



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS DE BALSAS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

ITAELMA GOMES DOS SANTOS

**ANÁLISE COMPARATIVA DE TENSÕES DE TRAÇÃO
PELOS MÉTODOS MBT E MEF EM BLOCO SOBRE 4
ESTACAS METÁLICAS**

**BALSAS-MA
2025**

Itaelma Gomes dos Santos

Análise Comparativa de Tensões de Tração Pelos Métodos MBT e MEF em Bloco
Sobre 4 Estacas Metálicas

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) na modalidade monografia, submetido à Coordenação de Engenharia Civil da Universidade Federal do Maranhão como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Bacharela em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Esp. Willame Braga Lima
Coorientadora: Profa. Me. Ranna de Sousa
Barros

Balsas-MA
2025

Seção de Informação e Referência
Catalogação da Publicação na Fonte.

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Gomes dos Santos, Itaelma.

Análise Comparativa de Tensões de Tração Pelos Métodos
MBT e MEF em Bloco Sobre 4 Estacas Metálicas / Itaelma
Gomes dos Santos. - 2025.

57 p.

Coorientador(a) 1: Ranna de Sousa Barros.

Orientador(a): Willame Braga Lima.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil,
Universidade Federal do Maranhão, Balsas -ma, 2025.

1. Bloco de Coroamento. 2. Estacas Metálicas. 3.
Análise Estrutural. 4. Tensões. I. Braga Lima, Willame.
II. de Sousa Barros, Ranna. III. Título.

Itaelma Gomes dos Santos

Análise Comparativa de Tensões de Tração Pelos Métodos MBT e MEF em Bloco
Sobre 4 Estacas Metálicas

Trabalho de conclusão de curso na modalidade Monografia, submetido à Coordenação de Engenharia Civil da Universidade Federal do Maranhão como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil.

Aprovado em: 19 de fevereiro de 2025.

Prof. Esp. Willame Braga Lima – Orientador

Profa. Ma. Ranna de Sousa Barros – Coorientador

Prof. Me. Francisco de Assis Alves da Cunha – Examinador

Prof(a). Dr. Daniel Beserra Costa – Examinador

Balsas-MA

2025

Dedico este trabalho à memória de minha
querida avó, Antonia Pereira Duarte, cuja
presença foi essencial em minha vida.

“Não deve haver limites para o esforço humano. Somos todos diferentes. Por pior do que a vida possa parecer, sempre há algo que podemos fazer em que podemos obter sucesso. Enquanto houver vida, haverá esperança”

Stephen Hawking

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por ser meu conforto nos momentos em que me faltaram forças.

Aos meus pais, Nelson Gomes dos Santos e Valdirene Duarte Gomes dos Santos, por todo o incentivo e apoio ao longo dessa jornada. Estendo minha gratidão a todos os meus familiares, cuja presença e suporte foram fundamentais.

Aos meus orientadores, Prof. Wilame Braga Lima e Profa. Ranna de Sousa Barros, pelos ensinamentos, paciência e dedicação, que foram essenciais para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos e companheiros de trajetória, pelo apoio e pela partilha de momentos inesquecíveis ao longo dessa caminhada.

À Universidade Federal do Maranhão (Campus de Balsas), por me proporcionar a oportunidade de cursar o ensino superior e pelo espaço oferecido para a realização deste trabalho.

RESUMO

O presente estudo investiga a melhor forma de analisar blocos de coroamento sobre estacas metálicas através das tensões de tração, comparando dois métodos amplamente utilizados na engenharia: o Método das Bielas e Tirantes (MBT) e o Método dos Elementos Finitos (MEF). O objetivo é entender como as tensões se distribuem nesses blocos e avaliar qual abordagem é mais adequada para projetar fundações seguras e eficientes. Para isso, foram realizadas simulações computacionais nos softwares Eberick e DIANA, que possibilitaram uma análise detalhada do comportamento estrutural dos blocos. O MBT foi aplicado conforme as diretrizes da ABNT NBR 6118 (2023), enquanto o MEF permitiu uma visão tridimensional das tensões atuantes. Os dados utilizados vieram de um projeto real, garantindo que os modelos refletissem situações concretas de engenharia. Os resultados mostram que o MEF consegue captar melhor os efeitos tridimensionais e a interação entre solo e estrutura, proporcionando uma análise mais precisa. Já o MBT, por ser mais simplificado, é uma alternativa prática e viável para dimensionamentos convencionais. Ambos os métodos cumprem seu papel, mas o MEF se destaca quando é necessário um estudo mais detalhado do comportamento das tensões. Dessa forma, o estudo busca contribuir para uma melhor compreensão dos blocos sobre estacas metálicas.

Palavras-chave: bloco de coroamento; estacas metálicas; análise estrutural; tensões.

ABSTRACT

This study investigates the best way to analyze pile cap blocks on steel piles through tensile stresses, comparing two widely used engineering methods: the Strut-and-Tie Method (STM) and the Finite Element Method (FEM). The objective is to understand how stresses are distributed in these blocks and to assess which approach is more suitable for designing safe and efficient foundations. To achieve this, computational simulations were conducted using the Eberick and DIANA software, enabling a detailed analysis of the structural behavior of the blocks. The STM was applied following the guidelines of ABNT NBR 6118 (2023), while the FEM provided a three-dimensional view of the acting stresses. The data used were taken from a real project, ensuring that the models reflected actual engineering situations. The results show that FEM can better capture three-dimensional effects and the interaction between the soil and structure, providing a more accurate analysis. On the other hand, STM, being more simplified, is a practical and viable alternative for conventional designs. Both methods fulfill their roles, but FEM stands out when a more detailed study of stress behavior is required. Thus, this study aims to contribute to a better understanding of pile caps on steel piles.

Keywords: pile cap; metallic piles; structural analysis; stress distribution.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Analogia da treliça.....	18
Figura 2 – Situações típicas de regiões D.	20
Figura 3 – Configurações das bielas prismática (a), leque (b), e garrafa (c). .	21
Figura 4 – Tipos de nós: (a) nó CCC, (b) nó CCT, (c) nó CTT.	24
Figura 5 – Funcionamento de um bloco estrutural.....	25
Figura 6 – Modelo de bielas e tirantes aplicado ao um bloco sobre estacas. .	27
Figura 7 – Exemplos de formas de elementos finitos.	29
Figura 8 – Fluxograma do trabalho	39
Figura 9 – Projeto arquitetônico de referência.	41
Figura 10 – Bloco de estudo (a) vista 3D, (b) vista lateral.	42
Figura 11 – Laudo de sondagem SPT.	45
Figura 12 – Bloco de coroamento com estacas metálicas em 3D no Diana. .	48
Figura 13 - Distribuição das tensões na direção do eixo Z.	49

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A_s – Área de armadura do tirante

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

cm – centímetros

E_0 – Módulo de deformação do solo

FS_d – Valor de cálculo da força de tração que atua sobre o tirante

f_{cd} – Resistência de cálculo à compressão do concreto

f_{cd1} – Tensão resistente máxima no concreto em regiões com tensões de compressão transversal ou sem tensões de tração transversal e em nós onde confluem somente bielas de compressão

f_{cd2} – Tensão resistente máxima no concreto em regiões com tensões de tração transversal e em nós onde confluem dois ou mais tirantes tracionados

f_{cd3} – Tensão resistente máxima no concreto em nós onde conflui um tirante tracionado

f_{yd} – Tensão de escoamento de cálculo do aço

α_{v2} – Coeficiente que depende da resistência à compressão do concreto

E_0 – Módulo de deformação do solo

F – Área da estaca

f – Coeficiente adimensional que depende da forma da fundação

\hat{F} – Vetor de forças externas nodais do sistema ou do próprio elemento

FEM – Finite Element Method

IFC – Industry Foundation Classes

ISE – Interação Solo-Estrutura

K – Coeficiente de rigidez

k – Matriz de rigidez do sistema discreto ou do próprio elemento

Kg – Quilograma

kgf/cm² – Quilograma-força por centímetro quadrado

kN/m – Quilonewton por metro

kN/m³ – Quilonewton por metro cúbico

K_v – Coeficiente de recalque vertical

MBT – Método das Bielas e Tirante

MEF – Método dos Elementos Finitos

Mpa – Mega Pascal (unidade de medida de pressão)

N – Índice de resistência à penetração

NBR – Normas Brasileiras Regulamentadoras

Nd – Carga axial

RVT – Revit Project File

V_i – Volume

SPT – Standard Penetration Test

STM – Strut-and-Tie Method

\hat{u} – Vetor de deslocamentos nodais do sistema ou do próprio elemento

$\int_v f dV$ – Integral da função sob um domínio complexo de volume

$\sum_{i=1}^n \int_{v_i} f dV$ – Somatório das integrais dos subdomínios complexos de volume

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	JUSTIFICATIVA.....	16
3	OBJETIVOS	17
3.1	Objetivo geral	17
3.2	Objetivos específicos.....	17
4	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
4.1	Método das bielas e tirantes.....	18
4.1.1	Origem do método das bielas e tirantes (MBT)	18
4.1.2	Regiões B e D	19
4.1.3	Geometria do modelo	20
4.1.4	Bielas.....	21
4.1.5	Tirantes	22
4.1.6	Nós	23
4.1.7	Modelo de Blévo e Frémy (1967)	24
4.2	Método de Fusco (1995)	25
4.2.1	Definição do método.....	25
4.3	Método de Santos	26
4.3.1	Método de dimensionamento	26
4.3.2	Diferenças entre os métodos por (2022)	27
4.4	Perspectivas da simulação numérica em elementos finitos	28
4.4.1	Concepção do modelo.....	28
4.4.2	Tipos de elementos finitos	29
4.4.3	Fundamentos matemáticos	29
4.5	Comportamento estrutural de blocos.....	31
4.5.1	Classificação dos blocos	31
4.5.2	Método de dimensionamento	32
4.5.3	Blocos sobre estacas metálicas	33
4.6	Investigação geotécnicas	34
4.6.1	Investigação inicial	34
4.6.2	Sondagem a percussão associada ao SPT.....	35
4.6.3	Procedimento do ensaio SPT NBR 6484 (ABNT, 2020).....	35

5	METODOLOGIA	39
5.1	Levantamento de dados	40
5.2	Método MBT pelo o software Eberick.....	42
5.3	Método MEF pelo o software DIANA.....	43
5.3.1	Definição da malha.....	43
5.3.2	Definição da mola elástica.....	44
5.3.3	Definição dos materias da estrutura	44
5.3.4	Interação solo-estrutura.....	45
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
6.1	Tensões pelo o MEF	49
6.2	Tensões pelo o MBT	50
6.3	Comparação entre os métodos MEF e MBT	51
7	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

A fundação exerce a função crucial de receber e distribuir as cargas da edificação, abrangendo tanto as cargas permanentes quanto as acidentais. Esse processo garante que as forças sejam transferidas para o solo de maneira adequada, permitindo que ele suporte as solicitações sem comprometer a estabilidade e a segurança da estrutura, refletindo o impacto direto dos avanços tecnológicos na construção civil (Velloso; Lopes, 2010).

A escolha da fundação depende de diversos fatores, como as características do solo, as técnicas construtivas aplicadas, as condições econômicas e o detalhamento arquitetônico da edificação, entre outros. As fundações são classificadas em dois grupos principais, fundações superficiais e fundações profundas. Portanto, as fundações superficiais transmitem as cargas ao solo por meio de pressões distribuídas em sua base, enquanto as fundações profundas transferem as cargas por meio da resistência lateral ao longo de sua extensão e pela resistência na base (Cintra; Aoki, 2010).

Quando a resistência do solo é baixa em cotas próximas à superfície, a solução indicada é o uso de fundações profundas, como estacas, tubulões e caixões. As estacas, amplamente utilizadas na construção civil, podem ser confeccionadas em materiais como madeira, concreto pré-moldado ou metálico. Sua execução varia entre estacas escavadas ou cravadas, que podem ser instaladas por métodos como percussão, prensagem ou vibração, permitindo a adaptação às necessidades específicas de cada projeto (Falconi, 2019).

A aplicação das estacas exige, de forma indispensável, o uso do bloco de coroamento ou bloco de fundação. Esses elementos estruturais são responsáveis por intermediar a transferência das cargas da estrutura para a fundação. Os blocos de coroamento são posicionados no topo das estacas, com parte de sua estrutura engastada no interior do bloco, garantindo a adequada distribuição das forças. (Campos, 2015).

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023), os blocos são estruturas volumétricas que podem ser classificadas como rígidas ou flexíveis, de acordo com critérios específicos. Essas estruturas são utilizadas para transmitir as cargas dos pilares para as estacas e, conseqüentemente, para as fundações. Nesse contexto, os blocos de

coroamento podem conter uma ou mais estacas, desempenhando um papel fundamental na distribuição de cargas.

Entre os tipos de estacas utilizadas em blocos de coroamento, as metálicas se destacam por oferecer diversos benefícios, como menor vibração durante a cravação, excelente resistência a esforços de flexão e tração, maior eficiência em solos de difícil escavação e facilidade para cortes e emendas. Apesar dessas vantagens, os estudos sobre a distribuição das tensões entre blocos e estacas metálicas ainda são limitados, evidenciando uma lacuna a ser explorada na literatura técnica (Delalibera; Gonçalves, 2020).

Embora os blocos de fundação sejam amplamente utilizados em construções, existe inúmeros métodos para o dimensionamento. Dois procedimentos frequentemente aplicados são o Modelo de Viga e o Método das Bielas e Tirantes (MBT) (Souza et al., 2020). As diretrizes normativas mais recentes recomendam o uso do MBT para projetar blocos rígidos sobre estacas, método que se baseia na concepção de treliças tridimensionais para representar o fluxo de forças na estrutura (Souza *et al.*, 2020).

Dessa forma, a aplicação de métodos numéricos tem se mostrado uma ferramenta poderosa para solucionar problemas complexos na engenharia, principalmente relacionados a estruturas de fundações, proporcionando resultados mais precisos e próximos da realidade (Duarte, 2016).

Conforme Silva (2023), os métodos numéricos, como o Método dos Elementos Finitos (MEF), vêm ganhando destaque, especialmente no estudo de estruturas de concreto armado. O MEF é amplamente reconhecido como uma abordagem eficaz para resolver problemas em domínios complexos e avaliar detalhadamente o comportamento estrutural, contribuindo para a evolução da análise de estruturas.

Este trabalho aborda a análise das tensões de trações em fundações que utilizam blocos de coroamento sobre estacas metálicas, empregando uma abordagem comparativa entre o MBT e o MEF. Essas ferramentas se destacam pela eficácia no estudo e dimensionamento de fundações, permitindo uma análise detalhada do comportamento estrutural.

2 JUSTIFICATIVA

Um aspecto relevante a ser destacado é o dimensionamento de blocos sobre estacas, utilizados para transferir as cargas dos pilares para as fundações. Para o dimensionamento desses blocos e a análise das tensões, a NBR 6118 (ABNT, 2023) recomenda o Método da Biela e Tirante (MBT), mas não especifica o modelo exato que deve ser adotado para o cálculo das tensões, deixando ao calculista a liberdade de escolher o modelo mais adequado às características do projeto (Tomaz, *et al.*, 2018).

Outro método usual para a análise das tensões é o método computacional do Método dos Elementos Finitos (MEF), que possibilita a verificação do fluxo de tensões e pode incorporar situações mais complexas, como a deformabilidade do solo de apoio das estacas, entre outros fatores (Oliveira; Barros; Giongo, 2014). Conforme informado, de acordo com Delalibera e Gonçalves (2020), na literatura são raros os estudos voltados especificamente para blocos sobre estacas metálicas, o que deixa em aberto diversas questões sobre a distribuição de tensões no bloco de coroamento.

Os poucos trabalhos encontrados na literatura, como os de Delalibera *et al.* (2020) e Delalibera e Gonçalves (2020), realizaram estudos para blocos sobre duas estacas metálicas. O primeiro trabalho realizou ensaios experimentais para analisar as tensões pelo método MBT, enquanto o segundo apresentou um comparativo entre os métodos MBT e MEF.

Portanto, o presente trabalho propõe um comparativo dos métodos para um bloco sobre quatro estacas metálicas. Dessa forma, busca-se contribuir para um melhor entendimento do comportamento estrutural da ligação bloco-estaca metálica, realizando um comparativo entre os resultados obtidos pelo método proposto pela NBR 6118 (ABNT, 2023) e os resultados obtidos através do MEF.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Análise numérica das tensões no conjunto bloco-estacas por meio dos resultados obtidos pelo MBT e pelo MEF.

3.2 Objetivos específicos

- Analisar as tensões pelo o método MBT;
- Analisar as tensões pelo o método MEF;
- Comparação dos resultados dos métodos MBT e MEF.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

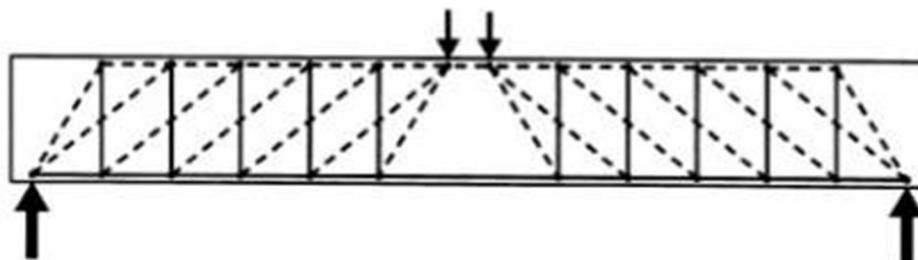
4.1 Método das bielas e tirantes

4.1.1 Origem do método das bielas e tirantes (MBT)

No início do século XX, Ritter e Morsch desenvolveram a analogia da treliça, um modelo fundamental para a compreensão do comportamento de estruturas de concreto armado. Essa concepção surgiu a partir da análise de vigas bi-apoiadas submetidas a carregamentos, nas quais se observou o desenvolvimento de campos de tensões de tração e compressão. Com base nessa analogia, uma estrutura de concreto armado pode ser representada por um conjunto de barras interligadas por nós, formando um sistema estrutural capaz de descrever o fluxo de forças internas. Esse conceito foi essencial para o desenvolvimento do Método das Bielas e Tirantes (MBT), amplamente utilizado no dimensionamento de elementos estruturais (Delalibera *et al.*, 2023).

A treliça tem na sua composição tirantes tracionado e bielas comprimidas, sendo que os tirantes são as armaduras que resultam das trações absorvidas pela resistência a tração do concreto, enquanto as bielas é o resultado da compressão do concreto. No MBT, as forças são concentradas em elementos unidimensionais, as bielas são inclinadas e ligam o eixo da estaca ao nó, ligando o pilar ao bloco (Guerra; Grego, 2017). Na Figura 1, é representada a analogia da treliça.

Figura 1 – Analogia da treliça.



Fonte: Ladeira (2019).

De acordo com Tomaz *et al.* (2018), no decorrer dos anos foram feitos inúmeros estudos sobre o método das bielas e tirantes, todavia as ideias originárias se mantêm. O método tem como base no Teorema do Limite Inferior da Teoria da Plasticidade.

Portanto, o modelo proposto pode ser obtido pelo o fluxo de tensões elásticas presentes na estrutura, assim deve-se fazer uma análise elástica da estrutura para determinas valores de tensões elásticas e as principais direções, desenvolvendo o modelo mais coerente.

Conforme Aguiar (2018), O MBT pode ser utilizado para estudar o comportamento da estrutura, permitindo a análise do fluxo de forças e proporcionando uma representação mais realista da distribuição de tensões. Principalmente em fundações pois, após sua execução, esses elementos ficam ocultos, dificultando a inspeção direta.

A principal vantagem do MTB é a generalidade de aplicações, sobretudo em peças de concreto armado, sendo elas mesmas analisadas de forma simples pelo o modelo. Contudo, o MBT requer mais conhecimentos gerais e específicos para identificar os esforços internos da estrutura e não é considerado uma escolha econômica para o projetista (Aguiar, 2018).

4.1.2 Regiões B e D

Para determinar as áreas onde é necessário aplicar o Método das Bielas e Tirantes (MBT), é essencial identificar as regiões de descontinuidade presentes na estrutura, que são classificadas em duas categorias: regiões B e D (Guerra; Grego, 2017).

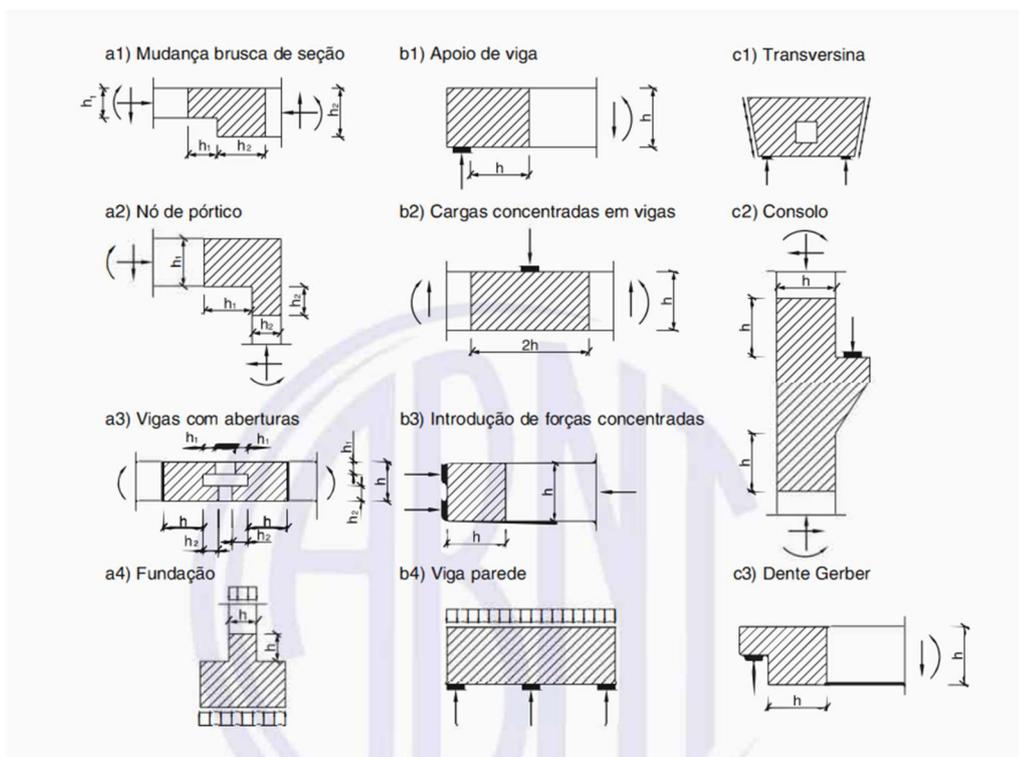
A região B, ou de comportamento linear, são definidas pela hipótese de Navier-Bernoulli, que prevê uma variação linear das deformações específicas ao longo de uma seção transversal. Assim, é possível dimensionar os elementos estruturais por métodos tradicionais, considerando as solicitações em cada seção. (Aguiar, 2018).

De acordo com Sato (2015), as regiões D, associadas às áreas de descontinuidade, podem ser analisadas com base no percurso das tensões próximas a essas zonas. O MTB é desenvolvido considerando o fluxo de tensões dentro da estrutura, acompanhando o trajeto das forças geradas pelo carregamento. Esse fluxo ocorre por regiões submetidas a tensões de tração e compressão, que no modelo são representadas, respectivamente, por tirantes e bielas.

Na Figura 2, a NBR 6118 (ABNT, 2023) apresenta as regiões D (representadas pela área hachurada) ocorrem em situações onde as deformações lineares são

provocadas por descontinuidades geométricas, estáticas ou uma combinação de ambas.

Figura 2 – Situações típicas de regiões D.



Fonte: ABNT, (2023).

Para a NBR 6118 (ABNT, 2023), as regiões B de um elemento estrutural são caracterizadas por uma distribuição linear das deformações, enquanto as regiões D correspondem às áreas onde essa hipótese de distribuição linear não é válida.

4.1.3 Geometria do modelo

De acordo com Delalibera (2006), é necessário considerar determinados critérios para obter um modelo compatível com o MBT. Dessa forma, recomenda-se observar os seguintes fatores.:

- tipos de ações atuantes na estrutura;
- ângulos entre bielas e tirantes;
- isolar a região D;
- área de aplicação das ações e reações;

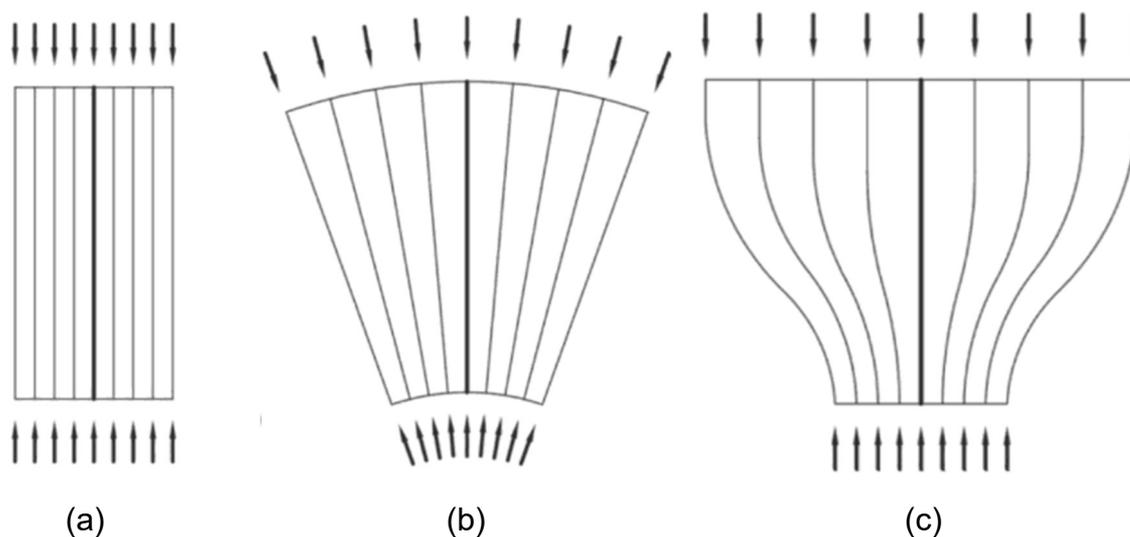
- e) número de camadas da armadura;
- f) cobrimento da armadura.

4.1.4 Bielas

Conforme Santos (2022), as bielas correspondem aos campos de tensões de compressão presentes nos elementos de concreto. Três configurações típicas são suficientes para abranger todos os casos de campos de compressão, incluindo aqueles que ocorrem nas regiões B.

Existem três tipos de configurações para bielas, sendo prismáticas, leque, e formato de garrafa (Santos, 2021). Na Figura 3 é representado as ilustrações das bielas prismáticas, leque e garrafa.

Figura 3 – Configurações das bielas prismática (a), leque (b), e garrafa (c).



Fonte: Santos, (2021).

A NBR 6118 (ABNT, 2023) estabelece diretrizes fundamentais para a verificação das tensões máximas de compressão em bielas e regiões nodais. Para essa verificação, a norma recomenda o uso de três equações específicas:

- a) Equação 1: utilizada para bielas prismáticas, ou seja, aquelas que não sofrem interferência de outros elementos estruturais;
- b) Equação 2: aplicada em bielas atravessadas por um ou mais tirantes, onde a distribuição das tensões se torna mais complexa;
- c) Equação 3: empregada em situações similares à equação 2, mas considerando casos em que há múltiplas interações com tirantes.

Essas equações permitem avaliar se as tensões de compressão nas bielas e nas regiões nodais estão dentro dos limites estabelecidos pela norma, garantindo a segurança e o desempenho adequado da estrutura (ABNT, 2023).

$$f_{cd1} = 0,85 \times \alpha_{v2} \times f_{cd} \quad \text{Eq. (1)}$$

$$f_{cd2} = 0,60 \times \alpha_{v2} \times f_{cd} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$f_{cd3} = 0,72 \times \alpha_{v2} \times f_{cd} \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde,

f_{cd1} = tensão resistente máxima no concreto, em verificações pelo MBT, em regiões com tensões de compressão transversal ou sem tensões de tração transversal e em nós onde confluem somente bielas de compressão, em Mpa;

f_{cd} = tensão resistente máxima no concreto, em verificações pelo MBT, em regiões com tensões de tração transversal e em nós onde confluem dois ou mais tirantes tracionados, em MPa;

f_{cd3} = tensão resistente máxima no concreto, em verificações pelo MBT, em nós onde conflui um tirante tracionado, em MPa;

α_{v2} = coeficiente que depende da resistência à compressão do concreto, adimensional;

f_{cd} = resistência de cálculo à compressão do concreto, em MPa.

4.1.5 Tirantes

Segundo Sato (2015), o tirante representa a armadura tracionada, correspondendo ao eixo de um conjunto de barras de reforço, que pode ser composto por armaduras passivas ou protendidas. Para garantir a eficiência do modelo

estrutural, as forças atuantes nos tirantes devem ser suportadas pela armadura, cujo eixo precisa coincidir com o do tirante.

A NBR 6118 (ABNT, 2023) estabelece que a área de aço necessária para cada tirante seja determinada pela Equação 4.

$$A_s = \frac{FS_d}{f_{yd}} \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde,

A_s = área de armadura do tirante, em cm²;

FS_d = valor de cálculo da força de tração que atua sobre o tirante, em kN;

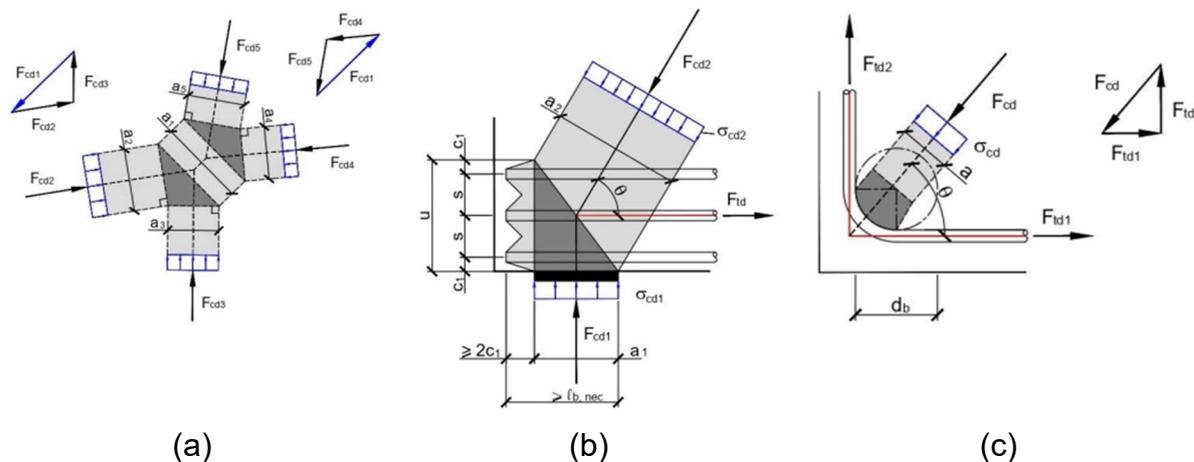
f_{yd} = tensão de escoamento de cálculo do aço, em kN/cm².

4.1.6 Nós

Os nós, também conhecidos como zonas ou regiões nodais, correspondem a áreas de concreto onde há concentrações de tensões e desvios de forças (Delalibera; Gonçalves, 2020). De acordo com Santos (2021), esses nós desempenham um papel fundamental na análise estrutural utilizando campos de tensões e o modelo de bielas e tirantes. Por apresentarem estados de tensão distintos, é essencial que cada nó seja analisado de forma independente.

As tensões nos nós geralmente são analisadas em um estado de tensão plana, enquanto problemas tridimensionais são resolvidos por meio da combinação de modelos em planos distintos. Os nós podem ser classificados em quatro categorias: CCC, CCT, CTT e TTT, onde as letras "C" e "T" indicam, respectivamente, a presença de esforços de compressão ou tração (Santos, 2022). Na Figura 4, é representada os tipos de nós.

Figura 4 – Tinos de nós: (a) nó CCC, (b) nó CCT, (c) nó CTT.



Conforme Santos (2023), os nós do tipo TTT devem ser evitados devido às dificuldades de ancoragem da armadura. Esses nós ocorrem quando os tirantes convergem para o mesmo ponto, resultando em forças de tração em ambos os lados.

4.1.7 Modelo de Blévet e Frémy (1967)

Blévet e Frémy conduziram ensaios em blocos sobre estacas com o objetivo de validar e analisar, de forma prática, a aplicação da teoria das bielas. Para isso, foram testados modelos submetidos a forças centradas e armaduras posicionadas de diferentes maneiras. Os resultados obtidos permitiram avaliar tanto os estados de formação de fissuras quanto os estados-limite último, contribuindo para uma melhor compreensão do comportamento estrutural dos blocos (Delalibera *et al.*, 2023).

De acordo com a tradução do trabalho Blévet e Frémy (1967, apud Prado, Delalibera, Giongo e Gonçalves, 2020) ao longo dos anos entre 1955 e 1961, Blévet e Frémy realizaram ensaios em 116 modelos de blocos sobre duas, três e quatro estacas. Os resultados desses ensaios serviram como base para o desenvolvimento do Método das Bielas e Tirantes, amplamente utilizado até hoje para o dimensionamento de blocos rígidos.

De acordo com os ensaios de Blévet e Frémy (1967, apud Prado *et al.*, 2023), o ângulo formado pelas bielas de compressão no concreto deve variar entre 45° e 55° . Por essa razão, esse método, embora amplamente utilizado, não é adequado para calcular blocos em que as estacas estão localizadas diretamente sob o pilar.

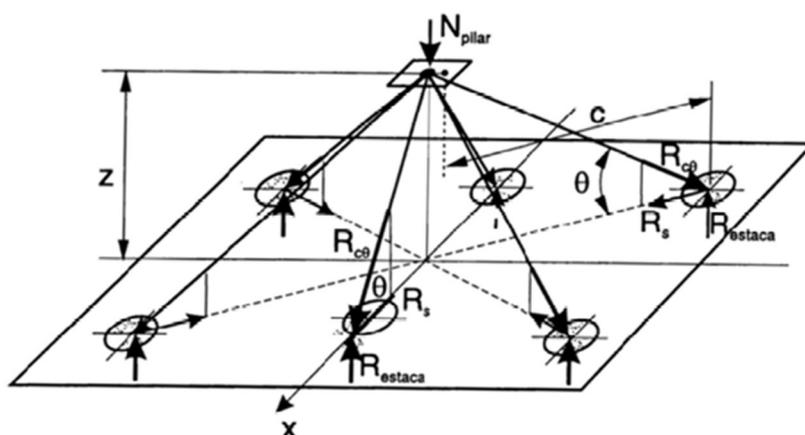
4.2 Método de Fusco (1995)

4.2.1 Definição do método

Segundo Fusco (1995), o modelo de bielas e tirantes, originalmente desenvolvido por Blévtot e Frémy (1967), foi aprimorado com base em seus experimentos e pesquisas, visando proporcionar uma maior precisão na análise estrutural. Conforme sua abordagem, a transferência de cargas entre o pilar, localizado na parte superior do bloco, e as estacas, situadas na base, pode ocorrer diretamente quando as bielas formam um ângulo com a horizontal a partir de $26,5^\circ$. No entanto, por motivos de segurança, recomenda-se que até mesmo as bielas mais inclinadas mantenham um ângulo entre 34° e 45° .

Na Figura 5, o modelo elaborado por Fusco (1995), afirma que a carga do pilar se distribui de maneira uniforme entre todas as estacas do bloco por meio de bielas comprimidas. Dessa forma, a inclinação da biela pode ser determinada pela linha que conecta o centro da estaca ao ponto na base do pilar, situado a uma distância equivalente a um quarto da dimensão do pilar em relação à sua face.

Figura 5 – Funcionamento de um bloco estrutural.



Fonte: Fusco (1995).

Ao estender o pilar para o interior do bloco, observa-se que as tensões nas seções transversais diminuem rapidamente à medida que se afasta do topo do bloco. Portanto, o método consiste, basicamente, na definição da geometria do bloco e do modelo da treliça.

4.3 Método de Santos

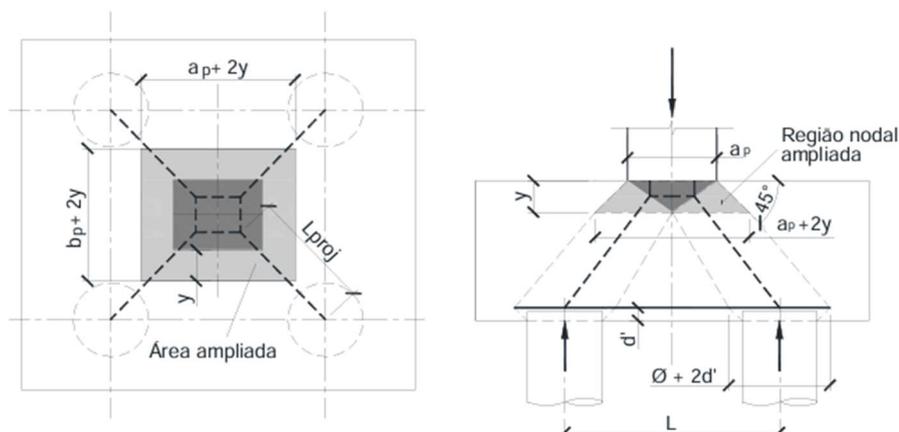
4.3.1 Método de dimensionamento

Santos (2013 *apud* Santos, 2022), desenvolveu um modelo de biela-tirante para o dimensionamento de blocos sobre estacas, que é similar ao método proposto por Blevot e Frémy (1967). Esse método idealiza uma treliça tridimensional composta por bielas inclinadas que conectam a base do pilar às estacas.

Nos blocos rígidos, onde a transferência de cargas ocorre por meio de bielas diretas, essas bielas costumam apresentar um formato semelhante ao de uma “garrafa”, resultando em tensões transversais em relação ao eixo das bielas. Em situações planas, como blocos apoiados em duas estacas, é necessário contrabalançar essas tensões com a instalação de armaduras específicas. Por outro lado, em casos tridimensionais que são blocos apoiados em três ou mais estacas, devido ao confinamento das bielas, a inclusão de armaduras internas para a resistência ao cisalhamento pode ser dispensável (Santos *et al.*, 2019).

Conforme Santos (2022), um bloco pode ser classificado como flexível quando o ângulo de inclinação da biela em relação à horizontal (θ) é inferior a $33,7^\circ$ ou quando a tangente desse ângulo ($\text{tg}(\theta)$) é menor que $2/3$. Por outro lado, um bloco é considerado rígido quando θ é igual ou superior a 45° ou $\text{tg}(\theta)$ é maior ou igual a 1. Existe também uma faixa intermediária, onde $33,7^\circ \leq \theta < 45^\circ$ ou $2/3 \leq \text{tg}(\theta) < 1$, que se refere aos blocos semirrígidos. Nestes blocos, é possível considerar a ação de biela direta, desde que a rigidez do bloco seja analisada ao determinar os esforços nas estacas. Na figura 6, o modelo assume que o pilar é submetido a aplicação de forças que sobrecarregam sua resistência, resultando no desvio das bielas diagonais.

Figura 6 – Modelo de bielas e tirantes aplicado ao um bloco sobre estacas.



Fonte: Santos e Carvalho e Stucchio (2019 *apud* Santos, 2022, p,838).

O modelo proposto estabelece a compatibilidade entre os campos de tensões e o modelo de bielas e tirantes resultante, mantendo apenas a simplificação no cálculo das tensões das bielas por meio da área ampliada de Fusco (1995). Isso possibilita a adoção dos limites de resistência dos nós de bielas conforme NBR 6118 (ABNT, 2023), sem sobrecarregar o projeto estrutural das fundações e blocos de sapatas (Santos, 2022).

4.3.2 Diferenças entre os métodos por (2022)

De acordo com Santos (2022), o modelo de Blévoet estabelecem três limites para a determinação dos esforços em um bloco, sendo esses limites bem definidos e independentes, pois a inclinação da biela é determinada apenas por parâmetros geométricos. Um limite é relacionado à resistência do aço, enquanto os outros dois se referem à resistência da biela. A segurança é avaliada pela relação de esmagamento da biela, considerando as tensões calculadas tanto junto ao pilar quanto às estacas. Se a verificação mais crítica estiver relacionada à resistência da biela, somente o aumento da resistência do concreto ou a alteração da altura do bloco são permitidos.

Já o modelo de Fusco (1995) foi adaptado considerando para ângulos de bielas próximos $\arctg 2/3$, esse método considera a resistência do nó superior depende da armadura. Entretanto, devido à grande abertura de carga, esse método permite que o ângulo de inclinação da biela seja maior do que o definido pelo método de Blévoet. Isso resultaria em uma geometria de bielas e tirantes não realista, com esforços de tração na parte superior do bloco.

No modelo proposto por Santos (2022), a força resistente no bloco é definida pelo menor valor entre duas referências críticas: a primeira é calculada a partir da combinação entre o escoamento da armadura e o limite superior do nó superior; a segunda leva em conta as resistências dos nós superiores e inferiores.

4.4 Perspectivas da simulação numérica em elementos finitos

4.4.1 Concepção do modelo

Conforme Soriano (2020), o Método dos Elementos Finitos (MEF) começou a se desenvolver entre as décadas de 1960 e 1980, alcançando grande sucesso na análise de estruturas. Inicialmente, suas aplicações foram direcionadas para projetos de alta complexidade, como espaçonaves, mísseis e cápsulas espaciais, sendo introduzido pelos engenheiros aeronáuticos Turner e Argyris.

A partir de 1975, o MEF consolidou seu uso com o surgimento dos primeiros softwares de análise estrutural, como o SAP2000 V14®, ANSYS® e NASTRAN®, que ampliaram sua aplicabilidade e facilitaram sua implementação em diversos campos da engenharia (Soriano, 2020).

De acordo com Lanes e Greco (2022), o MEF trata-se de um modelo aproximado de cálculo para sistemas contínuos. A estrutura é subdividida em um número finito de partes, designado como elementos, que são conectados por pontos discretos, ou seja, nós.

Na Equação 5 que expressa o equilíbrio do sistema discretizado, isto é, o comportamento de cada elemento do modelo, sendo fundamental para compreender a distribuição dos esforços.:

$$k \cdot \hat{u} = \hat{F} \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde,

k = a matriz de rigidez do sistema discreto ou do próprio elemento;

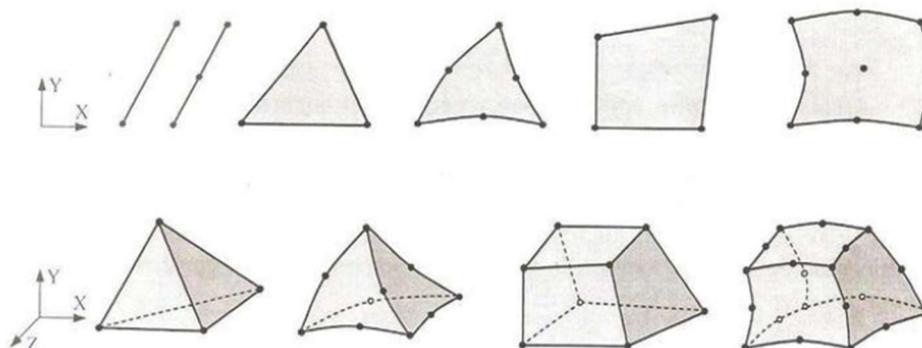
\hat{u} = é o vetor de deslocamentos nodais do sistema ou do próprio elemento;

\hat{F} é o vetor de forças externas nodais do sistema ou do próprio elemento.

4.4.2 Tipos de elementos finitos

Os elementos finitos apresentam formas variadas como unidimensional (barras), bidimensionais (áreas) e tridimensionais (volume) com números distintos de pontos nodais em seus lados e faces. A escolha do tipo de elemento depende das características da estrutura e do problema a ser resolvido. Dessa forma, os elementos podem variar ainda em forma, números de pontos nodais e números e tipos de graus de liberdade por ponto nodal. Na Figura 7, são apresentados exemplos de formas de elementos finitos (Soriano, 2020).

Figura 7 – Exemplos de formas de elementos finitos.



Fonte: Soriano (2020).

Segundo, Azevedo (2003), as formas utilizadas nos elementos finitos variam conforme cada caso, dependendo das condições geométricas. É possível empregar diferentes tipos de formas em uma mesma modelagem, adaptando-se às necessidades do problema analisado.

4.4.3 Fundamentos matemáticos

O MEF está diretamente ligado ao avanço da tecnologia, sendo usado nas engenharias até simulações em escala nano e micro. É uma ferramenta essencial na análise numérica e simulação de sistemas complexos, pois apresenta resultados mais confiáveis. A formulação por trás do MEF é baseada no Princípio dos Trabalhos

Virtuais e sendo denominada atualmente como métodos dos elementos finitos (Silva, 2023).

Conforme Azevedo (2003), a formulação matemática do MEF exige uma integral, uma vez que analisa vários subdomínios em função de determinada variável, como por exemplo, momento fletor. A malha é o domínio com vários subdomínios, podendo substituir a integral sobre um domínio complexo (de volume V) por um somatório de integrais longas sobre subdomínios de geometria simples, quadrada ou triangular (de volume V_i).

Logo, Azevedo (2003) explica em sua obra Método dos Elementos Finitos que a equação do princípio dos trabalhos virtuais e da energia de potencial mínima em análise estrutural pode ser expressada na Equação 6.

$$\int_V f dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f dV \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde,

$\int_V f dV$ = é a integral da função sob um domínio complexo de volume;

$\sum_{i=1}^n \int_{V_i} f dV$ = somatório das integrais dos subdomínios complexos de volume;

V_i = volume.

Para as integrais longas, Azevedo (2003) explica que os subdomínios foram viáveis de ser calculados de V_i , pode-se apenas calcular o somatório de V_i para obter a integral estendida a todo o domínio. A Equação 7 demonstra o somatório de V_i para obter a integral longa para todo o domínio.

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde,

V representa o volume total do domínio da função V_i , enquanto V_i corresponde ao volume de cada subdomínio da função. Cada subdomínio V_i é associado a um elemento finito de geometria simples, como segmentos de reta, triângulos, quadriláteros, tetraedros ou paralelepípedos (Azevedo, 2003).

O (MEF) desempenha um papel fundamental na modelagem desses subdomínios. De acordo com Duarte (2016), o MEF pode ser classificado em três categorias principais de problemas, que são:

- a) Problemas conhecidos como de autovalores incluem aqueles voltados para o cálculo de frequências naturais e modos de vibração em meios sólidos e fluidos, além de questões relacionadas à estabilidade linear, como flambagem, e à aeroelasticidade;
- b) Problemas de propagação que se referem à análise do comportamento de sistemas mecânicos ao longo do tempo, especialmente em regime transitório. Nessa categoria, incluem-se estudos como a determinação da distribuição de temperaturas causadas por uma fonte de calor variável;
- c) Problemas de equilíbrio que têm soluções independentes do tempo. Eles incluem estudos de mecânica dos fluidos, focados na distribuição de pressão e velocidades em regime permanente, e de mecânica dos sólidos, voltados à análise de tensões e deformações.

4.5 Comportamento estrutural de blocos

4.5.1 Classificação dos blocos

Os blocos de fundação são componentes volumétricos situados nas bases dos pilares, cuja função é transferir as cargas da superestrutura para as estacas ou tubulões. Esses elementos desempenham um papel crucial na estabilidade e segurança das construções. Como estão localizados abaixo do solo, são estruturas que apresentam desafios em termos de inspeção e monitoramento (Souza *et al.*, 2020).

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2023), o bloco de coroamento é um elemento fundamental nas fundações profundas. Esse bloco pode ser classificado como rígido ou flexível, dependendo das suas características.

Assim, a NBR 6118 (ABNT, 2023) define o bloco rígido com base em seu comportamento estrutural, determinado pelos seguintes critérios:

- a) trabalho à flexão nas duas direções, mas com trações essencialmente concentradas nas linhas sobre as estacas (reticulado definido pelo eixo das estacas, com faixas de largura igual a 1,2 vez seu diâmetro);
- b) forças transmitidas do pilar para as estacas essencialmente por bielas de compressão, de forma e dimensões complexas;
- c) trabalho ao cisalhamento também em duas direções, não apresentando ruínas por tração diagonal, e sim por compressão das bielas, analogamente às sapatas.

Quando o bloco de coroamento é classificado como flexível, de acordo com a norma NBR 6118 (ABNT, 2023), ele deve ser analisado sob as mesmas premissas que um bloco rígido, porém com uma avaliação mais detalhada. Nesse caso, é necessário observar a distribuição dos esforços nas estacas, verificar a presença e o dimensionamento dos tirantes de tração, além de realizar uma análise cuidadosa sobre a punção do elemento.

A recomendação da ABNT NBR 6118 (ABNT, 2023) para determinar a rigidez do bloco de coroamento, utiliza-se a aplicação da Equação 8, um procedimento semelhante ao usado para calcular a rigidez de uma sapata isolada. Se a altura do bloco atender aos requisitos estabelecidos pela equação, a estrutura é classificada como rígida; caso contrário, a estrutura será considerada flexível.

$$h \geq (a - a_p)/3 \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde:

h é a altura da sapata;

a é a dimensão do bloco em uma determinada direção;

a_p é a dimensão do pilar na mesma direção.

4.5.2 Método de dimensionamento

O método de bielas e tirantes é amplamente utilizado para dimensionar blocos sobre estacas, seguindo etapas semelhantes, independentemente das condições específicas. Nesse processo, podem ser aplicados modelos tridimensionais, sejam eles lineares, não lineares ou baseados em bielas e tirantes (Alves; Tomaz, 2018).

Embora a norma NBR 6118 (ABNT, 2023) ofereça orientações gerais sobre os modelos e as verificações necessárias, ela não apresenta um método detalhado para o dimensionamento e a validação desses blocos (Alves; Tomaz, 2018). Assim, as etapas para o dimensionamento descritas na norma ou na literatura são apresentadas a seguir:

- a) Determinação das forças das ações e reações atuantes;
- b) Escolha dos eixos das bielas e tirantes do modelo, assim como os nós que os conectam;
- c) Determinação dos esforços nas barras da treliça idealizada;
- d) Verificação das tensões nas bielas;
- e) Verificação das tensões nas zonas nodais;
- f) Dimensionamento das armaduras dos tirantes (incluindo a ancoragem).

4.5.3 Blocos sobre estacas metálicas

As estacas metálicas são amplamente utilizadas em construções de grande porte, com a vantagem de eliminar a necessidade de vigas de transição. No entanto, ainda não há consenso sobre o comportamento mecânico dos blocos apoiados nesse tipo de estaca (Silva, 2024). Embora a maioria das pesquisas experimentais e numéricas esteja voltada para blocos sobre estacas de concreto armado, os estudos relacionados a blocos sobre estacas metálicas ainda são limitados na literatura (Brandão; Delalibera, 2022).

Essa escassez de estudos gera incertezas sobre o comportamento mecânico de blocos sobre estacas metálicas (Delalibera; Gonçalves, 2020). Conforme Gonçalves (2020), diante dessa lacuna, os engenheiros frequentemente recorrem a recomendações empíricas e modelos simplificados ao optar por esse tipo de solução, o que pode levar ao superdimensionamento dos elementos de fundações.

De acordo com Mendonça (2017), o detalhamento da conexão entre a estaca e o bloco permanece como um tema que exige maior investigação, uma vez que as normas atuais não apresentam um modelo padronizado. As soluções de projeto e execução têm se fundamentado em práticas adotadas por profissionais da engenharia estrutural, além das orientações fornecidas por fabricantes e fornecedores de estacas metálicas (Mendonça, 2017).

A norma NBR 6122 (ABNT, 2024), em relação às ligações entre as estacas metálicas e o bloco de coroamento em seu anexo F, item F.9, estabelece que o sistema de transferência dos esforços solicitantes, sejam eles de compressão, tração, momentos fletores ou esforços horizontais, do bloco de coroamento para as estacas metálicas, deve ser estudado e detalhado em colaboração com o projetista da estrutura.

4.6 Investigação geotécnicas

4.6.1 Investigação inicial

De acordo Velloso e Lopes, (2010) as investigações geotécnicas são essenciais para revelar as características do solo analisado, possibilitando ao engenheiro desenvolver um projeto de fundação seguro e apropriado para a construção. Em geral, essas investigações são realizadas diretamente no local da obra, por meio de ensaios “in situ”. O primeiro passo para uma investigação eficaz do subsolo é elaborar um programa que estabeleça as etapas da investigação e os objetivos a serem alcançados. As etapas são:

- a) Investigação preliminar;
- b) Investigação de projeto ou complementar;
- c) Investigação para a fase de execução.

As investigações são necessárias para se obter uma visão integrada e uma análise conjunta de todos os resultados obtidos em laboratório ou em ensaios de campo, permitindo uma melhor compreensão do comportamento das camadas de solo mole. Além disso, possibilitam avaliar a consistência dos resultados de diferentes ensaios, sendo essencial a obtenção de parâmetros precisos para prever riscos em obras (Souza, 2019).

Portanto, ignorar as etapas de caracterização cria um risco significativo de desastres. Investigações geotécnicas bem realizadas ajudam a prevenir desabamentos, desmoronamentos e perfurações, além de controlar a ocupação desordenada de áreas perigosas. Eles também evitam problemas patológicos ligados

à infraestrutura, diminuem o risco de acidentes e envolvem custos desnecessários com fundo (Ventura Junior *et al.*, 2021).

4.6.2 Sondagem a percussão associada ao SPT

De acordo com Souza (2019), as condições geológicas do solo influenciam de maneira crucial a escolha das fundações. As regiões com solos expansivos, rochosos ou com presença elevada de lençóis freáticos podem exigir soluções específicas no projeto de fundações. Compreender as propriedades geológicas é fundamental para prevenir possíveis instabilidades no futuro. O fornecimento de informações geotécnicas inclui diversas metodologias, como a amostragem de solo, ensaios laboratoriais, sondagens geotécnicas, testes *in situ*, como o SPT (*Standard Penetration Test*), além de análise.

Os ensaios de (SPT) foram inicialmente desenvolvidos por Terzaghi na década de 1940 e consistem em testes *in situ* de penetração dinâmica padronizada, nos quais um amostrador normalizado é cravado no fundo de um furo de sondagem. A cravação é realizada por meio de um pilão com massa de 63,5 Kg, que cai livremente de uma altura de 760 mm sobre um batente, conectado a um conjunto de hastes, cuja extremidade é um amostrador normalizado (Gomes, 2023).

Segundo a NBR 6484 (ABNT, 2020), é um ensaio utilizado para determinar o quanto o solo é resistente. Esse ensaio envolve a cravação de um amostrador padrão no solo perfurado previamente, contabilizando o número de golpes aplicados como indicador da resistência à penetração do solo.

4.6.3 Procedimento do ensaio SPT NBR 6484 (ABNT, 2020)

Conforme NBR 6484 (ABNT, 2020), o processo manual de sondagem começa com a definição da localização do furo, que deve ser selecionado nos pontos de maior concentração de carga e nas proximidades dos limites da obra. O procedimento é realizado em profundidade, portando a execução do ensaio segue os seguintes critérios.

- a) Primeiro, o equipamento é instalado no local designado, e a haste de cravação é marcada em três partes de 15 centímetros cada;

- b) É necessário escavar até a profundidade de um metro utilizando trado concha ou cavadeira manual. Em seguida, coleta-se uma amostra desse solo, chamada de amostra zero.
- c) O amostrador é colocado no fundo da perfuração, verificando-se se há penetração apenas pelo peso próprio da haste/amostrador. Caso não ocorra avanço, o martelo é apoiado com cuidado sobre a cabeça de bater, observando se o peso do martelo provoca algum avanço. Se houver penetração significativa em qualquer uma dessas situações, deve-se registrar essa informação em fração;
- d) Caso não ocorra penetração nas situações anteriores, o ensaio é iniciado deixando o martelo padronizado cair sobre a cabeça de bater, a partir da altura especificada pela norma, até que o amostrador avance 45 centímetros. Registra-se o número de golpes necessários para cravar cada segmento, sendo os primeiros 15 centímetros desconsiderados. O total de golpes para os últimos 30 centímetros é conhecido como "N";
- e) Após a penetração de 45 centímetros, o amostrador é removido do furo para que a amostra seja coletada. A anotação da relação entre os golpes e a penetração do amostrador segue normas e deve ser feita na forma de fração;
- f) Após concluir o primeiro metro de sondagem, utiliza-se o trado helicoidal para escavar até a profundidade de dois metros, repetindo o processo de cravação. Segundo as normas, é proibido usar o amostrador padrão para avançar para a próxima profundidade de amostragem;
- g) O procedimento deve ser repetido a cada metro até atingir a profundidade definida no projeto. Embora outros tipos de trados possam ser usados para a perfuração, o trado helicoidal garante a limpeza do furo de sondagem. A troca do trado ocorre apenas quando se atinge o nível d'água ou o avanço da perfuração for inferior a 50 mm em 10 minutos de operação. Nessas situações, é adotado o método de perfuração por circulação de água, conhecido como método de lavagem, que utiliza o trépano para remover o material escavado através da circulação de água dentro do furo;

- h) A soma dos golpes necessários para cravar os últimos 30 centímetros do amostrador indica o índice de compactidade das areias e a consistência das argilas.

A NBR 6484 (ABNT, 2020), dispõem tabelas para relacionar correlações com os resultados obtidos em relação ao ensaio SPT. Na Tabela 1, permite determinar características dos solos argilosos, como a sua consistência, o peso específico e a tenção admissível.

Tabela 1 – Classificação dos solos conforme número de golpes para cravar amostrador.

Solo	Índice de resistência à penetração (N)	Designação
Areias e siltes arenosos	≤ 4	Fofa(o)
	5 a 8	Pouco compacta (o)
	9 a 18	Medianamente compacta (o)
	10 a 40	Compacta (o)
	>40	Muito compacta (o)
Argilas e siltes argilosos	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média (o)
	11 a 19	Rija (o)
	20 a 30	Muito rija (o)
	>30	Dura (o)

Fonte: Adaptação, ABNT (2020), pg 28

Na Tabela 2, é apresentado os valores de penetrações em comparação ao amostrador e deve seguir os exemplos abaixo.

Tabela 2 - Exemplo do número de golpes e penetração do amostrador

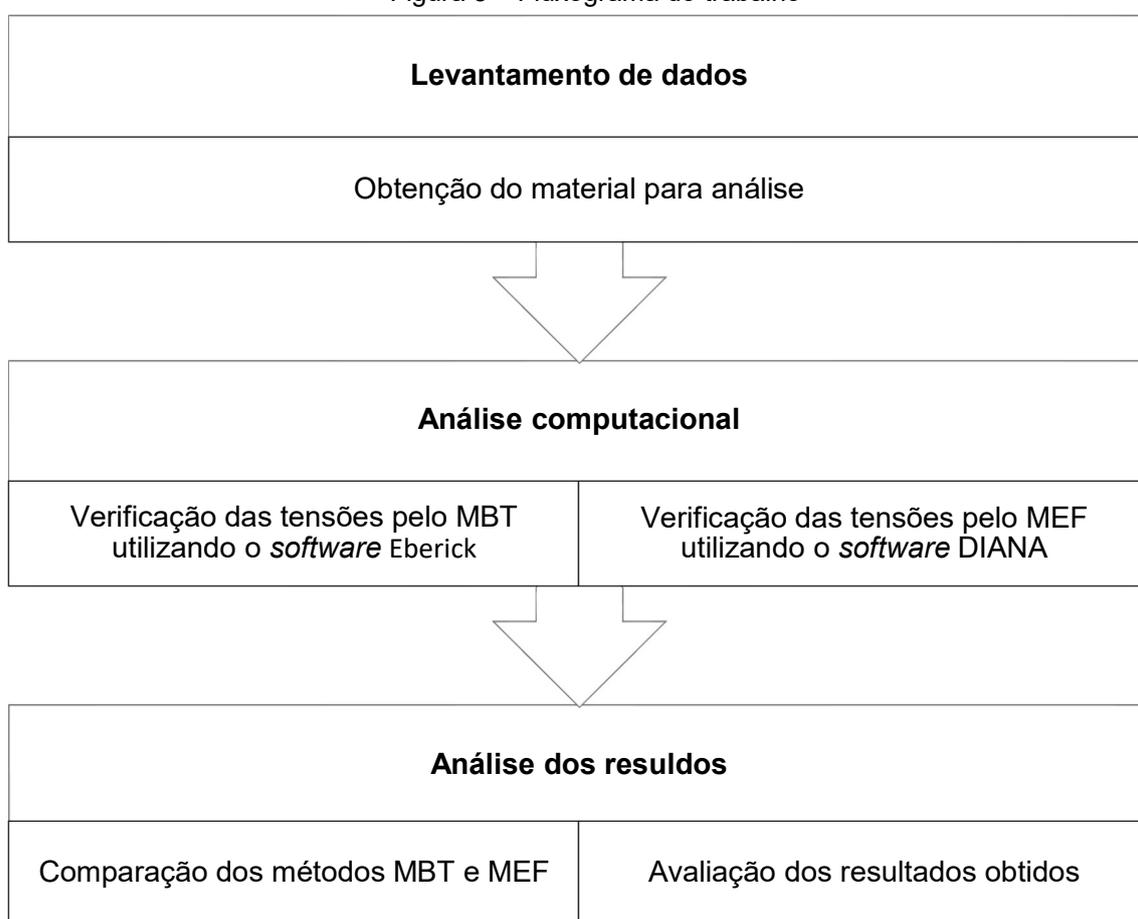
Penetração	Registro dos Golpes	Exemplo
Penetração de 45cm Três trechos iguais a 15cm	Golpes por trechos	3/15 – 3/15 – 4/15
Penetração diferente de 45cm Trechos diferentes de 15cm	Número de golpes para uma penetração superior a 15cm	3/17 – 4/14 – 5/15
Penetração superior a 45cm com a aplicação do primeiro golpe de martelo	Número de golpes e respectiva penetração	1/58
Penetração com haste e amostrador, sem número de golpes	Sem números de golpes	PH/50
Penetração com martelo, haste e amostrador, sem número de golpes	Sem números de golpes	PM/70
Penetração superior a 45cm com a aplicação de poucos golpes de martelo	Número de golpes e respectiva penetração nos respectivos intervalos	1/33 – 1/20
Penetração inferior a 45cm se em qualquer dos três segmentos o número de golpes ultrapassar 30	Número de golpes para cada intervalo de penetração	32/15
Se não for observado avanço do amostrador durante a aplicação de cinco golpes sucessivos do martelo	Número de golpes para cada intervalo de penetração	5/0

Fonte: Adaptação, ABNT (2020), pg 16

5 METODOLOGIA

Este trabalho possui natureza quantitativa e tem como objetivo principal realizar uma análise numérica de um bloco de coroamento sobre estacas metálicas. Para isso, será feita uma avaliação das tensões utilizando dois métodos distintos, o MBT e o MEF, comparando os valores obtidos por ambos. A metodologia adotada segue as etapas descritas na Figura 8, garantindo um processo estruturado e consistente com os objetivos do estudo.

Figura 8 – Fluxograma do trabalho



Fonte: Autor (2025)

5.1 Levantamento de dados

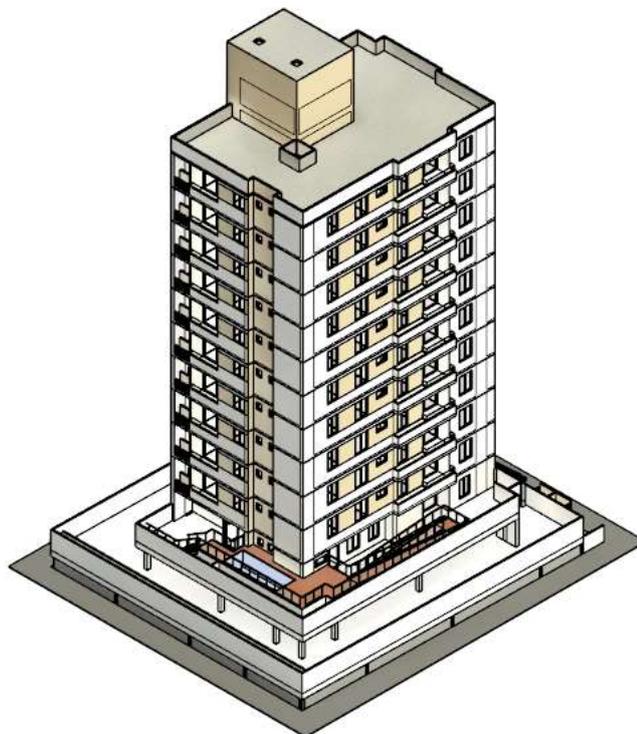
O estudo foi conduzido com base em um edifício de 12 andares e um subsolo, localizado em João Pessoa-PB, cuja o projeto foi feito pelo o engenheiro Flavio Roberto. O projeto foi concebido para fundações em perfis metálicos, o que motivou a realização de um comparativo entre os métodos de análise MBT e MEF.

Inicialmente, o modelo arquitetônico do edifício foi desenvolvido no software Revit, resultando em um arquivo no formato RVT (Revit Project File). Para garantir a integração com as demais ferramentas de análise estrutural, o modelo foi convertido para o formato IFC (Industry Foundation Classes), possibilitando a compatibilidade com softwares especializados, como DIANA 10.10 e Eberick infinite 2025. Essa conversão permitiu a importação dos elementos estruturais de forma precisa, mantendo as propriedades geométricas e os parâmetros relevantes para as análises subsequentes.

A partir do modelo IFC, foram realizadas verificações para garantir a consistência das informações, como compatibilidade entre os elementos estruturais e a correta atribuição das cargas de projeto. Após essa etapa, os dados foram inseridos no DIANA e no Eberick, onde foram conduzidas as análises numéricas e verificações estruturais necessárias para validar o desempenho do sistema de fundação.

Na Figura 9, é apresentado o modelo de referência que serviu como base para o desenvolvimento deste estudo. Esse modelo foi utilizado para a definição das dimensões e cargas do bloco de coroamento, possibilitando a realização das análises e comparações necessárias ao trabalho.

Figura 9 – Projeto arquitetônico de referência.



Fonte: Flavio Roberto, (2024)

Para a modelagem computacional, foi considerado o bloco sobre estacas apresentado na Figura 10. O bloco foi modelado com um embutimento de 10 cm e uma chapa metálica no topo, conforme as características especificadas no projeto. As dimensões do bloco foram adotadas de acordo com a Tabela 3, garantindo a fidelidade ao modelo estrutural proposto.

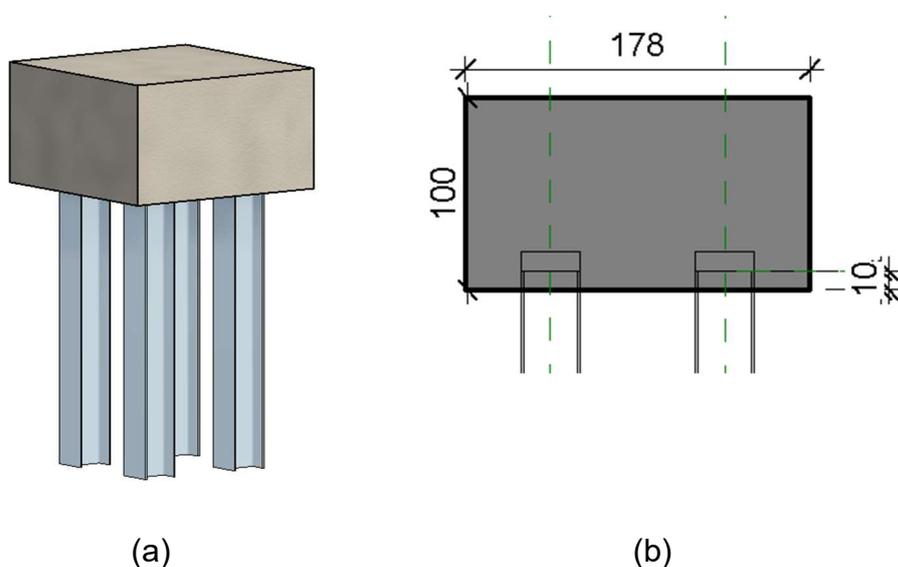
Tabela 3 – Propriedades geométricas do bloco

Altura (cm)	Comprimento (cm)	Largura (cm)	Distâncias entre os eixos (cm)
100	178	178	90

Fonte: Autor (2025).

Para as estacas, foi considerada uma resistência de 30 MPa, utilizando o perfil HP 310x79 (GERDAU). Esses parâmetros foram incorporados à modelagem a fim de representar com precisão as condições estruturais e geotécnicas do sistema de fundação.

Figura 10 – Bloco de estudo (a) vista 3D, (b) vista lateral.



Fonte: Autor (2025).

As propriedades geométricas do modelo e do perfil metálico das estacas foram definidas com base nas especificações do projeto e estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades do perfil HP 310x79

Massa linear (kN/m)	Espessura(mm)	Perímetro (mm)	Área reduzida (cm ²)
79	11	177	82,3

Fonte: Gerdau (2018).

Esses parâmetros foram escolhidos para garantir que a modelagem representasse com fidelidade o comportamento real da estrutura. Essa definição foi fundamental para assegurar uma análise numérica precisa e confiável do sistema de fundação.

5.2 Método MBT pelo o software Eberick

Para a análise das tensões utilizando o software Eberick, considerando blocos sobre estacas e a interação solo-estrutura. A metodologia inicia-se com a definição do

tipo de fundação no software, onde o bloco escolhido é do tipo 4 RET, apoiado sobre quatro estacas do tipo perfil (HB 310X79). As dimensões do bloco são definidas de acordo com a Tabela 3.

Na modelagem, é considerada a influência do atrito solo-fuste, ativando essa opção no software para analisar seu impacto nos deslocamentos e esforços internos das estacas. A discretização do fuste é ajustada para 100 cm, com um número mínimo de 10 divisões, garantindo uma representação mais refinada do comportamento estrutural.

Para a rigidez das molas do fuste, opta-se pelo modelo linear, permitindo uma variação mais realista da rigidez ao longo do comprimento da estaca. Os vínculos dos deslocamentos em X, Y e Z são definidos como elásticos, com coeficiente de rigidez $K = 100000 \text{ kgf/m}$, enquanto as rotações nos eixos são deixadas livres, permitindo uma análise mais flexível da estrutura.

Na tabela 5, está a carga axial (Nd) referente ao carregamento do pilar no bloco de coroamento que foi utilizado como dado no *software Eberick*, retirado do prédio de referência citado na Figura 9, a solicitação foi baseada no memorial de cálculo do referente projeto. Com essas configurações, são realizadas análises de tensões, verificando a influência das condições de vínculo e do atrito solo-estaca.

Tabela 5 – Dados de carregamento.

Carga	Valor
Esforço normal (Nd)	600 tf

Fonte: Autor (2025).

5.3 Método MEF pelo o software DIANA

5.3.1 Definição da malha

Para a análise no software DIANA, foi utilizado um modelo tridimensional (3D), permitindo uma avaliação detalhada em todas as direções do espaço. O modelo foi configurado para abranger uma área de 1 km, com o espaço de modelagem delimitado por uma caixa cúbica cujas coordenadas variaram de (-500, -500, -500) a (500, 500, 500), garantindo uma simulação completa e balanceada.

Quanto à malha, foi adotado o tipo padrão de elementos tetraédricos ou triangulares, devido à sua adequação para simulações tridimensionais,

proporcionando maior flexibilidade na modelagem e precisão na análise dos comportamentos estruturais.

A ordem da malha foi definida como quadrática, permitindo maior precisão nos cálculos em comparação com malhas lineares. Essa escolha foi feita para aprimorar a resolução dos resultados, especialmente em modelos complexos, evitando os picos de tensões entre o bloco e as estacas.

Além disso, a localização dos nós intermediários foi estabelecida por meio de interpolação linear, assegurando uma distribuição uniforme entre os elementos da malha e garantindo a consistência e qualidade da modelagem computacional.

5.3.2 Definição da mola elástica

A interação solo-estrutura foi modelada utilizando uma mola com rigidez de 10000 kN/m, adotando comportamento linear elástico. O amortecimento foi representado por um coeficiente de 0,196133 kN/m, o que permite considerar a dissipação de energia durante a deformação da estaca.

5.3.3 Definição dos materiais da estrutura

Para a modelagem computacional no software DIANA, foram definidos os materiais utilizados na estrutura, incluindo as estacas metálicas, o concreto e o aço estrutural. Cada um desses materiais foi caracterizado com base em suas propriedades mecânicas. Na Tabela 6, são apresentados os valores do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson. Os valores referentes ao perfil metálico foram obtidos a partir do catálogo da Gerdau, enquanto os valores para o concreto foram determinados com base na NBR 6118 (ABNT, 2023).

Tabela 6 – Dados dos materiais.

Material	Módulo de elasticidade (E)	Coefficiente de Poisson (ν)
Perfil metálico	200 Mpa	0,3
Concreto C35	29398.2 Mpa	0,2

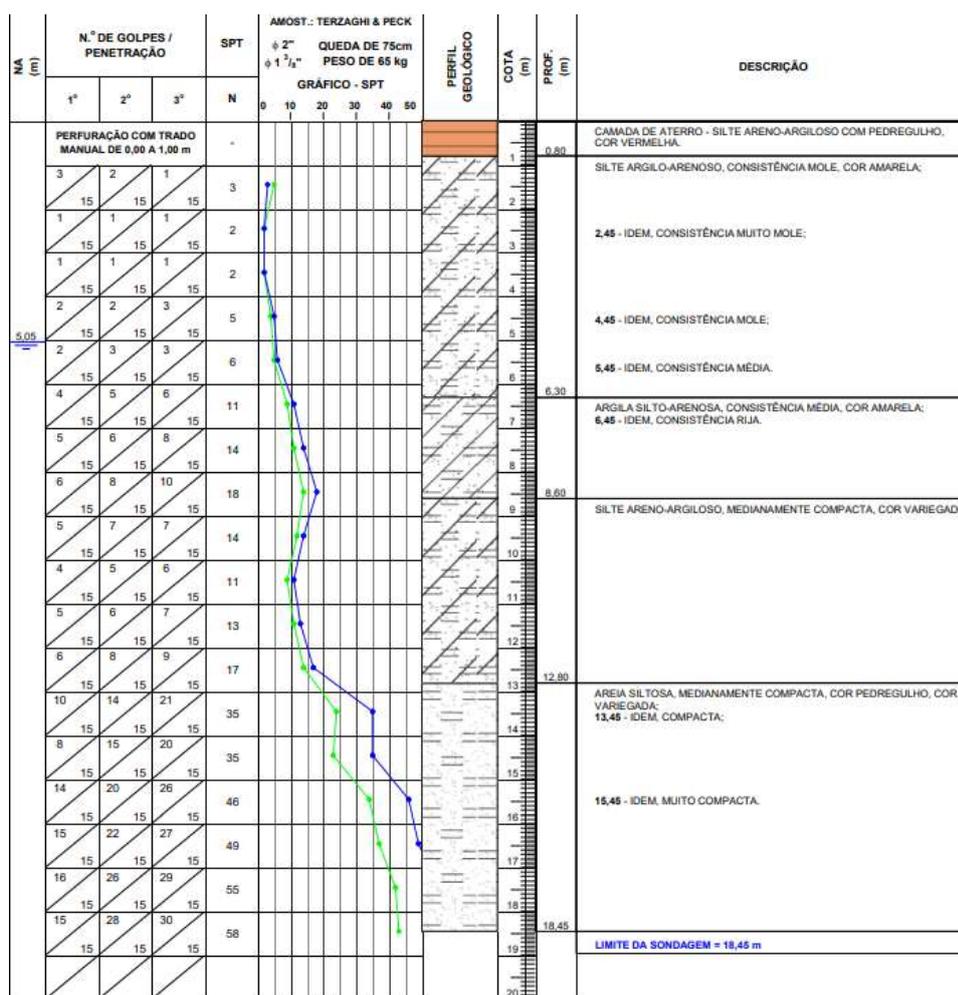
Fonte: Autor (2025).

5.3.4 Interação solo-estrutura

Para determinar o coeficiente de recalque vertical (k_v), um parâmetro essencial na modelagem da interação solo-estrutura, utilizamos o Método de Rausch (1959). No software DIANA, esse coeficiente é fundamental para definir a rigidez do solo na interface com a fundação, especialmente em modelagens que empregam elementos de interface ou o conceito de fundação elástica de Winkler.

Para determinar o coeficiente k_v foi utilizado o laudo de sondagem SPT. As informações obtidas nesse laudo foram inseridas no software Eberick, considerando o carregamento aplicado pela estrutura. A Figura 11 apresenta a sondagem realizada no município de São Luís-MA.

Figura 11 – Laudo de sondagem SPT.



Fonte: Franco Engenharia e Geotecnia, (2024).

O cálculo de k_v é feito a partir do módulo de deformação do solo (E_0), levando em conta a área da base da fundação ou da estaca. No caso da estaca HB 310x79, a área reduzida foi adotada com base nas especificações do manual da Gerdau.

A escolha desse método se apoia em referências e na abordagem apresentada no artigo disponível no suporte da AltoQi, que detalha a correlação entre o NSPT e o módulo de deformação do solo. Isso garante uma estimativa confiável do comportamento do solo para aplicações em engenharia estrutural e geotécnica. Dessa forma, o k_v foi obtido pela Equação 9.

$$K_v = f \times \frac{E_0}{F} \quad \text{Eq. (9)}$$

Onde,

K_v = coeficiente de recalque vertical (kN/m^3);

f = coeficiente adimensional que depende da forma da fundação (geralmente adotado como 0,4 para fundações retangulares);

E_0 = módulo edométrico do solo (kPa);

F = área da estaca

E o módulo edométrico do solo E_0 é dado pela equação 10.

$$E_0 = \alpha \times N_{SPT} \quad \text{Eq. (10)}$$

Onde α é um coeficiente que depende do tipo e consistência do solo.

Com base na figura 11, para solos argilosos e silto-arenosos, valores típicos de α variam entre 2.500 e 4.500 kPa por golpe de SPT. Dessa forma as correlações foram relacionadas.

- Solo: Silte argilo-arenoso de consistência média;
- Profundidade: 4 m;
- Valor típico de NSPT: Entre 5 e 10.

Com base nas equações foi desenvolvido os cálculos. Primeiro foi calculado o E_0 , dado pela Equação 10, onde foi feita uma média ponderada para NSPT 5 e 10.

$$E_0 = \alpha \times N_{SPT}$$

$$E_0 = 2500 \times 5$$

$$E_0 = 12500 \text{ kn/m}^2$$

$$E_0 = \alpha \times N_{SPT}$$

$$E_0 = 4500 \times 10$$

$$E_0 = 45000 \text{ kn/m}^2$$

Sendo a média de 25000 kN/m² para E₀.

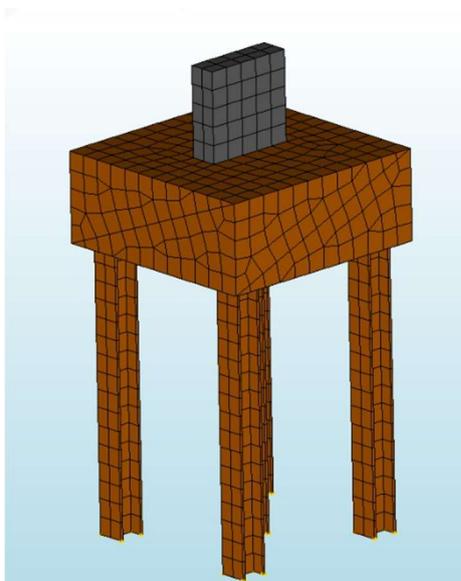
$$K_v = f \times \frac{E_0}{F}$$

$$K_v = 0,4 \times \frac{25000}{82,3}$$

$$K_v = 121,5 \text{ Kn/m}^3$$

O Método de Rausch (1959) é uma abordagem eficiente para determinar a rigidez vertical do solo em fundações e estacas. Sua implementação no DIANA pode ser feita por meio de elementos de interface ou molas de Winkler, permitindo uma análise precisa da interação solo-estrutura. Com os parâmetros definidos foi gerado o modelo em 3D para análise do bloco com estacas metálicas, na Figura 12 é apresentado a representação tridimensional do bloco.

Figura 12 – Bloco de coroamento com estacas metálicas em 3D no Diana.



Fonte: Autor (2025).

O estudo busca compreender o comportamento estrutural do conjunto bloco-estacas a partir dos métodos adotados, avaliando a distribuição das tensões e a interação entre os materiais envolvidos. A partir dos resultados obtidos, será possível interpretar a influência dos parâmetros adotados na modelagem computacional, validando sua eficácia e contribuindo para uma abordagem mais precisa no dimensionamento de fundações.

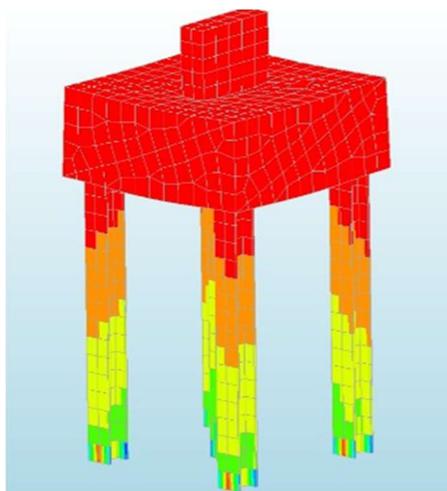
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Tensões pelo o MEF

O primeiro resultado obtido por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) foi a distribuição das tensões normais na direção vertical (eixo Z). Observou-se que as tensões são negativas nas regiões comprimidas, enquanto nas áreas menos carregadas tendem a valores próximos de zero ou até mesmo positivos.

Na Figura 13, é apresentado a distribuição ao longo da estrutura. As cores evidenciam que a compressão aumenta à medida que se desce na estrutura, atingindo seu valor máximo na base dos pilares. Já na parte superior da estrutura, as tensões são significativamente menores, destacadas pela coloração avermelhada, indicando menor sollicitação nessa região. Esse comportamento era esperado, pois as cargas gravitacionais se acumulam ao longo da altura da estrutura, concentrando os maiores esforços na base.

Figura 13 - Distribuição das tensões na direção do eixo Z.



Fonte: Autor (2025).

Os níveis de tensão distribuídos ao longo da estrutura, variando de $0,11 \text{ kgf/cm}^2$ (vermelho) até $-6,16 \text{ kgf/cm}^2$ (azul escuro). Na Tabela 7 tem-se os valores de máximas e mínimas para tensões.

Tabela 7 – Dados das tensões.

Cor	Intervalo de tensão (kgf/cm²)	Interpretação
Vermelho	0,11	Baixa solicitação (região menos carregada)
Laranja	-0,68	Compressão leve
Amarelo	-1,46	Compressão moderada
Verde	-2.24 a -3.81	Compressão significativa
Azul claro	-4.59	Compressão elevada
Azul escuro	-6.16	Compressão máxima

Fonte: Autor (2025).

Os pilares da estrutura apresentam cores que vai do vermelho no topo ao azul na base, o que indica que a carga está sendo transferida de cima para baixo. A maior compressão ocorre na base dos pilares, representada pela cor azul escuro, devido à reação do solo ou dos apoios estruturais. Já a região superior, em vermelho, sofre menor solicitação, provavelmente por concentrar menos carga.

De forma geral, a estrutura está predominantemente sob esforços de compressão, com as tensões mais elevadas concentradas na base dos pilares. A distribuição das tensões está coerente com um modelo estrutural submetido a cargas gravitacionais, refletindo um comportamento esperado para esse tipo de sistema.

6.2 Tensões pelo o MBT

A análise estrutural realizada no software Eberick apresenta as tensões que atuam sobre os blocos de fundação e as estacas do projeto. O software indica tensões variando de -0,0085 kgf/cm² a 6,03 kgf/cm².

O valor máximo indica uma compressão intensa atuando sobre a fundação, evidenciando uma grande transferência de carga para o solo, o que é esperado em elementos estruturais submetidos a elevadas cargas gravitacionais. Já o valor mínimo, sendo negativo, sugere a presença de pequenos esforços de tração, possivelmente originados por momentos fletores atuantes na estrutura ou por efeitos de levantamento devido a reações diferenciais do solo.

Esses esforços de tração devem ser analisados com atenção, pois podem comprometer a aderência entre os materiais e favorecer a formação de fissuras no concreto. A correta modelagem do solo, a definição dos vínculos e a consideração do

atrito solo-estaca no software são essenciais para garantir uma distribuição equilibrada das tensões.

6.3 Comparação entre os métodos MEF e MBT

A análise estrutural dos blocos de fundação e estacas foi realizada utilizando dois métodos distintos, o MEF e o MBT. Ambos têm suas particularidades na distribuição e interpretação das tensões.

O MEF foi utilizado para obter a distribuição das tensões normais na direção vertical (eixo Z). Os principais resultados mostraram que as tensões apresentaram valores negativos nas regiões comprimidas, variando de $-6,16 \text{ kgf/cm}^2$ (compressão máxima) até $0,11 \text{ kgf/cm}^2$.

O modelo apresenta um comportamento estrutural esperado, com as maiores tensões de compressão concentradas na base dos pilares, o que está de acordo com a realidade física das fundações. Além disso, a transição de tensões ao longo da estrutura, evidenciada pelo software, demonstra a distribuição das cargas, sendo feita a distribuição em 3D, ou seja, o projetista terá uma visão detalhada da estrutura.

Já a análise pelo MBT, realizada no software Eberick, apresentou tensões variando de $-0,0085 \text{ kgf/cm}^2$ a $6,03 \text{ kgf/cm}^2$. O valor máximo indica uma compressão intensa sobre a fundação, evidenciando a transferência de carga para o solo, enquanto o valor mínimo negativo sugere a presença de esforços de tração, possivelmente causados por momentos fletores ou reações diferenciais do solo.

Esse efeito de tração deve ser analisado com atenção, pois pode comprometer a aderência entre os materiais e favorecer o surgimento de fissuras no concreto. Para garantir uma distribuição equilibrada das tensões, a correta modelagem do solo e a consideração do atrito solo-estaca são fundamentais.

O MEF se mostrou a opção mais eficaz para analisar blocos sobre estacas metálicas, pois oferece uma visão mais detalhada da distribuição das tensões e da interação entre o solo e a estrutura. Diferente do Método MBT, que apresenta uma abordagem mais simplificada, o MEF consegue captar com mais precisão os efeitos tridimensionais das forças atuantes, tornando os resultados mais próximos da realidade. Isso faz com que seja a escolha ideal para projetos que exigem um alto nível de segurança e precisão, garantindo análises estruturais mais completas e confiáveis.

7 CONCLUSÃO

As fundações são estruturas essenciais na engenharia civil, responsáveis pela transferência de cargas da estrutura para o solo de maneira segura e eficiente. O dimensionamento correto dessas estruturas é fundamental para garantir estabilidade e durabilidade às edificações. Portanto, este trabalho realizou uma análise comparativa entre dois métodos amplamente utilizados para a avaliação de blocos sobre estacas metálicas, o MBT e o MEF.

A análise dos resultados mostra que ambos os métodos são eficazes para avaliar blocos sobre estacas, mas com diferenças na abordagem e no nível de detalhamento. O MEF permite uma análise mais refinada, considerando variações tridimensionais de tensões e a interação solo-estrutura de maneira mais precisa. Já o MBT oferece uma abordagem mais simplificada e prática para projetos convencionais, sendo uma ferramenta útil para o dimensionamento de fundações.

Para projetos que exigem um nível maior de detalhamento e previsão de deslocamentos e tensões locais, o MEF se mostra mais adequado. Já o MBT é uma excelente escolha para projetos correntes, garantindo um dimensionamento seguro com base em metodologias simplificadas.

A relevância deste estudo está no fato de que há poucos trabalhos recentes abordando a aplicação dessas metodologias especificamente para blocos sobre estacas metálicas. Assim, os resultados obtidos servem como referência para futuros estudos e aprimoramento das práticas de projeto, fornecendo diretrizes úteis para engenheiros e projetistas. A continuidade desse tema em pesquisas futuras pode contribuir para o desenvolvimento de modelos ainda mais precisos e otimizados, promovendo avanços na engenharia de fundações.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, C. C. P. **Dimensionamento de estruturas especiais de concreto armado pelo método de bielas e tirantes**. 2018. Dissertação (Mestrado em Projeto de Estruturas), Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2018. Disponível em https://rangellage.com.br/wp-content/uploads/2019/07/Mestrado_Bielas-e-Tirantes-Caio-Aguiar.pdf . Acesso em: 07 nov. 2024.
- ALVES, E. C.; TOMAZ, A. G. S. Dimensionamento ótimo de bloco sobre estacas. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, Série III, n.º 8, p. 19-32, nov. 2018. ISSN 2183-8488. Disponível em: http://rpee.inec.pt/Ficheiros/rpee_serielll_n08/rpee_slll_n08_pg19_32.pdf . Acesso em: 08 nov. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6122**: Projeto e Execução de Fundações. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6484**; Solo — Sondagem de simples reconhecimento com SPT — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.
- AZEVEDO, A. F. M. **Método dos elementos finitos**. 1. ed. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- BARBOSA, A. I. M.; ALBERTINI, M. M. análise comparativa de estimativa de capacidade de cargas de estacas profundas—métodos Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, [S. l.], v. 8, n. 11, p. 1968–1979, 2022.: <https://doi.org/10.51891/rease.v8i11.7781> . Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/7781> Acesso em: 06 nov. 2024.
- BLEVOT, B.; FREMY, F. Blocos sobre estacas: tradução para o português – Parte A. Tradução: PRADO, A. P.; DELALIBERA, R. G.; GIONGO, J.S.; GONÇALVES, V. F. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 1, n. 1, p. 1-20, 1967. Disponível em: http://www.abece.com.br/pdf/1967_Blevot_e_Fremy.pdf Acesso em: 06 nov. 2024.
- CAMPOS, J. C. **Elementos de fundações em concreto**. São Paulo: Oficina de texto, 2015. 1º.
- CINTRA, J. C. A; AOKI, N. **Projeto por estacas**: projeto geotécnico. São Paulo: Oficina de texto, 2010. 1º.
- DELALIBERA, R. G. **Análise numérica e experimental de blocos de concreto armado sobre duas estacas submetidos à ação de força centrada e excêntrica**. 2006. Tese (Doutorado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em:

<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-19072006-093551/pt-br.php> .
Acesso em: 10 dez. 2024.

DELALIBERA, R. G.; SILVA, J. C. G.; GIONGO, J. S.; SILVA, A. A. S. Análise das tensões nodais nos ensaios de Blévyot e Frémy. **HOLOS**, v. 7, n. 39, 2023. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2023.10840> Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/10840> . Acesso em: 10 nov. 2024.

DELALIBERA, R. G; GONÇALVES, V. F. Análise numérica de bloco sobre duas estacas metálicas. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 16, n. 1, p. 91-104, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5216/reec.v16i1.54220> Disponível em: <https://revistas.ufg.br/reec/article/view/54220> . Acesso em: 12 nov. 2024.

DELALIBERA, R. G; TOMAZ, M. A.; GONÇALVES, V. F.; GIONGO, J. S. Analysis of nodal stress on reinforced concrete two-pile caps supported on steel piles. **Ibracon**, v. 13, n. 6, p. 1-16, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952020000600012> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/bQPWhcBsWxW9tG5pMp3yyHb/abstract/?format=html&lang=pt&stop=previous> . Acesso em: 12 nov. 2024.

DUARTE, E. N. **Mecânica do contato entre corpos revestidos**. São Paulo: Blucher, 2016. 104 p. 1º

FALCONI, Frederico *et al.* **Fundações: teoria e prática**. São Paulo: Editora Pini, 2019. 3º

FLAVIO ROBERTO. **Projeto arquitetônico comercial**. São Luís, 2024.

FRANCO ENGENHARIA E GEOTECNIA. **Laudo de sondagem SPT**. São Luís, 2024.

FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1995. 396 p.

GERDAU. **Manual de Estacas Metálicas Gerdau**. 9. ed. 2018.

GOMES, D. S. **Caraterização Geológica-Geotécnica de Terrenos de Fundação Calco-Margosos. Instalação de uma unidade industrial em Coimbra**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2023. Disponível em <https://hdl.handle.net/10316/110328> Acesso em: 20 nov. 2024.

GUERRA, M. B. B. F.; GRECO, M. Modelos de concepção para estruturas de concreto armado com comportamento não linear obtidos pelo método de bielas e tirantes e otimização topológica. **Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural**, v. 14, n. 1, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5335/rsae.v14i1.6510>. Disponível em: <https://seer.upf.br/index.php/rsae/article/view/6510> . Acesso em: 15 nov. 2024.

LADEIRA, A. H. **Análise de estruturas de concreto armado via modelos de bielas e tirantes e técnicas de otimização topológica**. 2019. (Mestrado em estruturas e construção). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro preto. 2019.

Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/11854> . Acessado em 16/11/2024.

LANES, R. M.; GRECO, M. **Simulação da interação solo-estrutura considerando-se a influência de sapatas isoladas e de um conjunto de sapatas**. In Anais do XXV ENMC – Encontro Nacional de Modelagem Computacional, XIII ECTM – Encontro de Ciências e Tecnologia de Materiais, 9º MCSul – Conferência Sul em Modelagem Computacional e IX SEMENGO – Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica. Belo Horizonte, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Marcelo-Greco-2/publication/364653290_SIMULACAO_DA_INTERACAO_SOLO-ESTRUTURA_CONSIDERANDO- . Acesso em: 12 dez. 2024.

MENDONÇA, F. C. **Dimensionamento de Blocos de Coroamento Sobre Estacas Metálicas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal De Pernambuco. Recife, PE, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/29623> . Acesso em: 26 dez. 2024.

OLIVEIRA, D. S.; BARROS, R.; GIONGO, J. S. Blocos de concreto armado sobre seis estacas: simulação numérica e dimensionamento pelo método de bielas e tirantes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 7, p. 1-23, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952014000100002> Disponível em <https://www.scielo.br/j/riem/a/yVRGjdNYn8MMBqqP9R3YvQG/> . Acesso em: 10 dez. 2024.

SANTOS, D. M. **Análise teórica e experimental de blocos sobre estacas: uma abordagem com auxílio de modelos de bielas e tirantes** 2022. Dissertação (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-19012023-101722/pt-br.php> . Acesso em: 18 nov. 2024.

SANTOS, D. M.; CARVALHO, M. L.; STUCCHI, F. R. Design of deep pile caps by strut-and-tie models. **Revista IBRACON de Estruturas e materiais**, v. 12, p. 832-857, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952019000400007> . Acessado em 81/11/2024.

SANTOS, Daniel Miranda. **Projeto estrutural por bielas e tirantes**. Oficina de Textos, 2021, 1º.

SATO, H. T. **Dimensionamento de Regiões D Através do Método dos Elementos Finitos e do Método de Bielas e Tirantes Aliado à Otimização Topológica**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2015. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-16112015-115450/publico/Dissertacao_Henrique.pdf . Acesso em: 26 dez. 2024.

SILVA, A. A. S. **Análise Experimental e Numérica Sobre a Influência de Chapas de Ligação Bloco-Estaca no Comportamento Mecânico de Blocos Sobre Duas Estacas Metálicas**. 2024 Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/43368> Acesso em: 28 dez. 2024.

SILVA, R. C. S. **Análise tridimensional multifísica da difusão de cloretos em estruturas de concreto armado: uma abordagem pelo método dos elementos finitos**. 2023. Dissertação, (Doutorado em Estruturas). Universidade de São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-17042023-144043/pt-br.php> . Acesso em: 20 nov. 2024.

SORIANO, H. L. **Elementos Finitos: Formulação e Aplicação na Estática e Dinâmica das Estruturas**. São Paulo: editora Ciência Moderna, 2003.

SORIANO, H. L. **Métodos dos Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. São Paulo: editora da Universidade de São Paulo, 2020, 1º.

SOUZA, E. **Geologia e Engenharia Geotécnica**. Editora Engenho, 2019.

SOUZA, D. B.; DELALIBERA, R. G. Análise numérica de blocos sobre doze estacas: estudo de caso. *Revista Principia, João Pessoa*, v. 61, n. 4, p. 890–914, out. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2022id7248>. Acesso em: 10 dez. 2024.

SOUZA, R. A.; BAVARESCO, D.; TRAUTWEIN, L. M.; JUNIOR, D. P. Análise de blocos de fundação destinados ao apoio de pilares de geometria complexa. *Paranoá*, n. 26, p. 48-66, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n26.2020.04>. Disponível em: <https://www.periodicos.unb.br/index.php/paranoa/article/view/30429> . Acesso em: 8 nov. 2024.

SUPORE ALTOQI. Como inserir ou remover a barra de ferramentas no AltoQi Builder?. Disponível em: <https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/115004184613>. Acesso em: 20 jan. 2025.

TOMAZ, M. A.; DELALIBERA, R. G.; GIONGO, J. A.; GONÇALVES, V. F. Análise das tensões nodais em blocos sobre estacas. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 11, p. 1208-1257, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952018000600005> . Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/BScr7msmhzf4VNxZKs7Rmvq/?lang=pt#> Acesso em: 25 nov. 2024.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações, critérios de projeto–investigação do subsolo**. São Paulo: Oficina dos Textos, 2010.

VENTURA JUNIOR, E. F.; PIRES, R. C. S.; BISPO, E. R.; GONÇALVES, J. R. M. R.; MARTINS, F. B. S.; ARAUJO, G. J. B. Solos moles: os desafios na construção civil / Soft soils: the challenges in civil construction. *Brazilian Journal of Development, [S. l.]*, v. 7, n. 5, p. 51803–51824, 2021. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv.v7i5.30290>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/30290> . Acesso em: 12 nov. 2024.