ou percussiva, com o auxílio de equipamentos especializados. Durante a escavação, é inserida a camisa metálica, que pode ser fabricada em aço ou outro material resistente. A camisa metálica proporciona a estabilidade das paredes da escavação, evitando desmoronamentos. Em seguida, é realizada a concretagem do fuste da estaca para garantir a sua resistência estrutural.

Aplicações das Estacas Escavadas com Camisa Metálica: As estacas escavadas com camisa metálica e embutimento em rocha são amplamente utilizadas em fundações de pontes, obras de infraestrutura e outras estruturas que requerem suporte em terrenos rochosos. De acordo com Oliveira (2017), essas estacas são indicadas quando há necessidade de transferir as cargas da estrutura para camadas mais resistentes, presentes na rocha subjacente.

Para a execução das estacas escavadas com camisa metálica em rocha, é necessário o uso de equipamentos como perfuratrizes rotativas ou martelos hidráulicos adaptados para perfuração em rocha. Esses equipamentos são capazes de penetrar na rocha, realizando a escavação do furo com a dimensão adequada para a instalação da camisa metálica.

Uma das técnicas utilizadas nesse processo é a rotação e avanço simultâneo da perfuratriz, como destaca Oliveira (2017): "A perfuração em rocha é realizada mediante o giro e avanço simultâneo do trado ou broca com auxílio de uma máquina perfuradora".

Além dos equipamentos de perfuração, outros equipamentos auxiliares, como guindastes e guinchos, são necessários para o içamento e posicionamento das camisas metálicas no local de perfuração em rocha.

2.3.3.3 ESTACAS ESCAVADAS COM FLUIDO ESTABILIZANTE

A estaca escavada com fluido estabilizante é um tipo de fundação profunda amplamente utilizado na engenharia civil. Nesse método de construção, um furo é escavado com uma perfuratriz com trado helicoidal no solo e preenchido com fluido estabilizante, que exerce pressão hidrostática para manter as paredes do furo estáveis durante a execução da estaca. Esse processo proporciona vantagens em relação à estabilidade do solo, controle do nível d'água e redução de problemas relacionados à instabilidade das paredes do furo.

Uma das principais referências sobre estacas escavadas com fluido estabilizante é o livro "Piling Engineering" (Engenharia de Fundações), escrito por Ken Fleming e Geoff J. Powell (2020). Na obra, os autores discutem os diversos métodos de fundações profundas, incluindo as estacas escavadas com fluido estabilizante. Eles abordam os princípios teóricos, as técnicas de construção, as considerações de projeto e os aspectos práticos envolvidos nesse tipo de fundação.

2.3.3.4 ESTACA ESCAVADA POR CIRCULAÇÃO REVERSA

As estacas escavadas por circulação reversa, também conhecidas como estacas Wirth, devido ao equipamento utilizado, são fundações amplamente utilizadas na engenharia civil para suportar estruturas em solos saturados ou abaixo do nível d'água. Essa técnica envolve a cravação de estacas de tubos de aço no solo, proporcionando uma base estável e resistente para a estrutura.

De acordo com Chellappah et al. (2003), as estacas Wirth são usadas em várias aplicações, como obras portuárias, pontes, plataformas offshore e estruturas submersas. Essas estacas são projetadas para resistir a cargas de compressão e tração, e sua capacidade de carga depende do diâmetro, comprimento, tipo de solo e método de cravação (Figura 12).

Figura 12 - Estaca escavada por Circulação Reversa.



Fonte: Brasfix (2017).

2.3.3.5 ESTACA HÉLICE CONTÍNUA

As estacas hélice monitoradas são uma técnica de fundação submersa amplamente utilizada na engenharia civil para construção de estruturas em solos saturados ou abaixo do nível d'água. Essa técnica consiste na perfuração do solo por meio de uma haste helicoidal que é monitorada durante a instalação, garantindo a qualidade e a capacidade de carga da fundação.

De acordo com Fellenius (2002), as estacas hélice monitoradas são usadas em uma variedade de aplicações, essas estacas são especialmente adequadas para solos coesivos e argilosos, onde a remoção do solo é mais desafiadora.

Segundo Tomlinson (2001), durante a instalação das estacas hélice monitoradas, a haste helicoidal é girada e avançada no solo com auxílio de equipamentos especializados. Ao mesmo tempo, a taxa de penetração, o torque e a pressão no solo são monitorados para garantir que a estaca esteja sendo instalada corretamente.

A instrumentação e o monitoramento durante a instalação das estacas hélice são essenciais para controlar o desempenho da fundação. De acordo com Randolph e Wroth (1979), o monitoramento do torque aplicado, do deslocamento axial e da pressão no solo permite avaliar a capacidade de carga da estaca e a resistência do solo circundante (Figura 13)

Figura 13 - Estaca Hélice Contínua Monitorada.



Fonte: Racional Engenharia (2021).

2.3.3.6 ESTACA RAIZ

A Estaca raiz foi concebida pelo Engenheiro Fernando Lizzi na Itália na década de 50, originalmente foi denominada como “Pali Radice”, sendo utilizada apenas como reforço de fundações na época.

Na norma NBR 6122:2022 (Projeto e Execução de Fundações), a Estaca Raiz é uma estaca moldada in loco, armada em todo o seu comprimento e preenchida com argamassa de cimento e areia, executada através de perfuração rotativa ou roto percussiva, com a circulação de água durante todo o processo e revestida integralmente, no trecho em solo, por um conjunto de tubos metálicos (para garantir a estabilidade do furo) recuperáveis, que são rosqueados à medida que a perfuração é executada.

São estacas de diâmetro pequeno entre 15 e 45 cm, com capacidade de carga de 100 a 500kN na resistência por atrito lateral com o solo do terreno. Diferente das outras estacas em que a armação é colocada após o lançamento do concreto, na estaca raiz a armação é colocada antes da injeção da argamassa.

Sua utilização é indicada para locais de difícil acesso, terrenos com presença de matacões, reforçar fundações e locais sensíveis a vibrações.

3 METODOLOGIA

A pesquisa utilizada neste trabalho foi descritiva em relação aos objetivos proporcionando uma proximidade com o tema, utilizando como coleta de dados a pesquisa bibliográfica e documental.

Na área da engenharia civil o foco da pesquisa foi bibliografias que discutem a utilização das fundações submersas, especificando o seu uso além de suas características e especificações em relação à mão de obra.

Embora existam normas específicas a respeito de fundações e segurança do trabalho, notou-se uma carência de materiais como publicações e artigos que tratem o assunto “fundações submersas” e suas particularidades de forma correlacionada. Essa situação dificultou bastante a pesquisa e dispenderu bastante tempo do trabalho.

A seguir será apresentado dentre as fundações profundas, três exemplos de fundações que são indicadas para ambiente submerso, conforme mencionado, o tubulão pneumático por se tratar de uma fundação que envolve o uso de ar comprimido, a estaca pré-moldada como exemplo de fundação cravada e a estaca por circulação reversa, por ser uma fundação com processo de execução mista de cravação e escavação:

3.1 TUBULÕES A AR COMPRIMIDO

O tubulão a ar comprimido é uma fundação profunda, de base alargada, utilizada em obras com grande solicitação de carregamentos e com água no subsolo, como em mares e rios onde há o risco de desmoronamento das paredes.

A utilização deste tipo de fundação proporciona a utilização da injeção de ar comprimido que impede a entrada de água no interior deles, permitindo que sejam executados os trabalhos de escavação, alargamento da base e a concretagem.

3.1.1 CONTEXTO HISTÓRICO

Na busca de informações sobre o contexto histórico de projetos de fundações em Tubulão a ar comprimido, foi possível encontrar em alguns trabalhos como Teixeira

(1997), que relata em sua tese que o inventor do processo de tubulões pneumáticos seria o britânico Isambard Kingdom Brunel (1806-1859) que utilizou a técnica nas fundações da Chepstow Bridge, conforme Figura 14, em 1852 sobre o rio Wye. Em relação às informações das fundações a ponte teria aproximadamente 183 metros de comprimento, tubulões com cilindros de ferro fundido de 1,8 metros de diâmetro e que foram afundados a uma profundidade aproximada de 15 metros.

Figura 14 - Ponte Chepstow Bridge.



Fonte: The Victorian Web (2016).

No Brasil, este estudo encontrou como relato o uso deste tipo de fundação na construção da ponte metálica sobre o rio Potengi, no Estado do Rio Grande do Norte, a ponte conhecida também como Ponte de Igapó (Figura 15), inaugurada em 1916 e desativada em 1970, quando construiu-se a ponte de concreto. Neto (2013) menciona que o projeto da ponte se constituiu com 550 metros de extensão, nove vãos de 50 metros e um vão de 70 metros à esquerda do pilar central, além da fundação da ponte ter contado com 9 tubulões a ar comprimido com 6 metros de diâmetro e profundidades variáveis. Para a construção da ponte os materiais vieram da Inglaterra, tendo como engenheiro responsável o francês Georges Camille Imbau.

Figura 15 - Ponte de Igapó.



Fonte: Novo Notícias (2022).

Teixeira (1997) ainda menciona que seria a partir da década de 40, devido a importação de campânulas pela Companhia Nacional de Construções Civis e Hidráulicas (CIVILHIDRO), o Brasil teria as primeiras obras nacionais com fundações em tubulão a ar comprimido. O primeiro prédio citado com este tipo de fundação foi o edifício Rhodia, atual edifício São Joaquim, na Cidade de São Paulo e com conclusão da obra 1946. O projeto foi realizado pelos construtores Severo e Villares, mas sem muitos detalhes de execução ou dimensões das fundações. Desde então, os tubulões a ar comprimido com camisa de concreto passaram a ser, dentre as fundações profundas, uma das mais executadas no país. Em 1951 houve a importação do primeiro equipamento para cravação de camisas metálicas pela Engenharia de Funções S.A (Engefusa), tornando-se mais uma alternativa de tubulão a ar comprimido.

Entre as obras mais conhecidas pode ser citado a Ponte Presidente Costa e Silva, conhecida como ponte Rio-Niterói (Figura 16), ligando o bairro do Caju (Rio de Janeiro) à Avenida do Contorno (Niterói). Com projeto e supervisão de um consórcio entre as firmas Howard, Needles Tammen and Bergendoff International, Inc., de Nova Iorque, e Antonio A. Noronha – Serviços de Engenharia S. A., do Rio de Janeiro. A ponte com extensão aproximada de 13 quilômetros e inaugurada em 1974, teve como finalidade a redução do trajeto antes por meio terrestre de mais de 100 km ou por meio de balsa, relatado com tempo de aproximadamente 2 horas para conclusão do trajeto

e com limitação da quantidade transportada. Dentre as fundações empregadas nesta ponte, tem-se o relato de fundações em tubulão a ar comprimido e base alargada, totalizando 462 tubulões deste tipo de fundação profunda.

Figura 16 - Ponte Rio-Niterói.



Fonte: SILVA, Tomaz/Agência Brasil (2021).

Devido às alterações na NR 18 (Segurança e saúde no trabalho na indústria da construção) em 2020, visando a segurança e bem estar dos trabalhadores, o uso de tubulões a ar comprimido passou a não ser mais respaldado quanto a norma regulamentadora, memo ainda estando presente na NBR 6122:2022. Uma das últimas obras com a execução de Tubulões a ar comprimido seria a ponte sobre a Lagoa dos Índios, zona oeste de Macapá. A ponte com estrutura de 50 metros de comprimento e 26 metros de largura, contando com quatro pistas de rolamento em dois sentidos, projeto elaborado pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente (Sema) com etapa inicial de construção em 2019. A fundação foi composta por oito tubulões com ar comprimido e aproximadamente 70 cm de diâmetro, com proposta de resistir ao volume das enchentes no período de inverno e para sustentação da ponte.

3.1.2 PROCEDIMENTO

O objetivo deste procedimento de execução do tubulão a ar comprimido é criar um ambiente controlado dentro da escavação subterrânea, permitindo que os trabalhadores realizem a escavação, remoção de solo e construção da estrutura do tubulão em condições de pressão atmosférica elevada, utilizando ar comprimido para evitar o ingresso de água e solo.

Esse método é empregado quando a escavação necessita ser feita abaixo do nível da água do lençol freático, em solos saturados ou coesivos, onde a água tende a infiltrar-se rapidamente na escavação, dificultando o trabalho e aumentando os riscos de instabilidades. O ar comprimido é introduzido na escavação, criando uma pressão maior do que a pressão hidrostática da água do lençol freático, impedindo que ela penetre na área de trabalho.

O correto procedimento de execução do tubulão a ar comprimido tende a promover:

- a) Segurança dos Trabalhadores: O ar comprimido mantém a água e o solo afastados da escavação, criando um ambiente de trabalho mais seguro e estável para os operários.
- b) Prevenção de Inundações: O uso de ar comprimido impede a entrada de água na escavação, evitando inundações e problemas relacionados à infiltração.
- c) Estabilidade da Escavação: A pressão do ar comprimido auxilia na contenção das paredes da escavação, reduzindo os riscos de desmoronamentos e deslizamentos.
- d) Possibilidade de Trabalho em Profundidades Maiores: O método do tubulão a ar comprimido permite realizar escavações a profundidades que seriam inviáveis ou arriscadas utilizando outros métodos convencionais.
- e) Facilitação da Construção da Estrutura: O ambiente controlado proporcionado pelo ar comprimido torna mais eficiente a construção das paredes do tubulão e a colocação do concreto estrutural.
- f) Menor Impacto Ambiental: Ao evitar a entrada de água no processo de escavação, o método de ar comprimido ajuda a reduzir o impacto ambiental relacionado à extração de água e ao tratamento de efluentes.

- g) Economia de Tempo e Recursos: Ao garantir uma execução mais segura e estável, o método pode reduzir retrabalhos e a necessidade de medidas corretivas, economizando tempo e recursos financeiros.

Sendo importante ressaltar que a execução de um tubulão a ar comprimido requer conhecimento técnico especializado, bem como o cumprimento rigoroso de normas de segurança e regulamentações específicas para a preservação da integridade dos trabalhadores e o sucesso da empreitada.

3.1.2.1 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

Antes de dar início às atividades de execução do tubulão a ar comprimido, é preciso realizar uma análise minuciosa dos documentos de referência que oferecem diretrizes tanto para a sua implementação quanto para as normas específicas que regem esse tipo de serviço. Entre os documentos de referência que devem ser consultados, incluem-se as normas técnicas de engenharia geotécnica, como a ABNT NBR 6122/2022 (Projeto e Execução de Fundações), que aborda o projeto e a execução de fundações. Além disso, é essencial atentar para as regulamentações relacionadas à saúde e segurança no ambiente de trabalho, como delineado pelas diretrizes da NR-18 (Segurança e saúde no trabalho na indústria da construção) e NR-33 (Segurança e saúde nos trabalhos em espaços confinados). Estas regulamentações definem os procedimentos apropriados para operações em espaços confinados e situações que apresentam riscos de exposição a ambientes pressurizados. Ademais, é de vital importância realizar uma análise completa dos projetos específicos do tubulão, dos planos de execução e das sondagens geotécnicas do solo local, juntamente com quaisquer outras orientações técnicas relevantes. Tais medidas são indispensáveis para assegurar a segurança dos trabalhadores envolvidos e para garantir a qualidade geral da obra realizada.

3.1.2.2 MÉTODO EXECUTIVO

Segundo Naresi (2023) a sequência executiva para a construção de um tubulão a ar comprimido envolve várias etapas coordenadas para garantir a eficiência, a segurança e a qualidade do processo. A seguir sendo apresentado o procedimento Executivo de Tubulão a Ar Comprimido com Camisa de Concreto Armado:

a) PREPARO DA ÁREA DE TRABALHO

Remoção da camada vegetal para garantir a limpeza da área do aterro provisório e permitir a abertura dos poços primários. A Figura 17 abaixo demonstra um exemplo desta limpeza.

Figura 17 - Limpeza da Camada Vegetal.



Fonte: NARESI, Luiz Antônio (1993).

Execução do aterro provisório para tráfego de veículos e equipamentos e viabilizar a escavação dos poços primários. A Figura 18 demonstra a execução do aterro provisório.

Figura 18 - Aterro Provisório.



Fonte: NARESI, Luiz Antônio (1993).

b) ESCAVAÇÃO DOS POÇOS PRIMÁRIOS

Escavação dos poços primários conforme as dimensões necessárias (Figura 19).

Figura 19 - Escavação dos Poços Primários.



Fonte: NARESI, Luiz Antônio (1994).

c) MONTAGEM DA ARMAÇÃO

Montagem da armação interna do poço primário, incluindo a câmara de trabalho e o fuste e fechamento externo da forma do poço conforme a (Figura 20) abaixo.

Figura 20 - Montagem da Armação.



Fonte: NARESI, Luiz Antônio (1994).

d) FECHAMENTO DA FORMA EXTERNA

Fechamento das formas externas para a futura concretagem da primeira seção da camisa de concreto, segundo a (Figura 21).

Figura 21 - Fechamento da Forma Externa.



Fonte: NARESI, Luiz Antônio (1994).

e) CONCRETAGEM DA 1^a SEÇÃO DE CAMISA DE CONCRETO ARMADO

Concretagem e vibração da primeira seção da camisa de concreto armado usando guindaste e concreto usinado aplicado por caçamba, pode-se observar segundo a (Figura 22).

Figura 22 - Concretagem da 1^a Seção de Camisa de Concreto Armado.



Fonte: NARESI, Luiz Antônio (1994).

f) DETALHE DO TÉRMINO DA CONCRETAGEM E DESFORMA

Desforma do concreto, preparando-se para a montagem do pau de cargas e prosseguimento da escavação (Figura 23).

Figura 23 - Término da Concretagem e Desforma.



Fonte: NARESI, Luiz Antônio (1994).

g) MONTAGEM DA ESTRUTURA DE CARGA PARA APOIO NA DESCIDA DOS COLABORADORES

Montagem da estrutura de carga para auxiliar na descida dos trabalhadores e equipamentos para sequenciamento da escavação, conforme (Figura 24).

Figura 24 - Estrutura de Carga para Apoio na Descida dos Colaboradores.



Fonte: NARESI, Luiz Antônio. *Tubulão à Ar Comprimido com Camisa de Concreto Armado* (1994).

h) ESCAVAÇÃO DO TUBULÃO

Escavação do fuste do tubulão usando a técnica de escavação a céu aberto com a utilização do pau de carga (Figura 25).

Figura 25 - Escavação do Tubulão.



Fonte: NARESI, Luiz Antônio (1994).

i) INSTALAÇÃO DO GABARITO PARA EMENDA DA SEGUNDA SEÇÃO

Instalação do gabarito metálico para emenda da próxima seção da camisa de concreto.

Na Figura 26 observamos que neste caso há a necessidade de colocação de um gabarito metálico e parafusos chumbados na camisa de concreto que irão receber a campânula de ar comprimido, visto que com a presença de água do lençol freático durante a escavação, já não é possível prosseguir a escavação a céu aberto.

Figura 26 - Instalação do Gabarito.



Fonte: NARESI, Luiz Antônio (1994).

j) MONTAGEM DA ARMAÇÃO DA PRÓXIMA SEÇÃO DE CAMISA DE CONCRETO

Montagem das armações da próxima seção, incluindo a preparação para a emenda da ferragem. Na Figura 27, é visível que a forma interna foi removida e um novo sistema de suporte para o tubulão foi implementado, utilizando estacas e tirantes de eucalipto dispostos de forma semelhante a uma fogueira, reforçados para garantir o alinhamento adequado do tubulão. Nesse estágio, a montagem das armações da segunda seção, feitas de aço, já foi realizada, incorporando a nova estrutura de

reforço, juntamente com o entrelaçamento da ferragem anterior. Ademais, os estribos foram posicionados para garantir um cobrimento mínimo de 3 centímetros, e pastilhas foram inseridas entre a forma externa e a ferragem, garantindo um processo bem consolidado.

Figura 27 - Montagem da Armação da Próxima Seção.



Fonte: NARESI, Luiz Antônio (1994).

k) INSTALAÇÃO DA CAMPÂNULA

Na Figura 28, podemos observar a disposição da campânula no tubulão. Após a preparação cuidadosa da armação de espera, que é aberta com atenção às laterais externas, a figura revela o equipamento de içamento, que está posicionando com precisão o pescoço da campânula e o cachimbo de concreto nos chumbadores. Esses chumbadores serão parafusados à campânula, garantindo que esta não corra o risco de se deslocar da estrutura de concreto durante a compressão. Passadas 24 horas desde o início do processo de cura do concreto, a montagem é realizada. Um funcionário conhecido como furador está dentro do tubulão de concreto, auxiliando no posicionamento da campânula ao lado da camisa de concreto existente. Posteriormente, a campânula é abaixada e fixada no lugar.

Figura 28 - Instalação da Campânula



Fonte: NARESI, Luiz Antônio (1994).

I) DETALHE DA CAMPÂNULA MONTADA EXTERNAMENTE

Observação da montagem externa das campânulas e seus complementos (Figura 29).

Figura 29 - Campânula Montada.



Fonte: NARESI, Luiz Antônio (1994).

m) DETALHE DA PORTINHOLA DE ENTRADA PARA TRABALHADORES HIPERBÁRICOS

Descrição da portinhola de entrada na campânula para os trabalhos em ambiente hiperbárico (Figura 30).

Figura 30 - Portinhola de Entrada para Trabalhos Hiperbáricos.



Fonte: NARESI, Luiz Antônio (1994).

n) INÍCIO DA COMPRESSÃO

Início da compressão que dependendo da profundidade do tubulão pode chegar a pressões de até 2,5 a 3 kg/cm² sendo regido a partir daí as mesmas condições adotadas nos procedimentos de mergulhos profissionais.

o) DETALHE DA ESCAVAÇÃO E LOCAL DE SAÍDA DE MATERIAL DA CAMPÂNULA

Observação do cachimbo de terra por onde sai o material escavado da base do tubulão (Figura 31)

Figura 31 - Local de saída de material da campânula.



Fonte: NARESI, Luiz Antônio (1994).

p) DESCIDA À BASE DO TUBULÃO PARA LIBERAÇÃO DA GEOLOGIA DA BASE

Descrição da descida à base do tubulão para liberar o material geológico da base. É necessário comprimir para poder retirar a água da base e permitir ao trabalhador escavar a seco o fuste do tubulão devidamente protegido pela camisa de concreto armado ou metálica

q) DESCIDA À BASE DO TUBULÃO PARA LIBERAÇÃO DA ARMAÇÃO DA BASE

Detalhe da descida à base do tubulão para liberar a ferragem da base (Figura 32).

Figura 32 - Descida a base do tubulão.



Fonte: NARESI, Luiz Antônio (2020).

r) ARMAÇÃO MONTADA NA BASE DO TUBULÃO

Montagem da armação na base do tubulão, incluindo a campânula, com a utilização do caminhão Munck (Figura 33).

Figura 33 - Montagem da campânula com caminhão Munck.



Fonte: NARESI, Luiz Antônio (2020).

s) ESCORAMENTO PROVISÓRIO DA BASE

Detalhe do escoramento provisório da base para garantir a segurança durante o processo.

A água do lençol freático não “afoga” a base devido à presença do ar comprimido pressurizado em todo tubulão que impede o alagamento da câmara de trabalho. Percebe-se também a dificuldade do pequeno espaço para trabalho, que é confinado e em ambiente hiperbárico. É possível ver a armação da base liberada para a concretagem. Nota-se também uma escora provisória de eucalipto que serve de segurança para impedir antes da concretagem que a câmara de trabalho e o fuste do tubulão entrem pela base em caso de despressurização acidental garantindo a geometria de projeto da base da fundação (Figura 34).

Figura 34 - Escoramento da base.



Fonte: NARESI, Luiz Antônio (1994).

t) CONCRETAGEM DO TUBULÃO EM CONDIÇÕES HIPERBÁRICAS

Descrição do processo de concretagem em ambiente hiperbárico, incluindo a utilização de caminhão betoneira e mangote para lançamento do concreto. Detalhe da acoplagem metálica que pode ser executada para evitar a abertura do cachimbo de terra para a concretagem do tubulão (Figura 35).

Figura 35 - Acoplagem metálica



Fonte: NARESI, Luiz Antônio (1994).

3.1.3 EQUIPAMENTO NECESSÁRIO

Para a boa execução de um tubulão a ar comprimido é necessário que os equipamentos corretos sejam metodicamente escolhidos.

Segundo Naresi (2012) em publicação para revista "Infraestrutura Urbana: Projetos, custos e construção", as ferramentas adotadas para a boa prática em executar-se tubulões pneumáticos são:

3.1.3.1 Campânula

Segundo registros do livro Fundações Teoria e Prática (1996), a primeira campânula utilizada no Brasil, foi em meados dos anos 40, quando o engenheiro Sérgio Valério importou as mesmas da empresa francesa Campenon Bernard. Tal equipamento trata-se de um compartimento projetado para ser hermeticamente selado e que confina o ar pressurizado na região do fuste, base e em seu próprio interior, além de garantir que a infraestrutura não inunde durante as escavações. As campânulas são compostas de uma portilha de acesso para entrada e saída dos trabalhadores, três "cachimbos", um no topo de sua estrutura para a passagem da

armadura que será utilizada no fuste do tubulão ou em sua base, e dois cachimbos em suas laterais, um deles com angulação para baixo, utilizado para saída da terra escavada e um inclinado para cima, chamado de cachimbo de concretagem, que cumpre exatamente essa função. Alguns de seus complementos são manômetros, para avaliar a pressão interna da campânula, registros para controle da adição ou saída do ar comprimido e um guincho, para puxar a terra escavada e descartá-la.

3.1.3.2 Compressor de ar comprimido

O compressor é uma peça fundamental durante a execução da fundação, sendo parte essencial do sistema de pressurização e escavação. Sua principal função é fornecer ar comprimido para manter constante a pressão interna dentro do tubulão, com uma pressão superior à do lençol freático circundante, evitando que água entre no espaço de trabalho e garantindo a estabilidade da escavação. Segundo Naresi (2012), recomenda-se a utilização do compressor de ar comprimido 900pcm.

3.1.3.3 Câmara Hiperbárica

Uma câmara hermética onde os trabalhadores podem entrar antes de entrar na escavação, permitindo que eles se adaptem à pressão atmosférica aumentada de forma gradual.

3.1.3.4 Camisas de aço ou de concreto

As camisas são peças fundamentais para possibilitar o total esgotamento da água presente no solo, além de garantir a segurança do operador, impedindo que ele seja soterrado em caso de uma possível obstrução das paredes do fuste. Este equipamento pode ser tanto de concreto quanto de aço. Segundo a NBR 6122/2022 (Projeto e execução de fundações), as camisas de concreto são moldadas em trechos sobre a superfície e, durante as escavações introduzidas no terreno. Podendo possuir toda a sua armadura na camisa ou parte em seu núcleo. Enquanto a camisa de aço deve ser dimensionada de acordo com as diretrizes da NBR 8800/2008 (Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios), garantindo a segurança quanto seu estado de limite último (ruptura) e estado limite de serviço (microfissuração).

3.1.3.5 Filtro de ar com carvão ativado

No contexto de um tubulão a ar comprimido, o filtro de ar com carvão ativado desempenha uma função importante no sistema de ventilação e purificação do ar dentro da campânula (compartimento de trabalho) usada em projetos de escavação subaquática. A sua função principal é remover contaminantes e poluentes do ar, proporcionando um ambiente de trabalho seguro e saudável para os trabalhadores. O carvão ativado é um material poroso que tem a capacidade de adsorver (prender) gases e compostos químicos nocivos, tornando-o útil para a purificação do ar.

3.1.3.6 Serpentina para resfriamento da campânula

A principal vantagem da serpentina de resfriamento é evitar que a temperatura dentro da campânula atinja níveis excessivos, o que pode ser perigoso para a saúde dos trabalhadores. Em ambientes subaquáticos pressurizados, o calor gerado pelas atividades dos trabalhadores e pelos equipamentos pode elevar rapidamente a temperatura interna, tornando o ambiente desconfortável e, em casos extremos, perigoso. À medida que a água circula no interior da serpentina, ela entra em contato com o ambiente interno mais quente da campânula. Isso permite que a água absorva o calor gerado pelos trabalhadores, equipamentos e operações dentro da campânula.

3.1.3.7 Mangotes vibradores

Os mangotes vibradores são utilizados para garantir o perfeito adensamento do concreto fresco, utilizado principalmente durante a construção das camisas de concreto. Ajudando a garantir a integridade e estanqueidade da estrutura. Normalmente adotados os equipamentos de diâmetro 45mm e 60mm.

3.1.3.8 Gerador de energia (elétrica ou a diesel)

Em projetos de tubulões a ar comprimido, os geradores de energia, especialmente aqueles que funcionam com motores a diesel, desempenham um papel crítico devido à natureza específica dessas obras subaquáticas pressurizadas. Os geradores de energia fornecem eletricidade para os sistemas de ventilação e

compressores de ar que mantêm a pressão interna, alimentação de bombas de drenagem, de sistemas de iluminação e comunicação. Servindo como fonte de backup para garantir que esses sistemas críticos continuem funcionando mesmo em casos de falha da rede elétrica.

3.1.3.9 Equipamentos de iluminação

Devido às condições escuras na escavação subterrânea, é necessário um sistema de iluminação adequado para facilitar o trabalho e aumentar a segurança na hora de executar o serviço.

3.1.3.10 Guindaste

Usado para içar e descer materiais e equipamentos na escavação, de capacidade apropriada devidamente coordenado e orientado por pessoa habilitada.

3.1.3.11 Instrumentos de medição

Incluindo medidores de pressão, monitores de gases, equipamentos de medição de umidade e outros dispositivos para garantir a segurança dos trabalhadores e do ambiente.

3.1.3.12 Ferramentas de corte e escavação

As ferramentas de corte e escavação necessárias para a execução de tubulão a ar comprimido são: picaretas, pás, escavadeiras e outras ferramentas para remover o solo da escavação.

3.1.3.13 Ferramentas de soldagem e corte

Para montar e ajustar as estruturas metálicas do tubulão, sendo necessário avaliar com clareza a possibilidade da utilização da solda em determinadas áreas e peças do maquinário do tubulão a ar comprimido.

3.1.3.14 Equipamentos de proteção individual (EPIs)

Roupas, capacetes, luvas, óculos de proteção, máscaras de proteção respiratória e outros EPIs necessários para garantir a segurança dos trabalhadores em ambientes pressurizados.

3.1.3.15 Equipamentos de comunicação

Rádios ou sistemas de comunicação para manter contato entre os trabalhadores na escavação e a equipe na superfície, sendo uma ferramenta capaz de informar em tempo real tudo o que ocorre no decorrer da construção, auxiliando na prevenção de acidentes e colaborando no bom andamento de todo o trabalho.

3.1.3.16 Equipamentos de resgate

Em caso de emergências, é necessário ter equipamentos de resgate adequados para a remoção rápida e segura dos trabalhadores da escavação.

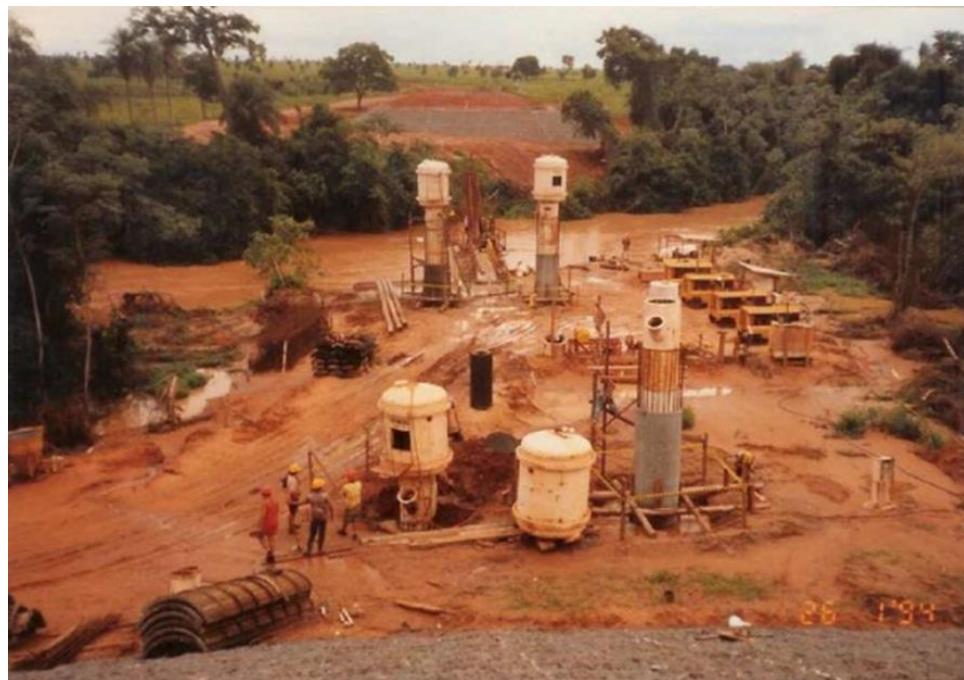
É fundamental que todos esses materiais, equipamentos e ferramentas sejam utilizados de acordo com as diretrizes de segurança, regulamentações e procedimentos estabelecidos para a execução do tubulão a ar comprimido, garantindo a proteção dos trabalhadores e a integridade da obra.

3.1.4 MÃO DE OBRA

Antes da abolição desta técnica para trabalhar em tubulões de ar comprimido os colaboradores tinham que satisfazer alguns requisitos tais como: ter mais de 18 anos e menos de 45 anos de idade; ser submetido a exame médico obrigatório, pré-admissional e periódico, exigido pelas características e peculiaridades próprias do trabalho; além dos requisitos já estabelecidos para se executar um serviço em obra como a utilização de EPI.

Por se tratar de um serviço de elevado risco é preciso um cuidado maior com as instruções repassadas aos trabalhadores contratados, para que esses exerçam suas funções em ambientes hiperbáricos, com consciência dos riscos de suas funções, de forma a prevenir a ocorrência de acidentes. Na Figura 36 está mostrado a imagem de um canteiro bem organizado, com o acesso à obra e as distâncias entre os tubulões que estão sendo executados.

Figura 36 - Detalhe externo das campânulas montadas



Fonte: NARESI, Luiz Antônio. *Tubulão à Ar Comprimido com Camisa de Concreto Armado* (1994)

Os funcionários que antes exerciam esta função em tubulões de ar comprimido necessitavam de 24 horas de treinamento, sendo pelo menos 8 horas para a parte prática, inicialmente para poder executar este tipo de trabalho, além de um treinamento periódico de 8 horas/ano segundo a NR18 (NR 18 - Condições e meio ambiente de trabalho na indústria da construção).

3.1.5 CONDIÇÕES DE TRABALHO

O trabalho em tubulões de ar comprimido necessita de trabalhadores que tenham conhecimento e preparo para executar as atividades em condições hiperbáricas (sob altas pressões).

Os responsáveis por esse trabalho transitam da condição de pressão atmosférica ambiente para uma câmara sob pressão que é chamada de campânula (Figura 37). Para executar esse serviço de acordo com a NR 15 Anexo 6 o funcionário não pode ser exposto à pressão superior a 3,4kgf/cm².

Figura 37 - Campânula dupla acoplada



Fonte: NARESI, Luiz Antônio. Tubulão à Ar Comprimido com Camisa de Concreto Armado (1998)

A atividade exercida pelo trabalhador em tubulão a ar comprimido é definida como ocupação classificada com risco de grau 4 (elevado risco de acidente) pelo Ministério do Trabalho. Por se tratar de uma atividade em que os trabalhadores descritos saem de uma atmosfera normal e entram em uma região de altas pressões (Figura 32), o que pode lhes trazer inúmeros prejuízos à saúde caso não sejam adequadamente treinados para evitá-los. A Figura 38 mostra o espaço interno da campânula e é onde ocorre o início da compressão.

Figura 38 - Início da compressão



Fonte: NARESI, Luiz Antônio. *Tubulão à Ar Comprimido com Camisa de Concreto Armado* (1998)

Para executar este serviço os trabalhadores devem estar muito bem treinados, e como em qualquer situação de risco devem se abster do uso de entorpecentes durante o período de trabalho.

A execução desta atividade é de alto risco por causa da possibilidade de haver uma descompressão equivocada, ela ocorre quando o trabalhador não respeita o tempo de descompressão, caso isso aconteça os gases e o nitrogênio em particular, se desprendem da solução e formam bolhas no líquido corporal e sangue. Estas bolhas gasosas se acumulam nos espaços das articulações e na circulação periférica, prejudicando a oxigenação tecidual, causando desorientação, dor intensa e eventualmente morte, as principais condições clínicas decorrentes dessa situação são a embolia gasosa, o enfisema subcutâneo e doenças articulares. Para que não haja estes problemas o funcionário deve sempre respeitar a velocidade de subida e após a chegada na superfície permanecer no mínimo duas horas no canteiro de obra, cumprindo um período de observação médica. Seguir a Norma Regulamentadora 15 Anexo 6 é imprescindível para que não tenha acidentes na execução desta atividade (Tabela 1).

Tabela 1 - Tabela de compressão e descompressão para trabalhos sob ar comprimido

Pressão de Trabalho (kg/cm ²)	Tempo de Compressão (min)	Período de Trabalho (h/m)	Estágio de Decompressão (kg/cm ²)									Tempo de Decompressão (min)
			1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	
0,00 a 1,00	3	7 h 40 min								3	14	17
1,00 a 1,20	4	6 h 00 min									20	20
1,20 a 1,40	5	6 h 00 min								5	35	40
1,40 a 1,60	6	6 h 00 min							5	20	40	65
1,60 a 1,80	6	6 h 00 min							10	30	45	85
1,80 a 2,00	7	6 h 00 min						5	20	35	45	105
2,00 a 2,20	7	5 h 43 min					5	10	25	40	50	130
2,20 a 2,40	8	5 h 17 min					10	20	30	40	55	155
2,40 a 2,60	8	4 h 52 min					15	25	30	45	60	180
2,60 a 2,80	10	4 h 25 min				5	20	25	30	45	70	205
2,80 a 3,0	10	3 h 45 min				10	20	30	40	50	80	245

Fonte: NR:15 Anexo 6 (1983)

A ação de compressão e descompressão é a atividade que demanda maior cuidado e preparo, tendo regras que devem ser cumpridas, para diminuir a chance de acidentes, que são:

Regras para a compressão

- I. No primeiro minuto após o início da compressão, a pressão não poderá ser maior que 0,3 kg/cm² (4 psi) dentro da câmara;
- II. A pressão será mantida a 0,3 kg/cm² (4 psi), durante 1 (um) minuto, para verificar se algum trabalhador está se sentindo mal;
- III. Após o estágio anterior a pressão deverá ser elevada uniformemente a uma velocidade não superior a 0,7 kg/cm², por minuto (10 psi/min);
- IV. Se a pressão de trabalho for maior do que 0,5 kg/cm² (7 psi), a compressão será aí estacionada durante 1 (um) minuto, para verificar se algum trabalhador está se sentindo mal;
- V. Se o trabalhador sentir mal-estar durante a compressão, deverá avisar imediatamente o operador da campânula, o qual estacionará a pressão

- até que o mal-estar ceda; se após cinco minutos tais sintomas não desaparecerem, o operador da campânula reduzirá gradualmente a pressão até que a pessoa avise, que seu mal-estar passou. Se o mesmo persistir, a pressão deverá ser reduzida até à atmosférica e a pessoa será retirada da campânula e encaminhada ao ambulatório médico;
- VI. Como exemplo do despreparo no tratamento de prevenção de doenças descompressivas na obra, durante a execução da ponte Rio-Niterói, onde cerca de dois mil trabalhadores sofreram com barotraumas, além de sequelas físicas que geram situações de estresse pós-traumático, caracterizadas por distúrbios de ansiedade que podem ameaçar fortemente o paciente acometido, em especial predispondo-o a sofrer novos acidente;
 - VII. O tratamento de doenças descompressivas é feito com oxigênio sob pressão em câmaras especiais, através do tratamento OHB (Oxigenoterapia Hiperbárica – OHB) que ocorre em uma câmara sob pressão hiperbárica onde o paciente recebe oxigênio próximo de 100% de pureza, a absorção de oxigênio pelos tecidos é aumentada, fazendo com que elimine as bolhas de nitrogênio que foram formadas;
 - VIII. Por se tratar de um trabalho em que há apenas uma entrada e saída deve ser tratado como espaço confinado, tendo assim que atender aos requisitos da NR-33 (Segurança e saúde nos trabalhos em espaços confinados);
 - IX. É necessário a supervisão da equipe de segurança do trabalho (técnico e engenheiro de segurança), para treinar e orientar os trabalhadores, sinalizar o local de trabalho e controlar a entrada e saída dos funcionários junto com o encarregado da atividade;
 - X. É preciso o controle de equipe médica do trabalho (enfermeiro e médico do trabalho), para verificação diária da pressão arterial, bom estado de saúde e condições de embriaguez;
 - XI. As manobras de compressão e descompressão deverão ser executadas através de dispositivos localizados no exterior da campânula ou clausa, pelo operador das mesmas. Porém deverá existir uma câmara ou inclusa de descompressão externa ao tubulão para casos de emergência;

- XII. Inspeção diária das câmaras de compressão e descompressão garantindo o seu perfeito funcionamento, sem colocar em risco os trabalhadores que entrarão no tubulão;
- XIII. Acesso fácil para resgate em caso de emergência;
- XIV. Equipe de emergência treinada e orientada sobre a entrada, descida e subida no tubulão. Bem como, equipamentos de resgate adequados e compatíveis para o resgate.

Regras para a descompressão

- I. Na descompressão de trabalhadores expostos a pressão de 0,0 a 3,4 kg/cm² durante um turno de trabalho num período de 24 horas, serão obedecidas as seguintes regras:
 - II. Sempre que duas ou mais pessoas estiverem sendo descomprimidas na mesma campânula e seus períodos de trabalho ou pressão de trabalho não forem coincidentes, a descompressão processar-se-á de acordo com o maior período ou maior pressão de trabalho experimentada pelos trabalhadores envolvidos;
 - III. A pressão será reduzida a uma velocidade não superior a 0,4 kg/cm² por minuto até o primeiro estágio de descompressão, de acordo com a tabela; mantida a campânula naquela pressão pelo tempo indicado em minutos, e depois diminuída a pressão à mesma velocidade anterior até o próximo estágio e assim por diante, para cada cinco minutos de parada a campânula deverá ser ventilada à razão de um minuto;
 - IV. Entre dois períodos de trabalho, deverá haver um tempo de repouso ao ar livre de no mínimo 12 (doze) horas consecutivas não sendo permitido, salvo em condições especiais e sob responsabilidade do médico responsável, o trabalho sob ar comprimido em dois ou mais turnos num período de 24 horas;
 - V. Para uma maior segurança também é preciso ter cuidado em relação a saúde e caso ocorra algum acidente, e preciso ter alguns pré-requisitos:
 - VI. Em cada canteiro deverá haver um ambulatório;
 - VII. Em cada canteiro deverá haver pelo menos uma caixa de primeiros socorros, portátil, sempre completa e macas :uma para salvamento (tipo

- “camila”), com dimensões tais que possa ser manejada no interior dos tubulões e campânulas, e uma para transporte, colocadas em local sempre acessível;
- VIII. A caixa de primeiros socorros deverá conter, no mínimo, medicamentos para emergências e materiais para curativos;
 - IX. Nos casos em que se fizer necessária a remoção de doentes ou acidentados do canteiro, caberá ao construtor fazê-la com urgência que o caso exigir, utilizando os meios adequados, por sua conta e risco;
 - X. Toda pessoa que trabalhar em ar comprimido deverá ter uma ficha médica, na qual o médico habilitado deverá registrar os pormenores relativos aos atestados previstos nesta especificação. A ficha será conservada pelo construtor no canteiro e a disposição da fiscalização;
 - XI. Quando estiver em andamento o trabalho sob ar comprimido, todos os principais hospitais da região deverão ser notificados pelo construtor, dando-lhes a localização do trabalho e o nome e endereço do médico designado para o atendimento do pessoal. O médico habilitado deverá acertar previamente com os hospitais o procedimento a ser seguido em caso de doença, que se manifeste após a saída do trabalho, para que a pessoa afetada possa ser imediatamente enviada à internação;
 - XII. Ninguém poderá ser empregado antes de ter sido examinado pelo médico, devendo este atestar, na ficha médica do funcionário que o mesmo está apto para esse trabalho;
 - XIII. O atestado de aptidão terá validade por seis meses a contar da data de sua expedição, conforme preceitua a legislação vigente. Em caso de ausência do trabalho por 10(dez) dias ou mais, ou por doença, o funcionário deverá ser aprovado em exame clínico de revisão;
 - XIV. O candidato considerado inapto não poderá ser empregado para esta função enquanto o atestado anterior não for anulado ou modificado;
 - XV. Antes do início de cada jornada de trabalho todos serão submetidos a uma inspeção pelo enfermeiro habilitado;
 - XVI. Após examinar ou reexaminar qualquer pessoa que tenha trabalho ou vá trabalhar em ar comprimido, o médico poderá modificar ou revogar qualquer atestado, em vigor quanto às condições de trabalho dessa

- pessoa, devendo registrar tais alterações na respectiva ficha médica. Se a alteração consistir na revogação da autorização para trabalhar em ar comprimido, essa pessoa não poderá voltar a esse tipo de trabalho enquanto não for novamente autorizado pelo médico, que deverá registrar essa autorização na respectiva ficha médica;
- XVII. O construtor apresentará mensalmente à fiscalização, uma lista de todos os empregados examinados pelo médico. Nessa lista deverão ser incluídos os engenheiros, e outros técnicos do construtor e da própria fiscalização. Somente pessoas cujos nomes constem dessa lista, ou que tenham autorização específica do departamento médico poderão ser admitidos nas campânulas. Além disso, o construtor deverá apresentar mensalmente uma relação de tratamento por descompressões realizadas na clausa médica, indicando diagnóstico e tabela empregada, juntamente com a relação de todo pessoal que foi submetido à descompressão.

3.2 ESTACA CRAVADA PRÉ-MOLDADA DE CONCRETO

Enquadram-se na categoria das estacas de deslocamento, caracterizadas por sua introdução no terreno através de processo que não promova a retirada de solo. Elas podem ser constituídas por um único elemento estrutural ou pela associação de dois elementos, quando será denominada “estaca mista”.

3.2.1 CONTEXTO HISTÓRICO

As estacas cravadas são elementos estruturais utilizados há muitos anos, segundo Velloso e Lopes (2011), por exemplo, na construção de estradas, para avançar em regiões pantanosa ou onde os materiais rochosos eram escassos. Os romanos empregavam passadiças apoiadas sobre estacas cravadas de madeira. A Ponte Sublício, em latim Pons Sublicius é datada de 642 a.C., sendo a mais antiga ponte sobre estacas cravadas registrada.

As estacas pré-moldadas de concreto são elementos fundamentais na construção civil, desempenhando um papel crucial na fundação de edifícios, pontes, viadutos e diversas outras estruturas. Essas estacas podem ser produzidas em

fábricas, seguindo rigorosos padrões de qualidade, antes de serem transportadas para o local da obra, onde são cravadas no solo, ou produzidos no próprio canteiro, exigindo assim, maior cuidado e controle tecnológico das mesmas, pois, fora de um ambiente controlada(o), a estrutura fica exposta durante sua moldagem e fabricação, estando mais sujeita a desenvolver patologias.

Segundo Vasconcelos (2002), não é possível determinar precisamente quando as estruturas pré-moldadas de concreto passaram a ser empregadas tendo em vista que, o surgimento de estruturas em concreto armado se deu por peças pré-fabricadas. No Brasil, a primeira notícia que se tem da aplicação desse método construtivo se dá na execução do hipódromo da Gávea (Figura 39), no Rio de Janeiro, em 1926.

Figura 39 - Coleção de Pedro Corre: fotografia do hipódromo da Gávea



Fonte: Malta, Augusto (1926)

A empresa, originalmente dinamarquesa, Christiani & Nielsen foi responsável por executar toda a obra. Destacasse nessa construção a concretagem no próprio canteiro das estacas pré-moldadas, que ultrapassaram a marca de 8 km, com estacas que alcançaram 24 metros, do total 218 estacas de seção 38 x 38 cm e comprimento ajustado de acordo com as condições litológicas do solo apresentadas durante as

campanhas de sondagens e as cravações, foram cravadas exclusivamente na região da tribuna dos sócios. Exigindo um controle de qualidade e organização do canteiro minuciosos, para não prolongar o cronograma de execução da infraestrutura e, consequentemente, de todo o hipódromo. Foi usado cimento Portland dinamarquês de endurecimento rápido, alcançando em 3 dias de idade, a mesma resistência habitualmente alcançada aos 28 dias. Em 2023 o local é sede do Jockey Club Brasileiro, conforme Figura 40.

Figura 40 - Hipódromo da Gávea



Fonte: Google Earth (2023)

A ponte sobre o Rio Tubarão, nomeada ponte Prefeito Paulo Osny May, ver Figura 41, no município de Tubarão/SC, foi inaugurada no dia 25 de setembro de 2021, sendo uma obra de arte especial com 142m de comprimento e 23,65m de largura, considerada uma das maiores obras de mobilidade do município nas últimas décadas, vale ser citada como um caso recente do uso de estacas pré-moldadas em concreto como uma estrutura de fundação submersa.

Figura 41 - Ponte Prefeito Paulo Osny May.



Fonte:

Prefeitura de Tubarão/SC (2021).

Com utilização de um bate estaca, segundo o site oficial da prefeitura de Tubarão (2020), foram fixadas 148 estacas pré-moldadas (Figura 42) em concreto que serviram de base para as duas cabeceiras e aos apoios de sustentação.

Foram cravadas 14 estacas em cada uma das cabeceiras e em cada eixo de pilares da ponte, foram usadas 24 estacas, totalizando 148 peças.

Figura 42 - Estacas pré-moldadas utilizadas para construção da ponte sobre o Rio Tubarão.



Fonte: Marcelo Becker (2020).

3.2.2 PROCEDIMENTO

Como citado no item 2.3.2 As estacas pré-moldadas podem ser em concreto armado ou em concreto protendido. Entretanto, neste item, será apresentado com maior detalhamento, as etapas de execução da estaca pré-moldada de concreto, a qual tem como método de execução a cravação por percussão ou prensagem. As estacas, como o próprio nome indica: pré-moldadas, são estacas confeccionadas em fábrica e transportadas para o canteiro de obras para execução.

3.2.2.1 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

Entre os documentos de referências normativas que estabelecem os critérios de execução para as estacas pré-moldadas temos a ABNT NBR 6122/2022 (Projeção e execução de fundações), já mencionada, e que regulamenta os requisitos que devem ser observados em projeto e na execução de fundações. A NBR 6122, traz em seu texto o anexo E, texto específico para os procedimentos executivos complementares para as estacas pré-moldadas.

Outra norma também referente às estacas pré-moldadas é a ANBT NBR 16258/2014 (Estacas pré-fabricadas de concreto – Requisitos) que visa estabelecer os requisitos para estacas como estruturas de fundações quanto projeto, fabricação, estocagem e manuseio. A NBR 16258/2014 (Estacas pré-fabricadas de concreto) como a 6122/2022 (Projeção e execução de fundações) define sobre algumas orientações como as emendas que podem ser realizadas com as estacas, sendo emendas por luva de encaixe, por anel metálico soldado ou colagem, desde que resistam às solicitações que possam ocorrer durante o manuseio, cravação e utilização. O içamento das estacas deve ser por um ponto, preferencialmente a 0,29 vezes seu comprimento, em uma das extremidades e com auxílio de cabo de lona ou aço. O seu armazenamento em obra, que deve ser área plana e de fácil acesso ao equipamento de içamento e deslocamento.

3.2.2.2 MÉTODO EXECUTIVO

O procedimento de cravação das estacas pré-moldadas de concreto é conduzido em etapas, desde a preparação do canteiro de obras até a verificação de

deslocamento vertical após a cravação. A seguir será apresentado de maneira detalhada e ilustrada sua execução.

a) PREPARO DA ÁREA DE TRABALHO

No Canteiro de obra, antes da execução da cravação das estacas deve ser realizado a locação das estacas, ou seja, na posição onde as estacas serão cravadas deve ser realizado um furo do mesmo diâmetro ou dimensão da estaca, e preenchido com cal ou areia. Esse furo será a guia para a cravação da estaca. A marcação dos furos serve para sinalização onde as estacas serão executadas, onde o equipamento de cravação deve ser posicionado, para que a localização da cravação não seja perdida devido à passagem de equipamentos e pessoas no local, evitando assim a necessidade de realizar remarcações da posição de cravação das estacas e o posicionamento do equipamento de cravação (Figura 43).

Figura 43 - Preparo da área de trabalho e marcação dos furos de estacas pré-moldada



Fonte: Sotef Engenharia, (2023)

b) IÇAMENTO E POSICIONAMENTO

Com a marcação do local de cravação da estaca, o equipamento deve ser posicionado e alinhado com o furo. O equipamento por meio de um cabo de guincho deve trazer à estaca junto a torre do equipamento, (Figura 44), permitindo seu posicionamento na vertical possibilitando que seu assentamento seja realizado corretamente.

Figura 44 - Içamento e Posicionamento de estaca pré-moldada.



Fonte: Sotef Engenharia, (2023)

c) CRAVAÇÃO

Após o içamento e posicionamento das estacas no furo, é inserido entre o martelo do equipamento e a parte superior da estaca o capacete, de superfície de contato plana, para auxílio da cravação sem que necessite fixação a cada golpe do equipamento, tendo como folga do martelo e do capacete a medida inferior a 3cm em relação às guias do equipamento. O capacete deve ser verificado periodicamente para correção de possíveis irregularidades. Com a estaca fixada, o equipamento de bate-estaca é acionado promovendo a cravação da estaca no solo com sucessivos golpes até a cota de assentamento, ilustrado conforme a Figura 45.

Figura 45 - Cravação de estaca pré-moldada



Fonte: NARESI, Luiz Antônio. Estacas Cravadas (2023)

A Norma 6122 salienta ainda sobre a importância do uso de martelos mais pesados e com altura menor de queda para garantir que a estaca seja posicionada até a profundidade definida sem ser danificada ao em vez de usar martelos mais leves, mas que precisariam ser acionados a uma altura maior. Além disso, quando a cravação é realizada por martelo de queda livre, devem ser observados as condições de peso do martelo igual ou superior a 20kN e mínimo de 75% do peso total da estaca. Para estacas com carga de trabalho de 0,7kN e 1,3kN o peso do martelo deve ser de 40kN. Enquanto para cravação em martelo automático, a norma define que deve ser seguido as recomendações do fabricante.

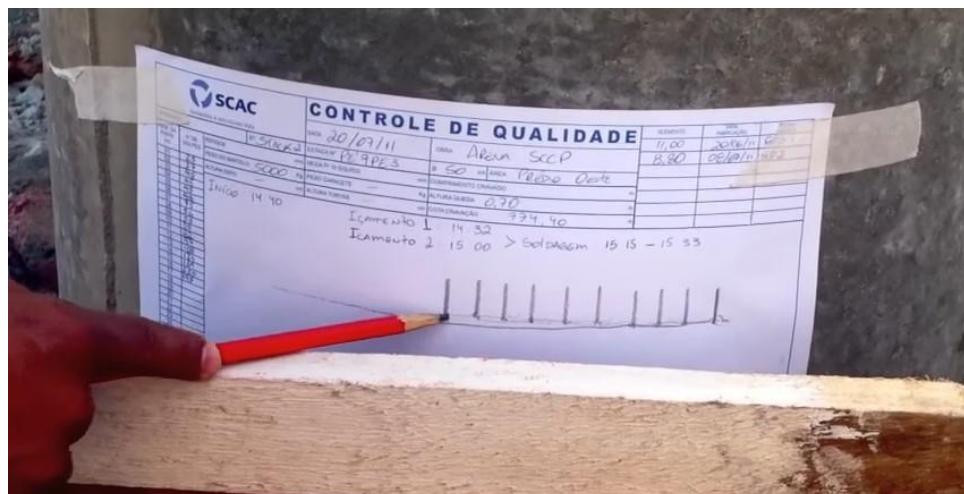
d) RECRAVAÇÃO

Em alguns casos, pode ocorrer a necessidade de recravação de algumas estacas que sofreram deslocamento ou que levantaram enquanto outras estacas próximas eram cravadas. Por isso, após a cravação de cada estaca é necessário marcação para visualizar a necessidade de recravação.

e) NEGA E REPIQUE

Após a cravação de cada estaca, é necessário realizar a medição da penetração permanente da estaca, denominada de nega, e do repique, que seria a parcela elástica da penetração máxima da estaca, ou seja, o levantamento da estaca que pode ocorrer decorrente a aplicação dos golpes. As análises de nega e repique, Figura 46, devem ser realizadas por meio de 10 golpes com a mesma altura da queda do martelo e por meio de medições de marcações transversais a cada golpe, tendo como finalidade promover e assegurar a cravação de maneira homogênea.

Figura 46 - Medição de Nega e Repique em estaca pré-moldada



Fonte: SCHNNEIDER, Nels, (2019)

3.2.3 EQUIPAMENTO NECESSÁRIO

3.2.3.1 Bate Estaca

Bate estaca é um equipamento utilizado para a execução de estacas pré-moldadas, geralmente é utilizado em obras de maior porte, os bate estacas são usados para a cravação das estacas de concreto, metálica e de madeira.

O bate estaca geralmente compõe-se de uma torre e um martelo que irá realizar o movimento que irá gerar a força necessária para a cravação da estaca no solo.

O trabalho de um bate estaca consiste na cravação, por meio de percussão, aplicada na cabeça da estaca de um elemento de concreto, aço ou madeira até uma profundidade que possa oferecer uma capacidade de carga.

O equipamento é composto por uma torre montada sobre plataforma onde cabos de aço acionados por um guincho mecânico erguem o martelo utilizado na cravação. Este guincho é dotado de dois tambores onde o segundo tambor é responsável pela movimentação e carregamento das estacas, na figura 47 é possível observar as partes que compõem um bate estaca.

Figura 47 - Componentes de um bate estaca



Fonte: Adaptado de Felten (2011)

Este equipamento causa vibrações no terreno. Dessa forma, Medidas devem ser adotadas para que pessoas que habitam próximos ao local de sua utilização e para que os elementos já construídos no próprio canteiro de obras não sejam afetados pela vibração do bate estaca. Também é muito utilizado na construção de portos, e pontes. No Brasil um dos exemplos mais famosos é o porto de Suape no Pernambuco, em que foi utilizado estacas pré-moldadas de concreto protendidas, de 80 cm diâmetro externo e 45 metros de altura, nas Figuras 48 e 49 é possível notar o uso delas nesta construção.

Figura 48 - Bate Estaca no Porto de Suape



Figura 48 Bate Estaca no Porto de Suape Fonte: Sérgio C. Paraíso (1983)

Figura 49 - Estacas pré-moldadas no Porto de Suape



Fonte: Sérgio C. Paraíso (1983)

O bate estaca possui tipos que diferem um do outro, mas que possuem a mesma finalidade, sendo:

- I. Manual: Este tipo de bate estacas, o esforço para a cravação das estacas é realizado com a força bruta através de golpes por atividades manuais.

- II. Queda livre ou gravidade: Este é composto por guias verticais e por um motor que tem a finalidade de erguer um peso até certa altura e soltá-lo, o esforço para a cravação é feito pela gravidade. Neste equipamento é importante que se tenha um operador experiente e bem capacitado pois a obtenção da nega fica a cargo dele. A média de golpes consecutivos é de 10 por minuto.
- III. Bate estaca a vapor ou de efeito simples: Consiste em um martelo de altura controlada pela quantidade de gases sob pressão na câmara. É chamado de efeito simples, pois os gases realizam o trabalho somente para o levantamento do martelo e a gravidade realiza a queda.
- IV. Pilão de duplo efeito: Ao contrário do de efeito simples, realiza o trabalho para içar e para a queda do martelo. Com isso, consegue-se uma frequência muito maior de cravação, na ordem de 250 a 300 golpes por minuto.
- V. Bate estaca de explosão: Nesse tipo de bate estacas o levantamento do martelo é realizado por meio da explosão de gases (tipo diesel). Foi criado na Alemanha na década de 1920. Muito utilizado em fundações submersas.

3.2.3.2 Martelo Hidráulico

Um martelo hidráulico é um equipamento de cravação recomendado para a cravação de perfis de estacas pré-moldadas ou metálicas. Com o uso de um martelo hidráulico, o procedimento de cravação será realizado com muita agilidade e eficiência, devido à sua robustez e alta qualidade. Foi criado na região dos países escandinavos da década de 1960.

A diferença entre esses sistemas está na energia transmitida no instante do golpe, que, em última análise, é o que faz a estaca penetrar no solo. Na figura 50 é possível observar como é o martelo hidráulico.

A definição sobre qual equipamento usar depende do prazo da obra, dos custos e das dificuldades de penetração da estaca em determinados perfis geotécnicos.

Figura 50 - Martelo automático hidráulico de cravação

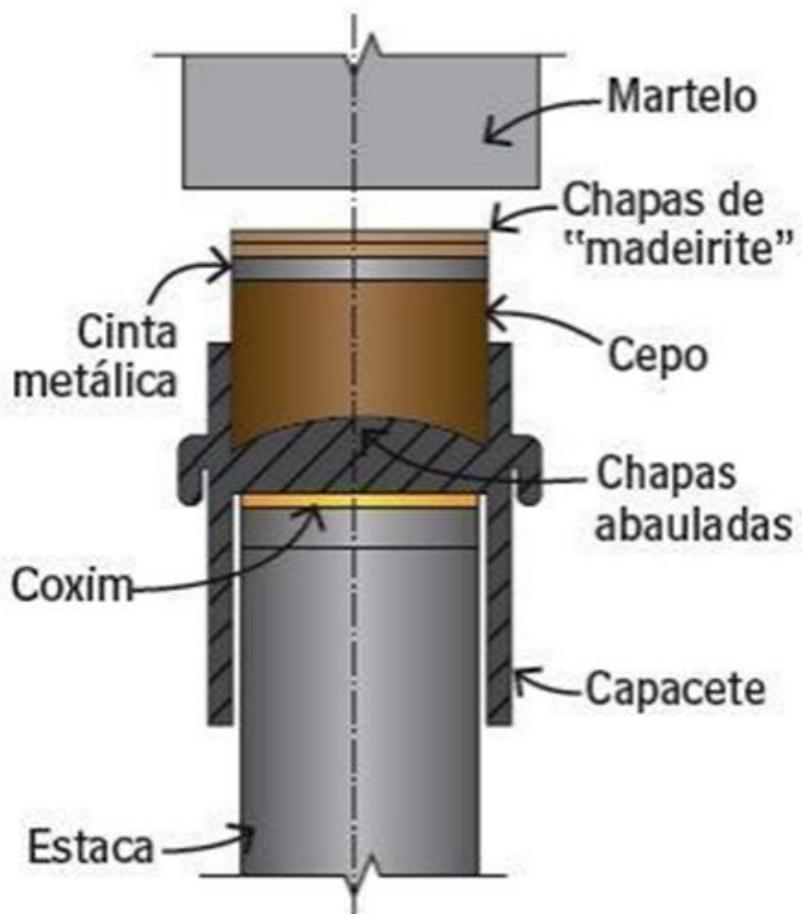


Fonte: NARESI, Luiz Antônio (2007)

3.2.3.3 Capacete Metálico

O capacete metálico é utilizado para que absorva e distribua de maneira uniforme as tensões decorrentes do martelo sobre a cabeça da estaca. O capacete conta com um coxim e um cepo em madeira, para otimizar a absorção dos impactos. É recomendável que esse seja abaulado, concentrando as tensões no centro do elemento em concreto (Figura 51).

Figura 51 - Componentes da base da estaca



Fonte: Bruno Loturco (2019)

3.2.3.4 Anel de Emenda

O anel de emenda é utilizado na emenda de estacas, quando existe a necessidade de comprimentos maiores que 12 metros, são soldados na junção entre as duas estacas, sendo preciso que suporte a transferência dos esforços de flexão, tração e compressão.

3.2.4 MÃO DE OBRA

Para a execução das estacas pré-moldadas é necessário que a mão de obra envolvida especializada, com experiência comprovada na execução de obras similares e com equipamentos apropriados para os serviços.

3.2.4.1 Mão de Obra Necessária em Ambientes Fluviais ou Marítimos

Engenheiro Civil Especializado: Um engenheiro civil especializado em obras marítimas é fundamental para supervisionar o projeto e garantir que as estacas sejam cravadas de acordo com as especificações e considerando as condições do ambiente.

3.2.4.2 Operadores de Embarcações

Operadores experientes de embarcações são necessários para navegar até o local de trabalho, posicionar as estacas pré-fabricadas e operar os equipamentos de cravação com precisão, levando em consideração as variações das marés e das correntes.

3.2.4.3 Mergulhadores Profissionais

Em alguns casos, mergulhadores profissionais podem ser necessários para auxiliar na instalação das estacas em áreas mais profundas ou para realizar inspeções subaquáticas.

3.2.4.4 Especialistas em Segurança Marítima

Profissionais especializados em segurança marítima desempenham um papel crucial na garantia do cumprimento de todas as medidas de segurança, especialmente em ambientes desafiadores como os fluviais ou marítimos. Uma das principais regulamentações que se aplicam ao trabalho nesses ambientes é a Norma Regulamentadora NR-30, que se concentra na Segurança e Saúde no Trabalho Aquaviário. A NR-30 estabelece requisitos específicos para assegurar a segurança e o bem-estar dos trabalhadores que desempenham suas funções em embarcações e plataformas offshore. Ela aborda temas que incluem treinamento, utilização de equipamentos de proteção individual (EPI), prevenção de acidentes e procedimentos de primeiros socorros, entre outros aspectos essenciais. Na figura 52 apresentamos colaboradores trabalhando em ambientes marítimos.

Figura 52 - Componentes da base da estaca



Fonte: Destaca Engenharia de Fundações (2023)

3.2.4.5 Mão de Obra Especializada em Equipamentos Subaquáticos

Se a instalação das estacas envolver trabalho subaquático significativo, pode ser necessário pessoal especializado em operar equipamentos subaquáticos, como câmeras de inspeção, sistemas de mergulho, entre outros.

A execução de estacas cravadas pré-fabricadas de concreto em ambientes fluviais ou marítimos necessita de um preparo adicional devido às condições específicas e desafios associados a esses locais. A segurança, a proteção ambiental

e a habilidade técnica são de extrema importância para o sucesso desse tipo de projeto.

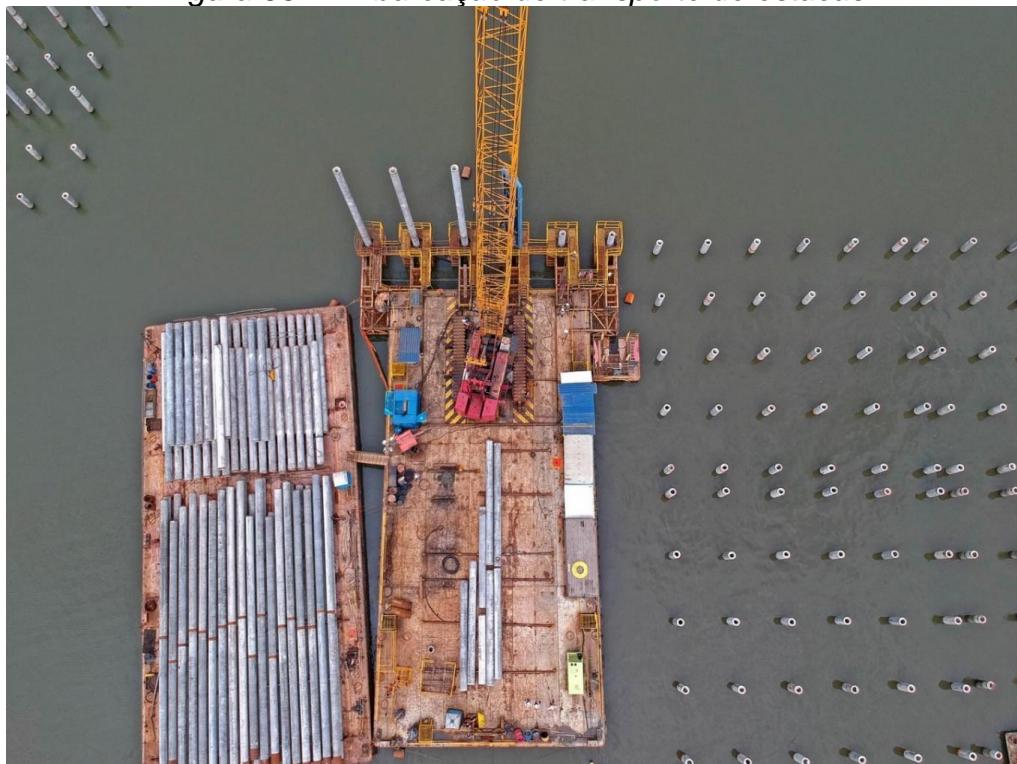
3.2.5 CONDIÇÕES DE TRABALHO

A execução de estacas cravadas pré-fabricadas de concreto em ambientes fluviais ou marítimos envolve condições de trabalho específicas e requer mão de obra qualificada, equipamentos adequados e considerações adicionais de segurança. Neste trabalho, descrevemos as condições de trabalho e mão de obra necessárias para esse contexto:

a) Acesso ao Local

É essencial garantir que a área onde as estacas serão cravadas seja acessível por via fluvial ou marítima. Isso pode exigir o uso de barcos ou embarcações especiais para transportar as estacas e equipamentos até o local conforme Figura 53.

Figura 53 - Embarcação de transporte de estacas



Fonte: Destaca Engenharia de Fundações (2023)

b) Condições Climáticas

Devido à exposição a condições climáticas adversas, como ventos fortes, chuvas e marés, é crucial monitorar as condições meteorológicas e ajustar o cronograma de trabalho conforme necessário. Além disso, estruturas de proteção, como quebra-mares temporários, podem ser necessárias para proteger o local de trabalho.

c) Proteção Ambiental

Em ambientes fluviais ou marítimos, a proteção ambiental é uma preocupação importante. Deve-se garantir que não haja derramamento de óleo ou produtos químicos prejudiciais durante o processo de cravação das estacas. Além disso, é necessário aderir a regulamentos rigorosos para preservar a vida marinha e a qualidade da água.

d) Estabilidade das Embarcações

As embarcações usadas para transportar as estacas e operar os equipamentos devem ser estáveis e seguras para operar em águas agitadas. Isso requer tripulações treinadas e experientes para manter a estabilidade da embarcação durante o processo de cravação.

3.3 ESTACA CRAVADA E ESCAVADA POR CIRCULAÇÃO REVERSA

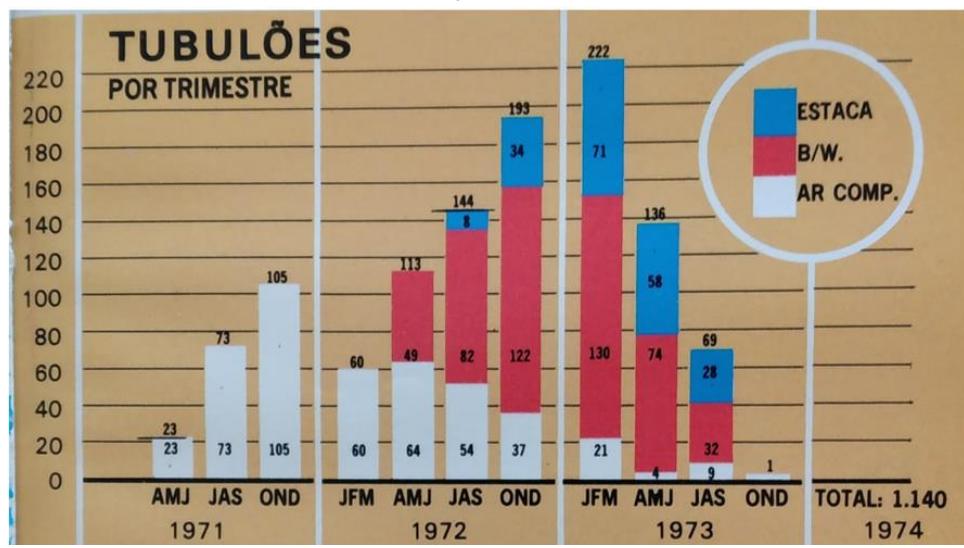
3.3.1 CONTEXTO HISTÓRICO

LL alemã para a construção da Ponte Rio-Niterói, inspirada na solução usada na Ponte sobre o Lago Maracaibo, na Venezuela, onde a empresa alemã utilizou camisas metálicas e perfuração para alcançar a rocha. Isso representou um marco na introdução dessa tecnologia inovadora no Brasil.

Na década de 1970, a metodologia da Fundação Mecanizada com Wirth foi implementada com sucesso na construção da Ponte Rio-Niterói. Durante essa fase, ocorreu a perfuração de 477 estacas, com um rendimento médio de 5 dias por estaca durante o pico de produção. Como ilustrado na Figura 54, em vermelho, essa implantação demonstrou a eficácia da tecnologia da Wirth em um projeto de grande

envergadura, resultando em maior produtividade na obra e enfatizando o compromisso com a preservação ambiental e a segurança.

Figura 54 - Gráfico da Evolução da Produção após implantação da estaca Wirth



Fonte: Eduardo Carlos Krueger (2023)

Durante os anos 1980, a tecnologia por trás da Fundação Mecanizada com Wirth continuou a se aperfeiçoar. As máquinas Wirth se tornaram mais sofisticadas, permitindo maior precisão e eficiência na instalação de estacas. Além disso, os métodos de cravação e perfuração foram aprimorados para atender a uma variedade de condições do solo.

No século XXI, a Fundação Mecanizada com Wirth passou por uma evolução significativa em direção à sustentabilidade e conformidade ambiental. A técnica foi amplamente adotada em projetos de construção que priorizavam a redução do impacto ambiental e a minimização dos transtornos para as comunidades locais.

Atualmente, a Fundação Mecanizada com Wirth é amplamente empregada em diversas aplicações de construção em todo o mundo. Sua escolha não se limita apenas à sua eficiência, mas também à sua notável capacidade de adaptação a diferentes tipos de solo e requisitos de projeto. Isso evita intervenções mais invasivas, como a construção de enseadeiras em rios ou a exposição da equipe de trabalho a ambientes insalubres, como ocorre na execução de tubulões à ar comprimido.

3.3.2 PROCEDIMENTO

Neste trecho será mostrado como ocorre a utilização da estaca cravada e escavada por circulação reversa (Wirth), um sistema de perfuração robusto e sem complicações, que é altamente eficiente para grandes diâmetros e profundidades, muito utilizado nas construções de portos como mostrado na imagem 55.

Figura 55 - Obra execução do Porto do Pecém



Fonte: NARESI, Luiz Antônio Naresi (2023)

3.3.2.1 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

Para se iniciar a obra é preciso ter os documentos de referência que oferecem as orientações para a realização deste processo construtivo. Entre os documentos que devem ser consultados está a ABNT NBR 6122/2022 (Projeção e execução de fundações), que regulamenta os requisitos a serem seguidos.

As regulamentações que definem os procedimentos apropriados a serem seguidos para a operação e os riscos que determinada atividade possa causar são indispensáveis, para garantir a segurança do trabalhador, as NR-18 (Condições de segurança e saúde no trabalho na indústria da construção) e NR-33 (Segurança e saúde nos trabalhos em espaços confinados) são essenciais.

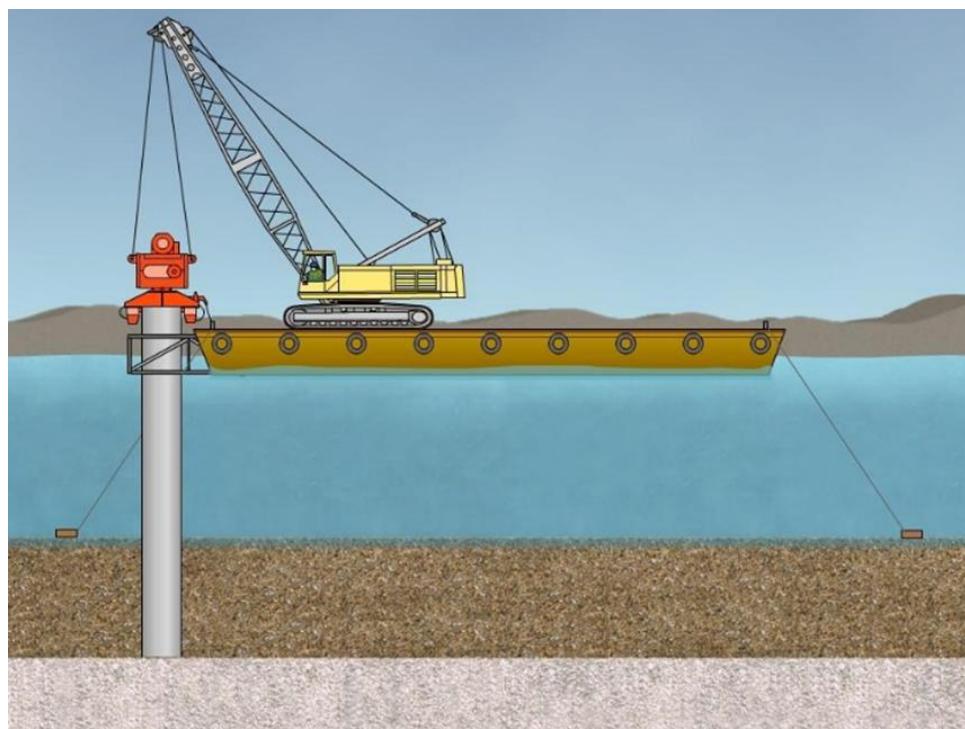
3.3.2.2 MÉTODO EXECUTIVO

A execução deste método possui etapas que devem ser seguidas para que haja uma eficiência em sua execução, o passo a passo que será demonstrado para perfurações de grande diâmetro e grandes profundidades.

a) Cravação

Crava-se no terreno a camisa metálica (tubo) no diâmetro da estaca com o uso de martelo (vibro cravador/hidráulico/queda livre) até que o mesmo atinja a região do topo da rocha (ou solo) conforme solicitação de projeto, como mostrado na Figura 56.

Figura 56 - Cravação da camisa metálica



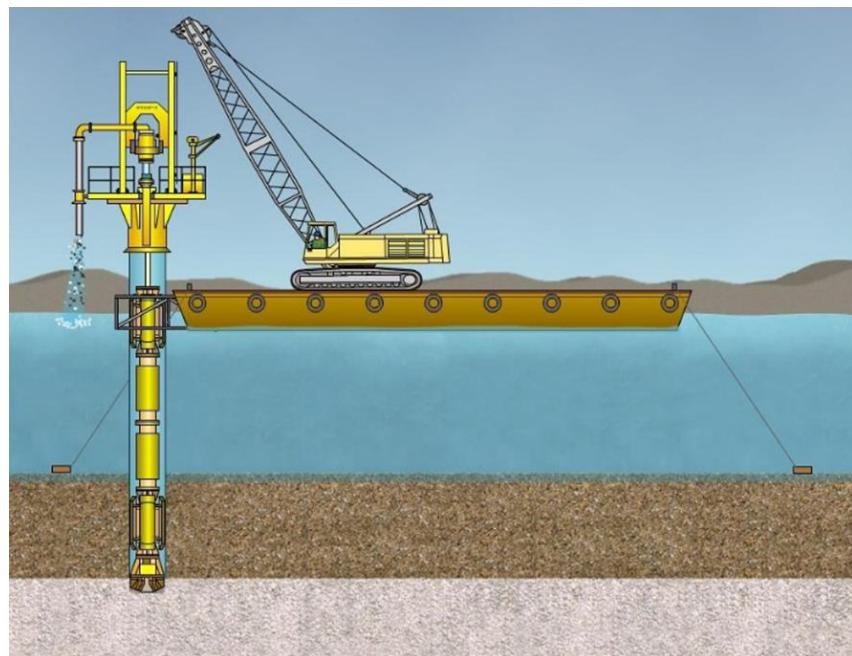
Fonte: KOIZIMI, Daniel (2017).

b) . Encaixe da Perfuratriz

Após cravar a camisa metálica até a cota da rocha, procede-se à escavação da rocha com perfuratriz rotativa hidráulica (Wirth) a partir da extremidade inferior da camisa escava-se o poço de engaste até a profundidade de projeto com demonstrado na Figura 57 e 58. A broca que é utilizada é formada por vários roletes. O tubo deve estar cheio de água para que o processo de perfuração possa ocorrer, pois o sistema de limpeza dos detritos da perfuração da rocha é feito por circulação de água. Assim,

enquanto a ferramenta de corte da rocha avança, a limpeza do furo é feita sem que seja preciso remover a ferramenta do interior da escavação e os resíduos são direcionados para água como mostrado na Figura 59. No transcorrer da perfuração é possível coletar o material perfurado, avaliar e comparar as características do maciço rochoso com o descrito na sondagem e, assim, melhor definir a profundidade a ser atingida pela estaca em função dos parâmetros geotécnicos adotados em projeto.

Figura 57 - Colocação da perfuratriz e escavação em rocha por circulação reversa.



Fonte: KOIZIMI, Daniel (2017).

Figura 58 - Perfuração interna do pino com tricone de asas com circulação reversa dotado de Widea.



Fonte: Luiz Antônio Naresi (2023)

Figura 59 - Foto da limpeza do interior da camisa

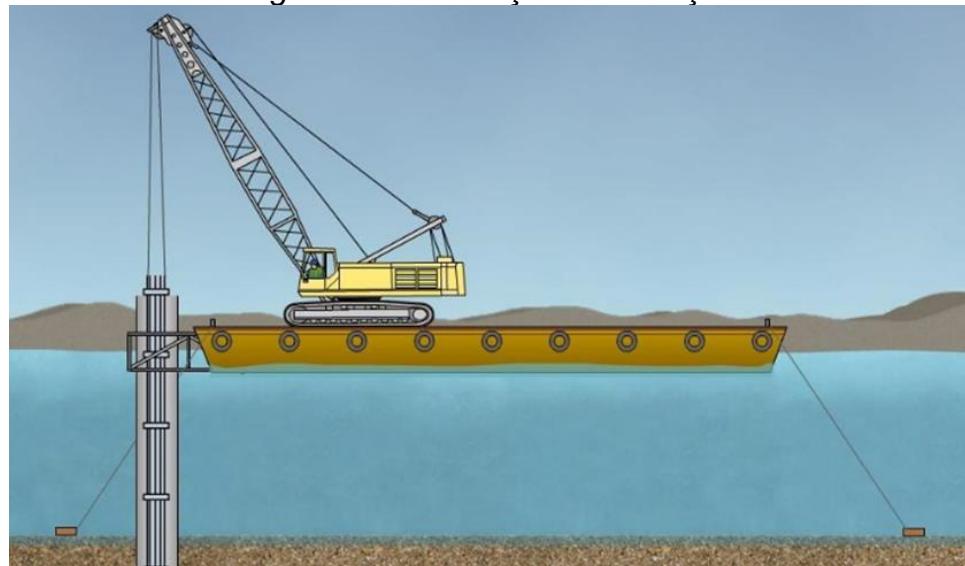


Fonte: Ramos L. A. (2019)

c) Colocação da armação

Terminada a perfuração é iniciada a colocação da armadura, por meio de um guindaste auxiliar. A armadura deve ser reforçada com anéis de enrijecimento e dotada de roletes distanciadores para garantir o recobrimento necessário. Na Figura 60 é possível ver como é utilizado o guindaste para a colocação da armadura, Ver Figura 61.

Figura 60 - Colocação da armação



Fonte: Jefferson Porfirio (2011)

Figura 61 - Armadura sendo colocada



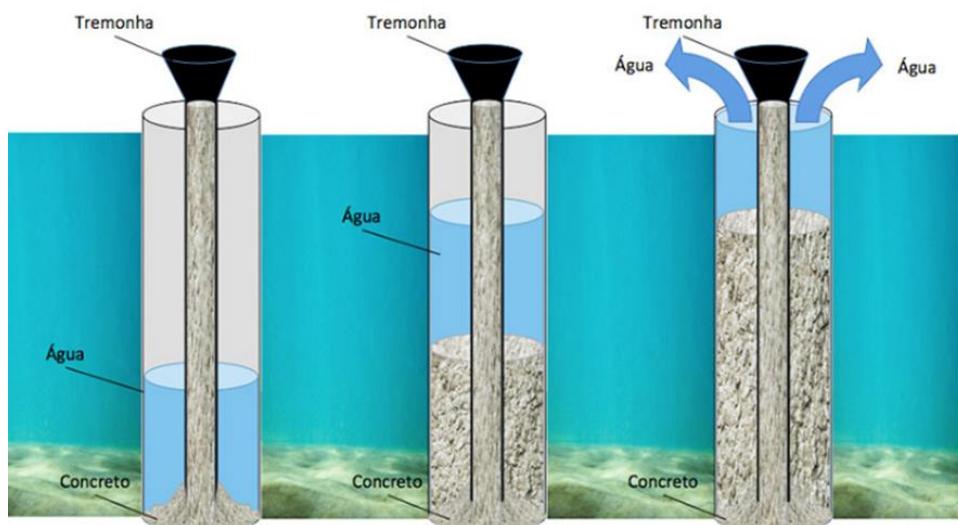
Fonte: Luiz Antônio Naresi (2023)

d) Concretagem submersa da estaca

O sistema de concretagem utilizado na execução das estacas escavadas é o submerso, sendo executado de baixo para cima de modo contínuo e uniforme. Este processo consiste na aplicação de concreto por gravidade através de um tubo, central ao furo, munido de uma tremonha de alimentação (funil) cuja extremidade, durante a concretagem deve estar imersa no concreto, na Figura 62 é possível observar como é feito este processo. Para evitar que a lama se misture com o concreto lançado, é colocado um obturador no interior do tubo, funcionando como êmbolo, expulsa a lama pelo próprio peso da coluna de concreto como mostrado na Figura 62.

Após esta operação prossegue-se com o lançamento de concreto, sendo despejado num fluxo constante e regular a fim de se obter uma concretagem adequada.

Figura 62 - Execução de uma concretagem submersa



Fonte: Mapa da obra (2016)

3.3.3 EQUIPAMENTO NECESSÁRIO

Para a execução das estacas cravadas e escavadas, os equipamentos envolvidos durante o procedimento podem ser divididos em suas respectivas etapas.

Para a etapa de cravação são necessários o posicionamento e a cravação da camisa metálica no furo até a profundidade definida, a cravação pode ser realizada por meio de martelo vibrocravador, Figura 63, que ao ser acoplado na parte superior da camisa metálica e ao ser acionado realiza o processo de cravação por vibração.

Figura 63 - Martelo vibrocravador



Fonte: Geofix (2020)

- I. Martelo hidráulico, como citado no item 3.2.3.2. Onde a cravação da estaca ocorre quando a energia de velocidade do fluido é convertida em energia de pressão dentro do equipamento. Esse processo também pode ser conhecido como golpe de aríete, causado quando se abre ou fecha de maneira rápida uma válvula ou quando bombas iniciam ou param repentinamente;
- II. Bate estaca em queda livre, também comentado no item 3.2.3.1. Constituído pela cravação da camisa metálica ou tubo pela queda do pilão por acionamento mecânico e sucessivos golpes.

Na etapa de escavação é necessária uma perfuratriz hidráulica, equipamento que promove o transporte do solo ou rocha por meio de perfuração rotativa. Dentre os métodos de perfuração será apresentado o de perfuração de circulação reversa, Figura 64. Método de perfuração por injeção de ar com circulação reversa, quando os detritos da perfuração no fundo do furo são deslocados pelo fluido para cima durante o fluxo do equipamento em uma circulação contínua sem a necessidade de remoção do equipamento do interior da escavação para remoção dos resíduos;

Figura 64 - Perfuratriz hidráulica rotação reversa, Wirth



Fonte: Geofix (2020)

A perfuratriz hidráulica, é composta pelos componentes:

- III. Compressor, equipamento responsável pela remoção e compressão do ar atmosférico e seu transporte pela tubulação dentro do corpo da prova e liberado próximo a sua cabeça, auxiliando com que os resíduos gerados pela cravação sejam elevados junto com água;
- IV. Bomba d'água, equipamento responsável por manter a circulação da água no furo, permitindo a retirada dos resíduos e manter limpa perfuração durante a cravação;
- V. Motores, powerpack, equipamentos responsáveis pelo funcionamento hidráulico da perfuratriz;
- VI. Corpo da perfuratriz, parte do equipamento onde é conectado todos os demais equipamentos, compressor, bomba, power pack, broca e tubo por onde são removidos os resíduos;
- VII. Broca, é a parte responsável pela perfuração do solo ou rocha, no interior do tubo ou camisa metálica, a perfuração é realizada por meio da quebra ou corte do material em contato com a broca. (Figura 65);

Figura 65 - brocas com botões de roletes



Fonte: Geofix (2020)

Enquanto para solos rochosos, a broca indicada para uso seria a broca com botões de tungstênio, figura 66.

Figura 66 - Broca com botões de tungstênio



Fonte: Geofix (2020)

Ainda são utilizados equipamentos especiais para auxílio da execução das estacas cravadas e escavadas como:

- VIII. Plataforma Auto-Elevatória Jackup, plataforma utilizada para realização da cravação e escavação da estaca em ambiente marítimo. A plataforma fica em flutuação e pode ser transportada por reboque ou por propulsão, ao ser posicionada na localização da cravação da estaca a plataforma por meio de acionamento elétrico ou hidráulico tem suas pernas apoiadas no leito marinho e que permite que a plataforma se movimente para cima ou para baixo e seja posicionada acima do nível da água, permitindo que a execução da estaca seja realizada de maneira estável;
- IX. Cantitraveller, Figura 67, plataforma metálica que trabalha em balanço apoiada em uma viga principal, a cantitraveller permite a execução de estacas cravadas e escavadas sem a necessidade de apoio de plataformas flutuantes ou embarcações, seu deslocamento é realizado pelas estacas que realizou o cravamento.

Figura 67 - Cantitraveller



Fonte: Silva, A. C. P (2018)

Além de ser necessário o Guindaste, para levantamento e posicionamento da camisa metálica, do martelo vibratório para cravação e da perfuratriz wirth para perfuração.

3.3.4 MÃO DE OBRA

A execução de estacas de fundação em obras offshore é uma tarefa complexa e crítica que envolve diversos aspectos, desde a escolha da tecnologia apropriada até

a gestão eficiente da mão de obra. Neste contexto, as perfuratrizes Wirth emergem como um possível elemento-chave para o sucesso desses empreendimentos. Este trabalho se propõe a explorar o papel da qualificação da mão de obra para operar as perfuratrizes Wirth na execução de estacas de fundação em obras submersas, garantindo a segurança e eficiência em ambientes marítimos desafiadores.

3.3.4.1 Equipe Responsável

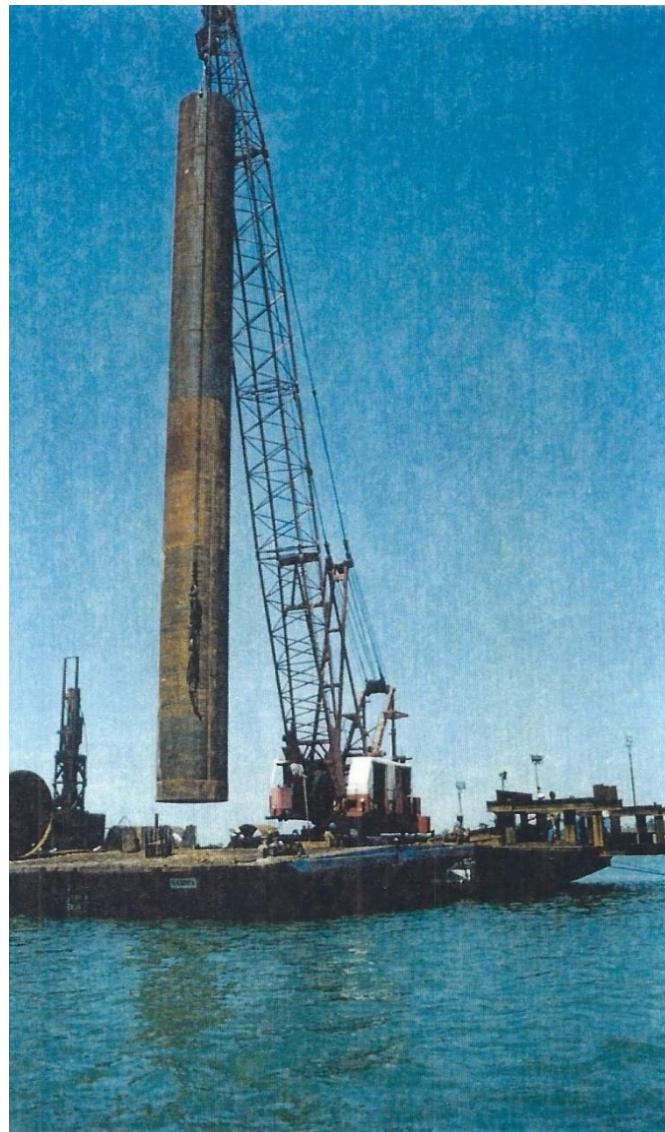
A equipe de engenharia responsável pela execução das estacas deverá se capacitar quanto as normas regulamentadoras vigentes, NBR 6122:2022 Projeto e execução de fundações, essa norma estabelece os critérios técnicos para o projeto e a execução de fundações em geral, incluindo estacas. Ela fornece orientações importantes para a execução de estacas perfuradas em circulação reversa. NBR 6118:2023 Projeto de Estruturas de Concreto, essa norma é relevante tanto para o projeto quanto para a execução de fundações, incluindo estacas, e deve ser seguida para garantir a qualidade e a segurança do processo. NBR 12131/2006 (Estacas - Ensaios de Carregamento), esta norma trata dos ensaios de carregamento em estacas, que são importantes para verificar a capacidade de carga das estacas e garantir a segurança estrutural. NR 18 (Condições e Meio Ambiente de Trabalho na Indústria da Construção), a NR-18 estabelece diretrizes para garantir a segurança e saúde dos trabalhadores na indústria da construção civil, e pode ser aplicável à execução de estacas perfuradas em circulação reversa. NBR ISO 9001 Sistemas de Gestão da Qualidade, implementar um sistema de gestão da qualidade de acordo com a ISO 9001 pode ser importante para garantir a qualidade do todo o processo. Esses são os pré-requisitos mínimos para planejar e supervisionar a operação de perfuração em circulação reversa.

3.3.4.2 Equipe de transporte e içamento

O passo inicial do processo executivo se dá pelo transporte das camisas metálicas e, posteriormente, pelo içamento das mesmas (ver Figura 68), onde serão cravadas no solo previamente a perfuração. Para isso, os encarregados de transportá-las e içá-las deverão estar devidamente treinados de acordo com os requisitos da NR 11 (Transporte, Movimentação, Armazenagem e Manuseio de Materiais), que é a

Norma de segurança para o transporte, movimentação, armazenagem e manuseio de materiais, tanto manualmente quanto para com o uso de equipamentos. Embora essa NR seja mais frequentemente associada a atividades em ambientes industriais terrestres, suas diretrizes podem ser aplicadas em uma variedade de contextos, incluindo obras offshore.

Figura 68 - içamento de camisa metálica com diâmetro de 2,00m



Fonte: Luiz Antonio Naresi Junior (2023).

3.3.4.3 Equipe de montagem

A equipe de obra responsável pela montagem e operação da perfuratriz deverá ser treinada nas normas regulamentadoras NR 12 (Segurança no Trabalho em

Máquinas e Equipamentos). A NR 12 é uma Norma fundamental para garantir a segurança no trabalho em máquinas e equipamentos, incluindo as perfuratrizes em circulação reversa usadas na execução de estacas de fundação. O cumprimento rigoroso dessas diretrizes é essencial para prevenir acidentes, proteger os trabalhadores e manter um ambiente de trabalho seguro e saudável. A Figura 69 mostra a imagem de um equipamento Perfuratriz Wirth.

Figura 69 - Perfuratriz Wirth PBA 818



Fonte:Ramos, L. A. (2019)

Para montagem da perfuratriz (Figura 70), os colaboradores devem estar devidamente atracados a um ponto fixo seguro, segundo os parâmetros estabelecidos pela NR 35 (Trabalho em Altura). A Norma adota o princípio de que o trabalho em altura deve ser cuidadosamente planejado, buscando evitar, sempre que possível, que os trabalhadores se exponham a riscos. Isso pode ser feito através da realização do trabalho de maneira diferente, da implementação de medidas para eliminar o risco de quedas ou da adoção de medidas para minimizar as consequências caso a queda seja inevitável em situações de diferenças de níveis. A Norma também sugere a aplicação de estratégias que antecipem os riscos, utilizando métodos de análise de

risco e documentos como Permissões de Trabalho, de acordo com as circunstâncias de trabalho, a fim de garantir a máxima segurança durante a execução das atividades em altura. O trabalho em áreas marítimas, como em plataformas e balsas, sujeita o funcionário a ficar exposto durante longos períodos as condições do clima, podendo gerar consequências diretas a sua saúde. A NR 21 Trabalho a Céu Aberto, é um ponto importante que o colaborador deve estar ciente antes de executar qualquer atividade nestes locais. O empregador tem a responsabilidade de disponibilizar abrigos, ainda que simples, que sejam eficazes na proteção dos trabalhadores contra as diferentes condições climáticas, tais como excesso de sol, calor, frio, umidade ou ventos.

Figura 70 - Montagem da perfuratriz



Fonte: Luiz Antonio Naresi Junior (2023)

A NR 15 Atividades e Operações Insalubres, a Norma regulamentadora 15 identifica as tarefas que podem ser classificadas como prejudiciais à saúde, o que confere aos empregados o direito ao acréscimo de remuneração por insalubridade. Ela consiste em uma seção geral e contém 13 apêndices, os quais estabelecem os

Limites de Tolerância para substâncias físicas, químicas e biológicas, sempre que for viável mensurar a presença de agentes nocivos no ambiente de trabalho. Também descrevem ou mencionam circunstâncias em que a atividade laboral é considerada insalubre qualitativamente. Além disso, as NR 16 Atividades e Operações Perigosas, esta NR estabelece diretrizes sobre atividades e operações que são consideradas perigosas, definindo critérios para o pagamento de adicional de periculosidade aos trabalhadores que executam tais atividades e NR 17 Ergonomia, estabelece parâmetros que visam adequar as condições de trabalho às características psicofisiológicas dos trabalhadores, proporcionando o máximo de conforto, segurança e desempenho eficiente, essas NRs podem não estar diretamente relacionadas à construção de estacas de fundação em obras offshore, mas elas ainda são importantes para garantir a segurança e o bem-estar dos trabalhadores em todas as áreas de trabalho, incluindo as atividades em obras marítimas. Na Figura 71 está mostrada a imagem de um equipamento de perfuração Wirth já montado para operação.

Figura 71 - Equipamento de perfuração Wirth montado para operação



Fonte: Luiz Antonio Naresi Junior (2023)

3.3.5 CONDIÇÕES DE TRABALHO

Toda equipe executora do serviço está submetida a diversas condições desfavoráveis para a saúde, ou que pode vir a dificultar a boa execução de uma ou mais atividades, como por exemplo:

- I. Agitação Marítima: O trabalho em mar agitado pode ser desafiador, com ondas e correntes fortes afetando a estabilidade da embarcação e a operação de equipamentos. A agitação pode resultar em balanços da embarcação, tornando o trabalho mais difícil e arriscado;
- II. Mudanças Climáticas: As mudanças climáticas repentinas podem afetar a segurança e o progresso do trabalho. A equipe deve estar preparada para a rápida mudança de condições e para interromper o trabalho em caso de condições climáticas perigosas.

Por exemplo, as tempestades podem ser perigosas, com ventos fortes e grandes ondas. Nessas situações, a segurança da equipe é prioridade, e é necessário evacuar a área de trabalho temporariamente;

- III. Isolamento Geográfico: Em alguns locais, as plataformas ou áreas de trabalho offshore podem estar a grandes distâncias da terra firme. A equipe precisa estar ciente de como acessar essas áreas, incluindo o uso de helicópteros ou embarcações para transporte;
- IV. Isolamento Social: O isolamento social pode ser desafiador, uma vez que a equipe passa longos períodos a bordo de embarcações ou plataformas, longe de amigos e familiares. Apoiar a saúde mental e emocional da equipe é essencial;
- V. Espaço Limitado: Em ambientes offshore, o espaço é frequentemente limitado. Isso requer organização eficaz do local de trabalho e a minimização de riscos devido ao espaço apertado;
- VI. Ambiente Confinado: Áreas confinadas, como porões de embarcações ou espaços fechados em plataformas, requerem procedimentos de segurança rigorosos. A equipe deve ser treinada em como entrar e sair de espaços confinados com segurança, além de lidar com situações de emergência;

Figura 72 - Observatório Automático Abrangente Azumigawa-Oki da Agência Japonesa de Recursos Hídricos.



Fonte: Grouth Project (2021)

- VII. Riscos de Acidentes: Devido às superfícies escorregadias e ao ambiente úmido, os riscos de acidentes, como quedas, tropeços e escorregões, são mais elevados. É essencial que a equipe utilize equipamentos de proteção individual (EPI) apropriados e siga as diretrizes de segurança;
- VIII. Alto Nível de Risco e Segurança: A equipe deve estar ciente dos riscos inerentes às operações marítimas e seguir rigorosamente os procedimentos de segurança. Isso inclui o uso de coletes salva-vidas, treinamento em resposta a incêndios e evacuações, e comunicação eficaz durante situações de emergência.

Figura 73 - WINDFALL ENGINEERING NO TRABALHO OFFSHORE NIGÉRIA



Fonte: WINDFALL ENGINEERING PROJECTS LTD (2012).

IX. Poluição Ambiental: Para evitar a contaminação do ambiente marinho, a equipe deve aderir a rígidos protocolos de prevenção de poluição. Isso inclui o uso de equipamentos de contenção de vazamentos, o monitoramento constante de fluidos de perfuração, locais adequados para o descarte de resíduos e a pronta resposta a incidentes ambientais.

De forma geral, a equipe deve estar ciente e passar por treinamento específico para lidar com as condições de trabalho únicas de ambientes marítimos.

4 CONCLUSÃO

Por meio do estudo das metodologias e procedimentos, de forma estruturada e detalhada, para a execução das fundações profundas como tubulões a ar comprimido, estacas pré-moldadas e das estacas com circulação reversa, no ambiente submerso, foi possível ter uma clareza em relação à importância desses tipos de fundações na engenharia civil, a exemplo da execução de pontes consideradas como referências de construção.

Outro aspecto importante observado foi o aprimoramento das técnicas construtivas, a evolução da capacitação da mão de obra necessária em cada tipo de fundação como: a necessidade de um estudo de viabilidade; a possibilidade de ser adotado mais de um tipo de fundação em uma mesma construção; a importância dos equipamentos que auxiliam durante a execução; as etapas necessárias e os treinamentos para garantir a execução adequada, com segurança.

Foi possível verificar também uma certa evolução, ao longo do tempo, em relação aos tipos e técnicas de fundações, a exemplo do tubulão de ar comprimido, em que houve a decisão da NR18 de proibir sua execução devido aos danos que podem ser causados aos trabalhadores envolvidos devido à compressão e à descompressão durante a jornada de trabalho e ao espaço de confinamento, podendo vir a causar até mesmo a morte deles.

Apesar disso, compreender o processo de execução, as especificações de segurança que o tubulão a ar comprimido e a necessidade de ambiente controlado para garantir a segurança durante a execução foram os fatores importantes para desmistificar o conceito pré-definido de que é uma fundação perigosa, mas sim de que

é uma fundação que requer conhecimento técnico especializado e o cumprimento rigoroso de normas de segurança e regulamentações específicas.

Um outro tipo de fundação com execução mais ágil e menos arriscada é a realizada com estacas pré-moldadas que, devido ao uso de material pré-fabricado, sua execução se concentra no posicionamento no canteiro de obra, e sua cravação, com auxílio de equipamentos, mas que necessita de atenção ao cravamento das demais estacas para averiguar o deslocamento e a necessidade de recravação. Quanto à mão de obra em ambiente com total presença de água, há a necessidade de mergulhadores, ou seja, apesar de se tratar de uma fundação com execução mais simplificada do que o tubulão, por exemplo, é uma fundação que também requer capacitação especializada e atenção para sua correta execução.

Enquanto a estaca escavada por circulação reversa, conhecida também como Wirth, devido ao equipamento utilizado (perfuratriz), pode ser considerada uma estaca com otimização de execução, em comparação com tubulão. Atualmente é uma fundação mais usual por ser uma estaca que utiliza etapa de cravação e escavação, ou seja, pela análise comparativa entre as três fundações abordadas, esta seria a mais indicada para ambiente totalmente submerso, por permitir que seja realizada a cravação com camisa metálica até a profundidade definida e por meio de escavação com o equipamento, o que faz com que não seja necessário que o trabalhador entre dentro da estrutura. Entretanto, como a exemplo da estaca pré-moldada, também requer conhecimento especializado das equipes envolvidas, tanto para condução dos equipamentos, quanto para o ambiente onde será executada as fundações.

Apesar da larga pesquisa sobre a temática, foi constatado que há pouca atenção na literatura para alguns aspectos específicos dessas fundações normalmente utilizadas em ambientes submersos, a exemplo de critérios de aceitabilidade, manutenções necessárias e análises patológicas que podem afetar sua efetividade e durabilidade ao longo de sua vida útil, aspectos esses que podem ser objeto de futuros trabalhos pelos profissionais da área de engenharia civil e que podem resultar para a engenharia práticas mais seguras, econômicas e sustentáveis, contribuindo para a construção de estruturas mais resilientes e duradouras em ambientes submersos.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albuquerque, A. B. **Estacas Metálicas: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Editora Pini, 2018.

Almeida CW, Lira TL, Januário LV, Souza MR. **Transtorno por estresse pós-traumático como causa de acidente de trabalho**. Rev Bras Med Trab 2012

Almeida, J. A. **Estacas Pré-moldadas: Teoria e Prática**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2017.

Almeida, J. A. F. (2015). **Fundações marítimas e subaquáticas**. Porto Alegre: Editora UFRGS.

AMAPÁ. **Governo inicia construção da nova ponte na lagoa dos Índios**. 23 jan. 2019. Disponível em: <https://www.apama.gov.br/noticia/2301/governo-inicia-construcao-da-nova-ponte-na-lagoa-dos-indios>. Acesso 13 ago. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2011). **NBR14724 DE 03/2011 – Informações e documento – Trabalho acadêmico** - Apresentação. Rio De Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2014). **NBR16258 DE 01/2014 – Estacas pré-fabricadas de concreto — Requisitos**. Rio De Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2014). **NBR13208 DE 06/2007 – Estacas –Ensaio de Carregamento dinâmico**. Rio De Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2014). **NBR16903 DE 09/2020 – Prova de carga estática em fundação profunda**. Rio De Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2022). **NBR6122 DE 03/2022 - Projeto e execução de fundações**. Rio De Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2020). **NBR6484 DE 10/2020 - Solo — Sondagem de simples reconhecimento com SPT — Método de ensaio.** Rio De Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2022). **NBR6502 DE 05/2022 – Solos e rochas - Terminologia.** Rio De Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1983). **NBR8036 DE 06/1983 – Programação de de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios.** Rio De Janeiro.

BrasFix (2014). Fundações Marítimas e Fluviais: **Aspctos contrutivos.** Disponível em: http://www.geofix.com.br/biblioteca/7o_curso_eng_Aula_Teorica_05B_2017.pdf Acesso em: 25 nov. 2023

Brasília na Fotográfica. **O Hipódromo da Gávea, no Rio de Janeiro (2023).** Disponível em: <https://brasilianafotografica.bn.gov.br/> Acesso em 23 nov.2023.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 12 - Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos.** Brasília, Ministério do Trabalho e Emprego, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-12-atualizada-2022-1.pdf>. Acesso em: 28, nov. 2023.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 15 - Atividades e operações insalubres.** Brasília, Ministério do Trabalho e Emprego, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/norma-regulamentadora-no-15-nr-15>. Acesso em: 22 ago. 2023.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 16 - Atividades e operações Perigosas.** Brasília, Ministério do Trabalho e Emprego, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/nr-16-atualizada-2023.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2023.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 17 - Ergonomia.** Brasília, Ministério do Trabalho e Emprego, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-17-atualizada-2022.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2023.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 18 - Segurança e saúde na Indústria da Construção.** Brasília, Ministério do Trabalho e Emprego, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/norma-regulamentadora-no-18-nr-18>. Acesso em: 23 de nov. 2023.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 21 – Trabalho a Céu Aberto.** Brasília, Ministério do Trabalho e Emprego, 1999. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-21.pdf>. Acesso em: 23 de nov. 2023.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 30 - Segurança e Saúde no Trabalho Aquaviário.** Brasília, Ministério do Trabalho e Emprego, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-30-atualizada-2022.pdf>. Acesso em: 22 de ago. 2023.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-33 - Segurança e Saúde nos Trabalhos em Espaços Confinados**. Brasília, Ministério do Trabalho e Emprego, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-33-atualizada-2022-retificada.pdf>. Acesso em: 22, ago. 2023.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-35 – Trabalho em Altura**. Brasília, Ministério do Trabalho e Emprego, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/nr-35-atualizada-2022-4-1-3.pdf>. Acesso em: 28, nov. 2023.

Caputo, Francisco. BRASFIX. **10 ° Curso de Engenharia Aplicada às Obras de Fundações e Contenções. Fundações Marítimas e Fluviais - Aspectos Construtivos**. FAAP. 2020. 46 slides.

Chellappah, P., Nogami, T., & Balendra, T. (2003). **Pile foundations in engineering practice**. 2nd ed. New York: CRC Press.

Chepstow Town Council: **Pontes de Chepstow**. Chepstow Town Council. Disponível em: https://www.chepstow.co.uk/Bridges_41447.aspx. Acesso em: 20 ago. 2023.

Construção Civil. **Tubulões a Ar Comprimido**. 14 mar. 2023. Disponível em: <https://construcaociviltips.blogspot.com/2013/03/tubuloes-ar-comprimido.html>. Acesso em 18 ago. 2023.

Destaca. **Obras Portuárias** (2023). Disponível em: <https://www.destacaengenharia.com.br/obras-portuarias>. Acesso em: 27, nov. 2023.

DESTACA ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES. **Obras Portuárias**. Sertãozinho, SP, 2023. site: destacaengenharia.com.br. Disponível em: <https://www.destacaengenharia.com.br/obras-portuarias>. Acesso em 28 nov. 2023.

Dicionário do Petróleo em Língua Portuguesa. **Plataforma Autoelevatória/Jack-Up, Jack-Up Platform**. Disponível em: <https://dicionariopetroleoegas.com.br/dictionary/plataforma-autoelevatoria/>. Acesso em: 27 set. 2023.

EDUARDO CARLOS KRUEGER. **Obras de Grande Porte 60**. São Paulo, 1 set. 2023. Linkedin: [linkedin.com/in/ek310135](https://pt.linkedin.com/pulse/obras-de-grande-ponte-60-eduardo-carlos-krueger). Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/obras-de-grande-ponte-60-eduardo-carlos-krueger>. Acesso em: 28 nov. 2023.

Extra SC. Chegam as primeiras estacas para a construção da nova ponte. Disponível em: <https://extra.sc/2020/05/05/chegam-as-primeiras-estacas-para-a-construcao-da-nova-ponte/>. Acesso em: 23 nov. 2023.

Fellenius, B. H. (2002). **Hélice Contínua Monitorada (HCM)**. In: **Fundações - Projeto, Execução e Controle**. 2^a ed. São Paulo: Pini.

FLEMING, Ken et al. (2020). **Piling Engineering**. 3^a ed. Boca Raton: CRC Press.

FOGAÇA, Melina, **Fundações e Contenções: Fundação com tubulões**. Infraestrutura Urbana: Projetos, custos e construção. Edição 20, nov. 2012

Fundações: teoria e prática. (1996). São Paulo: Pini. Acesso em: 25 nov. 2023.

GEOFIX. **Teoria 02: Fundações Marítimas (Brasfix)**. 7 out. 2020. Site: <http://www.geofix.com.br/biblioteca-cursos.php>. Disponível em: http://www.geofix.com.br/biblioteca/10_curso_eng_Aula_Teoria_02_2020.pdf. Acesso em: 28 nov. 2023.

Geomec Engenheiros Consultores (2020). Prova de carga em estacas.

Geomec. Conceitos Bate Estaca no Porto de Suape Fonte: Sérgio C. Paraíso. Disponível em: <https://www.abms.com.br/wp-content/uploads/2013/11/3-Workshop-Cravacao-com-Martelo-Hidraulico-Sergio-Paraizo.pdf>. Acesso em; 27 nov.2023.

GOMES, Jaqueline. **Ponte metálica de Igapó faz 106 anos. Novo Notícias.** 18 abril 2022. Disponível em:<https://www.novonoticias.com.br/ponte-metalica-de-igapo-faz-106-anos/>. Acesso 19 ago. 2023.

Google Earth. Hipódromo da Gávea (2023). Disponível em:
<https://earth.google.com/web/search/Hip%C3%b3dromo+da+G%C3%A1vea+-+Pra%C3%A7a+Santos+Dumont+-+Lagoa,+Rio+de+Janeiro+-+RJ/@-22.9737724,-43.2231219,3.5684915a,770.88626335d,35y,0h,0t,0r/data=CrMBGogBEoEBCiMweDliZDVhNGNjZDQ5OGEzOjB4ODk2MDBiN2JiNjQ4Zjc2YRlXv-MISfk2wCG8widCj5xFwCpISGlww7Nkcm9tbyBkYSBHw6F2ZWEgLSBQcmHDp2EgU2FudG9zIER1bW9udCATlExhZ29hLCBSaW8gZGUgSmFuZWlbyAtlFJKGAlgASImCiQJTKvvvWHOMkARSqvvvWHOMsAZhx1VUnQPQ0AhgwXdaG-rTsA6AwoBMA.>
Acesso em: 25 nov. 2023

Growth Project. (2021). Disponível em:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Adogawa_offshore_General_Automatic_Observatory_20210406_04.jpg. Acessado em: 29 nov. 2023

Hipódromo da Gávea. Disponível em: <https://www.google.com/intl/pt-BR/earth/about/> Acesso em: 23 nov.2023.

KOIZIMI, Daniel (2017). Disponível em:
[https://www.linkedin.com/pulse/sistema-de-perfura%C3%A7%C3%A3o-em-circula%C3%A7%C3%A3o-reversa-reverse-drilling-koi...?trk=public_profile_article_view](https://www.linkedin.com/pulse/sistema-de-perfura%C3%A7%C3%A3o-em-circula%C3%A7%C3%A3o-reversa-reverse-drilling-koi...). Acessado em: 29 nov. 2023

KRUEGER, Eduardo. **Obras de grande porte.** Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/obras-de-grande-porte-60-eduardo-carlos-krueger>. Acesso em: 27 nov.2023.

LANDOW G. P; BANERJEE J; PRICE C. **Isambard Kingdom Brunel. the Victorian Web.** 18 april 2016. Disponível em: <https://victorianweb.org/technology/bridges/45.htm>. Acesso em 19 ago.2023.

LE BRUN, Charles (c.1643). **Horatius Coclès défendant le pont du Sublicius.** Disponível em: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1f/Le_Brun_Horatius_Cocl%C3%A8s_d%C3%A9fendant_le_pont_du_Sublicius.jpg. Acesso em: 25 nov. 2023.

Loturco. Bruno. (2019) **Veja os cuidados na execução de fundações com estacas de concreto pré-fabricadas.** Disponível em: [file:///D:/Users/Gui/Downloads/08.%20Estacas%20pr%C3%A9moldadas%20de%20concreto%20\(T%C3%A9chne,%202016\).pdf](file:///D:/Users/Gui/Downloads/08.%20Estacas%20pr%C3%A9moldadas%20de%20concreto%20(T%C3%A9chne,%202016).pdf). Acesso em: 27 nov.2023.

LUIZ ANTONIO NARESI JUNIOR. **3) Fundação Mecanizada com Wirth – Com utilização de cantitravel e plataforma off shore.** 23 abr. 2023 .Site: www.naresi.com. Disponível em: <https://sites.google.com/site/naresi1968/naresi?authuser=0>. Acesso em: 28 nov. 2023.

LUIZ ANTONIO NARESI JUNIOR. **441) Construção Fundação Ponte Rio Paranaíba com Wirth.** 20 ago. 2023 .Site: www.naresi.com. Disponível em: <https://sites.google.com/site/naresi1968/441-constru%C3%A7%C3%A3o-funda%C3%A7%C3%A3o-ponte-rio-parana%C3%ADba-com-wirth>. Acesso em: 28 nov. 2023.

MALTA, Augusto (1926). Disponível em: <https://brasilianafotografica.bn.gov.br/?p=27444>. Acesso em: 25 nov. 2023

MANCINI, Francine Trevisan. **Presença e atuação profissional 1930-1959.** 2013. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Paulo,2023.

MAPA DA OBRA. **Concretagem submersa exige soluções adequadas.** 2 set. 2016. Site: <https://www.mapadaobra.com.br/>. Disponível em: <https://www.mapadaobra.com.br/negocios/concretagem-submersa-exige-solucoes-adequadas/>. Acesso em: 28 nov. 2023.

MARANGON, Marcio. **Geotecnia de Fundações e Obras de Terra**, 2018. Geotecnia de Fundações e Obras de Terra, abril de 2022.

MEDEIROS, Adriano. **A antiga ponte de Igapó. Fatos e Fotos de Natal Antiga.** 27 out. 2021. Disponível em: <https://fatosfotosdenatalantiga.com/a-antiga-ponte-de-igapo/>. Acesso em: 19 ago. 2023.

Município de Tubarão. Nova ponte. Disponível em: <https://tubarao.sc.gov.br/>. Acesso em: 25 nov. 2023.

NARESI, Luiz Antonio. Lan Geotecnia e Fundação, 1993. Disponível em: <https://sites.google.com/site/langeotecniaefundacao/contato/produtos>. Acesso em: 25 nov. 2023

NARESI, Luiz Antonio. Lan Geotecnia e Fundação, 2023. Disponível em: <https://sites.google.com/site/langeotecniaefundacao/contato/produtos>. Acesso em: 22 ago. 2023.

NARESI, Luiz Antonio. **Fundação mecanizada com Wirth**, 2023. Disponível em: <https://sites.google.com/site/naresi1968/fundacao-mecanizada-com-wirth>. Acesso em: 27 nov. 2023.

NETO, Manoel Fernandes de Negreiros. **A Construção da Ponte Metálica sobre o Rio Potengi: Aspectos Históricos, Construtivos e de Durabilidade - Natal/RN, Brasil (1912-1916)** - Estudo de Caso. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

Novo Notícias. (2022). Disponível em: <https://www.novonoticias.com.br/ponte-metalica-de-igapo-faz-106-anos/>. Acesso em: 25 nov. 2023

Oliveira, J. C. **Estacas Escavadas: Teoria e Prática**. São Paulo: Editora Pini, 2017.

Oliveira, J. C. **Estacas Pré-moldadas: Fabricação, Transporte e Instalação**. São Paulo: Editora Pini, 2019.

Prefeitura Municipal de Tubarão (2021). Disponível em: <https://www.portal.criesuaagencia.com.br/com-nova-ponte-entenda-as-mudancas-no-transito-de-tubarao>. Acesso em: 25 nov. 2023

Prefeitura Municipal de Tubarão (2020). Disponível em: <https://tubarao.sc.gov.br/noticia-614950>.<https://www.portal.criesuaagencia.com.br/com-nova-ponte-entenda-as-mudancas-no-transito-de-tubarao> Acesso em: 25 nov. 2023

PECK, R. B., Hanson, W. E., & Thornburn, T. H. (2008). **Foundation Engineering**. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons.

PEREIRA, Caio. **Fundações Profundas**. Escola Engenharia, 2016. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/fundacoes-profundas/>. Acesso em: 22 de abril de 2023.

PEREIRA, Caio. **O que é bloco de fundação?**. Escola Engenharia, 2017. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/blocos-de-fundacao/>. Acesso em: 25 de novembro de 2023.

PEREIRA, Caio. **Tubulão a ar comprimido**. Escola Engenharia, 2015. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/tubulao-a-ar-comprimido>. Acesso em: 23 ago. 2023.

Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). **Pile Foundation Analysis and Design**. 1st ed. London: Telford.

Racional Engenharia. (2021). **Estaca Hélice Contínua Monitorada.**

RAMOS, L. A; YABUSAKI, G. H.S; COSTA, A. F. **Método de perfuração por circulação reversa com air lift empregado na fundação da Ponte Anita Garibaldi.** Revista da Universidade Ibirapuera, São Paulo, n.18, p 8-14, jul/dez 2019.

Randolph, M. F., & Wroth, C. P. (1979). **An analysis of the horizontal pull-out of screw piles.** *Géotechnique*, 29(4), 463-480.

Rodrigues, H. B., Nunes, F. L., & Pinto, C. S. (2012). **Uso de geotêxteis em fundações marítimas e subaquáticas.** In: Anais do 4º Congresso Brasileiro de Geotecnica Ambiental. Rio de Janeiro, Brazil.

SILVA, A. C. P; BARBOSA, O. M. H. **Projeto estrutural e de fundações do Terminal Offshore de Minérios do T1 do Complexo Portuário do Açu.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 10.,2018, Rio de Janeiro.

SILVA, Cristiano Oliveira. **História e outras curiosidades sobre a Ponte Rio-Niterói, marco da engenharia da construção.** Engenharia 360,02 mar. 2023. Disponível em: <https://engenharia360.com/engenharia-da-construcao-ponte-rio-niteroi/>. Acesso em: 20 ago. 2023.

SCHNEIDER, Nelso (2020). Disponível em: <https://nelsoschneider.com.br/fundacao-radier>. Acessado em: 25 nov. 2023.

SCHNEIDER, Nelso. **Fundações Profundas.** NELSOSCHNEIDER, 2016. Disponível em: <https://www.nelsoschneider.com.br/fundacoes-profundas/>. Acesso em: 23 abr. 2023.

SiloTips, **Análise de ruído na atividade de operadores de “bate-estacas” na Construção Civi.** Disponível em:<https://silo.tips/download/analise-de-ruido-na-atividade-de-operadores-de-bate-estacas-na-construao-civil>. Acesso em: 23 nov. 2023.

SILVA, A. C. P; BARBOSA, O. M. H. **Projeto estrutural e de fundações do Terminal Offshore de Minérios do T1 do Complexo Portuário do Açu.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 10,2018, Rio de Janeiro.

SILVA, Cristiano Oliveira. **História e outras curiosidades sobre a Ponte Rio-Niterói, marco da engenharia da construção.** Engenharia 360,02 mar. 2023. Disponível em: <https://engenharia360.com/engenharia-da-construcao-ponte-rio-niteroi/>. Acesso em 20 ago. 2023.

Silva, J. M. **Estacas Metálicas: Projeto e Execução.** São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2016.

Silva MP, Estrázulas JA, Lacerda EP. **Trabalho em condições hiperbáricas.** Revista Digital Buenos Aires 2010.

SILVA, Tomaz / Agência Brasil (2015). Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2015-03/leilao-de-concessao-da-ponte-rio-niteroi-deve-ser-concorrido-diz#>. Acesso em: 25 nov. 2023

Sondarello Engenharia (2019). Disponível em: <https://sondarello.com.br/sapata-entenda-este-tipo-de-fundacao>. Acessado em: 25 nov. 2023

SOTEF. **Cravação Estacas Pré-Moldadas.** Disponível em: <https://sotef.com.br/servico/cravacao-estacas-pre-moldadas/>. Acesso em: 06/ set de 2023.

Tecnologia da Construção (2009). Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/tecdaconstrucao/3793508457>. Acesso em: 25 nov. 2023

TEIXEIRA, Cornelio Zampier. (1997). **Capacidade de Carga de Sapatas, Estacas de Pequeno Diâmetro e Tubulões Curtos em Função do SPT: Um estudo em solos residuais de gnaisses para a região sul de minas.** São Carlos.

The Victorian Web. (2016). Disponível em:
<https://victorianweb.org/technology/bridges/45.html> Acesso em: 25 nov. 2023.

Tomlinson, M. J. (2001). **Pile Design and Construction Practice.** 5th ed. London: Taylor & Francis.

Vasconcelos, Augusto Carlos de. (2002). **O concreto no Brasil: vol. 3: pré-fabricação, monumentos, fundações.** São Paulo: Studio Nobel

Velloso, Dirceu de Alencar & Lopes, Francisco de Rezende (2012). **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas.** São Paulo: Oficina de Textos.

WINDFALL ENGINEERING PROJECTS LTD (2012). Disponível em:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:WINDFALL_ENGINEERING_AT_WORK_OF_FFSHORE_NIGERIA.jpg Acessado em: 29 nov. 2023

NARESI, Luiz Antônio. Tubulão à Ar Comprimido com Camisa de Concreto Armado <https://sites.google.com/site/naresi1968>. (1993). Acesso em: 27, novembro de 2023.

Hachich, Waldemar (2012). **Fundações: Teoria e Prática (1996).** São Paulo: ABMS/ABEF.