

**CENTRO UNIVERSITÁRIO CAMPO LIMPO PAULISTA - UNIFACCAMP**  
**ENGENHARIA CIVIL**

**MÁRCIO APARECIDO ANTONINI FERREIRA**

**DIMENSIONAMENTO DE TUBULÕES PARA OBRAS DE ENGENHARIA CIVIL**

Campo Limpo Paulista - SP  
2023

**Márcio Aparecido Antonini Ferreira**

**DIMENSIONAMENTO DE TUBULÕES PARA OBRAS DE ENGENHARIA CIVIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário Campo Limpo Paulista – UNIFACCAMP, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Paschoal Perdão Junior  
Coordenador: Prof. Dr. Paschoal Perdão Junior

Campo Limpo Paulista - SP  
2023

**Márcio Aparecido Antonini Ferreira**

**DIMENSIONAMENTO DE TUBULÕES PARA OBRAS DE ENGENHARIA CIVIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário Campo Limpo Paulista – UNIFACCAMP, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Campo Limpo Paulista - SP  
2023

## **Agradecimentos**

Expresso, em primeiro lugar, minha gratidão a Deus, que permitiu que todas essas conquistas se concretizassem, atendendo minhas preces, me fortalecendo e sustentando ao longo desses anos.

Aos meus filhos, dedico meu agradecimento pelo amor, incentivo, apoio emocional, pela confiança depositada e pela compreensão nos momentos em que precisei abdicar de estar presente. Eles são meu alicerce, minha fonte de força e motivação.

Ao meu pai, que não está mais entre nós neste plano, mas permanece vivo em meus sentimentos, expresso minha eterna gratidão.

Aos amigos da faculdade, agradeço pela força, incentivo e pelos grupos de estudo que compartilhamos ao longo desses anos.

Agradeço, com profunda gratidão, a cada professor que dedicou sua vida e tempo para nos educar. Sem eles, não haveria a formação de novos profissionais. Ao meu orientador, Paschoal Jr., expresso minha gratidão pela paciência, horas dedicadas e apoio para a realização deste trabalho.

Sou grato pela confiança depositada em mim por todos os professores, que nos momentos mais desafiadores, presentearam-me com aulas envolventes e conteúdos essenciais.

A todos que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para minha formação, expresso meu sincero e profundo agradecimento.

## Resumo

As fundações profundas descritas como tubulão são utilizadas quando as cargas transmitidas pelas estruturas ao solo são muito grandes, não permitindo utilizar-se de fundações rasas. Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo demonstrar todas as etapas para o dimensionamento de um tubulão para fundação de uma estrutura. Assim uma revisão bibliográfica sobre os principais métodos de dimensionamento de fundações se faz necessário. Foram coletadas informações sobre o solo, a carga a ser suportada pela fundação, os esforços a que o tubulão fora submetido, sondagem do solo e os diferentes métodos de dimensionamento. Com base nos dados, foram determinadas as dimensões do tubulão, as características do concreto e do aço utilizado em sua construção e capacidade máxima suportada pelo tubulão. Foram realizadas análises de segurança e estabilidade da fundação, levando em consideração diferentes cenários de carregamento e possíveis variações nas propriedades do solo. Para este dimensionamento, foram utilizados diversos referenciais teóricos, incluindo norma brasileiras como a NBR 6122, além de outros estudos e pesquisas em geotecnia, mecânica dos solos, métodos empíricos, semiempíricos, métodos analíticos, numéricos entre outros. Ao final do trabalho, é apresentado uma análise crítica e detalhada sobre os principais métodos para dimensionamento de uma fundação profunda tipo tubulão, além de apresentadas recomendações para elaboração de projetos de fundações utilizando tubulões, com base nos principais achados desse estudo.

**Palavras-chave:** Fundações profundas; Tubulão a céu aberto; Estaca escavada; Dimensionamento; Geotecnia; Solo; Comportamento estrutural; Engenharia geotécnica, Escavação, Estabilidade, Normas de Construção, Análise geotécnica, Flexibilidade construtiva, Segurança estrutural, Execução de fundações, Geologia de fundações.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Detalhes do Tubulão.....	25
Figura 2 — Tubulões - Perspectiva e Corte longitudinal .....	25
Figura 3 — Tubulões - Formatos da base .....	26
Figura 4 — Valores de C para estacas escavadas (Décourt, 1986).....	29
Figura 5 — Valores atribuídos ao coeficiente $\alpha$ .....	30
Figura 6 — Valores atribuídos ao coeficiente $\beta$ .....	30
Figura 7 — Falsa Elipse .....	31
Figura 8 — Dimensionamento do bloco de fundação – valor de $\alpha$ .....	32
Figura 9 — Formato característico de um tubulão com base alargada .....	35
Figura 10 — Deslocamentos "unitário" vertical e horizontal ao tubulão. ....	36
Figura 11 — Aplicação de uma rotação unitária ao tubulão. ....	36
Figura 12 — Diagramas propostos pelo método Russo .....	37
Figura 13 — Valores propostos para o coeficiente de reação vertical .....	40
Figura 14 — Fatores de capacidade de carga (Terzaghi) .....	43
Figura 15 — Fatores de forma - Terzaghi .....	44
Figura 16 — Tubulões próximos .....	51
Figura 17 — Situação de divisa (Pilares) .....	52
Figura 18 — Situação de divisa (Tubulões).....	55

### Lista de Quadros

Quadro 1 — Parâmetros de dimensionamento de tubulões segundo a NBR 6122 ..	33
--	----

### Lista de Tabelas

Tabela 1 — Tabela de sondagem .....	46
-------------------------------------	----

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	8
1.1	<b>OBJETIVO GERAL</b> .....	9
1.1.1	<b>Objetivos específicos</b> .....	9
1.2	<b>PROBLEMA</b> .....	9
1.3	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	9
1.4	<b>METODOLOGIA</b> .....	10
1.4.1	<b>Metodologia Científica</b> .....	10
1.4.2	<b>Metodologia do projeto</b> .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2	<b>DESENVOLVIMENTO</b> .....	11
2.1	<b>MECÂNICA DOS SOLOS</b> .....	11
2.1.1	<b>Sondagem</b> .....	12
2.1.1.1	Sondagem à percussão (SPT) .....	13
2.2	<b>FUNDAÇÕES</b> .....	14
2.2.1	<b>Fundações profundas</b> .....	15
2.2.1.1	Estacas Strauss.....	16
2.2.1.2	Estacas pré-moldadas de concreto .....	17
2.2.1.3	Estacas tipo Franki .....	18
2.2.1.4	Estacas Raiz.....	18
2.2.1.5	Estacas em hélice contínua.....	19
2.2.1.6	Estacas Metálicas.....	20
2.2.1.7	Estacas de Madeira .....	21
2.2.1.8	Estacas Tubulão.....	22
2.3	<b>DIMENSIONAMENTO DE TUBULÃO</b> .....	23
2.3.1	<b>Tubulões a ar comprimido</b> .....	27
2.3.2	<b>Capacidade do solo</b> .....	27
2.3.3	<b>Dimensionamento da base</b> .....	30
2.3.3.1	Base Circular .....	30
2.3.3.2	Base falsa elipse .....	31
2.3.4	<b>Dimensionamento da altura da base (<math>H_b</math>)</b> .....	31
2.3.5	<b>Dimensionamento do fuste (f)</b> .....	32
2.3.6	<b>Dimensionamento da área do fuste</b> .....	33
2.3.7	<b>Dimensionamento do volume da base</b> .....	34
2.3.8	<b>Carregamentos transversais em tubulões</b> .....	34
2.3.9	<b>Dimensionamento da armadura de flexão e distribuída</b> .....	40
2.3.10	<b>Capacidade de carga</b> .....	42
3	<b>METODOLOGIA</b> .....	45
3.1	<b>ESTUDO DE CASO 1</b> .....	45
3.2	<b>ESTUDO DE CASO 2</b> .....	49
3.3	<b>ESTUDO DE CASO 3</b> .....	52
4	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	56
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	60

**GLOSSÁRIO..... Erro! Indicador não definido.**



# 1. INTRODUÇÃO

Dimensionamento de fundações tipo tubulão no campo dinâmico da engenharia civil, o estudo aprofundado e preciso das fundações é um pilar essencial para a concepção e construção de estruturas sólidas e seguras. Nesse contexto, as fundações do tipo tubulão surgem como protagonistas, oferecendo uma alternativa versátil e eficiente para alicerçar edificações em diversos tipos de solos. A escolha da fundação é uma decisão estratégica e multifatorial, influenciada por características geotécnicas do terreno, condições ambientais e requisitos específicos do projeto. Este estudo direciona seu foco para o dimensionamento de fundações tipo tubulão, considerando não apenas as propriedades técnicas dessa modalidade, mas também a sua aplicabilidade em cenários diversos. Exploraremos os fundamentos teóricos das fundações profundas, compreendendo a essência dos tubulões e seu papel na garantia de segurança e estabilidade estrutural. Além disso, abordaremos a importância do dimensionamento correto, não apenas como uma etapa técnica, mas como uma contribuição significativa para a prevenção de patologias, a eficiência construtiva e a viabilidade econômica dos projetos. A adaptação do diâmetro e comprimento dos tubulões durante a escavação, a minimização de vibrações no processo construtivo e a capacidade de apoiar pilares em um único fuste são aspectos fundamentais a serem explorados. Contudo, a complexidade do tema exige um olhar crítico sobre as condições do solo, demandando estudos geotécnicos aprofundados para embasar as decisões de dimensionamento. À medida que avançamos neste estudo, buscamos preencher lacunas de conhecimento e incentivar uma abordagem integrada no projeto de fundações tipo tubulão. Afinal, o comprometimento com a segurança estrutural não apenas demanda conhecimento teórico sólido, mas também uma compreensão prática e aplicada das normativas vigentes e das condições reais do ambiente de construção. Este trabalho se propõe a ser uma contribuição valiosa para profissionais da engenharia civil, estudantes e demais interessados, promovendo uma análise crítica e atualizada sobre o dimensionamento de fundações tipo tubulão. Através dessa exploração, almejamos impulsionar o avanço na eficiência e segurança

das práticas construtivas, respeitando sempre a singularidade de cada projeto e o compromisso inalienável com a integridade estrutural

### **1.1. Objetivo geral**

O presente trabalho de conclusão de curso tem como objetivo realizar de forma prática e objetiva o dimensionamento de um tubulão para fundação de uma estrutura através de uma revisão bibliográfica sobre os principais métodos conhecidos e utilizados atualmente para uma fundação profunda do tipo tubulão.

#### **1.1.1. Objetivos específicos**

Mostrar de forma prática e didática os conceitos envolvidos em um projeto de uma fundação profunda do tipo tubulão, enfatizando temas relacionados à sua finalidade, tipos de tubulões, métodos de dimensionamento e construção e materiais aplicados, desde a escavação até a concretagem, afim de fornecer informações relevantes para profissionais de engenharia civil e estudantes da área.

### **1.2. PROBLEMA**

Como realizar o dimensionamento adequado e apresentar os principais métodos teóricos, empíricos, semiempírico e analítico de forma didática, mostrando todas as etapas de projeto, como, análise do solo, escavação e de construção para uma fundação profunda tipo tubulão, considerando aspectos técnicos e normativos?

### **1.3. Justificativa**

As fundações profundas tipo tubulões são elementos estruturais utilizados em diversas construções de engenharia civil, como edifícios, pontes, viadutos e fundações para grandes estruturas. Portanto, entender o funcionamento, o dimensionamento e a construção desses elementos são fundamentais para o exercício da profissão de engenheiro civil. Os tubulões apresentam vários desafios técnicos, como a escolha da fundação adequada em função do tipo de solo, a determinação do diâmetro e do comprimento dos tubulões, das dimensões da base, se esta será circular, quadrada ou falsa-elíptica, as execuções da escavação e a concretagem. Ao abordar esses desafios em um trabalho de conclusão de curso, pode-se ajudar estudantes e pessoas interessadas no tema a desenvolver habilidades

práticas importantes, levando a um avanço na disponibilidade de temas de modo a alavancar pesquisas e inovações.

## **1.4. Metodologia**

### **1.4.1. Metodologia Científica**

Para o desenvolvimento desse trabalho, serão consultados vários autores através de uma pesquisa bibliográfica com os principais tópicos relacionados a pesquisa em questão, serão consultadas as normas pertinentes a cada caso, feito um comparativo entre os métodos teóricos, empíricos, semiempíricos e analíticos, apresentados os cálculos de forma simples e objetiva. Será consultado também artigos científicos, trabalhos de conclusão de curso, teses e dissertações.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Desenvolvimento

Velloso e Lopes (2011) afirmam que o projeto e execução de fundações requerem conhecimentos em geotécnica e cálculo estrutural. A estrutura é calculada pelo engenheiro estrutural que considera os apoios que não se deslocam e, em seguida, repassa ao projetista de fundações o conjunto de cargas resultantes. As cargas inicialmente calculadas podem ser modificadas devido às deformações resultantes das fundações quando carregadas. É fundamental que o engenheiro de fundações participe da análise do problema da interação solo-estrutura, juntamente com o engenheiro estrutural, e possua conhecimentos sólidos em geologia de engenharia, mecânica das rochas e mecânica dos solos, englobando tópicos como origem e formação dos solos, caracterização e classificação dos solos, investigações geotécnicas, percolação nos solos, controle da água subterrânea, resistência ao cisalhamento, capacidade de carga e empuxos, compressibilidade e adensamento, distribuição de pressões, cálculo de deformações e recalques.

Para o dimensionamento de fundações profundas, em especial, tubulão que é o foco deste trabalho, são utilizados diversos referenciais teóricos, incluindo normas brasileiras, como a NBR 6122, além de outros estudos e pesquisas em geotécnica e mecânica dos solos, das cargas que serão suportadas e dos materiais que serão utilizados. Lembrando que o dimensionamento correto de uma fundação é fundamental para garantir a segurança e estabilidade de qualquer edificação.

#### 2.1.1. Mecânica dos solos

(CAPUTO, 1987) explica que em 1925, o livro *Erdbaumechanik*, do Prof. Karl Terzaghi, marcou o início da Mecânica dos Solos, uma ciência aplicada para estudar o comportamento dos sistemas constituídos por uma fase sólida granular e uma fase fluida. Embora os seus princípios fundamentais tenham sido publicados nesta data, foi somente em 1936, no Primeiro Congresso Internacional de Mecânica dos Solos e Fundações, que a ciência aplicada foi consagrada de maneira definitiva. O evento

representou um marco na história da engenharia civil, pois permitiu discutir sobre os meios de explorar as vantagens que os novos progressos ofereciam para combater as forças traiçoeiras da natureza ocultas na terra.

Em um projeto de fundações é necessário levar em consideração as cargas que serão aplicadas pela obra e a forma como o solo irá responder a essas solicitações. Como os solos possuem características muito distintas entre si, respondendo de maneira variável, toda a experiência transmitida pelas gerações de construtores se relaciona com o tipo de solo existente. Dessa forma, é possível escolher as fundações mais adequadas para cada situação e garantir a segurança da construção da obra (HACHICH *et al.*, 1998, p. 51).

Ainda de acordo com (CAPUTO, 1987), a construção de uma fundação sempre tem um risco devido às incertezas no terreno e cálculos, mas é importante minimizá-lo para evitar falhas que afetam o proprietário, projetista e construtor. Cada um tem sua responsabilidade: o proprietário deve evitar desperdício financeiro, o projetista deve fazer cálculos adequados com coeficientes de segurança prudentes, e o construtor deve aprimorar seus métodos construtivos e alertar o projetista sobre imprevistos. Ao planejar a investigação geotécnica, é necessário considerar as características do terreno e do tipo de estrutura que será construída. O número e profundidade dos reconhecimentos geotécnicos são definidos de acordo com as dimensões, cargas e características dos terrenos e da estrutura. É fundamental que a investigação seja rápida e conduzida por empresas e profissionais idôneos e experientes para garantir resultados confiáveis.

### **2.1.2. Sondagem**

Quando se está projetando fundações para uma construção, é muito importante conhecer bem o subsolo em que ela será construída. Infelizmente, muitas vezes isso não acontece. O projetista recebe apenas informações sobre a construção e um conjunto de sondagens. Essas sondagens são como um "primeiro olhar" no subsolo, mas se o projetista tiver dúvidas, é preciso fazer uma investigação mais detalhada. Existem três etapas na investigação do subsolo: a investigação preliminar, a investigação de projeto e a investigação de execução. Na investigação preliminar, são feitas sondagens a percussão para saber quais as principais características do solo.

Na investigação de projeto, são feitas mais algumas sondagens, além de ensaios *in situ* (que são feitos no local), para ter certeza de que as fundações escolhidas serão adequadas. Também podem ser feitos ensaios em laboratório com amostras do solo. Na investigação de execução, que pode ser feita tanto pelo projetista quanto pelo responsável pela obra, são confirmadas as condições de projeto em áreas críticas ou onde os solos variam muito. Assim, para projetar fundações adequadas, é preciso conhecer bem o subsolo. Isso é feito através de sondagens e ensaios em diferentes etapas da investigação do subsolo (LOPES; VELLOSO, 2011).

Para se realizar uma sondagem, que é a técnica mais utilizada, é necessário abrir um furo no solo e revesti-lo com tubos metálicos. A perfuração é feita por meio de ferramentas ou máquinas, que desagregam o terreno para extrair amostras representativas das diferentes camadas. Durante a sondagem, são registradas as cotas das camadas distintas, níveis d'água e outras observações para orientar o engenheiro na fase de projeto da obra. Para pontes, existem diversas soluções de sondagem, incluindo o uso de flutuantes, tripoides, plataformas fixas e embarcações, dependendo das condições do ambiente. O sino de sondagem também é utilizado para o estudo das fundações de estruturas *off Shore*, entre outras finalidades (CAPUTO, 1987).

#### **2.1.2.1. Sondagem à percussão (SPT)**

Souza e Garcia (2014) discorrem sobre o ensaio SPT (Standart Penetration Test), um método comumente utilizado na engenharia geotécnica para estimar a resistência do solo à penetração. O ensaio é realizado através da inserção de um amostrador padrão no solo, utilizando um martelo padrão de queda livre com um peso específico. O número de golpes necessário para penetrar a amostra a uma determinada profundidade é registrada e utilizada para determinar a resistência do solo. Os autores destacam que o SPT é bastante utilizado por sua simplicidade e rapidez de execução, além de fornecer informações quantitativas sobre as características do solo. No entanto, eles alertam que essa técnica, apresentam algumas limitações, como a não capacidade de fornecer informações detalhadas sobre a composição do solo e sua variabilidade espacial. Portanto é importante que engenheiros geotécnicos considerem as limitações do SPT e utilizem outras técnicas

complementares para obter uma compreensão mais completa e detalhada das características dos solos.

Oliveira e Amaro (2016) afirmam que a sondagem à percussão é uma técnica indispensável para a caracterização do subsolo em projetos de engenharia civil e geotécnica. Essa técnica possibilita a estimativa das camadas de solo e rocha presentes no terreno, bem como sua espessura e resistência. Além disso, a sondagem à percussão é fundamental para a identificação de possíveis problemas geotécnicos que possam afetar a estabilidade das estruturas construídas. Através da análise dos resultados obtidos pela sondagem, é possível avaliar a capacidade de suporte do solo, identificar a presença de lençóis freáticos, determinar a ocorrência de descontinuidades geológicas e estimar a profundidade do nível freático.

Dessa forma, Oliveira e Amaro (2016) destacam a importância da sondagem à percussão para o sucesso de projetos de engenharia civil e geotecnia, sendo uma etapa fundamental no processo de planejamento e execução de obras de grande porte.

## **2.2. Fundações**

Segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), fundação é a parte da estrutura que tem a função de transmitir as cargas de uma edificação para o solo, de modo seguro e estável. As fundações estão divididas em dois tipos, fundações rasas ou diretas e profundas ABNT NBR 6122/2019 (2019).

A NBR 6122/2019 ressalta em seu escopo que:

Reconhecendo que a engenharia geotécnica não é uma ciência exata e que riscos são inerentes a toda e qualquer atividade que envolva fenômenos ou materiais da Natureza, os critérios e procedimentos constantes desta Norma procuram traduzir o equilíbrio entre condicionantes técnicos, econômicos e de segurança usualmente aceitos pela sociedade na data de sua publicação. Nos projetos civis que envolvem mecânica dos solos e mecânica das rochas, o profissional habilitado com notória competência é o profissional capacitado a dar tratamento numérico ao equilíbrio mencionado (ABNT NBR 6122/2019, 2019).

Guimarães e Peter (2018) ressalta que normalmente, as construções apresentam várias opções de fundações, que devem ser selecionadas com base na economia de custos e no tempo de instalação reduzido. Durante a análise preliminar, pode-se adicionar uma variedade de opções de fundações superficiais, incorporar níveis de implementação adicionais e considerar várias alternativas para fundações profundas. Durante a avaliação dos custos e prazos, é crucial levar em conta os processos de escavação e preenchimento do solo.

Melo (2019) também discorre da observação pela ABNT sobre o fato de que a engenharia de fundações não é uma disciplina exata e, portanto, é importante seguir rigorosamente as normas que guiam o planejamento da investigação geotécnica. Assim sendo, destaca as principais normas brasileiras relacionadas ao assunto.

- NBR 8044: Projeto geotécnico - Procedimento - esta norma estabelece os procedimentos a serem observados nos estudos e projetos geotécnicos.
- NBR 8036: Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios – norma que especifica os procedimentos mínimos e a profundidade das sondagens.
- NBR 12722: Discriminação dos serviços para construção de edifícios – nesta norma podemos verificar a importância da investigação geotécnica na fase de estudos preliminares, vemos os serviços referentes ao projeto geotécnico.

### **2.2.1. Fundações profundas**

De acordo com o item 3.11 da (ABNT NBR 6122/2019, 2019), as estacas são elementos de fundação profunda que são completamente executados por meio de equipamentos ou ferramentas, sem que ocorra trabalho manual em profundidade em qualquer momento de sua execução. A norma reconhece vários tipos de estacas, incluindo madeira, aço, concreto pré-moldado, concreto moldado in loco, argamassa, calda de cimento, ou qualquer combinação dos anteriores, que são executadas no Brasil. Em contraste, o tubulão é definido como um elemento de fundação profunda pelo item 3.49 da mesma norma, que pode exigir trabalho manual em profundidade para executar o alargamento de base ou para a limpeza do fundo da escavação durante a etapa final de escavação do terreno, uma vez que as cargas nesse tipo de



fundação são resistidas principalmente pela ponta. Os tubulões são divididos em duas categorias básicas: a céu aberto (normalmente sem revestimento) e a ar comprimido (ou pneumático), que são revestidos; o revestimento pode ser de camisa de concreto armado ou por camisa de aço (metálica). No caso da camisa metálica, é possível que ela seja perdida ou recuperada.

As fundações profundas devem ser dimensionadas de acordo com as características do solo e das cargas a serem suportadas, levando em consideração os efeitos dinâmicos e as condições geotécnicas locais. Além disso, devem ser executadas com rigoroso controle de qualidade, verificando a verticalidade, capacidade de carga e integridade dos elementos.

#### **2.2.1.1. Estacas Strauss**

Lopes e Velloso (2011) explica que a estaca Strauss é um tipo de estaca moldada no solo que requer um equipamento relativamente simples. É necessário um tripé com guincho, um pequeno pilão, uma ferramenta de escavação e tubos de revestimento para sua construção. A qualidade da estaca depende do trabalho da equipe encarregada. Primeiramente, um tubo de revestimento é descido no terreno, e seu diâmetro determina o tamanho da estaca. Isso é feito por meio de um processo parecido com as sondagens a percussão ou por escavação do interior do tubo com uma ferramenta chamada sonda ou "piteira". Quando a cota desejada é atingida, enche-se o tubo com cerca de 75 cm de concreto úmido, que é compactado à medida que o tubo é retirado. Essa manobra é repetida até que o concreto atinja a cota de arrasamento. É importante que o concreto tenha boa qualidade até essa cota, por isso, às vezes é colocado um pouco acima da cota de arrasamento para garantir a qualidade. Ao trabalhar abaixo do lençol d'água, é recomendável ter grande cuidado na execução da estaca Strauss.

Lopes e Velloso (2011) Salienta ainda que, caso haja água no fundo do furo após a perfuração, que não possa ser retirada pela sonda, é aceitável lançar um volume de concreto seco para obstruir o furo, entretanto, nesse caso deve-se desprezar a contribuição da ponta da estaca na sua capacidade de carga. As estacas Strauss podem ser armadas com uma ferragem longitudinal (barras retas) e estribos que permitam livre passagem do soquete de compactação e garantam um cobrimento

da armadura não inferior a 3 cm. Caso não haja armação, é necessário providenciar uma ligação corno bloco, por meio de uma ferragem que é simplesmente cravada no concreto fresco.

#### **2.2.1.2. Estacas pré-moldadas de concreto**

Segundo ABNT NBR 6122/2019 (2019) estacas pré-moldadas de concreto são elementos estruturais fabricados em concretos simples ou armado, com seção transversal circular, quadrada, retangular ou octogonal, com comprimentos que variam de acordo com a necessidade de cada projeto. Essas estacas são moldadas em fábrica, com ou sem armadura, e transportadas para o canteiro de obras para serem cravadas no solo. A norma estabelece ainda os requisitos para a produção, transporte, armazenamento, cravação e verificação das estacas pré-moldadas de concreto, visando garantir a segurança e qualidade da estrutura. É importante destacar que a escolha do tipo de estaca pré-moldada a ser utilizada deve ser feita com base nas condições do solo e nas cargas a serem suportadas pela fundação.

As principais características das estacas pré-moldadas de concreto são:

- **Fabricação em série:** as estacas pré-moldadas de concreto são fabricadas em série, garantindo a uniformidade de qualidade, dimensões e resistência.
- **Rapidez de instalação:** como já foram fabricadas antecipadamente, as estacas pré-moldadas podem ser instaladas de forma mais rápida e eficiente do que as moldadas no local.
- **Resistência e durabilidade:** as estacas pré-moldadas de concreto tem alta resistência e durabilidade, sendo capazes de suportar grandes cargas e resistir à corrosão e à deterioração.
- **Diversidade de modelos e tamanhos:** as estacas pré-moldadas de concreto podem ser encontradas em diversos modelos e tamanhos, atendendo as necessidades de diferentes tipos de projetos e terrenos.
- **Sustentabilidade:** a sua produção utiliza menos material e gera menos resíduos do que as estacas moldadas no local, tornando-se uma opção mais sustentável.

- Custo-benefício: por serem produzidas em série e possuírem rapidez na instalação, as estacas pré-moldadas em concreto podem apresentar um melhor custo-benefício em comparação com as estacas moldadas no local.

#### **2.2.1.3. Estacas tipo Franki**

Conforme Hachich *et al.* (1998, p. 329) a estaca do tipo Franki é uma fundação que utiliza a cravação de um tubo de ponta fechada no solo, com a inserção de material granular através de golpes de um pilão, formando uma base alargada. Esta técnica foi desenvolvida por Edgard Frankignoul na Bélgica há mais de 85 anos, e foi utilizada pela primeira vez no Brasil em 1935 na Casa Publicadora Baptista, no Rio de Janeiro. O processo de execução da estaca começa com a colocação do tubo de revestimento e a formação da bucha, seguida da compactação do material granular e da cravação do tubo no solo através de golpes do pilão. Após a cravação, o tubo é preso à torre do bate-estaca para expulsar a bucha e formar a base alargada com apiloamento de pequenas quantidades de concreto quase seco. A armação é então instalada, ajustada e controlada durante a concretagem do fuste, que é realizada com camadas sucessivas de concreto e recuperação do tubo pelo apiloamento. Durante todo o processo, são feitas verificações da altura do concreto e da integridade da armação e do fuste. A concretagem é finalizada cerca de 30 cm acima da cota de arrasamento.

#### **2.2.1.4. Estacas Raiz**

De acordo com a norma brasileira ABNT NBR 6122/2019 (2019) as estacas raiz são um tipo de estaca de reforço, moldada in loco, que utiliza uma perfuração contínua com circulação de fluido para injeção de calda de cimento. Esse processo permite que a estaca seja escavada e preenchida com concreto simultaneamente, formando uma coluna de concreto armado no terreno. As estacas raiz são indicadas para solos com baixas resistências ou para áreas com restrições de altura ou espaço, pois permitem a execução de fundações profundas com diâmetros reduzidos. A norma estabelece requisitos para dimensionamento, produção, cravação, controle de qualidade e ensaios das estacas raiz, visando garantir a segurança e eficiência do

processo construtivo. As estacas raiz pode ser utilizadas em diversas aplicações, tais como contenção de encostas, reforço de fundações existentes, construção de muros de arrimo e obras em áreas urbanas com restrição de espaço.

As principais características das estacas Raiz são:

- Alta capacidade de carga: as estacas Raiz são capazes de suportar cargas elevadas, devido à grande área de aderência do solo com as raízes.
- Versatilidade: as estacas Raiz podem ser utilizadas em diferentes tipos de solo, inclusive em solos de baixa resistência.
- Baixo impacto ambiental: o processo de instalação das estacas Raiz não demanda grande movimentação de terra e não gera grandes impactos ambientais.
- Velocidade de execução: as estacas Raiz podem ser instaladas em curto período de tempo, o que aumenta a produtividade da obra.
- Diâmetros variáveis: as estacas Raiz podem ser dimensionadas de acordo com as necessidades da estrutura, permitindo diâmetros variados.
- Flexibilidade: as estacas Raiz podem ser instaladas em diferentes angulações, permitindo adaptações a diversos projetos.
- Controle de qualidade: todo processo de instalação da estaca Raiz pode ser monitorado e controlado, o que garante maior qualidade na execução da obra.

#### **2.2.1.5. Estacas em hélice contínua**

A estaca Hélice-Continua é um tipo de estaca de concreto que é moldado no próprio local onde será utilizado. Ela é feita utilizando um trado contínuo e a injeção de concreto sob pressão controlada, tudo isso enquanto o trado é retirado do terreno. Esse tipo de estaca foi desenvolvido nos Estados Unidos e se tornou popular na Europa e no Japão na década de 80. No Brasil, a primeira vez que ela foi usada foi em 1987 com equipamentos próprios. Atualmente, muitas máquinas importadas da Europa são utilizadas para criar estacas com até 24 metros de profundidade. A construção da estaca Hélice-Continua acontece em três fases: perfuração, concretagem simultânea e colocação da armação. A perfuração é feita com uma mesa rotativa que gira o trado na profundidade desejada, aplicando o torque necessário para vencer a resistência do terreno. O trado é composto por uma hélice espiral com dentes na extremidade inferior para penetrar no solo. Em terrenos mais resistentes, pontas

de vdia podem ser utilizadas. A concretagem é feita através do tubo central do trado enquanto ele é retirado lentamente do terreno. Essa fase é importante para garantir que não haja vazios entre a retirada do trado e o preenchimento do espaço com concreto, assim evitando estrangulamentos ou seccionamentos da estaca. Após a concretagem,  estaca recebe uma armação em forma de gaiola, feita de barras grossas com estribos helicoidais. Essa armação  centralizada no furo com a ajuda de espaçadores para garantir um recobrimento mínimo necessário (HACHICH *et al.*, 1998, p. 345).

Ainda segundo Hachich *et al.* (1998) estaca Hélice-Continua pode ser utilizada em diversos tipos de terrenos, tanto solos coesivos quanto arenosos, e sem a necessidade de alívio significativo do terreno. A produtividade pode variar de 150 a 400 metros por dia, dependendo do diâmetro do trado, da profundidade da estaca, do tipo e resistência do terreno e do torque do equipamento utilizado.

#### **2.2.1.6. Estacas Metálicas**

A ABNT NBR 6122/2019 (2019) define estaca metálica como elemento estrutural pré-fabricado ou moldado in loco, de aço estrutural, de seção transversal circular, quadrada ou retangular, geralmente cravado ou perfurado no solo, utilizando para suporte de cargas verticais e / ou horizontais em fundações profundas. As estacas metálicas podem ser do tipo tubular, com perfil laminado ou soldado, com ou sem revestimento, e tem como principal vantagem a capacidade de suporte elevada e a possibilidade de serem introduzidas em solos de alta resistência.

As principais características das estacas metálicas são:

- Resistência: as estacas metálicas são altamente resistentes, o que significa que podem suportar cargas extremamente altas e forças externas.
- Durabilidade: as estacas metálicas são feitas de materiais duráveis, como aço ou ferro fundido, o que garantem uma vida útil longa.
- Flexibilidade: as estacas metálicas podem ser cortadas e moldadas facilmente, o que as torna ideais para uso em uma ampla variedade de projetos.
- Facilidade de aplicação: as estacas metálicas podem ser instaladas com facilidade utilizando de equipamentos simples.

- Resistência a corrosão: o aço inoxidável e o aço galvanizado oferecem resistência a corrosão, o que as tornam adequadas para uso em ambientes aquáticos e salinos.
- Capacidade de carga: as estacas metálicas podem suportar grandes cargas, o que as tornam adequadas para uso em projetos de construções de pontes, prédios, viadutos entre outros.

#### **2.2.1.7. Estacas de Madeira**

Segundo a ABNT NBR 6122/2019 (2019) projetos de estruturas de madeira, é um elemento estrutural de madeira de seção retangular ou circular, que pode ser utilizado como elemento estrutural em fundações diretas e profundas, proteção superficial e estabilização de taludes. A norma especifica dimensões mínimas e requisitos de qualidade da madeira utilizada para fabricação das estacas. Além disso, a norma estabelece critérios para dimensionamento e verificação da capacidade de carga das estacas de madeira em função de parâmetros como diâmetro, comprimento, resistência da madeira e tipo do solo.

As principais características das estacas de madeira são:

- Flexibilidade: as estacas de madeira são relativamente flexíveis, o que significa que elas podem ser moldadas e adaptadas para se ajustarem ao terreno em que estão sendo instaladas.
- Resistência: a madeira é um material naturalmente resistente, e isso torna as estacas de madeira capazes de sustentar cargas consideráveis.
- Facilidade de instalação: as estacas de madeira são relativamente fáceis de instalar, uma vez que podem ser cortadas e aparadas com facilidade.
- Economia: a madeira é um material bastante acessível, o que torna as estacas de madeira uma opção econômica para obras de construção.
- Durabilidade: a madeira pode ser tratada para resistir a intempéries e a ações de insetos e outros organismos danosos, o que torna as estacas de madeira uma opção durável em determinadas condições.

### 2.2.1.8. Estacas Tubulão

Conforme Hachich *et al.* (1998, p. 400) os tubulões são elementos utilizados como base para construções e podem ser construídos de duas formas básicas: a céu aberto ou a ar comprimido. Eles são diferentes das estacas porque, em seu processo final de construção, um operário desce para completar a escavação ou fazer a limpeza do solo. A base do tubulão deve ser dimensionada de maneira a evitar alturas superiores a 2m, mas, em casos excepcionais, pode-se admitir alturas maiores se devidamente justificadas. Quando as características do solo indicam que o alargamento da base é problemático, pode-se usar injeções, aplicar cimento superficialmente ou escorar o tubulão para evitar o desmoronamento do fuste. Se a base se apoia em solo, a concretagem deve ser feita em, no máximo, 24 horas após o término da execução do alargamento da base para evitar novas avaliações. Já se a base do tubulão é assente na rocha, a pressão admissível deve considerar a continuidade da rocha, inclinação e atitude da mesma sobre a estabilidade. No caso de tubulões com bases assentes em cotas variáveis, deve-se executá-los iniciando pelos mais profundos e passando para os mais rasos. Além disso, deve-se evitar trabalho simultâneo em bases alargadas de tubulões cuja distância, de centro a centro, seja inferior a duas vezes o diâmetro da maior base. Isso vale tanto para a escavação quanto para a concretagem, e é especialmente importante quando se tratar de tubulões a ar comprimido.

Ao alcançar o lençol d'água durante a execução do tubulão, é essencial revestir a escavação e usar ar comprimido. A campânula é amplamente utilizada nesses casos. Essa estrutura é bombeada com ar comprimido para evitar que a água entre no interior do tubulão e tem um tubo de descarga para o material escavado. Na fase de concretagem, é adicionado um elemento entre a campânula e o revestimento do tubulão, equipado com um tubo de concretagem. Existem algumas variações que serão descritas abaixo. Quando o fuste é escavado mecanicamente, é comumente utilizado um revestimento metálico, podendo ser recuperado ou não. A escavação é realizada com a presença de água. Após atingir a profundidade desejada, a campânula é instalada, o ar comprimido é aplicado, e os operários descem para alargar a base. Normalmente, a base e um trecho do fuste são concretados sob ar comprimido. Quando o concreto adquire alguma resistência, a campânula é removida

e o restante do fuste é concretado a céu aberto. Para realizar esse tipo de tubulão, é necessária uma máquina que desça a camisa metálica (conhecida como tubuladora) e uma máquina de escavação. Dependendo do equipamento disponível, o revestimento metálico pode ser recuperado imediatamente após a concretagem do fuste. Em alguns casos, o revestimento metálico pode ser cravado a percussão. Quando o fuste é escavado manualmente, é utilizado um revestimento metálico ou de concreto. Se o diâmetro do tubulão exceder as opções de revestimento metálico (cerca de 1,50 m) ou pelo custo, pode-se optar pelo revestimento de concreto armado. Normalmente, o revestimento de concreto é moldado in situ e desce junto com o processo de escavação em trechos. O primeiro elemento concretado tem uma forma especial, compreendendo uma câmara de trabalho. Após atingir a profundidade prevista, a base é alargada e o restante da execução é idêntico ao processo descrito anteriormente. Em todos os tipos de tubulão, o diâmetro mínimo interno é de 80 cm. No tubulão com revestimento de concreto, a espessura mínima da parede deve ser de 20 cm, exceto na câmara de trabalho, em que pode ser reduzida para 10 cm, conforme Lopes e Velloso (2011, p. 234-236).

### **2.3. Dimensionamento de Tubulão**

Para Cintra, Aoki e Albiero (2010, p. 10) o subsistema estrutural de um edifício é composto pela infraestrutura, que inclui sapatas, tubulões ou estacas, que por sua vez está inserida no subsistema geotécnico. Esses dois subsistemas funcionam como um sistema único, que está sujeito às forças ativas externas, conhecidas como ações, subdivididas em ações permanentes, variáveis e excepcionais. As forças externas geram forças reativas internas que transmitem tensões em cada seção da estrutura, gerando esforços solicitantes, como a força normal, cortante, o momento fletor e torção. A análise dos deslocamentos e deformações é feita considerando o equilíbrio estático e a interação solo-estrutura. As solicitações e quantificação das ações são especificadas em normas, levando-se em conta a situação mais desfavorável. Para engenheiros de fundações, as solicitações nas transições da superestrutura para a infraestrutura e os recalques das fundações são de particular interesse. Anteriormente, a superestrutura era considerada separada e independente da infraestrutura, com a hipótese de apoios não deslocáveis, o que não atendia à



interação solo-estrutura. Nesse contexto, surgiam as forças reativas externas, denominadas ações nas fundações.

Os tubulões representam um tipo de fundação profunda que opera predominantemente através da base. Durante o processo de escavação, pelo menos em uma de suas etapas, é necessária a descida de pessoal, seja para alargar a base do tubulão ou simplesmente para executar a limpeza do fundo. Similarmente às fundações rasas, o engenheiro encarregado do projeto deve realizar uma análise da resistência do solo, bem como avaliar as geometrias da base, antes de autorizar o início da concretagem da fundação.

As dimensões dos tubulões podem ser observadas na Figura 1, a qual também disponibiliza informações relevantes, tais como:

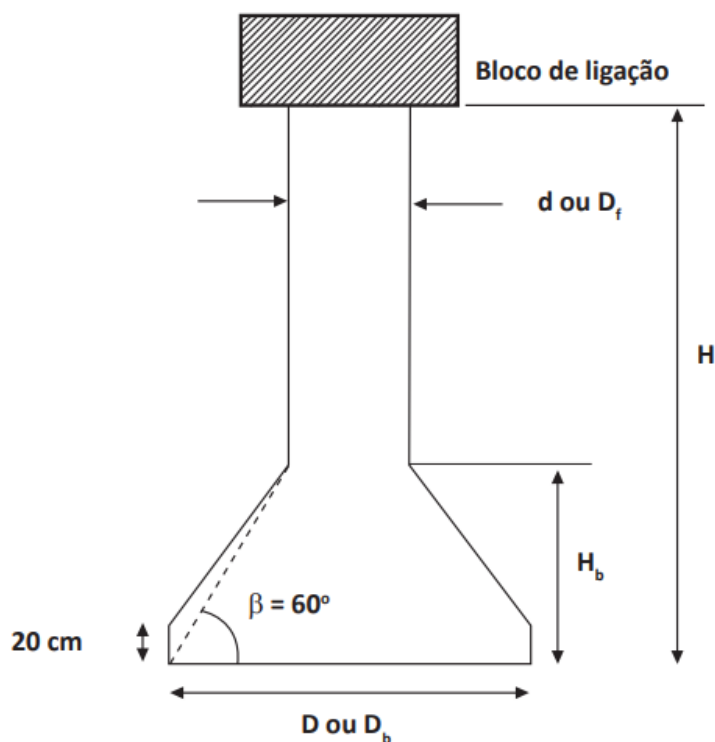
Uma altura mínima do rodapé, estabelecida em 20 cm, que é uma medida essencial para garantir a estabilidade da estrutura.

A presença de um bloco de ligação que conecta o pilar à base do tubulão, fornecendo resistência e transmissão de cargas entre esses componentes estruturais.

A altura total ( $H$ ), que é a medida da cota de arrasamento até a cota de apoio do tubulão. Essa dimensão desempenha um papel crucial na determinação da profundidade e alcance da fundação.

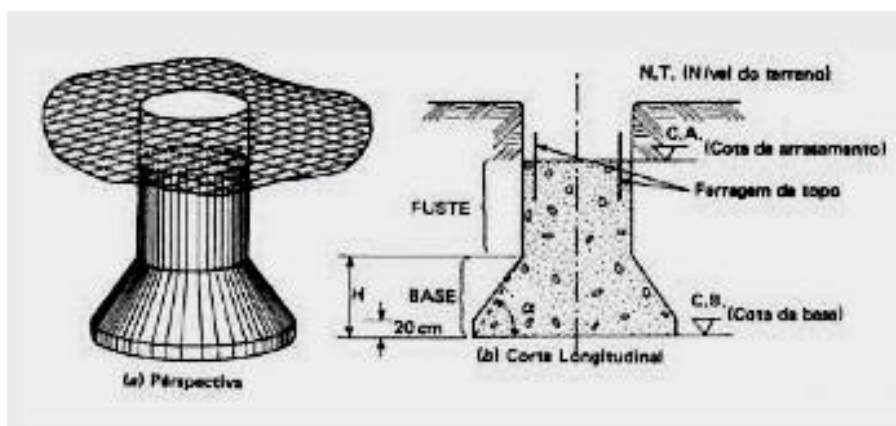
A altura da base ( $h_b$ ), que consiste na altura da base do tubulão somada à altura do tronco de cone. Essa medida é um parâmetro importante no projeto da fundação, influenciando sua capacidade de suportar cargas.

Figura 1 — Detalhes do Tubulão



Fonte: Melo (2019, p. 64).

Figura 2 — Tubulões - Perspectiva e Corte longitudinal

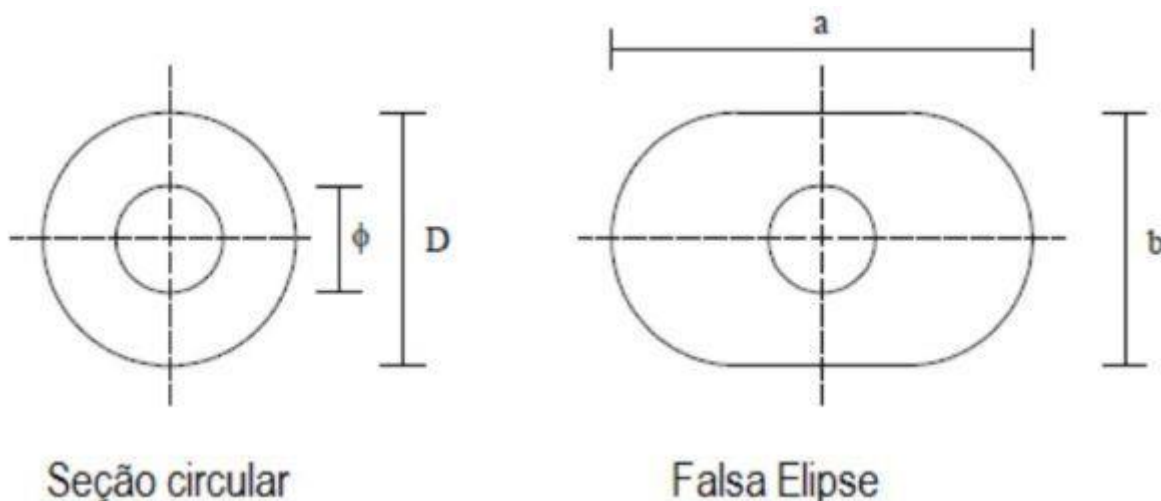


Fonte: Alonso (2010, p. 41).

Conforme estabelecido pela norma NBR 6122:2019, o diâmetro mínimo do fuste deve ser de 70 cm. No entanto, de acordo com as diretrizes da NR 18 do Ministério do Trabalho e Emprego, o uso desse diâmetro está sujeito à apresentação de uma justificativa técnica pelo Engenheiro encarregado da fundação.

O fuste apresenta tipicamente uma seção transversal circular, com um diâmetro mínimo estabelecido em 70 cm. Essa escolha de diâmetro mínimo é justificada pela necessidade de permitir a entrada e saída segura de operários na estrutura. No entanto, é importante observar que a projeção da base do fuste pode ser configurada de duas maneiras distintas: circular ou em forma de falsa elipse. Quando se opta por uma projeção de base em forma de falsa elipse, é necessário atender a uma relação específica entre os eixos  $a$  e  $b$  dessa elipse, sendo essa relação  $a/b$  limitada a um valor igual ou inferior a 2,5 (Alonso, 2003; Alonso, 2010, p. 42).

**Figura 3 — Tubulões - Formatos da base**



Fonte: Alonso (2010, p. 42).

O diâmetro mínimo de 70 cm para a seção circular do fuste é uma medida que visa garantir a segurança dos operários, permitindo que eles entrem e saiam do fuste com espaço suficiente para operações de construção, manutenção e inspeção. Esse valor está de acordo com os padrões de segurança ocupacional e normas aplicáveis em locais de trabalho. A opção por uma projeção da base em forma de falsa elipse, em vez de uma base circular, pode ser feita com base em considerações de engenharia e design específicas. No entanto, para evitar deformações excessivas e garantir a estabilidade da estrutura, é necessário impor limites à relação entre os eixos  $a$  e  $b$  da falsa elipse. A restrição a uma relação  $a/b$  menor ou igual a 2,5 é estabelecida para manter a integridade estrutural da fundação e garantir que a distribuição de cargas seja adequada. Isso se baseia em princípios de engenharia e segurança

estrutural, visando minimizar riscos e assegurar a estabilidade da fundação do fuste (Alonso, 2010).

### **2.3.1. Tubulões a ar comprimido**

(Hachich *et al.*, 1998) estabelece ainda que, nos tubulões deste tipo, seja a camisa de concreto ou de aço, a pressão máxima de ar comprimido utilizada é de 340 kPa. Isso ocorre porque o excesso de pressão pode resultar no desconfinamento do fuste do tubulão, acarretando a redução de sua capacidade de resistência ao atrito. Por essa razão, determina-se um limite para a profundidade desses tubulões, que é fixada em 34 metros abaixo do nível da água. Isso visa garantir a segurança da construção e prevenir qualquer problema decorrente do excesso de pressão ou da profundidade excessiva.

Os tubulões a ar comprimido são construídos quando o nível da água se encontra acima da cota de assentamento do tubulão. Portanto, quando a intenção é construir tubulões em solos que contenham água e não seja viável drená-la devido ao risco de colapso das paredes do fuste, recorre-se à utilização de tubulões a ar comprimido revestidos com camisa de concreto ou aço. Esse método possibilita a construção segura em condições desfavoráveis, onde a presença de água no solo torna o uso de métodos convencionais impraticável devido ao perigo de desmoronamento das paredes do tubulão (Hachich *et al.*, 1998).

### **2.3.2. Capacidade do solo**

Conforme Hachich *et al.* (1998, p. 69-70). O solo é composto de partículas, e as forças são aplicadas a ele, sendo transmitidas de partícula a partícula. A forma como as forças são transmitidas no solo varia de acordo com o tipo de mineral. Em grãos de areia, que têm dimensões ortogonais semelhantes, a transmissão de forças ocorre por meio do contato direto de mineral a mineral. No caso de partículas de argila, a transmissão pode ocorrer através da água quimicamente adsorvida. A transmissão de forças ocorre em áreas muito reduzidas em relação à área total do solo. Um corte plano no solo intercepta grãos, vazios e planos de contato, mas as forças são transmitidas apenas nas áreas de contato. Para representar as forças transmitidas no

solo, são definidos conceitos de tensão. A tensão normal é a somatória das componentes normais das forças, dividida pela área da placa.

$$\sigma = \frac{\sum F_N}{A} \quad (1)$$

A tensão de cisalhamento é a somatória das componentes tangenciais das forças, também dividida pela área da placa.

$$\tau = \frac{\sum F_T}{A} \quad (2)$$

As tensões que são consideradas na engenharia dos solos são significativamente menores do que as tensões que ocorrem nos contatos físicos entre as partículas do solo. Enquanto as tensões entre as partículas podem chegar a 700.000 kPa, na engenharia raramente se trabalha com tensões acima de 1.000 kPa. Devido ao fato de as áreas de contato entre as partículas serem muito menores do que 1% da área total, muitas vezes, para efeitos práticos, essas áreas de contato são consideradas desprezíveis (Hachich *et al.*, 1998, p. 69-70).

O método proposto por Décourt & Quaresma (1978) define o valor da capacidade de carga de estacas pré-moldadas a partir dos valores obtidos através do ensaio SPT (VELLOSO E LOPES, 2010). Segundo os autores, este método visa a obtenção de estimativas que sejam além de próximas, seguras e de fácil determinação. Um aperfeiçoamento deste método foi lançado pelos autores em 1996 estendendo sua utilização para mais tipos de estacas. A definição dos valores das resistências unitárias de ponta e lateral se dá, respectivamente, pelas equações

Décourt & Quaresma (1978) estabelece um método de cálculo da capacidade de carga de estacas pré-moldadas com base nos dados obtidos por meio do ensaio SPT conforme (Lopes; Velloso, 2011). Os autores propõem que este método tenha como objetivo principal a obtenção de estimativas que sejam não apenas aproximadas, mas também seguras e de fácil determinação, ampliando sua aplicabilidade para diversos tipos de estacas. A determinação dos valores das

resistências unitárias de ponta e lateral é efetuada utilizando, respectivamente, as equações a seguir:

$$q'_p = \alpha \cdot C \cdot N(3)$$

$$q'_l = 10 \cdot \beta \cdot \left( \frac{N_l}{3} + 1 \right) (4)$$

Onde:

$q'_p$  = resistência de ponta unitária;

$q'_l$  = resistência lateral unitária;

C = coeficiente que relaciona a resistência de ponta com o valor N em função do tipo de solo (Figura 4);

N = média entre o valor correspondente à ponta da estaca, o imediatamente anterior e o imediatamente posterior;

$N_l$  = média dos valores de N ao longo do fuste, devendo os valores menores que 3 serem considerados iguais a 3, e maiores que 50 devem ser considerados iguais a 50;

$\alpha$  = coeficiente de minoração ou majoração para a reação de ponta (figura 5);

$\beta$  = coeficiente de minoração ou majoração para o atrito lateral unitário (figura 6).

**Figura 4 — Valores de C para estacas escavadas (Décourt, 1986)**

<b>Tipo de solo</b>	<b>C (kPa)</b>
Argilas	100
Siltes argilosos (alteração de rocha)	120
Siltes arenosos (alteração de rocha)	140
Areias	200

Fonte: Alonso (2003).

**Figura 5 — Valores atribuídos ao coeficiente  $\alpha$**

Tipo de estaca / Tipo de solo	Escavadas em geral	Escavadas (bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetada
Argilas	0,85	0,85	0,30*	0,85*	1,0*
Solos Intermediários	0,60	0,60	0,30*	0,60*	1,0*
Areias	0,50	0,50	0,30*	0,50*	1,0*

Fonte: Hachich *et al.* (1998).

**Figura 6 — Valores atribuídos ao coeficiente  $\beta$**

Tipo de estaca / Tipo de solo	Escavadas em geral	Escavadas (bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetada
Argilas	0,80	0,90*	1,0*	1,5*	3,0*
Solos Intermediários	0,65	0,75*	1,0*	1,5*	3,0*
Areias	0,50	0,60*	1,0*	1,5*	3,0*

Fonte: Hachich *et al.* (1998).

### 2.3.3. Dimensionamento da base

#### 2.3.3.1. Base Circular

Nos tubulões circulares, a determinação do diâmetro mínimo da base é uma consideração fundamental no projeto geotécnico. Esse diâmetro mínimo é crucial para assegurar a transferência eficaz das tensões solicitantes da estrutura para o solo. (Alonso, 2010, p. 42). A obtenção desse valor é feita por meio da seguinte equação:

$$D = \sqrt{\frac{4P}{\pi\sigma_{adm}}} \rightarrow D = 1,13 \sqrt{\frac{P}{\sigma_{adm}}} \quad (5)$$

Onde:

$D$  = Diâmetro da base;

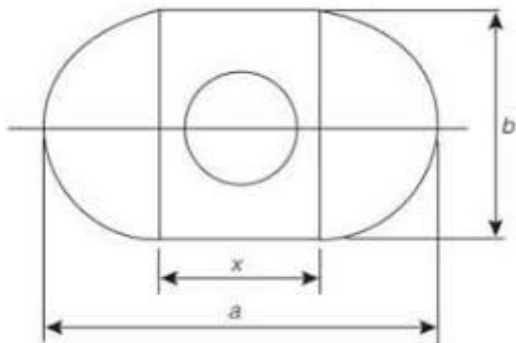
$P$  = Carga proveniente do pilar (kN)

$\sigma_{adm}$  = Tensão admissível do solo (kN/m<sup>2</sup>)

### 2.3.3.2. Base falsa elipse

Nos tubulões que possuem a base com formato de uma falsa elipse, pode-se calcular suas dimensões, adotando um valor para  $x$  (ou  $b$ ) (Alonso, 2010, p. 42), conforme segue:

Figura 7 — Falsa Elipse



Fonte: Alonso (2010, p. 42).

$$\frac{P}{\sigma} = \left( \frac{\pi \cdot b^2}{4} \right) + b \cdot x \quad (6)$$

Onde as medidas  $b$  e  $x$  podem ser exemplificadas conforme a Figura 4:

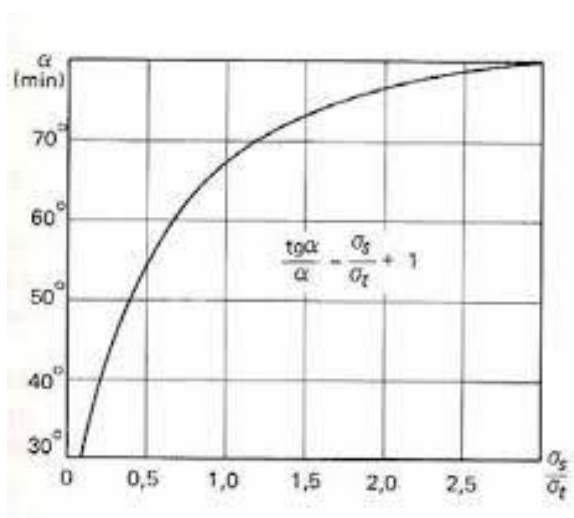
### 2.3.4. Dimensionamento da altura da base ( $H_b$ )



Conforme (Alonso, 2010, p. 43) o valor de  $H_b$  deverá ser no máximo 2m. O valor do ângulo  $\alpha$  indicado na figura 1 pode ser obtido através da figura 8, entretanto, no caso de tubulões a céu aberto, adota-se  $\alpha = 60^\circ$ . assim, o valor de H será:

$$H = \frac{D-\phi}{2} \cdot \tan(60^\circ) \therefore H = 0,866(D - \phi) \text{ ou } 0,866(a - \phi) \text{ quando falsa elipse (7)}$$

**Figura 8 — Dimensionamento do bloco de fundação – valor de  $\alpha$**



Fonte: Alonso (2010, p. 2).

### 2.3.5. Dimensionamento do fuste (f)

O fuste de um tubulão é responsável por transferir as cargas provenientes do bloco de ligação para a base do tubulão. Nesse contexto, é crucial considerar a tensão resistente do concreto, uma vez que ela desempenha um papel significativo no processo de dimensionamento da estrutura. Para garantir a segurança e a integridade da fundação, é necessário que o concreto tenha uma resistência característica mínima ( $f_{ck}$ ) de 20 MPa aos 28 dias (Melo, 2019, p. 64).

O fuste é projetado como um pilar de concreto simples, sujeito à ação de compressão uniaxial. Caso haja a presença de momentos fletor na base do pilar, estes devem ser levados em consideração durante o processo de dimensionamento do fuste (Hachich *et al.*, 1998).

O Concreto Simples é tratado pela NBR 6118 no item 24. “O concreto simples estrutural deve ter garantidas algumas condições básicas, como confinamento lateral (caso de estacas ou tubos), compressão em toda seção transversal (caso de arcos), apoio vertical contínuo no solo ou em outra peça estrutural (caso de pilares, paredes, blocos ou pedestais). Não é permitido o uso de concreto simples em estruturas sujeitas a sismos ou a explosões, e em casos onde a ductilidade seja qualidade importante da estrutura.”

Quadro 1 — Parâmetros de dimensionamento de tubulões segundo a NBR 6122

Tipo de Tubulão	$\gamma_f$	$\gamma_c$
Sem Encamisamento	1,4	1,6
Encamisado (camisa de concreto)	1,4	1,4
Encamisado (camisa de aço)	1,4	1,5 (ELU)

Fonte: ABNT NBR 6122/2019 (2019).

$$D_f = \sqrt{\frac{4P}{\pi\sigma_c}} \quad (8)$$

Onde:

$D_f$  = Diâmetro do fuste;

$P$  = Carga proveniente do pilar (kN)

$\sigma_c$  = Tensão do concreto

$f_{ck}$  = Resistência característica do concreto

$\gamma_f$  = Coeficiente de minoração = 1,4 (NBR 6122/2019)

$\gamma_c$  = Coeficiente de minoração = 1,6 (NBR 6122/2019)

### 2.3.6. Dimensionamento da área do fuste

A área do fuste é calculada de forma análoga ao dimensionamento de um pilar que tenha uma seção de aço nula (Alonso, 2010, p. 42).

$$\gamma_f P = 0,85 \cdot A_f \cdot f_{ck} / \gamma_c \quad (9)$$

Onde  $\gamma_f$  e  $\gamma_c$  estão descritos na tabela 1.

Ainda segundo (Alonso, 2010, p. 42), a fórmula descrita acima pode ser escrita de forma simplificada de forma a dimensionar a área do fuste do tubo:

$$A_f = \frac{P}{\sigma_c} \quad (10)$$

Diâmetro do fuste de Concreto Simples (M = 0): (Andrade *et al.*, 2021).

$$\sigma_{cd} = \frac{N_d}{A_f} \rightarrow A_f = \frac{N_d}{\sigma_{cd}} \rightarrow \frac{\pi \phi_f^2}{4} = \frac{N_d}{0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c}} \rightarrow \phi_f^2 = \frac{4N_d \cdot \gamma_c}{\pi \cdot 0,85 f_{ck}} \rightarrow$$

$$Df = \phi_f = \sqrt{\frac{4N_d \cdot \gamma_c}{\pi \cdot 0,85 f_{ck}}} \geq 70 \text{ cm (inteiro, múltiplo de 5)} \quad (11)$$

### 2.3.7. Dimensionamento do volume da base

Conforme (Alonso, 2010), o volume pode ser calculado, de maneira aproximada, como sendo a soma do volume de um cilindro com 20 cm de altura e um "tronco" de cone com altura (H - 20 cm)

$$V = 0.2A_b + \left(\frac{H - 0.2}{3}\right) \cdot \left(A_b + A_f + \sqrt{A_b \cdot A_f}\right) \quad (12)$$

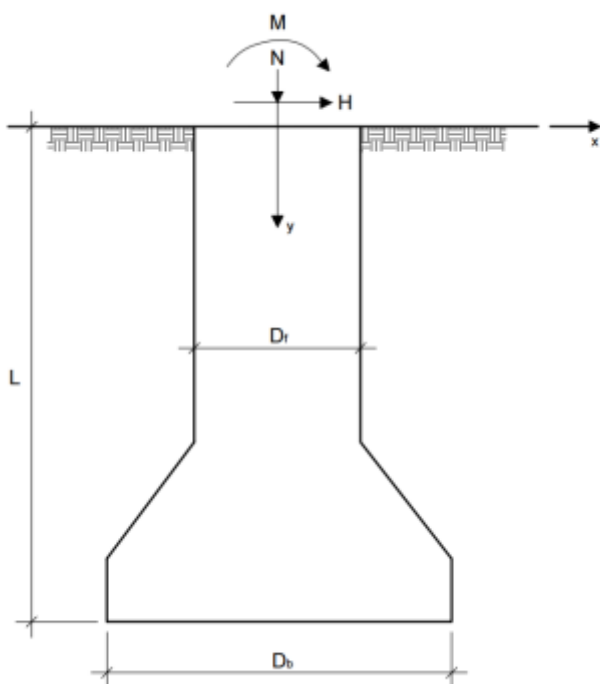
Onde V será obtido em metros cúbicos (m<sup>3</sup>), entrando-se com A<sub>b</sub> (área da base) e A<sub>f</sub> (área do fuste) em metros quadrados (m<sup>2</sup>).

### 2.3.8. Carregamentos transversais em tubulões

(Lopes; Velloso, 2011) Afirma que quando se torna inviável tratar uma estaca ou tubo como um elemento flexível com apoio elástico, torna-se necessário adotar uma abordagem que os considere como elementos rígidos com apoio elástico do tipo Winkler. Um dos métodos amplamente reconhecidos para abordar essa situação é o conhecido Método Russo, que tem sido amplamente empregado no contexto nacional para o dimensionamento de tubulões. Empregado na análise de elementos rígidos enterrados, este método pressupõe uma contenção lateral do tipo Winkler,

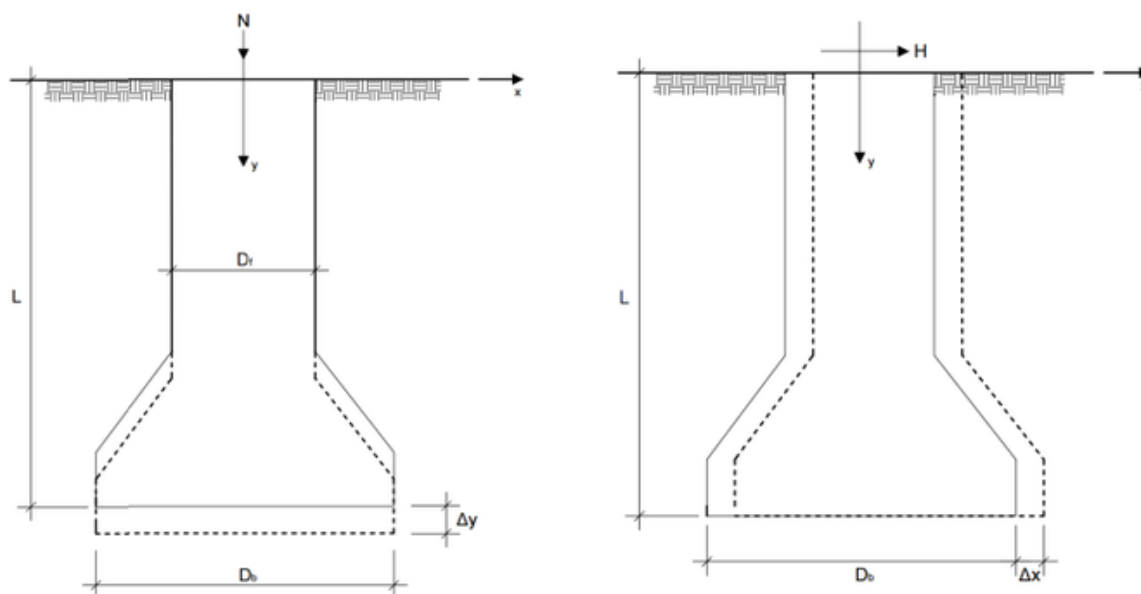
caracterizada por um coeficiente de reação lateral que aumenta proporcionalmente com a profundidade. O método considera o equilíbrio do elemento de fundação e, a partir disso, determina os deslocamentos nas direções horizontal e vertical, além de fornecer os diagramas de tensões tanto ao longo da profundidade quanto na base. O método emprega três equações distintas que resultam dos deslocamentos unitários aplicados ao tubulão, como ilustrado nas figuras seguintes:

**Figura 9 — Formato característico de um tubulão com base alargada**



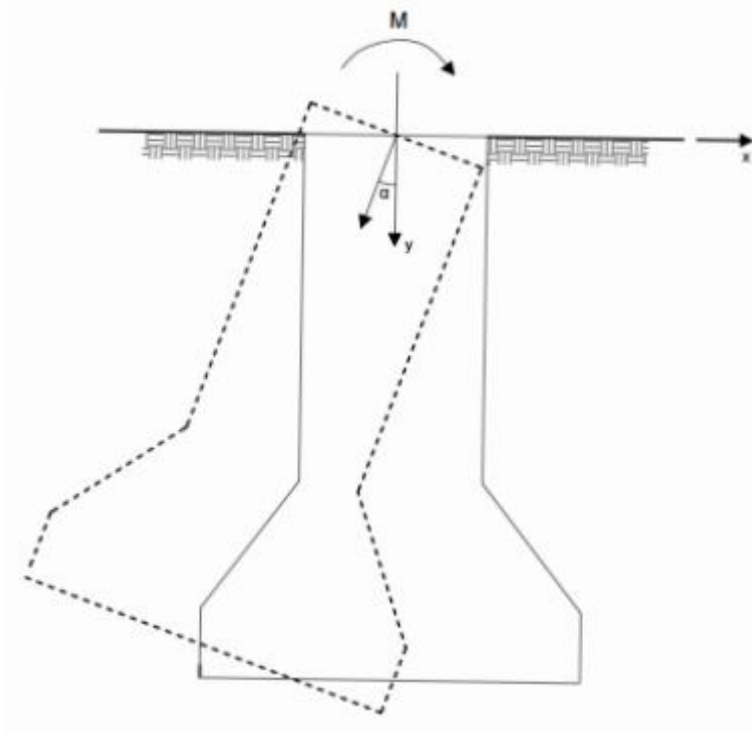
Fonte: Adaptado de Timerman (1980).

Figura 10 — Aplicação dos deslocamentos "unitário" vertical e horizontal ao tubulão.



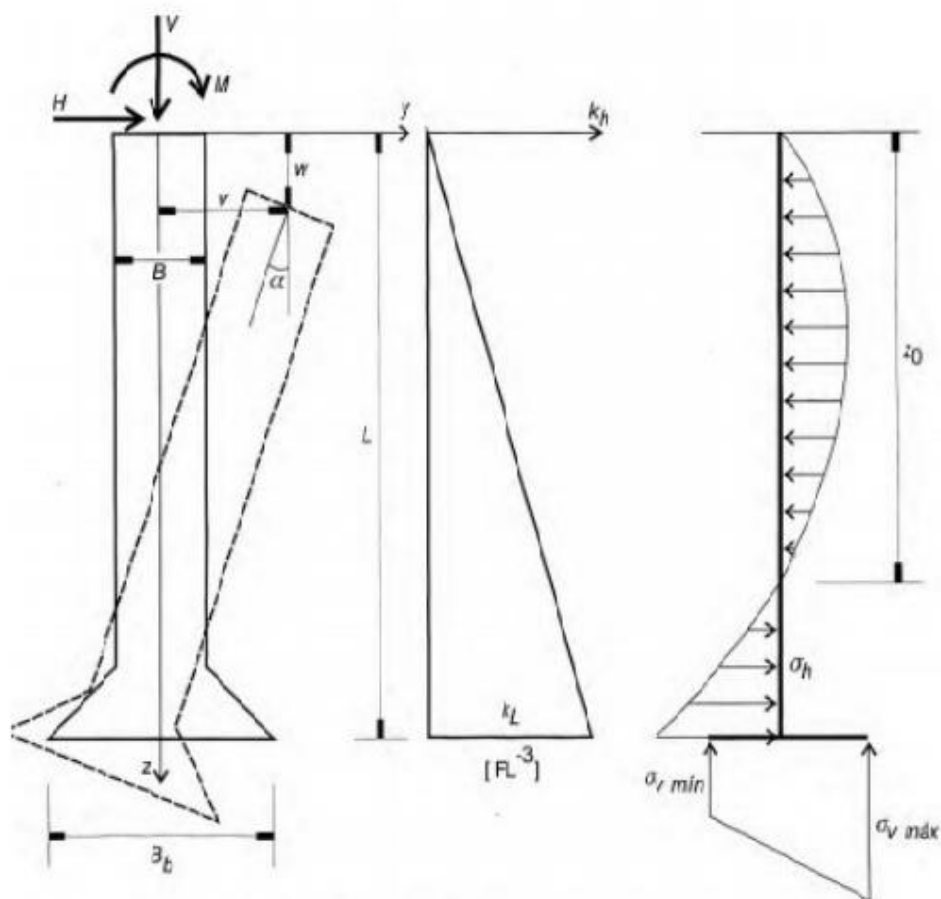
Fonte: Adaptado de Timerman (1980).

Figura 11 — Aplicação de uma rotação unitária ao tubulão.



Fonte: Adaptado de Timerman (1980).

Figura 12 — Diagramas propostos pelo método Russo



Fonte: Lopes e Velloso (2011).

Lopes e Velloso (2011) confere que a análise de equilíbrio para este tipo de fundação proporciona informações sobre os deslocamentos horizontais e verticais, a rotação no topo, bem como os diagramas de tensões laterais tanto ao longo da profundidade quanto na base do elemento, conforme as seguintes formulas:

O deslocamento horizontal pode ser determinado da seguinte forma:

$$\Delta x = \frac{2 \cdot H}{k_h \cdot L \cdot D_f} + \frac{2}{3} \cdot L \cdot \alpha \text{ (em radianos)} \quad (13)$$

O deslocamento vertical pode ser determinado da seguinte forma:

$$\Delta y = \frac{N}{k_v \cdot A_b} \quad (14)$$

A rotação causada ao tubulão pode ser determinada da seguinte forma:

$$\alpha = \frac{2 \cdot H \cdot L + 3 \cdot M}{\frac{1}{12} \cdot k_h \cdot L^3 \cdot D_f + \frac{3}{16} \cdot k_v \cdot A_b \cdot D_b^2} \quad (15)$$

O momento máximo resistido em função da rotação pode ser determinado da seguinte forma:

$$M = \alpha \left( \frac{1}{36} \cdot k_h \cdot L^3 \cdot D_f + \frac{1}{16} \cdot k_v \cdot A_b \cdot D_b^2 \right) - \frac{2}{3} \cdot H \cdot L \quad (16)$$

Tensão na lateral:

$$\sigma_h = -\frac{k_h}{L} \cdot \Delta_x + \frac{k_h}{L} \cdot y^2 \cdot \alpha \quad (17)$$

Tensão na base:

$$\sigma_v = -\frac{N}{A_b} \pm \frac{k_v \cdot D_b}{2} \cdot \alpha \quad (17)$$

Tensão lateral máxima:

$$\sigma_{hmax} = -\frac{k_h \cdot \Delta_x^2}{4 \cdot \alpha \cdot L} \quad (19)$$

Profundidade do nível de rotação:

$$y_{eng} = \frac{\Delta x^2}{\alpha} \quad (20)$$

Onde:

$A_b$  = área da base;

$D_b$  = diâmetro da base;

$D_f$  = diâmetro do fuste;

$H$  = esforço horizontal aplicado no topo do tubulão ao nível do solo;

$k_v$  = coeficiente de reação vertical;

$k_h$  = coeficiente de reação horizontal;

$L$  = comprimento enterrado do tubulão.

$M$  = momento fletor aplicado no topo do tubulão ao nível do solo;

$N$  = esforço normal aplicado no topo do tubulão ao nível do solo;

$\Delta_x$  = deslocamento horizontal;

$\Delta_y$  = deslocamento vertical;

$\alpha$  = deslocamento angular;

Vale salientar que os coeficientes de reação vertical e horizontal,  $k_v$  e  $k_h$  são introduzidos pelo modelo Winkler em 1867 conforme (Lopes; Velloso, 2011).



**Figura 13 — Valores propostos para o coeficiente de reação vertical**

Categoria	Natureza do terreno	Coeficiente de reação (kgf/cm <sup>3</sup> )
I	Terreno turfoso ou lamacento leve	0,5 – 1,0
II	Terreno turfoso pesado, areia fina de praia	1,0 – 1,5
III	Depósito de húmus, areia ou cascalho	1,0 – 2,0
IVa	Argila saturada	2,0 – 3,0
IVb	Argila úmida	4,0 – 5,0
IVc	Argila Seca	6,0 – 8,0
IVd	Argila seca e dura	10,0
Terrenos não removidos (naturais)		
V	Húmus mesclado de areia, com poucas pedras	6,0 – 8,0
VI	Húmus mesclado de areia, com muitas pedras ou cascalho	8,0 – 10,0
VII	Cascalho fino mesclado com areia fina	7,0 – 9,0
VIII	Cascalho de grossura média mesclado com areia grossa	9,0 – 11,0
IX	Cascalho grosso mesclado com muita areia grossa	11,0 – 13,0
X	Cascalho grosso com muita areia grossa	11,0 – 13,0
XI	Cascalho grosso com pouca areia grossa	13,0 – 16,0
XII	Cascalho grosso com pouca areia grossa (compacto)	16,0 – 20,0

Fonte: Adaptado de Hachich *et al.* (1998).

Conforme (Lopes; Velloso, 2011) pode-se estimar o valor do coeficiente de reação horizontal em relação a uma correlação típica para o SPT conforme a seguinte equação:

$$k_h = \frac{2 \cdot N}{B} \quad (21)$$

### 2.3.9. Dimensionamento da armadura de flexão e distribuída

Conforme (Hachich *et al.*, 1998), a armadura de flexão em tubulões é uma armadura projetada para resistir ao momento fletor que pode ocorrer devido às cargas atuantes ou a outros esforços que podem causar flexão no tubulão. Ela é composta por barras de aço que são dispostas em torno da circunferência do fuste do tubulão, proporcionando resistência ao momento fletor. A armadura distribuída em tubulões, por sua vez, refere-se a uma armadura que é distribuída ao longo do comprimento do tubulão para fornecer resistência à tração circunferencial e restringir a fissuração. Essa armadura distribuída também pode ser projetada para resistir a esforços de cisalhamento e cargas axiais, contribuindo para a estabilidade do tubulão em diferentes condições de carregamento. Em síntese, a armadura de flexão concentra-se na resistência ao momento fletor, enquanto a armadura distribuída é projetada para lidar com uma variedade de esforços, incluindo tração circunferencial, cisalhamento e cargas axiais, distribuída ao longo do fuste do tubulão.

A armadura de flexão pode-se ser calculada da seguinte forma:

$$AS_M = \frac{M}{0.85 \cdot d' \cdot f_{yd}} \quad (22)$$

Onde:

$AS_M$  = Área de aço (cm<sup>2</sup>);

$M_d$  = Momento fletor solicitante (kN/m);

$d'$  = Altura útil (cm);

$f_{yd}$  = Tensão de escoamento do aço (MPa).

A armadura distribuída pode-se ser calculada da seguinte forma:

$$AS'_m = \frac{AS_M}{c} \quad (23)$$

Onde:

$AS_M$  = Área de aço (cm<sup>2</sup>);

C = Comprimento da seção transversal do fuste (m).

Para verificar o espaçamento, (Hachich *et al.*, 1998) comenta que deve-se seguir a tabela seguinte com os valores pré-determinados conforme figura 04 e representado pela equação 23:

$$N = \left( \frac{d^{-2} \cdot \phi_L}{S} \right) + 1 \quad (24)$$

Onde:

N = Quantidade de barras;

d = Diâmetro do fuste (cm);

$\phi_L$  = Diâmetro longitudinal (cm);

S = Espaçamento (cm).

### 2.3.10. Capacidade de carga

Segundo (Jr., 2007, p. 113), a determinação da capacidade de carga dos tubulões é realizada mediante a aplicação de fórmulas empíricas, embora com certas limitações, bem como por meio da análise de correlações baseadas em ensaios de campo, notadamente os ensaios de Penetração Standard (SPT) e Cone Penetration Test (CPT). Um destaque é dado ao Método Empírico de Terzaghi, que se destina a estimar a tensão de ruptura de fundações, deve-se utilizar as seguintes fórmulas:

Solos argilosos rígidos a duro e arenosos compactos a muito compactos - ruptura geral:

$$\sigma_r = C \cdot N_c \cdot S_c + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot S + q \cdot N_q \cdot S_q \quad (25)$$

Solos argilosos moles e arenosos fofos - ruptura local:

$$\sigma_r = \frac{2}{3} \cdot C \cdot N_c \cdot S_c + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot S_\gamma + q \cdot N_q \cdot S_q \quad (26)$$

Onde:

C = Coesão do solo (KN/m<sup>2</sup>);

$\gamma$  = Peso específico médio efetivo abaixo da cota de apoio do tubo até a profundidade B(KN/m<sup>3</sup>), (se houver água  $\lambda_{ef} = \lambda_{sat} - \lambda_w$ );

B = Menor dimensão do tubo (m);

q = Pressão efetiva na cota de apoio do tubo (kn/m<sup>2</sup>), limitada a um valor máximo calculado de '10 x d' de profundidade.

**Figura 14 — Fatores de capacidade de carga (Terzaghi)**

$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$N_c'$	$N_q'$	$N_\gamma'$
0	5,7	1,0	0,0	5,7	1,0	0,0
5	7,3	1,6	0,5	6,7	1,4	0,2
10	9,6	2,7	1,2	8,0	1,9	0,5
15	12,9	4,4	2,5	9,7	2,7	0,9
20	17,7	7,04	5,0	11,8	3,9	1,7
25	25,1	12,7	9,7	14,8	5,6	3,2
30	37,2	22,5	19,7	19,0	8,3	5,7
34	52,6	36,5	35,0	23,7	11,7	9,0
35	57,8	41,4	42,4	25,2	12,6	10,1
40	95,7	81,3	100,4	34,9	20,5	18,8
45	172,3	173,3	297,5	51,2	35,1	37,7
48	258,3	287,9	780,1	66,8	50,5	60,4
50	347,5	415,1	1153,2	81,3	65,6	87,1

Fonte: Adaptado de Jr. (2007).

**Figura 15 — Fatores de forma – Terzaghi**

Forma da Fundação	Fatores de forma		
	$S_c$	$S_\gamma$	$S_q$
Corrida	1,0	1,0	1,0
Quadrada	1,3	0,8	1,0
Circular	1,3	0,6	1,0
Retangular	1,1	0,9	1,0

Fonte: Adaptado de Jr. (2007).

(Jr., 2007) recomenda que seja adotado para estimativa da tensão admissível do solo fator de segurança  $FS = 4$ :

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{rup}}{4} \quad (27)$$

Uma alternativa para estabelecer a capacidade de carga de tubulões, de acordo com (Alonso, 2003), consiste em utilizar o valor médio da resistência à penetração obtido a partir do ensaio de Penetração Standard (SPT). Tal valor deve ser medido a uma profundidade correspondente a duas vezes o diâmetro da base do tubulão, a partir da cota de assentamento:

$$\sigma_s \approx \frac{N_{spt}}{30} \text{ (MPa)} \quad (28)$$

## **3. ESTUDO DE CASO**

### **3.1. Metodologia**

Este estudo tem como propósito a aplicação e análise de modelos de cálculo estrutural voltados para tubulões. Essa abordagem se fundamenta na revisão bibliográfica extensiva realizada, visando aprofundar o conhecimento sobre a estrutura e o dimensionamento de tubulões a céu aberto, com foco especial em situações em que não há presença de um bloco intermediário entre o pilar e a fundação. A essência deste trabalho se resume a modelos de cálculo previamente estudados. Este caso será submetido a cálculos rigorosos e a subsequente apresentação detalhada de seus resultados.

O cenário analisado envolve um pilar submetido a uma carga de compressão que é aplicada diretamente à fundação. No primeiro caso, temos uma fundação composta por elementos de armadura de flexão e distribuição, desempenhando um papel crucial na absorção dos esforços gerados pela carga aplicada, além de evitar potenciais fissuras no concreto. Nos demais casos temos algumas variações de casos, proporcionando situações diversas, onde teremos a oportunidade de desenvolver análises específicas.

Por meio dessa análise minuciosa e da aplicação prática dos modelos de cálculo estrutural, buscando não apenas aprofundar o entendimento sobre tubulões a céu aberto sem blocos intermediários, mas também contribuir para o corpo de conhecimento técnico relacionado a essa área oferecendo insights valiosos para o projeto e dimensionamento de estruturas de fundação similares.

### **3.2. Estudo de caso 1**

A presente seção discute o procedimento para o dimensionamento de um tubulão com a finalidade de suportar uma carga,  $P = 2750 \text{ KN}$ , proveniente de 01 pilar com dimensões de 50 X 40 cm. Essa carga será aplicada em um concreto cuja

resistência é de 20 MPa, e o tubulão será inserido em um solo com a base apoiada na cota - 8,00m, conforme tabela de sondagem:

Tabela 1 — Tabela de sondagem

Cota (m)	SPT	Descrição do solo
0	0	Areia / Fina Argilosa
1	5	Areia / Fina Argilosa
2	7	Areia / Fina Argilosa
3	9	Areia / Fina Argilosa
4	16	Areia / Fina Argilosa Avermelhada
5	18	Areia / Fina Argilosa Avermelhada
6	19	Areia / Fina Argilosa Avermelhada
7	27	Areia / Fina Argilosa Avermelhada
8	32	Argila Silto - Arenosa
9	36	Argila Silto - Arenosa
10	36	Argila Silto - Arenosa
11	38	Argila Silto - Arenosa
12	38	Argila Silto - Argilosa
13	39	Argila Silto - Argilosa
14	40	Argila Silto - Argilosa

Fonte: O autor (2023).

Para determinar a resistência de ponta do solo pelo SPT, utilizamos o Método de Decourt e Quaresma dada pela equação 03:

$$q'_p = 0,85 \cdot 12 \cdot \frac{27+32+36}{3} = 323 \therefore q'_p = 323 \text{ t/m}^2(01)$$

Adotando um fator de segurança = 4, temos a tensão admissível do solo na cota de apoio, (na cota -8,00 m):

$$\sigma_{adm} = \frac{323}{4} = 80,75 \text{ t/m}^2 \therefore \sigma_{adm} = 8,10 \text{ kgf/cm}^2 \quad (02)$$

\* Será desconsiderado o atrito lateral (Alonso, 2010, p. 42).

Utilizando a equação 05, dimensionamos o diâmetro da base:

$$D_b = \sqrt{\frac{4 \cdot 2750}{\pi \cdot 800}} = 2,09 \text{ m} \therefore D_b = 2,10 \text{ m} \quad (03)$$

Utilizando a equação 10, encontramos a área da seção de concreto do fuste:

$$A_f = \frac{2750}{\frac{0,85 \cdot 2000}{2,24}} = 3,624 \text{ m}^2 \quad (04)$$

Utilizando a equação 08, dimensionamos o diâmetro do fuste:

$$D_f = \sqrt{\frac{4 \cdot 275}{\pi \cdot \frac{0,85 \cdot 2000}{2,24}}} = 0,68 \text{ m} \therefore D_f = 0,90 \text{ m (diâmetro mínimo)} \quad (05)$$

$$A_f = \frac{\pi \cdot 0,90^2}{4} \therefore \text{Area da Seção do Fuste} = 0,636 \text{ m}^2 \quad (06)$$

Definido o diâmetro, podemos calcular a área da base ( $A_b$ ):

$$A_b = \frac{\pi \cdot 2,10^2}{4} \therefore \text{Area da Base} = 3,46 \text{ m}^2 \quad (07)$$

Utilizando a equação 05, dimensionamos a altura da base:



$$H = \frac{2,10-0,9}{2} \cdot 1,73 = 1,04 \text{ m} \therefore H = 1,00 \text{ m} \quad (08)$$

Utilizando a equação 09, dimensionamos o volume total da base do tubulão:

$$V = 0,2 \cdot \pi \cdot 3,46 + \left( \frac{1,0 - 0,2}{3} \right) \cdot (3,46 + 0,636 + \sqrt{3,46 \cdot 0,636}) = 3,66 \text{ m}^3 \quad (09)$$

Cálculo da área de aço do fuste (armadura longitudinal).

$$\omega = 1 + \frac{6}{\phi_f} \rightarrow \omega = 1 + \frac{6}{90} = 1,066 \leq 1,1 \quad (10)$$

$$N_D = \gamma_f \cdot N_k \rightarrow N_D = 1,4 \cdot 275 \text{ tf} \rightarrow N_D = 385 \text{ tf} \quad (11)$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \rightarrow f_{cd} = \frac{20}{1,6} \rightarrow f_{cd} = 1,25 \text{ kgf/mm}^2 \quad (12)$$

$$A_{CN} = \frac{\omega \cdot N_D}{0,85 \cdot f_{cd}} \rightarrow A_{CN} = \frac{1,1 \cdot 385}{0,85 \cdot 1,25} \rightarrow A_{CN} = 398 \text{ cm}^2 \quad (13)$$

$$A_{s_{min}} \geq \{0,85\% A_{CN} \rightarrow A_{s_{min}} \geq 0,008 \cdot 398,6 \rightarrow A_{s_{min}} \geq 3,19 \text{ cm}^2 (14_a)$$

$$A_{s_{min}} \geq \{0,5\% A_C \rightarrow A_{s_{min}} \geq 0,005 \cdot 6361,7 \rightarrow A_{s_{min}} \geq 31,81 \text{ cm}^2 (14_b)$$

Logo temos  $A_s = 31,81 \text{ cm}^2$  de seção de aço necessário para armação do fuste, adotando barras de 16mm, temos:

$$N = \frac{31,81}{\frac{\pi \cdot 1,6^2}{4}} \rightarrow N = 15,82 \therefore N \cong 16 \text{ Barras } \phi 16 \text{ mm} \quad (15)$$

Cálculo da armadura transversal (estribos).

$$A_{se} = \frac{1,61 \cdot P \cdot (\phi - b)}{8 \cdot f_{yk} \cdot \phi_f} \rightarrow A_{se} = \frac{1,61 \cdot 275000 \cdot (90 - 40)}{8 \cdot 5000 \cdot 90} = 6,15 \text{ cm}^2 \quad (16)$$

Logo temos  $A_{se} = 6,15 \text{ cm}^2$  de seção de aço necessário para armação dos estribos, adotando barras de 8mm, temos:

$$N = \frac{6,15}{\frac{\pi \cdot 0,8^2}{4}} \rightarrow N = 12,235 \text{ cm}^2 \therefore N \cong 13 \text{ Barras } \emptyset 8 \text{ mm (17)}$$

### 3.3. Estudo de caso 2

Neste caso discute-se o procedimento para o dimensionamento de um tubulão a céu aberto, solicitado por um pilar com dimensões 80 x 30 com carga de 450t., com um solo com tensão admissível igual a 50t/m<sup>2</sup>, localizada em uma cota -5,00m. Essa carga será aplicada em um concreto cuja resistência é de 20 MPa.

Diâmetro da base:

$$D_b = \sqrt{\frac{4 \cdot 4500}{\pi \cdot 500}} = 3,385 \text{ m} \therefore D_b = 3,40 \text{ m (18)}$$

Área da base:

$$A_b = \frac{\pi \cdot 3,40^2}{4} \therefore \text{Area da Base} = 9,08 \text{ m}^2 \text{ (19)}$$

Área do fuste:

$$A_f = \frac{4500}{\frac{0,85 \cdot 2000}{2,24}} = 5,93 \text{ m}^2 \text{ (20)}$$

Diâmetro do fuste:

$$D_f = \sqrt{\frac{4 \cdot 450}{\pi \cdot \frac{0,85 \cdot 2000}{2,24}}} = 0,869 \text{ m} \therefore D_f = 0,90 \text{ m (diâmetro mínimo)} \quad (21)$$

Altura da base:

$$H = \frac{3,40 - 0,9}{2} \cdot \tan(60^\circ) = \frac{3,40 - 0,9}{2} \cdot 1,73 = 2,162 \text{ m} \quad (22)$$

Como a altura da base não pode ser superior a 2 metros, optaremos por utilizar 2 tubulões para o pilar. No entanto, a fim de evitar que o bloco de distribuição da carga do pilar seja muito grande, adotaremos 2 tubulões com base em falsa elipse, onde a relação entre a soma de A e B dividido por B será igual a 1,2.

Assim temos a seguinte situação:

Área necessária para base:

$$A_b = \frac{0,5 \cdot 450}{50} \therefore \text{Area da Base} = 4,5 \text{ m}^2 \quad (23)$$

Dimensões da base (A, B):

$$[(A + B)/B] = 1,2 \rightarrow A + B = 1,2 \cdot B \rightarrow A = 0,2 \cdot B$$

$$A_b = \frac{\pi \cdot B^2}{4} + 0,2 \cdot B^2 = 4,5 \text{ m}^2$$

$$B = 2,15 \text{ m}$$

$$A = 0,2 \cdot 2,15 = 0,4 \text{ m} \quad (24)$$

Área do fuste:

$$A_f = \frac{0,5 \cdot 450000}{\frac{0,85 \cdot 2000}{2,24}} = 2965 \text{ cm}^2 \quad (25)$$

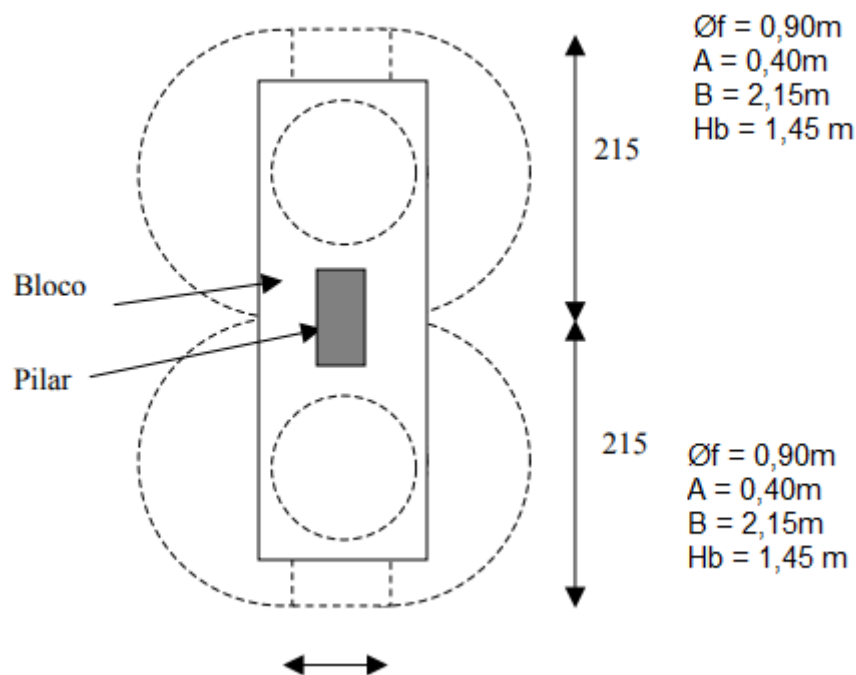
Diâmetro do fuste:

$$D_f = \sqrt{\frac{0,5 \cdot 4 \cdot 450}{\pi \cdot \frac{0,85 \cdot 2000}{2,24}}} = 0,614 \text{ m} \therefore D_f = 0,90 \text{ m (diâmetro mínimo)} \quad (26)$$

Altura da base:

$$H = \frac{(2,15 + 0,40) - 0,9}{2} \cdot \tan(60^\circ) = \frac{(2,15 + 0,40) - 0,9}{2} \cdot 1,73 = 1,43 \text{ m} \quad (27)$$

Figura 16 Tubulões próximos

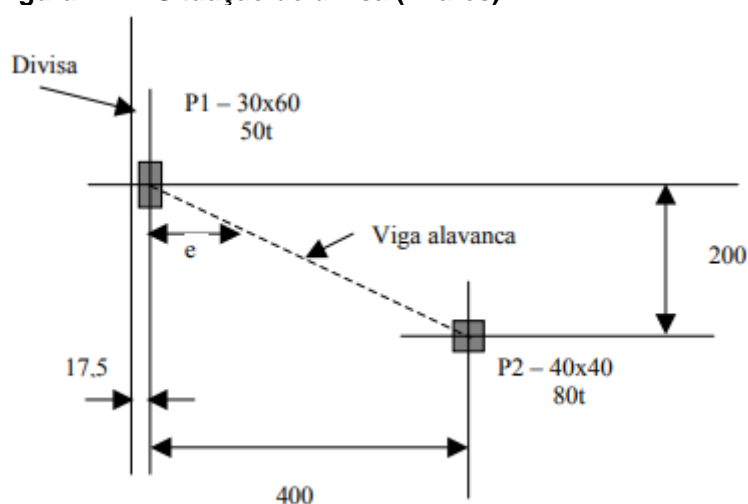


Fonte: Adaptado pelo autor (2023).

### 3.4. Estudo de caso 3

A presença de um pilar próximo a divisa do terreno, implica que o tubulão seja excêntrico, e essa excentricidade precisa ser compensada por meio de uma viga alavanca. O tubulão excêntrico é dimensionado com base em uma falsa elipse para minimizar a excentricidade, e a largura da base deve satisfazer a condição  $(A+B) / B \leq 2,5$ . Além disso, é possível considerar um alívio no segundo pilar, limitando-o a, no máximo, 50% da reação negativa calculada para esse ponto. Dessa forma vamos considerar a seguinte situação:

Figura 17 — Situação de divisa (Pilares)



Fonte: Adaptado pelo autor (2023).

Assim, devemos dimensionar o tubulão para os pilares  $P_1$  e  $P_2$ , considerando uma tensão admissível do solo de  $30\text{t/m}^2$  e um concreto cuja resistência é de  $15\text{ MPa}$ .

Para essa solução, primeiramente devemos admitir por hipótese que  $(A + B) / B = 2$ , sendo assim,  $A = B$ .

Dimensionamento da fundação para o pilar  $P_1$ :

Dimensionamento da área necessária para base para fundação de  $P_1$ :

$$A_b = \frac{\pi \cdot B^2}{4} + B^2 \rightarrow A_b = 1,7854 \cdot B^2$$

$$A_{b_{inical}} = \frac{P}{\sigma_s} \rightarrow A_b = \frac{50}{30} \rightarrow A_b = 1,667 \text{ m}^2$$

$$1,667 = 1,7854 \cdot B^2 \rightarrow B = \sqrt{\frac{1,667}{1,7854}} = 0,966 \therefore B = 1,00 \text{ m}$$

$$e = \frac{(1,0 - 0,30)}{2} - 0,025 = 0,325 \text{ m}$$

$$P_{+e} = 50 + \frac{50 \cdot 0,325}{4,0 - 0,325} = 54,42 \text{ t.} \therefore 55 \text{ t}$$

$$A_{b_{nec}} = \frac{P}{\sigma_s} \rightarrow A_b = \frac{55}{30} \rightarrow A_b = 1,834 \text{ m}^2$$

$$A = \sqrt{\frac{55}{30 \cdot \left(\frac{\pi}{4} + 1\right)}} = 1,0134 \therefore A = 1,05 \text{ m}$$

$$\text{Verificando: } \frac{1,05 + 1}{1} = 2,05 \rightarrow \leq 2,5 \therefore \text{ok (28)}$$

Dimensionamento da área do fuste para fundação de P<sub>1</sub>:

$$A_f = \frac{550}{\frac{0,85 \cdot 1500}{2,24}} = 0,966 \text{ m}^2 \quad (29)$$

Dimensionamento do diâmetro do fuste para fundação de P<sub>1</sub>:

$$D_f = \sqrt{\frac{55}{\pi \cdot \frac{0,85 \cdot 2000}{2,24}}} = 0,307 \text{ m} \therefore D_f = 0,80 \text{ m (diâmetro mínimo) (30)}$$

Dimensionamento da altura da base para fundação de P<sub>1</sub>:

$$H = \frac{(1,05 + 1,00) - 0,8}{2} \cdot 1,73 = 1,08 \text{ m} \therefore H = 1,10 \text{ m (31)}$$

Dimensionamento da fundação para o pilar P<sub>2</sub>:

Considerando um alívio no pilar 2, limitando-o a, no máximo, 50% da reação negativa calculada para esse ponto, temos a seguinte situação:

$$P_2 = 0,5 \cdot 5 = 2,5 \text{ t} \therefore P_2 = 80 - 2,5 = 77,5 \text{ t} \quad (32)$$

Dimensionamento da área do fuste para fundação de P<sub>2</sub>:

$$A_f = \frac{775}{\frac{0,85 \cdot 1500}{2,24}} = 1,362 \text{ m}^2 \quad (33)$$

Dimensionamento do diâmetro do fuste para fundação de P<sub>2</sub>:

$$D_f = \sqrt{\frac{775}{\pi \cdot \frac{0,85 \cdot 2000}{2,24}}} = 0,433 \text{ m} \therefore D_f = 0,80 \text{ m} \text{ (diâmetro mínimo)} \quad (34)$$

Dimensionamento da área da base para fundação de P<sub>2</sub>:

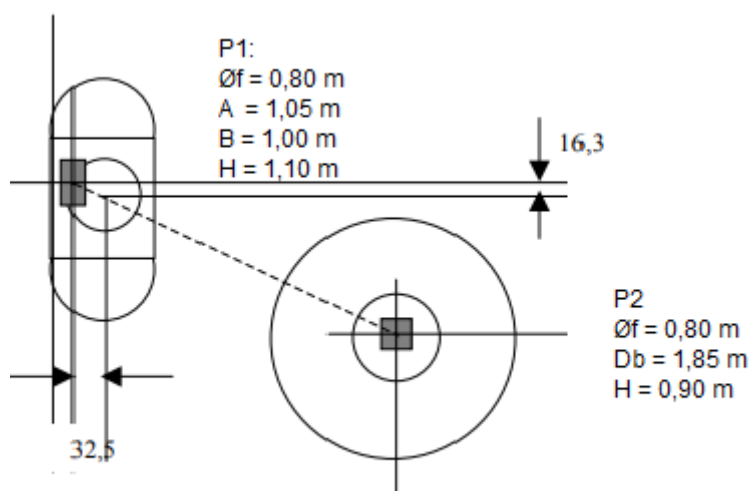
$$A_b = \frac{P}{\sigma_s} \rightarrow A_b = \frac{77,50}{30} \rightarrow A_b = 2,583 \text{ m}^2 \quad (35)$$

Dimensionamento do diâmetro da base para fundação de P<sub>2</sub>:

$$D_b = \sqrt{\frac{4 \cdot 775}{\pi \cdot 300}} = 1,81 \text{ m} \therefore D_b = 1,85 \text{ m} \quad (36)$$

Dimensionamento da altura da base para fundação de P<sub>2</sub>:

$$H = \frac{(1,85 - 0,8)}{2} \cdot 1,73 = 0,9 \text{ m} \therefore H = 0,9 \text{ m} \quad (37)$$

**Figura 18 Situação de divisa (Tubulões)**

Fonte: Adaptado pelo autor (2023).



## 4. Considerações finais

A execução de projetos de tubulões, embora ofereça diversas vantagens, requer uma atenção especial quanto à segurança, aspecto crucial para o desempenho a longo prazo das estruturas. Considerando as últimas atualizações da norma NBR 6122 e outras normativas de segurança, é necessário destacar todas as medidas essenciais para garantir a segurança na construção de fundações profundas do tipo tubulão.

Uma abordagem fundamental para assegurar a segurança na execução de projetos de tubulões é a estrita conformidade com as normas atualizadas, especialmente a NBR 6122. Essa norma estabelece critérios técnicos e parâmetros fundamentais para a escolha do tipo de fundação, dimensionamento e execução, visando garantir a estabilidade e segurança das estruturas. Uma abordagem fundamental para assegurar a segurança na execução de projetos de tubulões é a estrita conformidade com as normas atualizadas, especialmente a NBR 6122. Essa norma estabelece critérios técnicos e parâmetros fundamentais para a escolha do tipo de fundação, dimensionamento e execução, visando garantir a estabilidade e segurança das estruturas.

Uma análise geotécnica detalhada antes do início da construção é crucial para avaliar as condições do solo e adaptar o projeto de tubulões de acordo com a norma, essa análise deve considerar características como resistência do solo, presença de água no subsolo e outras condições geológicas relevantes. Dessa forma, é possível antecipar aos desafios potenciais e implementar medidas preventivas e de controle.

A segurança na execução de projetos de tubulões também está fortemente ligada à qualificação dos profissionais envolvidos. A norma destaca a importância de engenheiros, geotécnicos e demais profissionais responsáveis pela execução possuírem conhecimentos especializados e estarem atualizados com as melhores práticas de segurança.

Durante o processo de construção dos tubulões, é crucial implementar sistemas de monitoramento contínuo. Isso envolve a verificação regular das condições do solo, das vibrações durante a escavação e do alinhamento dos tubulões conforme

especificado no projeto. Eventuais desvios devem ser prontamente identificados e corrigidos para garantir a estabilidade estrutural.

A seleção e utilização de equipamentos adequados são pontos-chave para a segurança na execução. Isso inclui maquinário de escavação, transporte de materiais e concretagem. O cumprimento das normas de segurança aplicáveis a esses equipamentos é essencial para prevenir acidentes e garantir a integridade das estruturas.

A norma enfatiza a importância de manter registros detalhados de todas as etapas da execução, desde a análise geotécnica até a conclusão da construção. Essa documentação não apenas auxilia na garantia da qualidade do projeto, mas também fornece uma base para futuras inspeções e avaliações de segurança.

As vibrações associadas à construção de tubulões são de intensidade muito baixa, praticamente inexistentes. Isso minimiza os impactos ambientais e potenciais danos a estruturas vizinhas.

Tubulões geralmente oferecem uma opção mais econômica em termos de custos quando comparados a métodos como bate-estacas e outros equipamentos de fundação profunda.

Durante o processo de escavação, é possível ajustar o diâmetro e o comprimento do tubulão conforme as condições do solo encontradas. Isso proporciona uma adaptabilidade significativa ao projeto.

Os tubulões permitem o apoio de cada pilar em um único fuste, em contraste com outras fundações que podem exigir múltiplas estacas para um único pilar. Isso simplifica o processo construtivo.

Durante a construção do tubulão, é possível observar diretamente as condições do solo retirado. Essa capacidade de inspeção visual facilita a comparação com as condições previstas no projeto.

Tubulões podem apresentar limitações em solos específicos, como solos rochosos ou solos com elevada presença de água. Nestes casos, outros tipos de fundação podem ser mais adequados.

A construção de tubulões pode exigir equipamentos especializados, o que pode aumentar os custos iniciais e a complexidade do processo construtivo.

O processo de escavação e construção de tubulões pode levar mais tempo em comparação com métodos mais rápidos, como o uso de bate-estacas.

A execução de tubulões eficientes requer profissionais altamente qualificados e experientes, o que pode ser uma limitação em algumas regiões.

A eficácia dos tubulões está intrinsecamente ligada às condições do solo. Se houver variações significativas ou imprevistas no solo, pode ser necessário ajustar o projeto durante a execução, o que pode aumentar os custos e o tempo de construção.

Assim, ao longo deste trabalho, exploramos os diversos aspectos relacionados ao dimensionamento de tubulões como opção de fundação em edificações. A escolha da fundação em uma obra é um processo complexo e crucial, influenciado por vários fatores, como o tipo de solo encontrado no local. Em situações onde as características do solo demandam soluções específicas, os tubulões emergem como uma alternativa viável, especialmente em terrenos com solos mais resistentes.

A capacidade de adaptação do diâmetro e comprimento do tubulão durante a escavação proporciona flexibilidade no processo construtivo, permitindo ajustes conforme as condições reais do solo. Além disso, a execução com baixas vibrações e custos relativamente menores, quando comparados a métodos como bate-estacas, fazem dos tubulões uma escolha economicamente atrativa.

Destaca-se ainda, a importância do acompanhamento de todas as etapas de execução das fundações por profissionais habilitados. A presença de um especialista, familiarizado com as técnicas construtivas e normativas atualizadas, é crucial para garantir a segurança e estabilidade da estrutura.

O embasamento teórico apresentado proporcionou uma compreensão abrangente das fundações profundas, com ênfase nos tubulões. A análise de conceitos, tipos de fundações, fatores condicionantes para a escolha do tipo de fundação, características e métodos construtivos de tubulões, classificações, vantagens e o processo de dimensionamento contribuíram para a construção de um conhecimento sólido.

Os resultados obtidos nos cálculos reforçam a aplicabilidade prática dos tubulões, especialmente em regiões onde as primeiras camadas do solo apresentam baixa resistência. A correta aplicação desses conhecimentos permitirá a elaboração de projetos estruturais mais ousados, respeitando sempre os parâmetros de segurança.

No entanto, identificamos que ainda há uma carência de estudos mais aprofundados nessa área, possivelmente devido à falta de profissionais

especializados. Para futuras pesquisas, recomendamos a realização de amostragem do solo, a utilização de métodos alternativos para determinar a tensão admissível e a consideração da necessidade de contenção lateral na estrutura.

Em suma, a fundação de uma edificação desempenha um papel crucial na garantia da segurança e estabilidade da estrutura. A escolha adequada, baseada em um correto dimensionamento e estudo geotécnico, é fundamental para assegurar o bom funcionamento da obra, a fluidez da construção e a segurança da edificação ao longo de sua vida útil. A continuidade de estudos e aprofundamento nas técnicas de fundações profundas são essenciais para aprimorar as opções disponíveis e garantir a eficiência e segurança nos projetos futuros.

## Referências

ABNT NBR 6118:2014. **ABNT NBR 6118:2014**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238 p. Disponível em: <http://normadedesempenho.com.br/normas-para-download/>. Acesso em: 22 mai. 2023.

ABNT NBR 6122/2019. **NBR 6122/2019**: projeto e execução de fundações: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 127 p. Disponível em: <http://normadedesempenho.com.br/normas-para-download/>. Acesso em: 21 mai. 2023.

ALONSO, Urbano Rodriguez. **Dimensionamento de fundações profundas**. 3 ed. São Paulo: Editora Blucher, f. 79, 2003. 158 p.

ALONSO, Urbano Rodriguez. **Exercícios de fundações**. 2 ed. São Paulo: Editora Blucher, v. 1, f. 109, 2010. 218 p.

ANDRADE, Stephane Lima Pereira de *et al.* **Fundações e obras de contenções**. Porto Alegre: Sagah, 2021. Disponível em: <https://biblioteca-a.read.garden/viewer/9786556902593/2>. Acesso em: 22 mai. 2023.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**: fundamentos. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, f. 110, 1987. 219 p.

CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson. **Fundações por estacas: projeto geotécnico**. Oficina de Textos, v. 3, f. 48, 2010. 96 p.

CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson; ALBIERO, José Henrique. **Fundações diretas: projeto geotécnico**. São Paulo: Oficina de Textos, v. 3, f. 70, 2010. 140 p.

GUIMARÃES, Diego; PETER, Eduardo Alcides. **Fundações**. Porto Alegre: Sagah, 2018. Disponível em: <https://biblioteca-a.read.garden/viewer/9788595023536/4>. Acesso em: 22 mai. 2023.

HACHICH, Waldemar Coelho *et al.* **Fundações**: teoria e prática. São Paulo: Pini, f. 376, 1998. 751 p.

JR., Ivan Joppert. **Fundações e contenções de edifícios**: qualidade total na gestão do projeto e execução. 1ª ed. São Paulo: PINI, f. 111, 2007. 221 p.

LOPES, Francisco R.; VELLOSO, Dirceu A. **Fundações - Volume único**. São Paulo: Oficina de Textos, v. 3, 2011. 568 p.

MELO, Bárbara Nardi. **Fundações**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2019. 192 p.

OLIVEIRA, Cintia Araújo; AMARO, Maria Rafaela Gonçalves. **Dimensionamento de tubulão a ar comprimido**. São José dos Campos, 2016. 37 p Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Paraíba.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, f. 178, 2006. 355 p.

SOUZA, Luiz Humberto de Freitas; GARCIA, Laís Pereira. Redimensionamento de fundação profunda após análise da carga admissível obtida em ensaio de carregamento dinâmico (PDA). **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 6, agosto 2014.