

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GEANDRA SALBEGO BITENCOURT

**BLOCOS SOBRE ESTACAS: UMA ANÁLISE DOS MÉTODOS DE CÁLCULO POR
BIELAS E TIRANTES NO CONTEXTO BRASILEIRO**

**Alegrete
2024**

GEANDRA SALBEGO BITENCOURT

**BLOCOS SOBRE ESTACAS: UMA ANÁLISE DOS MÉTODOS DE CÁLCULO POR
BIELAS E TIRANTES NO CONTEXTO BRASILEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alisson Simonetti
Milani

**Alegrete
2024**

GEANDRA SALBEGO BITENCOURT

BLOCOS SOBRE ESTACAS: UMA ANÁLISE DOS MÉTODOS DE CÁLCULO POR BIELAS E TIRANTES NO CONTEXTO BRASILEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 04 de dezembro de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. ALISSON SIMONETTI MILANI - UNIPAMPA - Orientador
Profª. Dra. RAQUEL MARIANO LINHARES - UNIPAMPA
Ma. RAQUEL CAROLINE ZYDECK - Avaliador Externo



Assinado eletronicamente por **ALISSON SIMONETTI MILANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/12/2024, às 13:28, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Raquel Caroline Zydeck, Usuário Externo**, em 12/12/2024, às 13:58, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **RAQUEL MARIANO LINHARES, Coordenador(a) Acadêmico(a)**, em 12/12/2024, às 14:57, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1620471** e o código CRC **ACF49234**.

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço aos meus pais Leandro e Geisel e minha irmã Júlia que me incentivaram nesta trajetória ao longo destes anos me dando todo suporte necessário. Vocês foram fundamentais em todos os momentos.

Ao meu companheiro Adryel, pelo amor, compreensão e apoio. Você é o meu refúgio, onde encontro paz e tranquilidade.

Ao meu orientador Prof. Dr. Alisson Simonetti Milani pela amizade, dedicação e orientação fornecida durante a elaboração deste trabalho e demais projetos realizados. Seus conhecimentos foram essenciais para o meu desenvolvimento como futura engenheira.

Ao Prof. Dr. Jaelson Budny, pela amizade, ensinamentos e contribuições em diversos momentos.

Ao meu amigo e colega Ronald Willian Assunção da Silva, pela inspiração no início da graduação e amizade sincera.

Às minhas amigas Amanda, Lívia e Stefani, que sempre vibraram pelas minhas conquistas e apoiaram em momentos difíceis.

Aos meus colegas de projeto EMEC no qual tive bons momentos.

Aos meus animais de estimação, pois a presença constante ao meu lado, mesmo sem dizer uma palavra, foi um apoio inestimável durante essa jornada.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”

Isaac Newton

RESUMO

Os blocos de fundação são elementos essenciais para a estabilidade de estruturas com fundações profundas, transmitindo as cargas das superestruturas para as estacas. Apesar de sua importância, o dimensionamento desses blocos no Brasil apresenta desafios, devido à complexidade dos métodos disponíveis e à falta de uniformidade em critérios normativos. Neste trabalho, foi realizada uma análise comparativa de diferentes métodos de cálculo pelo modelo de bielas e tirantes, que se destaca por representar de maneira realista a transferência de tensões em regiões descontínuas, conforme recomendado pela NBR 6118. Métodos clássicos e modernos, como os de Blévyot e Frémy (1967), Oliveira (2009), Santos (2013 e 2023) e Fusco (1994), foram revisados e comparados utilizando o software CalcBlocos, uma ferramenta desenvolvida para analisar e dimensionar blocos sobre estacas. A pesquisa incluiu a validação do software com exemplos retirados da literatura e a análise gráfica e tridimensional das tensões e armaduras necessárias. Os resultados mostraram diferenças significativas entre os métodos, destacando as limitações dos métodos tradicionais em atender às exigências normativas atuais e evidenciando os avanços das abordagens mais recentes. Além disso, a utilização do CalcBlocos revelou-se essencial para superar as limitações dos cálculos manuais, fornecendo mais possibilidades de análise e clareza no entendimento ao dimensionar blocos de fundação, fornecendo uma base para a escolha do método mais adequado em projetos de engenharia.

Palavras-Chave: Blocos de fundação; Blocos sobre estacas; Bielas e Tirantes; CalcBlocos.

ABSTRACT

Foundation blocks are essential elements for the stability of structures with deep foundations, transmitting the loads from the superstructures to the piles. Despite their importance, the design of these blocks in Brazil presents challenges due to the complexity of the methods available and the lack of uniformity in normative criteria. In this work, a comparative analysis of different calculation methods was carried out using the tie-rod model, which stands out for realistically representing the transfer of stresses in discontinuous regions, as recommended by NBR 6118. Classic and modern methods, such as those of Blévoit and Frémy (1967), Oliveira (2009), Santos (2013 and 2023) and Fusco (1994), were reviewed and compared using the CalcBlocos software, a tool developed to analyze and design pile caps. The research included validation of the software with examples taken from the literature and graphical and three-dimensional analysis of the necessary stresses and reinforcements. The results showed significant differences between the methods, highlighting the limitations of traditional methods in meeting current regulatory requirements and highlighting the advances of more recent approaches. In addition, the use of CalcBlocos proved to be essential in overcoming the limitations of manual calculations, providing more possibilities for analysis and clarity of understanding when designing foundation blocks, providing a basis for choosing the most appropriate method in engineering projects.

Keywords: Foundation blocks; Pile blocks; Struts and Ties; CalcBlocos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Campo de tensões de compressão e tração para viga bi-apoiada.	9
Figura 2 – a) Caminho de tensões de compressão; b) Modelo aprimorado de bielas e tirantes.	13
Figura 3 - a) Tensões na biela tipo prismática; b) Tensões na biela tipo leque; c) Tensões na biela tipo garrafa	13
Figura 4 - Configuração de Nós CCC, CTT e CCT.	14
Figura 5 - Dimensões do bloco em planta baixa.	15
Figura 6 - Altura do bloco de coroamento.	16
Figura 7 - Reações nas estacas.....	17
Figura 8 - Seções críticas da biela	20
Figura 9 - Equilíbrio de forças.	22
Figura 10 - Projeção da área expandida.	24
Figura 11 - Tensões nos planos horizontais no bloco.	27
Figura 12- Tipos de blocos disponíveis no programa.....	30
Figura 13- Interface do software.....	31
Figura 14 - Configuração de Critérios	32
Figura 15 - Exibição de tensões e tirantes	33
Figura 16 - Gráfico de resultados exemplo I.	37
Figura 17- a) Quadrículas Bloco I; b) Bloco I tridimensional	38
Figura 18 - Gráfico de resultados exemplo II.....	39
Figura 19 - a) Quadrículas Bloco II; b) Bloco II tridimensional	40
Figura 20 - a) Quadrículas Bloco III; b) Bloco III tridimensional.....	41
Figura 21 - Gráfico de resultados exemplo III.....	42
Figura 22 - Gráfico de resultados exemplo IV.	44
Figura 23 - a) Quadrículas Bloco IV; b) Bloco IV tridimensional.....	45
Figura 24 - Gráfico de resultados exemplo V.	46
Figura 25 - a) Quadrículas Bloco V; b) Bloco V tridimensional.....	47

SUMÁRIO

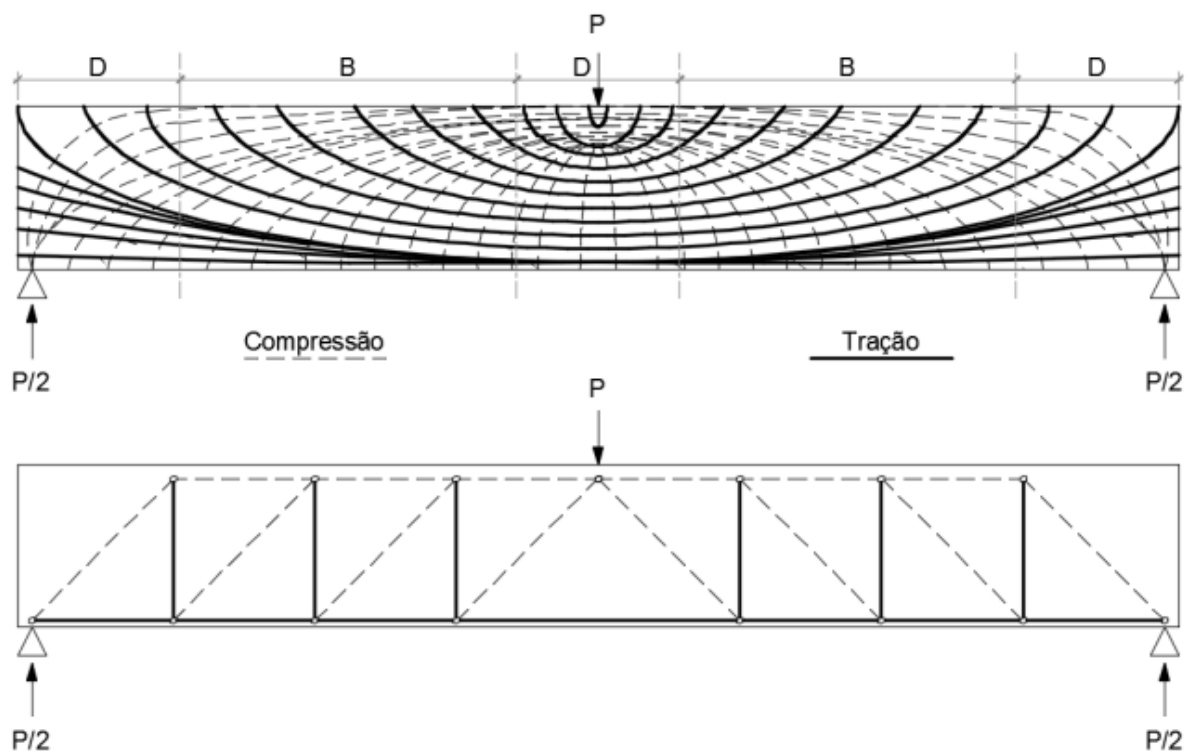
1 INTRODUÇÃO	9
2. JUSTIFICATIVA.....	11
3. OBJETIVOS.....	11
3.1. Objetivo geral	11
3.2. Objetivos específicos.....	11
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
4.1 Bielas e tirantes.....	12
4.2 Parâmetros geométricos e de cálculo.....	14
4.2.1 Estacas e embutimento no bloco.....	14
4.2.2 Dimensões e ancoragem.....	15
4.2.3 Reações nas estacas.....	17
4.2.4 Critérios normativos.....	18
4.3 Metodologias de cálculo aplicadas no Brasil	19
4.3.1 Método de Blévyot e Frémy (1967).....	19
4.3.2 Método Oliveira (2009).....	22
4.3.3 Método de Santos (2013-2023)	23
4.3.4 Método de Fusco (1994).....	26
5. METODOLOGIA	29
5.1 Software CalcBlocos.....	29
5.2 Interface CalcBlocos.....	30
5.3 Exemplos de Blocos	34
6. RESULTADOS.....	36
6.1 Exemplo I	36
6.2 Exemplo II	38
6.3 Exemplo III	40
6.4 Exemplo IV.....	43
6.5 Exemplo V.....	45
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	48

1 INTRODUÇÃO

Os blocos de fundação desempenham um papel essencial na transferência das cargas das superestruturas para as estacas ou tubulões, sendo responsáveis por garantir a estabilidade e segurança das edificações com fundações profundas. Esses elementos estruturais têm seu comportamento complexo pois são altamente dependentes do efeito de confinamento gerado pelo grande volume de concreto no seu interior, já que possuem baixa taxa de armadura (SANTOS, 2023).

Para dimensionar adequadamente os blocos de coroamento sobre estacas, diversos métodos de cálculo são empregados, como Método dos Elementos Finitos (MEF) e o modelo de bielas e tirantes (LADEIRA, 2019), sendo o último um dos mais eficazes para representar a distribuição de tensões nesses elementos. Este modelo de bielas e tirantes é fundamentado na analogia da treliça, uma idealização proposta inicialmente por Ritter (1899) e Mörsch (1909) indicada na Figura 1, que descreve o caminho das forças de compressão e tração dentro das estruturas (SCHLAICH *et al.*, 1987).

Figura 1- Campo de tensões de compressão e tração para viga bi-apoiada.



Fonte: Aguiar (2018)

O modelo de bielas e tirantes vem ganhando destaque na engenharia estrutural devido à sua capacidade de representar de maneira mais realista a transferência de cargas em regiões descontínuas, como aquelas presentes em blocos de fundação. Nesse modelo, as bielas representam as tensões de compressão, enquanto os tirantes simbolizam as tensões de tração, proporcionando uma visão clara do comportamento estrutural. Estudos como os de Adebbar *et al.* (1990) e Oliveira (2009) aprofundam essa metodologia, destacando sua eficiência na análise de blocos submetidos a cargas elevadas e em regiões com variações geométricas significativas.

No contexto brasileiro, a NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto (2023) regulamenta o uso do modelo de bielas e tirantes para o dimensionamento de blocos de fundação, recomendando a análise de regiões de descontinuidade, ou "regiões D". Essas regiões são críticas, pois nelas as distribuições de tensão não são lineares, o que exige uma atenção especial no cálculo das bielas e na resistência das áreas nodais (AGUIAR, SANTOS, 2018).

Assim, a aplicação prática do modelo de bielas e tirantes enfrenta desafios, especialmente pela escassez de bibliografia específica e por ser um tema pouco abordado nos cursos de graduação em engenharia civil no Brasil. A falta de consenso sobre os critérios de dimensionamento e a coexistência de diferentes métodos de cálculo reforçam a necessidade de estudos aprofundados e de maior difusão do conhecimento técnico nessa área.

2. JUSTIFICATIVA

Este trabalho justifica-se pela notoriedade que o elemento estrutural bloco de coroamento desempenha em estruturas com fundação profunda. Apesar de existirem diversas metodologias para obtenção de esforços e dimensionamento de blocos de coroamento, há certa dificuldade de interpretação destes métodos. A própria norma brasileira sugere que sejam dimensionados pelo modelo de bielas e tirantes, propondo inclusive limitações de tensões nas regiões nodais no interior do bloco, mas não possui maiores especificações nos parâmetros que devem ser considerados para o modelo de cálculo.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

Analisar os métodos de cálculo de blocos de coroamento pelo modelo de bielas e tirantes para análise de tensões e determinação das armaduras.

3.2. Objetivos específicos

- Apresentar uma revisão bibliográfica sobre as metodologias de cálculo de blocos sobre estacas mais utilizadas no Brasil;
- Demonstrar a utilização do software “CalcBlocos”, de análise e dimensionamento de blocos de fundações, desenvolvido por Silva (2024);
- Verificar exemplos de blocos disponíveis na literatura comparando os resultados obtidos no software “CalcBlocos”;
- Comparar os resultados obtidos por diferentes modelos de cálculos comumente utilizados no Brasil.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O estado da arte a respeito de blocos de coroamento e seus métodos de dimensionamento são apresentados em três partes: a primeira contextualiza o modelo de bielas e tirantes em blocos sobre estacas; a segunda parte expõe parâmetros geométricos e de cálculo; a terceira e última parte aborda os métodos de cálculo comumente utilizados no Brasil.

4.1 Bielas e tirantes

Compreende-se como modelo de bielas e tirantes uma idealização do caminho das cargas em uma estrutura, simulando uma treliça hipotética (SANTOS, 2023) na qual é composta por bielas, que representam as tensões de compressão, e tirantes representando as tensões de tração nas armaduras (AGUIAR, SANTOS, 2018).

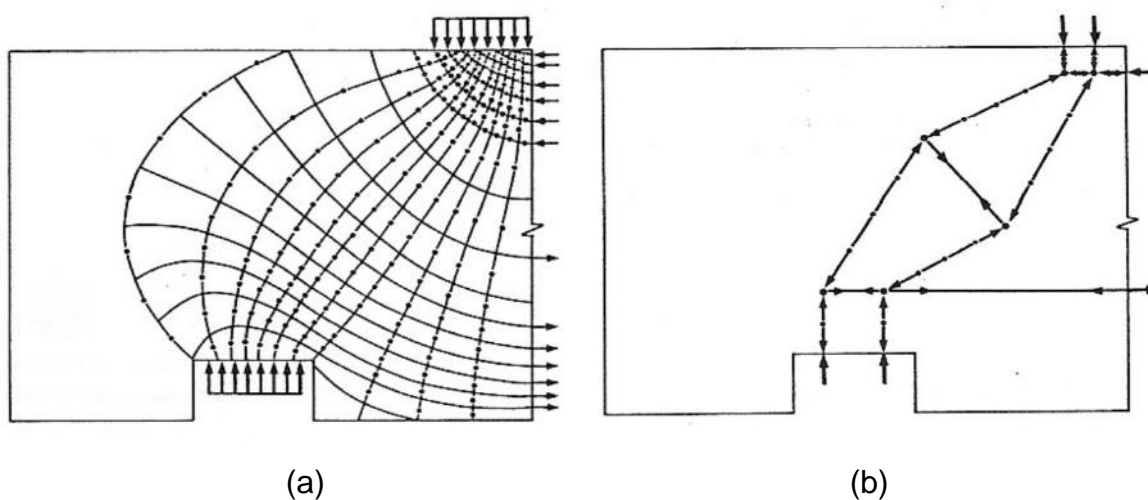
O modelo de treliça proposto por Ritter (1899) e Mörsch (1909) desencadeou diversos estudos a respeito do comportamento dos esforços axiais e serviu como referência para Schläich *et al.* (1987) classificar os blocos de coroamento como elementos que possuem regiões de distribuição de deformações não-lineares, ou seja, regiões descontínuas.

A NBR 6118 (2023) denomina estas regiões de descontinuidade como “região D” onde o comprimento destas é aproximado pelo princípio de Saint Venant. Como outros elementos estruturais que também são pertencentes a “região D”, podemos citar os dentes gerber, consolos, vigas-parede, furos em vigas e sapatas.

Nos blocos de coroamento em que a distância entre estacas é pequena, assume-se que a carga do pilar é transferida diretamente às estacas através de um campo de tensões de compressão (Figura 2a). A partir dos padrões de fissuração em ensaios práticos realizados por Schläich *et al.* (1987), foi definido um modelo refinado de bielas e tirantes (Figura 2b).

O trajeto de tensões de compressão que se formam da base do pilar ao topo das estacas se expandem devido ao confinamento do concreto (OLIVEIRA, 2009), resultando em um acréscimo de resistência à compressão pelo concreto e aparecimento de componentes de tração perpendiculares às bielas, evidenciando a necessidade de armaduras para conter o cisalhamento e fendilhamento.

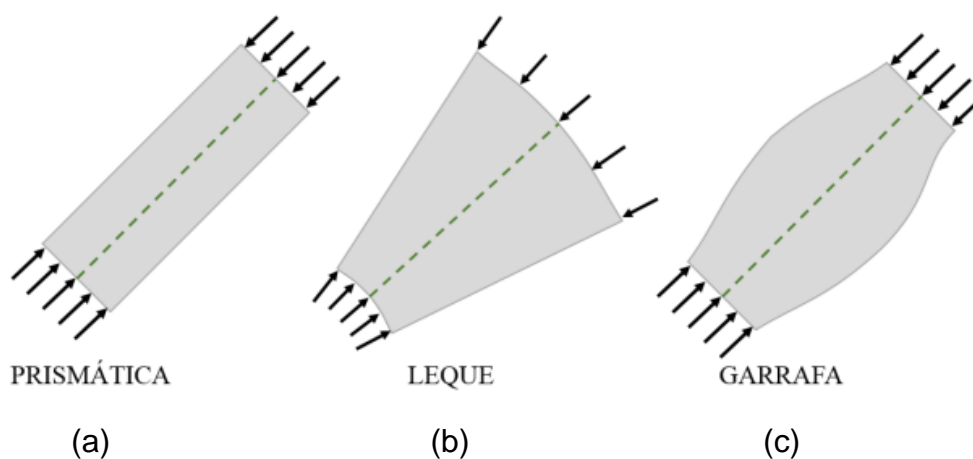
Figura 2 – a) Caminho de tensões de compressão; b) Modelo aprimorado de bielas e tirantes.



Fonte: Adebar *et al.* (1990)

O campo de tensões das bielas pode ser definido em três configurações, sendo estas: prismática, leque e garrafa (Figuras 3a, 3b e 3c, respectivamente). O comportamento das bielas prismáticas e leque não gera tensões de tração, diferentemente do tipo garrafa.

Figura 3 - a) Tensões na biela tipo prismática; b) Tensões na biela tipo leque; c) Tensões na biela tipo garrafa

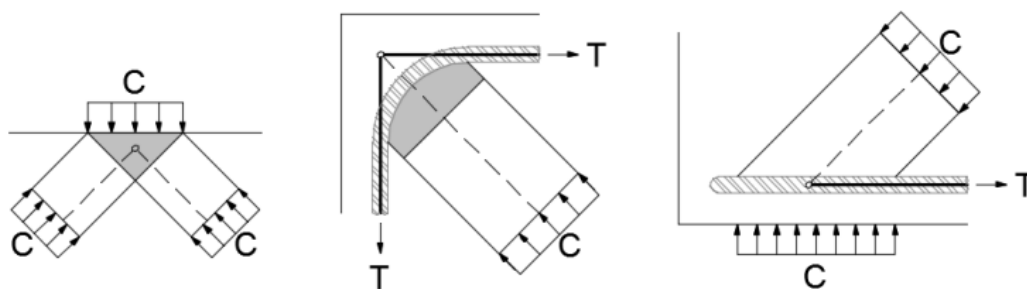


Fonte: Bavaresco (2016)

A região nodal que conecta bielas e tirantes no interior dos blocos sobre estacas é envolta de concreto e tem a finalidade de absorver as forças concentradas. Estas regiões são mais críticas no dimensionamento dos blocos e deve ser verificada sua

resistência à compressão. As tensões resistentes de compressão no estado plano são reduzidas de acordo com o tipo de nó e bielas prescrito conforme a NBR 6118 (2023). Os esforços de tração (T) e compressão (C) podem ser associados nas regiões nodais nas formas, CCC, CCT, CTT ou TTT (Figura 4).

Figura 4 - Configuração de Nós CCC, CTT e CCT.



Fonte: Aguiar (2018)

4.2 Parâmetros geométricos e de cálculo

4.2.1 Estacas e embutimento no bloco

Para dimensionamento do bloco de coroamento, é importante saber o estaqueamento previsto no projeto de fundações profundas, pois para a análise e dimensionamento do bloco é preciso conhecer as distâncias entre os eixos das estacas bem como a quantidade destas, pois o caminho das cargas varia de acordo com a geometria (ALONSO, 2019).

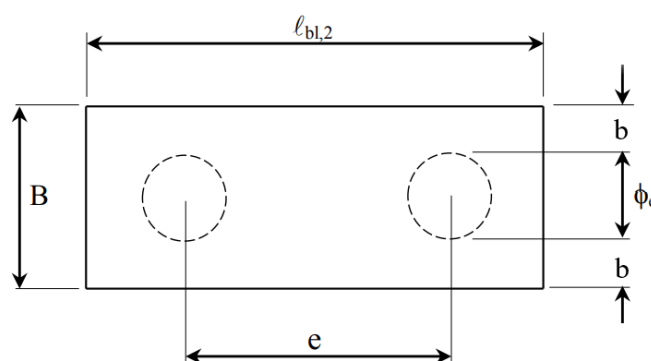
Para redução dos efeitos de grupo das estacas, prevê-se uma distância mínima entre elas. Calavera (1991) preconiza uma distância entre eixos de $2\phi_e$ e $3\phi_e$. Para Montoya *et al.* (2000) o critério deve ser o menor valor entre $2\phi_e$, 75cm e $1,75 \times$ diagonal. Campos (2022) sugere valores provenientes do tipo de solo e de processo executivo da estaca.

O embutimento consiste na parcela do topo da estaca acima do nível do terreno que posteriormente será concretada juntamente com o bloco de coroamento. Fusco (1994) indica o maior valor entre $0,2\phi_e$ ou $0,005h_{\text{bloco}}$. As recomendações segundo Calavera (1991) e Montoya *et al.* (2000) são de 10cm a 15cm. Já Santos (2023) indica um embutimento de apenas 5cm.

4.2.2 Dimensões e ancoragem

Em relação às dimensões de largura (B) e comprimento do bloco ($\ell_{bl,2}$) (Figura 5), não há considerações em relação ao cobrimento das estacas no bloco (b) na NBR 6118 (2023), mas autores como Calavera (1991) e Montoya *et al.* (2000) indicam no mínimo 25cm e Fusco (1994) recomenda que para garantir as dobras das armaduras seja uma distância mínima de 15cm. A NBR 6122 - Projeto e execução de fundações, (2022) que trata de projetos e execução de fundações, também não fornece esses parâmetros geométricos, apenas indica a restrição do comprimento do bloco ($\ell_{bl,2}$) possuir no mínimo 60cm.

Figura 5 - Dimensões do bloco em planta baixa.



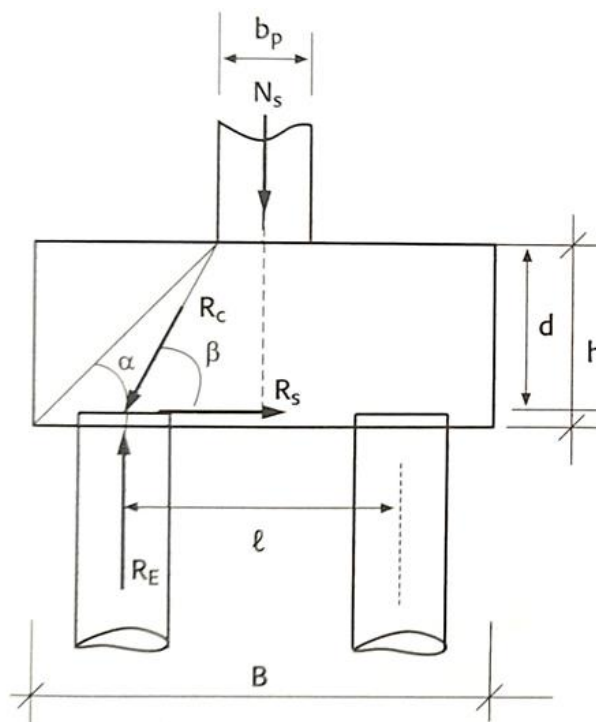
Fonte: Adaptado de Bastos (2023)

Outro fator geométrico importante no bloco de coroamento é em relação a sua altura, pois quanto mais alto o bloco, maior o ângulo de espraiamento de tensões das bielas. Segundo a NBR 6118, (2023) os blocos podem ser considerados rígidos ou flexíveis, esta definição é relacionando a altura do bloco, comprimento e dimensões do pilar na direção considerada. O bloco é classificado como rígido quando atende a Equação (1) cujas variáveis são exibidas na Figura 6.

$$H \geq \frac{B_b - b_p}{3} \quad (1)$$

Nos modelos de biela e tirante adota-se como região do nó da ligação o plano das armaduras sobre a estaca. Esta consideração é impactada para diferentes valores de embutimentos pois altera o ângulo β descrito na Figura 6. O IBRACON (2015) sugere que, para que um bloco seja considerado rígido este ângulo deve ser no mínimo 45°.

Figura 6 - Altura do bloco de coroamento.



Fonte: Campos (2022)

Ainda no que se refere às dimensões do bloco, um fator limitante e decisivo é na ancoragem das armaduras, pois este comprimento de ancoragem final precisa ser atendido. Para conferir uma boa aderência ao concreto, as barras de aço CA-50, frequentemente empregadas na construção civil, possuem nervuras que conferem atrito entre o aço e o concreto. O comprimento de ancoragem necessário é calculado de acordo com a Equação (2).

$$l_{b,nec} = \frac{\alpha l_b A_{s,c}}{A_{s,ef}} \geq l_{b,min} \quad (2)$$

Sendo:

$l_{b,nec}$: Comprimento de ancoragem necessário;

α : Parâmetro relacionado às dobras (1 para barra reta; 0,7 para barras com gancho);

$A_{s,c}$: Área de aço calculada;

$A_{s,ef}$: Área de aço efetiva;

O comprimento mínimo de ancoragem é o maior valor entre os encontrados a partir da Equação (3).

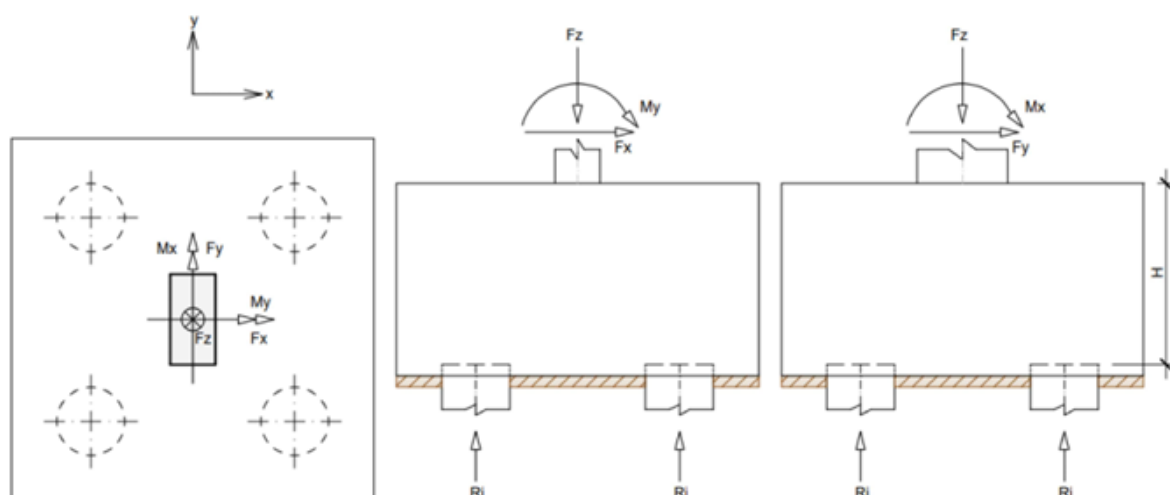
$$l_{b,min} \geq \begin{cases} 0,3l_b \\ 10\phi \\ 10cm \end{cases} \quad (3)$$

Delalibera (2006) analisou experimentalmente a posição onde deve ser considerado o início da ancoragem. A Hipótese I indica uma ancoragem com barra retilínea partindo da face interna da estaca, já a Hipótese II parte do eixo da estaca e pode ser adotada se prever a utilização de ganchos. Em contraponto Santos (2023) sugere que o início da ancoragem deve ser feito em região fora da estaca.

4.2.3 Reações nas estacas

Os esforços advindos do pilar, sejam eles esforços axiais ou momento fletores, são transferidos às estacas. A parcela desses esforços que são absorvidos pelas estacas, ou seja, as reações nas estacas podem ser determinadas pelo método da superposição dos efeitos (ALONSO, 2019). A Figura 7 indica um modelo de bloco referência para compreensão da Equação (4).

Figura 7 - Reações nas estacas.



Fonte: Silva (2024)

Segundo o método da superposição dos efeitos de carga normal e momentos fletores atuantes no bloco, obtém-se a reação individual de cada estaca por meio da

Equação (4), sendo válido este método quando os eixos x e y são os principais de inércia e as estacas contidas no bloco são iguais.

$$R_i = \frac{F_z}{n_{est}} \pm \frac{M_y x_i}{\Sigma(x_i)^2} \pm \frac{M_x y_i}{\Sigma(y_i)^2} \quad (4)$$

Onde:

F_z : Esforço normal característico;

n_{est} : Número de estacas;

M_y : Momento em torno do eixo y característico;

M_x : Momento em torno do eixo x característico;

y_i : Coordenada da estaca i em relação a centro de gravidade do bloco na direção Y;

x_i : Coordenada da estaca i em relação a centro de gravidade do bloco na direção X;

4.2.4 Critérios normativos

As tensões resistentes de compressão no estado plano são reduzidas de acordo com o tipo de nó e tipo de bielas prescrito conforme a NBR 6118 (2023) onde para nós totalmente comprimidos e bielas tipo prismática temos uma tensão limite dada pela Equação (5).

$$f_{cd1} = 0,85\alpha_{v2}f_{cd} \quad (5)$$

Os nós do tipo CTT, TTT ou com bielas atravessadas por mais de um tirante, tem sua tensão limite de compressão do concreto descritas pela Equação (6).

$$f_{cd2} = 0,60\alpha_{v2}f_{cd} \quad (6)$$

Por fim, onde há uma biela atravessada por tirante único ou nó do tipo CCT, o limite é estabelecido pela Equação (7).

$$f_{cd3} = 0,72\alpha_{v2}f_{cd} \quad (7)$$

O fator de efetividade do concreto é definido pela Equação (8), este fator considera a fragilidade do concreto, danos provocados por cargas elevadas, efeitos como temperatura e fadiga.

$$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \quad (8)$$

Outro parâmetro definido pela NBR 6118 (2023) é o coeficiente majorador adicional (γ_n) com valor mínimo de 1,2 para os elementos que se encontram na categoria da “região D”.

Em relação às armaduras, a prescrição normativa é de que 85% das armaduras dos tirantes estejam nas faixas definidas pelas estacas e que possuam ganchos em suas extremidades; que seja prevista uma armadura em malha que atenda 20% da área de aço tracionada calculada para o bloco. Ainda, prevê-se armaduras laterais e na parte superior do bloco para conter os esforços de cisalhamento e fendilhamento.

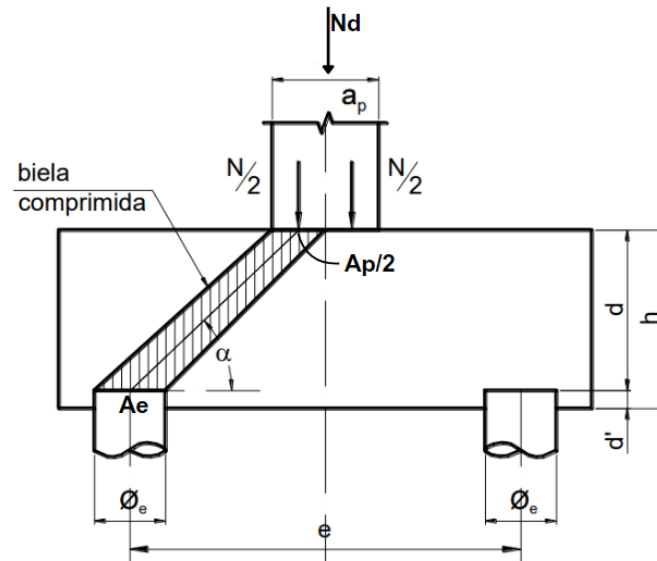
4.3 Metodologias de cálculo aplicadas no Brasil

4.3.1 Método de Blévet e Frémy (1967)

Os pioneiros do modelo de biela e tirante aplicados ao dimensionamento de blocos de coroamento foram Blévet e Frémy (1967), que a partir de estudos experimentais definiram critérios como o espraiamento das tensões partindo de nós no topo do bloco sobre estacas.

A Figura 8 indica a parcela da biela e nomenclatura dos elementos a serem consideradas no cálculo das tensões nas ligações biela-pilar e biela-estaca, bem como onde inicia o espraiamento das tensões.

Figura 8 - Seções críticas da biela



Fonte: Adaptado de Bastos (2023)

Seguindo a metodologia puramente estabelecida por Blévoit e Frémy (1967) onde indica que a tensão na ligação biela-pilar deve ser menor ou igual a tensão resistente ao esmagamento das bielas, temos a Equação (9).

$$\sigma_{pil} = \frac{N_d}{A_p \text{sen}^2 \alpha} \leq \sigma_{lim,pil} = k_R K f_{cd} \quad (9)$$

Sendo:

σ_{pil} : Parcela da tensão na ligação biela-pilar;

N_d : Força de compressão do pilar de projeto;

A_p : Área do pilar;

α : Inclinação da biela;

$\sigma_{lim,pil}$: Tensão limite na ligação biela-pilar;

k_R : Coeficiente de redução efeito Rüsck;

K : Coeficiente geométrico pela quantidade de estacas;

f_{cd} : Resistência de cálculo do concreto.

Para verificação da tensão na ligação biela-estaca, Blévet e Frémy (1967) propõe a Equação (10):

$$\sigma_{est} = \frac{N_d}{2A_e \sin^2 \alpha} \leq \sigma_{lim,est} = k_R f_{cd} \quad (10)$$

σ_{est} : Parcela da tensão na ligação biela-estaca;

A_e : Área da estaca;

$\sigma_{lim,est}$: Tensão limite na ligação biela-estaca.

Blévet e Frémy (1967) indicam o uso de um coeficiente geométrico baseado na quantidade de estacas presentes no bloco, sendo 1,4 para duas estacas, 1,75 para três estacas e 2,1 para quatro estacas. Estes coeficientes foram determinados a partir de resultados experimentais executados pelos autores.

A partir dos resultados experimentais também foi observado um acréscimo de 15% na tensão medida nos tirantes em relação à obtida pelos cálculos, assim os tirantes são calculados com um coeficiente majorador. Delalibera e Giongo (2008) em seus trabalhos experimentais também constataram a necessidade desse coeficiente. A área de aço necessária para armar o bloco de coroamento é descrita na Equação (11).

$$A_s = \frac{1,15N_d}{8df_{yd}} (2e - A_p) \quad (11)$$

Sendo:

A_s : Área de aço;

e : Distância entre eixo das estacas;

f_{yd} : Tensão de cálculo do escoamento do aço.

A tensão admissível proposta pela NBR 6118 (2023) no modelo de bielas e tirantes, que trata da redução de acordo com o tipo de nó implica dificuldades da aplicação do método de Blévet e Frémy (1967), pois limita demasiadamente a tensão e os valores calculados acabam sendo maiores que os admissíveis.

Novos métodos surgiram a partir do modelo de Blévet e Frémy (1967) e os principais conceitos novos são em relação ao espraiamento de tensões e à profundidade em que se posiciona o nó biela-pilar, alterando assim o ângulo de inclinação das bielas.

4.3.2 Método Oliveira (2009)

Oliveira (2009) sugere que para determinar do ângulo da biela comprimida do bloco de coroamento, deve ser considerada uma profundidade “X” com a área ampliada do pilar, que determina a altura da região nodal superior do bloco. Pode-se encontrar este valor a partir do somatório de momentos no ponto A (Equação 12). A Figura 9 indica a posição dos elementos considerados no cálculo.

$$X b_p \alpha_{v2} f_{cd} \left(d - \frac{X}{2} \right) = \frac{N_d}{2} \left(\frac{e}{2} - \frac{a_p}{4} \right) \quad (12)$$

Onde,

X : Profundidade da área ampliada;

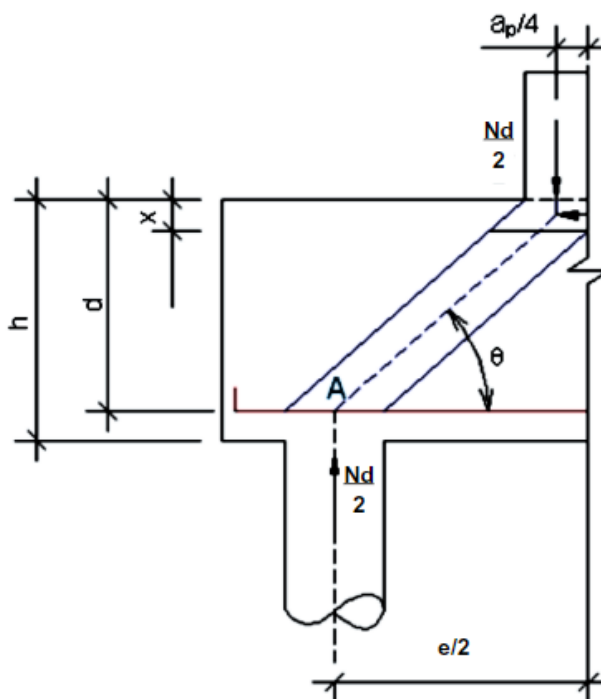
b_p : Dimensão do pilar;

α_{v2} : Fator de efetividade;

f_{cd} : Resistência de cálculo do concreto;

a_p : Dimensão do pilar;

Figura 9 - Equilíbrio de forças.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2009).

Com a profundidade definida pode-se calcular a projeção da área expandida do pilar (A_{exp}) (Equação 13), que leva em consideração na equação um fator multiplicador (fm) que correlaciona X/d com a quantidade de estacas que o bloco de fundação abrange. Os valores do fator multiplicador (fm) são apresentados em tabelas no trabalho de Oliveira (2009) e possuem embasamento prático a partir de resultados experimentais realizados pela autora.

$$A_{exp} = fmA_p \quad (13)$$

A tensão na ligação biela-pilar é calculada por meio da Equação (14) e deve ser comparada à limitação de tensão para nós CCC (f_{cd1}) prevista pela NBR 6118 (2023).

$$\sigma_{pil} = \frac{N_d}{A_{exp} \text{sen}^2 \alpha} \leq \sigma_{lim,pil} = f_{cd1} \quad (14)$$

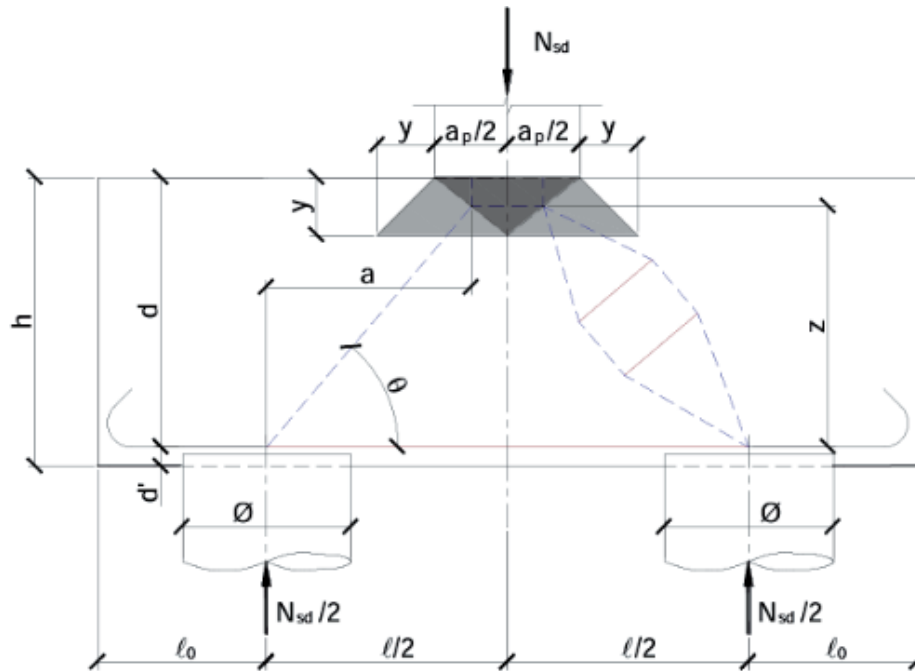
Para o cálculo da tensão na ligação biela-estaca, é proposta a Equação (15) que deve respeitar a tensão limite para nós CCT (f_{cd3}) prevista pela NBR 6118 (2023).

$$\sigma_{est} = \frac{N_d}{2A_e \text{sen}^2 \alpha} \leq \sigma_{lim,est} = f_{cd3} \quad (15)$$

4.3.3 Método de Santos (2013-2023)

O método proposto por Santos (2013) é denominado MBT (Método das Bielas e Tirantes) no qual prevê que o espraiamento das tensões para determinação da área expandida ocorre em 45° numa profundidade "y" (Figura 10). É prescrito que o processo para encontrar o valor de "y" seja iterativo, pois é necessário que se encontre uma tensão menor ou igual ao limite normativo para nó do tipo CCC (f_{cd1}). Neste modelo a biela é formada a partir do ponto médio da profundidade encontrada.

Figura 10 - Projeção da área expandida.



Fonte: Santos (2023).

A área expandida para este método é descrita na equação (16),

$$A_{exp} = A_p 2y \tan(45^\circ) \quad (16)$$

Segundo IBRACON (2015) é indicado que seja considerada uma força normal equivalente centrada (F_{eq}) no cálculo da tensão junto ao pilar, pois esta equivalência replica a reação de apoio sem momentos fletores. O cálculo da força equivalente é baseado na quantidade de estacas que o bloco de fundações descarrega (n_{est}) e na reação máxima da estaca mais solicitada ($R_{máx}$) (Equação 17).

$$F_{eq} = n_{est} R_{máx} \quad (17)$$

A tensão biela-pilar para o método de Santos (2013) é descrita na Equação (18).

$$\sigma_{pil} = \frac{\gamma_n \gamma_f (F_{eq} - PP)}{A_{exp} \sin^2 \theta} \quad (18)$$

Santos (2023) propôs adaptações no modelo de Santos (2013) que estabelecem parâmetros específicos para blocos sobre duas, três e quatro estacas. A Equação (19) é definida para obter o parâmetro "y" especificamente em blocos de duas estacas.

$$Y = d - \sqrt{d - \frac{N_d a}{b f_{cd1}}} \quad (19)$$

O autor prevê duas limitações de valores para y, sendo estas descritas na Equação (20), que está relacionada à capacidade de deformação plástica, e Equação (21), que trata de limitações geométricas.

$$y = 0,4d \quad (20)$$

$$y \leq \frac{L + A_e + A_p}{2} \quad (21)$$

A determinação das áreas de aço dos estribos verticais e horizontais é feita a partir da seção média das bielas (tipo garrafa) como descrito na Equação (22).

$$a_{bie} = 0,5 \left[(a_e + d' - l) \text{sen} \theta + \left(\frac{a_p}{2} \text{sen} \theta \right) + (y \text{cos} \theta) \right] \quad (22)$$

Para determinar a força de tração transversal na biela é seguida a Equação (23).

$$f_{twd} = 0,25 \frac{N_d}{2 \text{sen} \theta} \left(1 - 1,4 \frac{a_{bie}}{z} \text{sen} \theta \right) \quad (23)$$

O autor apresenta as Equações (24) e (25) para cálculo das armaduras verticais e horizontais, respectivamente.

$$A_{sv} = \frac{2F_{twd} \text{cos} \theta}{F_{yd}} \quad (24)$$

$$A_{sh} = \frac{2F_{twd} \text{sen} \theta}{F_{yd}} \quad (25)$$

As recomendações feitas por Santos (2023) para bloco sobre três estacas impõem que o modelo deve iniciar com uma profundidade y sendo 20% da altura útil (d). A área ampliada deve prever uma tensão biela-pilar que seja conforme a descrita na Equação (26).

$$\sigma_{pil} = 1,05f_{cd} \quad (26)$$

A área ampliada para uma estaca circular é definida pela Equação (27).

$$A_{e,amp} = \frac{\pi[a_e + (d' - l)]^2}{4} \quad (27)$$

Para blocos sobre quatro ou mais estacas, o modelo também deve iniciar com a profundidade, sendo no mínimo 20% da altura útil. A tensão limitante para este caso é descrita na Equação (28).

$$\sigma_{pil} = 1,27f_{cd} \quad (28)$$

A área ampliada para estaca circular é definida pela Equação (29).

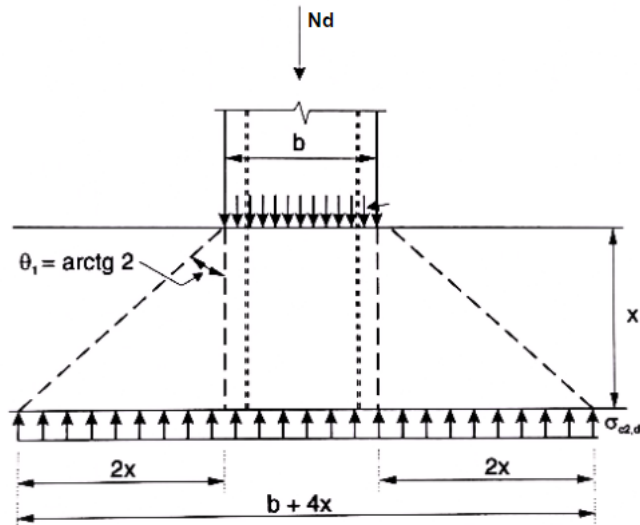
$$A_{e,amp} = \frac{\pi(a_e + 2d')^2}{4} \quad (29)$$

4.3.4 Método de Fusco (1994)

O modelo proposto por Fusco (1994) infere que as tensões advindas do pilar são espreiadas por meio das armaduras no interior do bloco de coroamento, onde a área ampliada pode chegar ao valor limite de 20% do f_{cd} para a tensão biela-pilar.

Em relação a tensão biela-estaca, é sugerido aumento de até 40% da área da estaca devido ao espreiamento em certa angulação. Entretanto a NBR 6119 (2023) limita esta ampliação da estaca em 20%. Para considerar um bloco rígido, os fatores envolvidos são em relação a geometria que afetam diretamente as restrições em relação ao ângulo da biela comprimida. Fusco (1994) recomenda valores de ângulo (θ) no mínimo $\arctan(2/3)$ e no máximo $\arctan(1)$, respectivamente $33,7^\circ$ e 45° . A Figura 11 mostra o espreiamento das tensões do pilar.

Figura 11 - Tensões nos planos horizontais no bloco.



Fonte: Adaptado de Fusco (1994).

O valor da profundidade "X" é obtida pela Equação (30), a projeção da área ampliada é indicada por Fusco (1994) que seja no ângulo de $\arctg(2)$, equivalente a $63,45^\circ$.

$$\frac{N_d}{(a + 4x)(b + 4x)} = 0,2f_{cd} \quad (30)$$

Uma equação direta para obtenção da profundidade do nó CCC "X" (Equação 31) foi proposta pela empresa TQS®, no manual TQS Fundações (TQS, 2023) este foi denominado "Fusco - Método A".

$$\frac{x}{b} = \frac{1 + \alpha}{4 \tan \phi_e} \left(-1 + \sqrt{1 - \frac{4\alpha \gamma_n \left(\frac{1}{\gamma_n} - \frac{\rho f_{yd}}{0,2f_{cd}} - \frac{0,85}{0,2} \right)}{(1 + \alpha)^2}} \right) \quad (31)$$

Onde:

α : Razão entre as dimensões do pilar (limitada a 10);

ϕ_e : Diâmetro da estaca;

ρ : Taxa de armadura do pilar;

Uma nova equação (Equação 32) denominada “Fusco - Método B” foi idealizada pela comunidade técnica, e considera no cálculo a geometria e carga característica. Diferentemente de “Fusco - Método A” não leva em consideração a taxa de armadura do pilar.

$$x = \frac{A_p + B_p}{4 \tan \phi_e} \left(-1 + \sqrt{1 - 4 \left(\frac{A_p B_p - \frac{5F_z \gamma_n \gamma_f}{f_{cd}}}{(A_p + B_p)^2} \right)} \right) \quad (32)$$

Os valores de tensão encontrados devem respeitar as limitações de tensão impostas pela NBR 6118 (2023) para os nós do tipo CCC e CCT.

5. METODOLOGIA

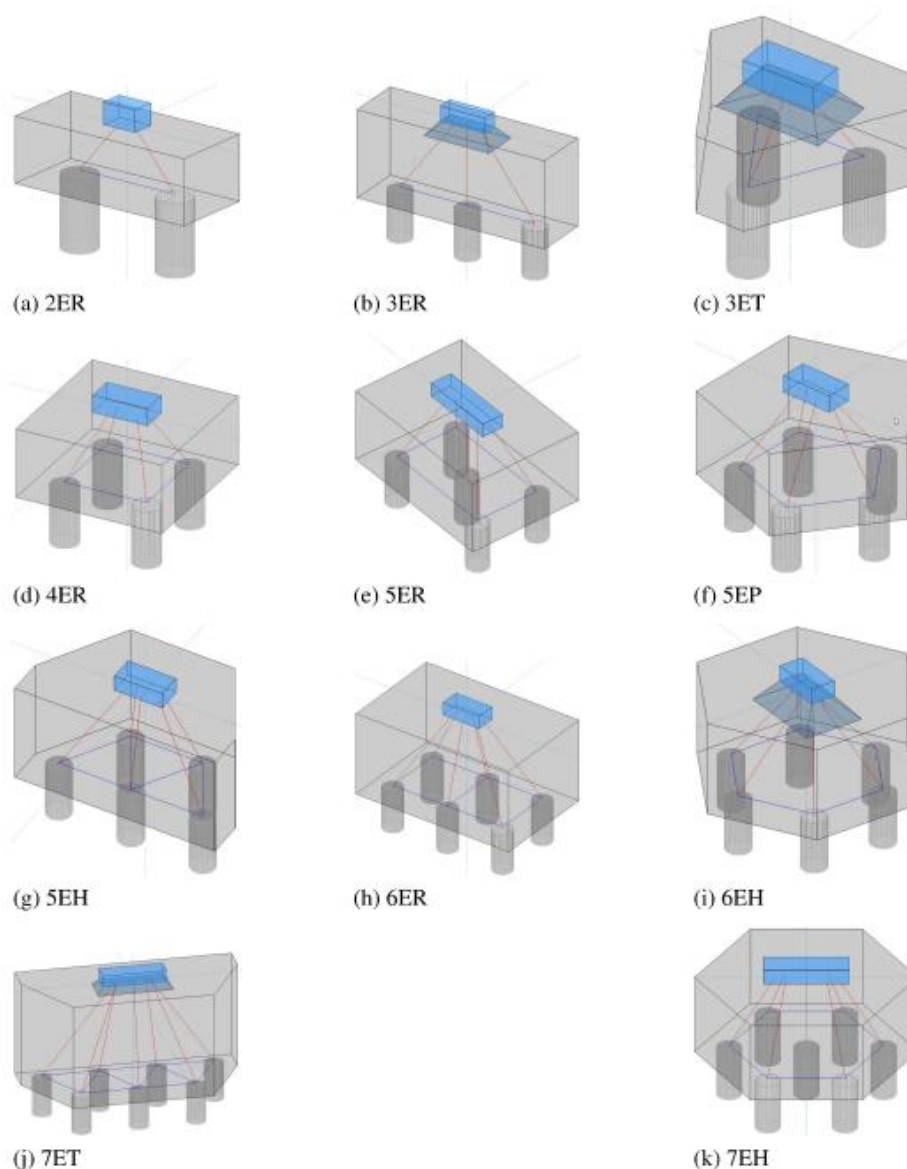
Neste capítulo, é apresentada uma breve contextualização do software “CalcBlocos”, utilizado para a verificação dos resultados pelos diferentes métodos de biela e tirantes mencionados anteriormente, e para validação dele, por meio de exemplos citados na literatura que serviram como embasamento teórico para este trabalho.

5.1 Software CalcBlocos

O software “CalcBlocos”, desenvolvido por Silva (2024), foi projetado para realizar a análise e dimensionamento de blocos sobre estacas pelo método de bielas e tirantes. Esta ferramenta permite a entrada de dados como ações atuantes no bloco, quantidade e distribuição de estacas, além do formato geométrico do bloco e oferece disponibilidade a seis métodos distintos de cálculo baseados no modelo de bielas e tirantes. Entre suas funcionalidades, destacam-se o dimensionamento das armaduras principais e secundárias, detalhamentos de ancoragem, e a visualização tridimensional do bloco, que inclui o posicionamento das bielas e tirantes, das áreas ampliadas e profundidades das bielas. Adicionalmente, o “CalcBlocos” possibilita a verificação das tensões nas ligações biela-pilar, bem como entre biela-estaca, adaptando-se a diferentes configurações de blocos (Figura 12).

Desenvolvido no âmbito de uma dissertação acadêmica por Silva (2024), o “CalcBlocos” ainda não está disponível comercialmente. Neste trabalho, sua aplicabilidade e confiabilidade são avaliadas como parte do estudo, com foco na análise comparativa entre os métodos de cálculo discutidos no estado da arte. Além disso, a ferramenta é empregada para verificar tensões e armaduras, possibilitando uma análise criteriosa das diferenças entre os métodos e suas implicações no dimensionamento de blocos de fundação.

Figura 12- Tipos de blocos disponíveis no programa

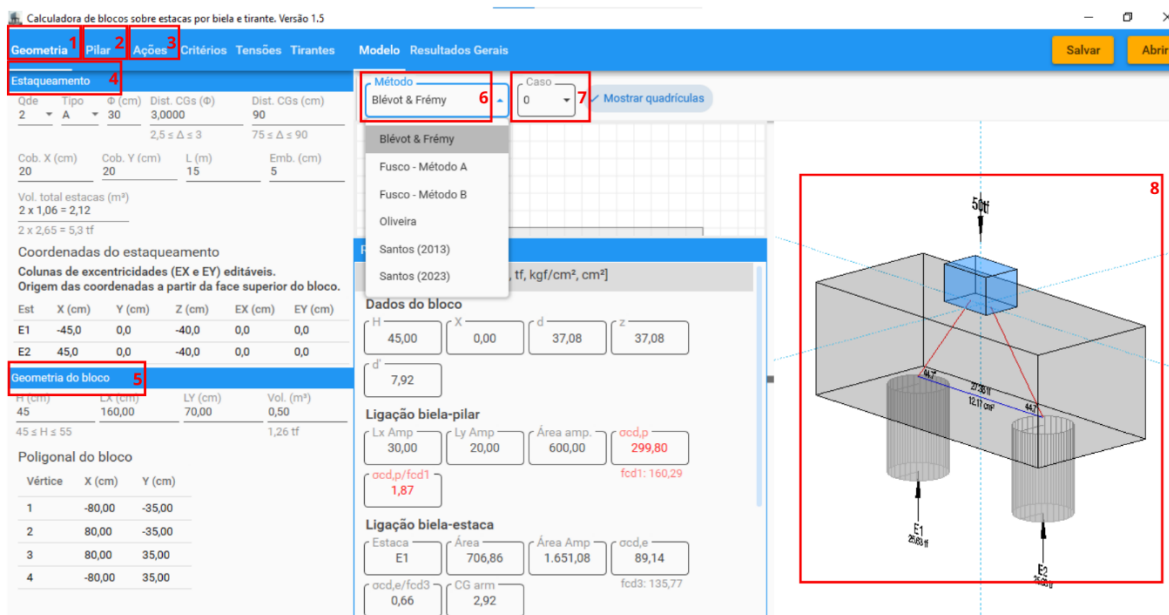


Fonte: Silva (2024).

5.2 Interface CalcBlocos

Ao iniciar o software, é apresentada uma interface (Figura 13) que permite inserir diretamente as informações pertinentes ao bloco sobre estacas. Esta etapa de preenchimento de informações é subdividida em outras seis etapas, sendo as primeiras quatro, os parâmetros do bloco como geometria, pilar, ações e configurações dos critérios e nas últimas duas a apresentação dos resultados das tensões e tirantes.

Figura 13- Interface do software



Fonte: Autoria própria

A numeração faz referência aos seguintes itens no programa:

1. Geometria – Item principal que possibilita a inserção de parâmetros geométricos do bloco.
2. Pilar – Item principal onde é inserido os parâmetros geométricos do pilar, bem como suas armaduras.
3. Ações – Item principal onde é possível criar combinações das ações atuantes no bloco e aplicar cargas axiais, laterais e momentos fletores, também calcula a reação máxima nas estacas.
4. Estaqueamento – Subitem da Geometria, nele é possível definir os parâmetros de estaqueamento, como quantidade de estacas, diâmetro, distanciamento entre elas e embutimento.
5. Geometria do bloco – Subitem da Geometria, nele é possível inserir a altura do bloco.
6. Método – Painel suspenso onde é possível selecionar o método de cálculo que deseja para dimensionar o bloco.
7. Caso – É possível escolher a combinação criada anteriormente na aba “Ações”.
8. Visualização 3d – Apresenta o bloco tridimensionalmente, bielas e tirantes, cargas e reações.

A quarta aba do programa no menu suspenso, apresenta o item “critérios” onde é possível configurar diversos parâmetros (f_{ck} dos elementos conectados ao bloco e fatores de ponderação são alguns destes). A Figura 14, apresenta este item.

Figura 14 - Configuração de Critérios

The image shows two side-by-side screenshots of a software application titled "Calculadora de blocos sobre estacas por biela e tirante. Versão 1.5".

The left screenshot shows the "Critérios" menu with the following items and their configurations:

- Materiais e ponderadores 2:** A table with columns for fck,b (MPa), fck,e (MPa), fyk (MPa), yb, ye, yf, and yn. Values: fck,b=30,0; fck,e=25,0; fyk=500,0; yb=1,40; ye=1,15; yf=1,40; yn=1,20.
- Critérios gerais 3:** Includes "Considera peso próprio" (checked) and "Pilar quadrado eq."
- Blévtot & Frémy (1967) 4:** KR=0,90. Options: "Op por Blévtot" (selected), "Op pela NBR 6118/2023".
- Fusco (1994) 5:** Includes "Usar 0,5X" (checked) and "Biela a partir da projeção do pilar" (selected).
- Oliveira (2009) 6:** "Ângulo de espraçamento (°)" = 45,00.
- Santos (2013) 7:** "Fixar valor para X" = 0,00.
- Santos (2023) 8:** "Fixar valor para X" = 0,00.
- Verificação biela-estaca 9:** Includes "Usar área ampliada na estaca" (checked) and "Fixar (d' - emb)" = 0,00.

The right screenshot shows the "Verificação biela-estaca 9" configuration panel:

- Armaduras 10:**
 - Cobrimento (cm): 4,00
 - Φ para arm. secundárias: 10
 - Espaçamento mínimo (cm): 5,00
 - Espaçamento máximo (cm): 30,00
 - Buttons: "Priorizar camada única de tirantes", "Considerar cobrimento da arm. sobre a estaca"
- Bitolas dos tirantes:** "Marque as bitolas utilizadas no dimensionamento".
- Ancoragem 11:**
 - Options: "A partir da face interna" (selected), "A partir do centro"
 - Table of reinforcement diameters (Φ) and their corresponding Lb values for "Boa aderência" and "Má aderência":

Φ	Área (cm²)	Massa (kg/m)	Φ Pino dobra (cm)	
<input checked="" type="checkbox"/>	8	0,50	0,39	4,00
<input checked="" type="checkbox"/>	10	0,79	0,61	5,00
<input checked="" type="checkbox"/>	12,5	1,23	0,96	6,25
<input checked="" type="checkbox"/>	16	2,01	1,57	8,00
<input checked="" type="checkbox"/>	20	3,14	2,45	16,00
<input checked="" type="checkbox"/>	25	4,91	3,83	20,00
<input checked="" type="checkbox"/>	32	8,04	6,27	25,60
<input checked="" type="checkbox"/>	40	12,57	9,80	32,00

Φ	Lb - Boa aderência	Lb - Má aderência
5	16,7	23,8
6,3	21,0	30,0
8	26,7	38,1
10	33,4	47,7
12,5	41,7	59,6
16	53,4	76,2
20	66,7	95,3
25	83,4	119,1
32	106,7	152,5
40	145,0	207,2

Fonte: Autoria própria

A numeração referencia os seguintes itens de critérios no programa:

1. Critérios – Quarto item principal no menu suspenso.
2. Materiais e ponderadores – Possibilita inserir dados como f_{ck} do pilar e estaca, ponderadores das ações e dos materiais.
3. Critérios gerais – Considerações para o cálculo.
4. Blévtot e Frémy (1967) – Aba onde se define o coeficiente de Rüscht e definição do método de cálculo da tensão limite, por Blévtot ou NBR6118 (2023).

5. Fusco (1994) – Possibilita a escolha do início da inclinação das bielas pelos métodos de Fusco (1994).
6. Oliveira (2009) – Permite definir o ângulo de espraio da biela.
7. Santos (2013) – Permite a inserção manual da profundidade “X”.
8. Santos (2023) – Permite a inserção manual da profundidade “X”.
9. Verificação biela-estaca – Item onde trata se há ou não uma ampliação na área da estaca.
10. Armaduras – Definição dos critérios de armadura, como bitolas, espaçamentos e cobrimentos.
11. Ancoragem – Possibilita a escolha da região onde parte o início da ancoragem.

As abas finais do programa, apresentam os itens “Tensões” e “Tirantes” (Figura 15).

Figura 15 - Exibição de tensões e tirantes

Calculadora de blocos sobre estacas por biela e tirante. Versão 1.3

Geometria Pilar Ações Critérios **Tensões 1** Tirantes

Unidades: [cm, °, tf, kgf/cm², cm²] **Tensões admissíveis: 2**
fcd1: 160,29 | fcd3: 135,77

Seleção de Resultados

Todas Críticas Escolher caso 0

Blévo & Frémy (1967)

Caso	α	X	$\sigma_{cd,p}$	$\sigma_{cd,e}$	Estaca
0	43,11	0,00	299,80	130,45	E1
0	43,11	0,00	299,80	130,45	E2

Fusco (1994) - Método A (TQS)

Caso	α	X	$\sigma_{cd,p}$	$\sigma_{cd,e}$	Estaca
0	36,38	16,94	69,35	72,99	E1
0	36,38	16,94	69,35	72,99	E2

Fusco (1994) - Método B (TQS)

Caso	α	X	$\sigma_{cd,p}$	$\sigma_{cd,e}$	Estaca
0	38,86	9,78	108,89	59,83	E1
0	38,86	9,78	108,89	59,83	E2

Oliveira (2009)

Caso	α	X	$\sigma_{cd,p}$	$\sigma_{cd,e}$	Estaca
0	35,32	15,66	79,88	62,57	E1
0	35,32	15,66	79,88	62,57	E2

Santos (2013)

Caso	α	X	$\sigma_{cd,p}$	$\sigma_{cd,e}$	Estaca
0	41,96	4,44	167,28	59,45	E1
0	41,96	4,44	167,28	59,45	E2

Santos (2023)

Caso	α	X	$\sigma_{cd,p}$	$\sigma_{cd,e}$	Estaca
0	37,12	13,87	133,17	127,80	E1
0	37,12	13,87	133,17	127,80	E2

Calculadora de blocos sobre estacas por biela e tirante. Versão 1.3

Geometria Pilar Ações Critérios Tensões **Tirantes 3**

Unidades: [cm, tf, cm²]

Seleção de Resultados

Todas Críticas Escolher caso 0

Blévo & Frémy (1967)

Caso	Tirante	Força	As,nec	As,ef	Φ	Qde	Lb,nec
0	E1-E2	27,38	12,17	12,27	12,5	10	41

Fusco - Método A (1985)

Caso	Tirante	Força	As,nec	As,ef	Φ	Qde	Lb,nec
0	E1-E2	34,79	13,44	13,50	12,5	11	42

Fusco - Método B (1985)

Caso	Tirante	Força	As,nec	As,ef	Φ	Qde	Lb,nec
0	E1-E2	31,81	12,29	12,57	10,0	16	33

Oliveira (2009)

Caso	Tirante	Força	As,nec	As,ef	Φ	Qde	Lb,nec
0	E1-E2	36,17	13,98	14,07	8,0	28	27

Santos (2013)

Caso	Tirante	Força	As,nec	As,ef	Φ	Qde	Lb,nec
0	E1-E2	28,50	11,01	11,04	12,5	9	42

Santos (2023)

Caso	Tirante	Força	As,nec	As,ef	Φ	Qde	Lb,nec
0	E1-E2	33,87	13,09	13,35	10,0	17	33

Fonte: Autoria própria

Os números correspondem aos itens citados abaixo:

1. Tensões – Possibilita analisar os parâmetros do bloco pelos métodos disponíveis no programa.
2. Tensões Admissíveis – Indica os valores limites impostos pela NBR 6118 (2023) para as tensões biela-pilar e biela-estaca.
3. Tirantes – Indica os valores de área de aço para cada método disponível no programa, bem como os detalhamentos da armadura principal.

5.3 Exemplos de Blocos

Foram selecionados a partir da literatura e materiais complementares cinco exemplos de blocos sobre estacas resolvidos para validação do programa. Visando verificar a consistência de seus resultados. Posterior a este passo, utilizando os mesmos exemplos serviram como comparativo entre métodos, visando expor as diferenças nas tensões e áreas de aço calculadas por cada método para um mesmo bloco.

Exemplo I – Calculado pelo método de Blévet e Frémy (1967) este exemplo feito por Bastos (2023), mostra um bloco sobre duas estacas, submetido a cargas axiais e momentos fletores no pilar.

Exemplo II – Descreve um bloco sobre três fustes de tubulão, submetido apenas a cargas axiais, foi calculado pelo método de Blévet e Frémy (1967) e retirado de Bastos (2023).

Exemplo III – Calculado pelo método de Oliveira (2009) e demonstrado na dissertação da autora, o exemplo traz um bloco sobre duas estacas, onde atuam apenas cargas axiais.

Exemplo IV – Trata de um bloco sobre quatro estacas, submetido a cargas axiais e momentos fletores nas duas direções do pilar, calculado pelo método de Santos (2023) e retirado de IBRACON (2015).

Exemplo V – Neste exemplo, é resolvido um bloco sobre duas estacas, onde atuam cargas axiais, momentos fletores e cargas horizontais, o método empregado é de “Fusco - Método B”, este exemplo foi exposto por Cunha (2021).

A Tabela 1 apresenta os dados pertinentes a cada exemplo, que foram utilizados nos parâmetros de entrada do software “CalcBlocos”. Posteriormente foram verificados os resultados do programa com as referências de literatura e finalmente calculados pelos outros métodos para comparação entre eles.

Tabela 1 – Parâmetros de entrada dos exemplos de blocos sobre estacas.

	Exemplo I	Exemplo II	Exemplo III	Exemplo IV	Exemplo V
Nº Estacas	2	3	2	4	2
ϕ_e (cm)	30	70	30	31	30
D. eixos (cm)	80	250	75	120	90
Cob. X (cm)	20	35	20	19,5	20
Cob. Y (cm)	10	35	20	19,5	20
H (cm)	50	160	55	80	60
Lx (cm)	30	65	20	30	30
Ly (cm)	20	65	20	80	20
ϕ_{arm} (mm)	16	25	16	20	20
Nx	5	11	4	4	5
Ny	4	11	4	14	3
Fz (tf)	62	500	46	97,9	60
Mx (tf.m)	0,44	-	-	58,7	-
My (tf.m)	1	-	-	8	5
f_{ck} (MPa)	25	25	30	30	30

Fonte: Autoria própria

6. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados da análise de blocos de fundação sobre estacas, calculados pelo software “CalcBlocos”, permitindo uma avaliação das diferenças nos resultados pelos diferentes métodos empregados. Na sequência, são exibidos gráficos que destacam as variações nos esforços biela-pilar, biela-estaca e área de aço do tirante, além de modelos tridimensionais que ilustram as distribuições de tensões nos blocos analisados. A comparação busca validar o software e identificar as vantagens e limitações de cada abordagem, fornecendo uma base para a escolha do método mais adequado em projetos de engenharia.

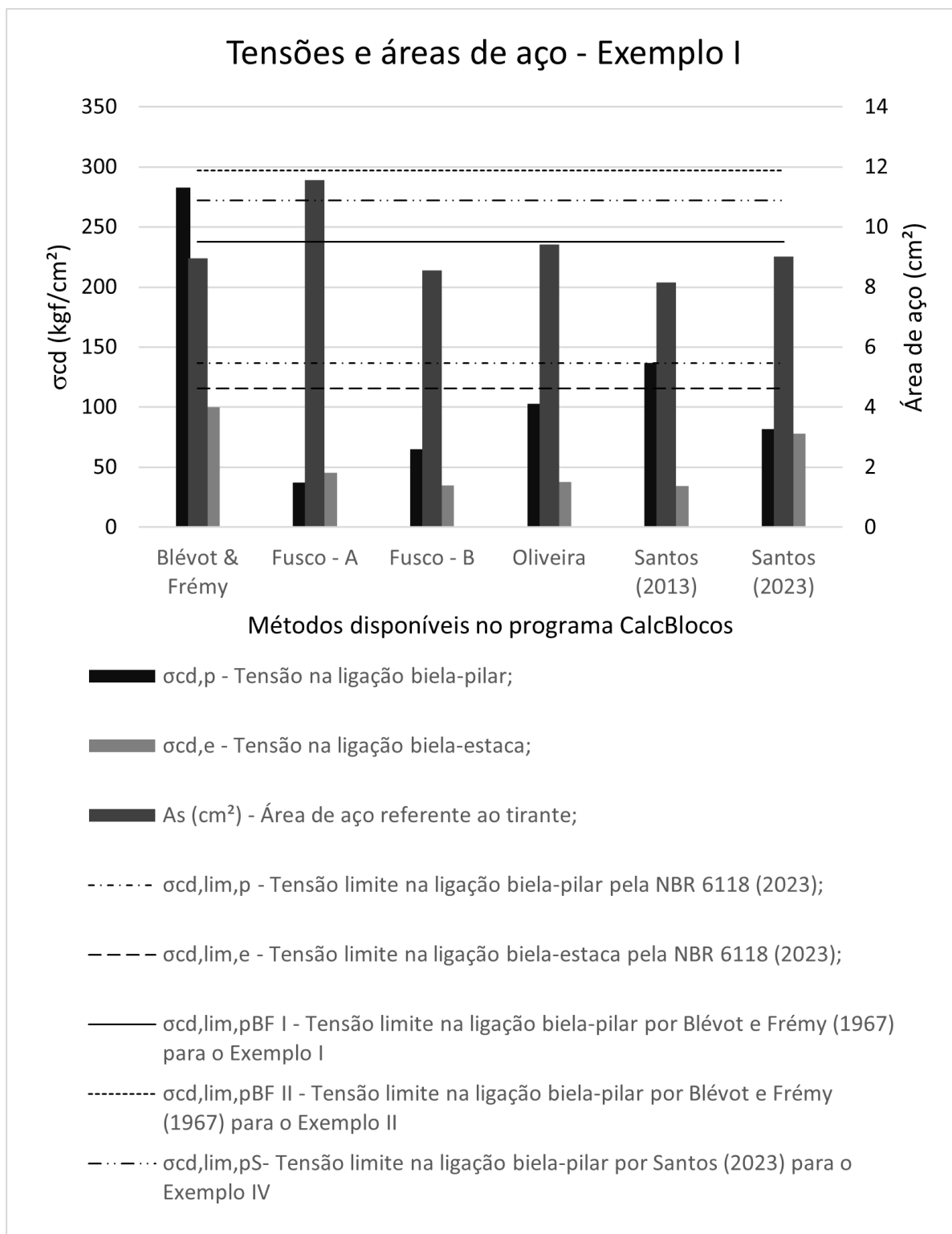
6.1 Exemplo I

O exemplo I, calculado inicialmente pelo método de Blévtot e Frémy (1967), com o objetivo de calibrar o software e identificar possíveis limitações para o cálculo por este método, gerou resultados positivos, visto que as tensões encontradas e áreas de aço foram praticamente iguais às encontradas na literatura para o bloco em questão. Em relação ao software CalcBlocos, não houve nenhuma inconsistência no preenchimento dos dados referentes ao bloco do exemplo I.

Após essa análise inicial, foram obtidos os resultados das bielas e tirantes pelos outros métodos, onde foi possível observar que embora o método de Blévtot e Frémy (1967) seja referência para outros métodos, não atende os limites normativos da tensão biela-pilar impostos pela NBR 6118 (2023) o que explica o desuso do método no contexto brasileiro. O valor da tensão biela-pilar no bloco I chega a um acréscimo de 70% em relação ao limite normativo. Entretanto, se fosse avaliado pelo limite de Blévtot e Frémy, estaria aceitável.

Ao que se refere a área de aço necessária nos tirantes, o método que apresenta uma maior taxa de armadura é o de “Fusco - A”, é possível verificar este resultado na Figura 16.

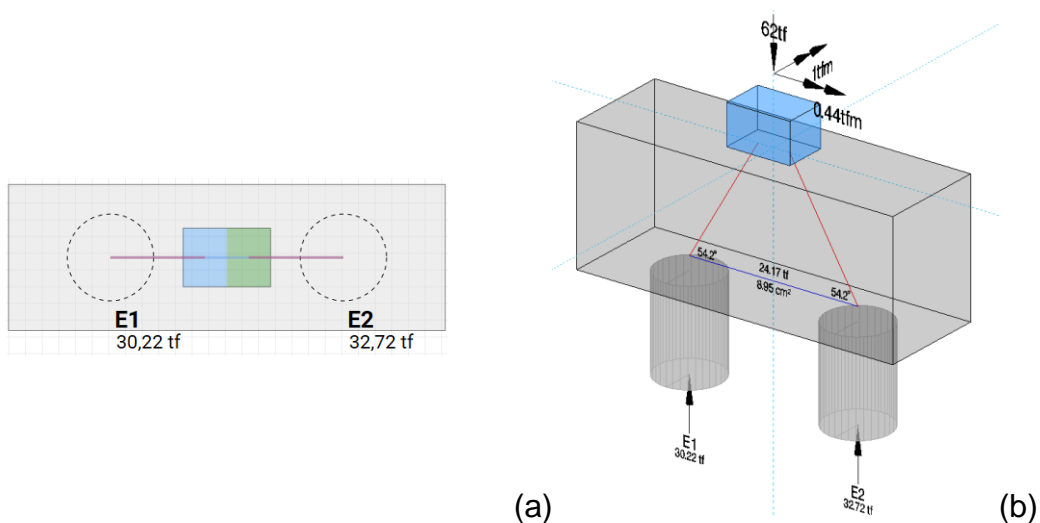
Figura 16 - Gráfico de resultados exemplo I.



Fonte: Autoria própria

No software é indicado por figuras as quadrículas de distribuição dos esforços do pilar para os blocos calculados, a Figura 17a indica as quadrículas para o bloco I, bem como a Figura 17b, expõe o bloco I tridimensionalmente indicando o ângulo de inclinação das bielas, esforço no tirante e reações nas estacas.

Figura 17- a) Quadrículas Bloco I; b) Bloco I tridimensional

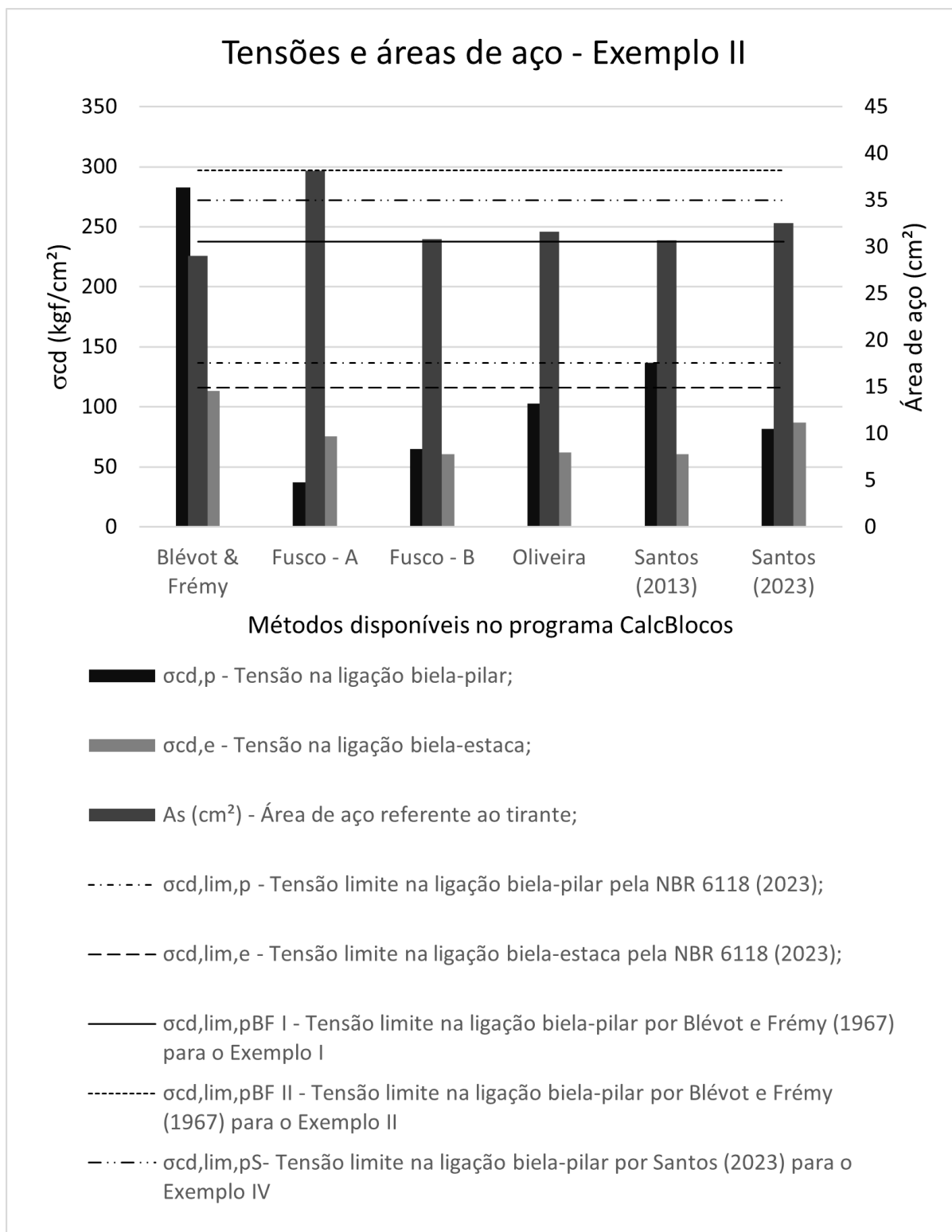


Fonte: Autoria própria

6.2 Exemplo II

Calculado inicialmente também pelo método de Blévoit e Frémy (1967), a verificação de resultados “software X literatura” apontou êxito nos valores encontrados, prosseguindo com a metodologia do trabalho foram obtidos os valores para análise para os demais métodos estudados, é possível verificá-los na Figura 18.

Figura 18 - Gráfico de resultados exemplo II.

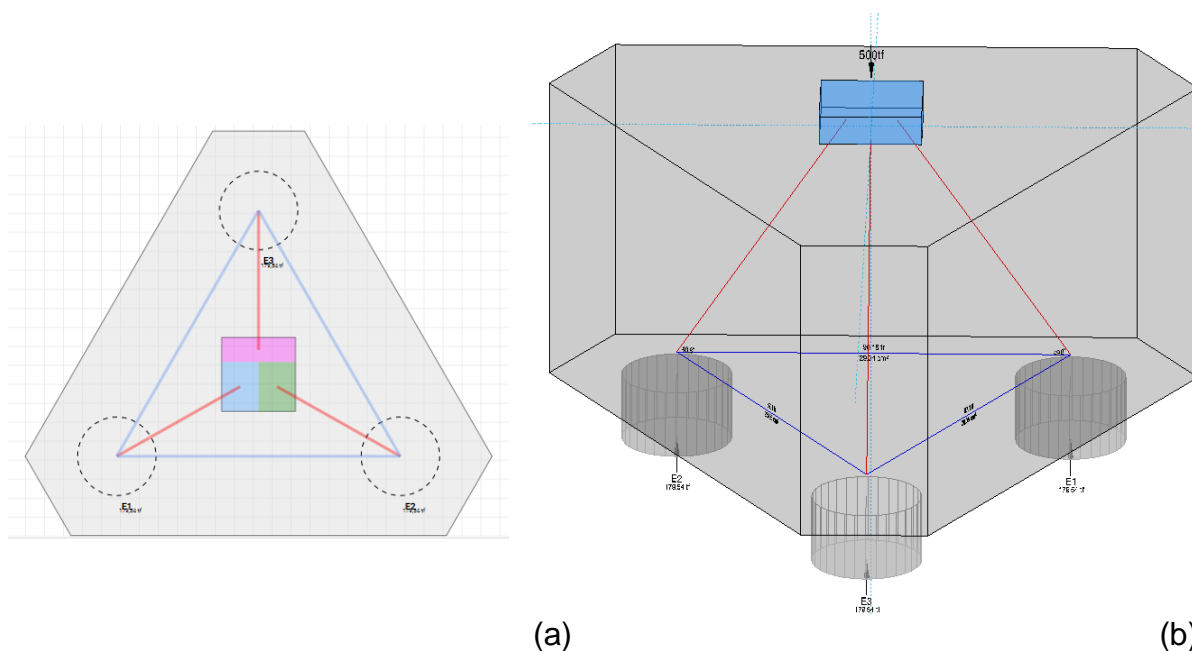


Fonte: Autoria própria

Ao observar o gráfico da Figura 18 é possível constatar que o comportamento do bloco pelo método de Blevót e Frémy (1967) no quesito tensão biela-pilar, não atende os limites normativos impostos pela NBR 6118 (2023), no caso do exemplo II indicando um acréscimo de 106% em relação ao limite normativo, contudo, se fosse avaliado pelo limite estabelecido por Blévot e Frémy, seria uma tensão satisfatória.

Em relação à área de aço nos tirantes o método que apresenta uma maior taxa de armadura é o de “Fusco - A”, os valores altos nas armaduras relativamente ao bloco do exemplo I é devido as suas características geométricas e cargas atuantes. A Figura 19b indica a geometria e cargas atuantes no bloco II de forma clara, já na Figura 19a são retratadas as quadrículas para distribuição dos esforços do pilar.

Figura 19 - a) Quadrículas Bloco II; b) Bloco II tridimensional



Fonte: Autoria própria

6.3 Exemplo III

O exemplo de Bloco III foi calculado para calibração do software pelo método de Oliveira (2009) onde as tensões e áreas de aço foram compatíveis aos valores encontrados na literatura, embora a inserção dos dados do bloco III no software não tenha sido tão intuitiva. No software CalcBlocos, na aba onde é possível definir critérios para o cálculo e análise pelo método de Oliveira (2009) há como definir o ângulo de espreiamento da área ampliada do pilar, entretanto, no método da autora a

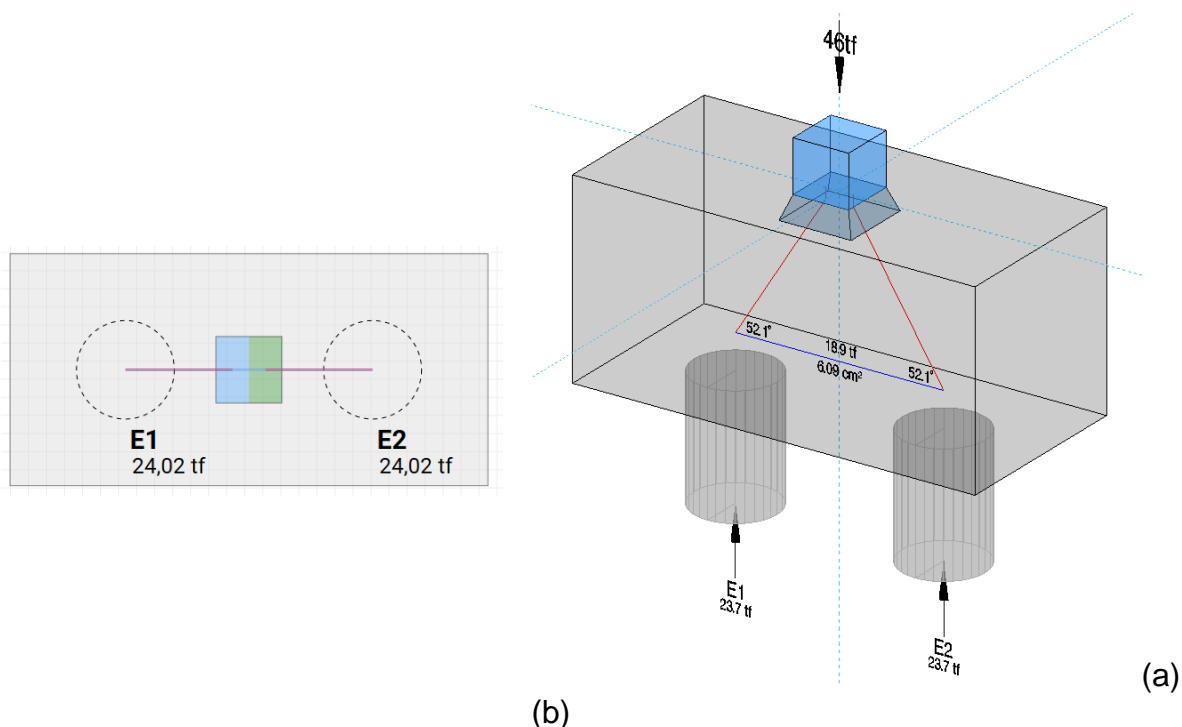
área ampliada é encontrada pelo produto da área do pilar e um coeficiente f_m , obtido a partir de tabelas criadas por ensaios experimentais dela.

Assim, para inserção de um ângulo congruente com o encontrado na literatura, foram realizados cálculos trigonométricos para sua obtenção. Nesta configuração de critérios para Oliveira (2009) quando analisado para os outros exemplos de bloco, foi mantido o ângulo pré-definido do programa (45°) que coincide com as recomendações de Santos (2013 e 2023).

Em relação à tensão biela-pilar, todos os métodos exceto Blévoit e Frémy atenderam as limitações normativas, é possível verificar isto na Figura 21. Quanto à tensão-biela estaca todos os métodos estavam abaixo do limite previsto pela NBR6118 (2023), inclusive com o maior valor de tensão biela-estaca sendo apenas 53% do limite, esse resultado é justificado devido ao aumento da área da estaca previsto pela normativa.

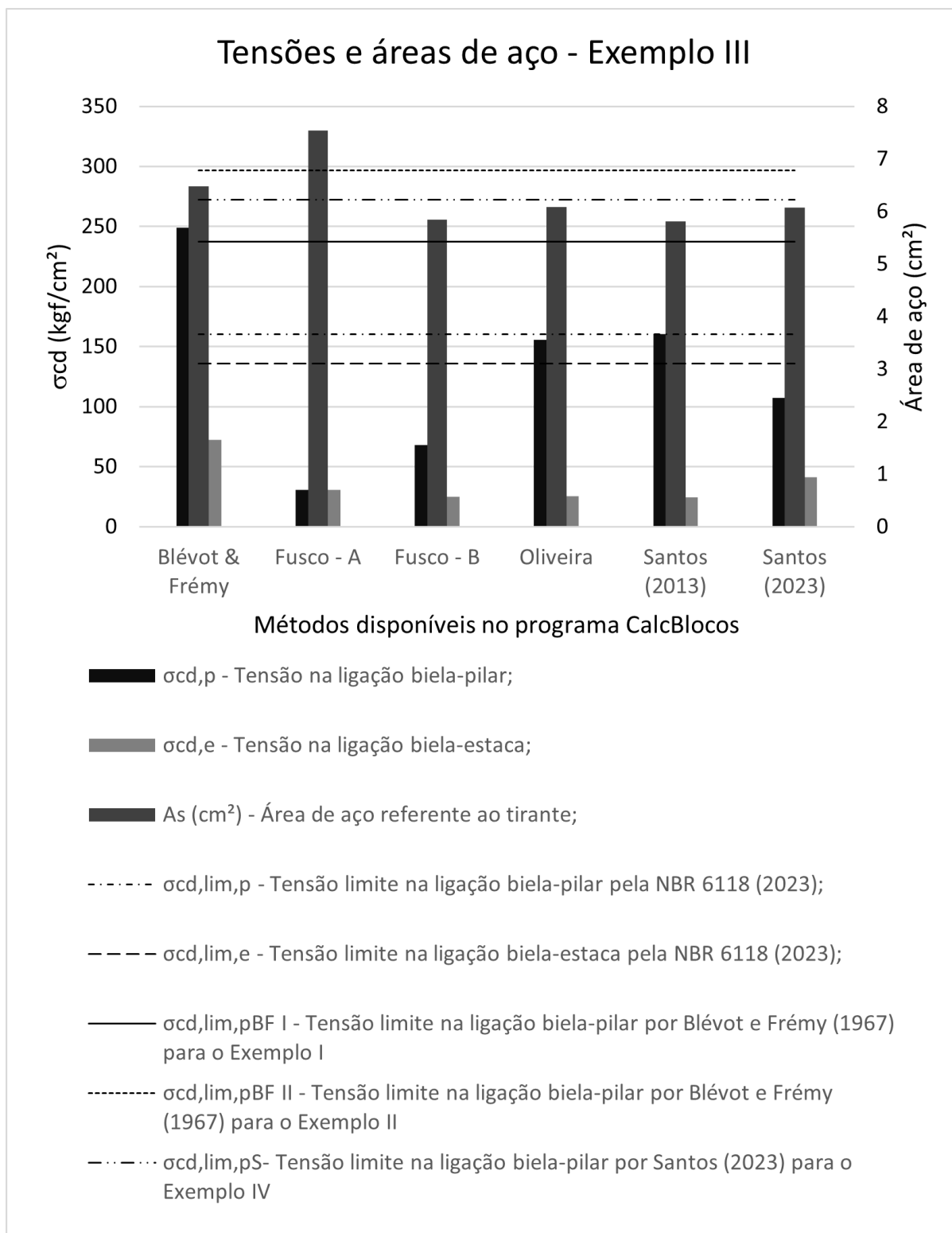
A Figura 20a indica as quadrículas de distribuição dos esforços oriundos do pilar, já na Figura 20b é apresentada a geometria do bloco III.

Figura 20 - a) Quadrículas Bloco III; b) Bloco III tridimensional



Fonte: Autoria própria

Figura 21 - Gráfico de resultados exemplo III.



Fonte: Autoria própria

6.4 Exemplo IV

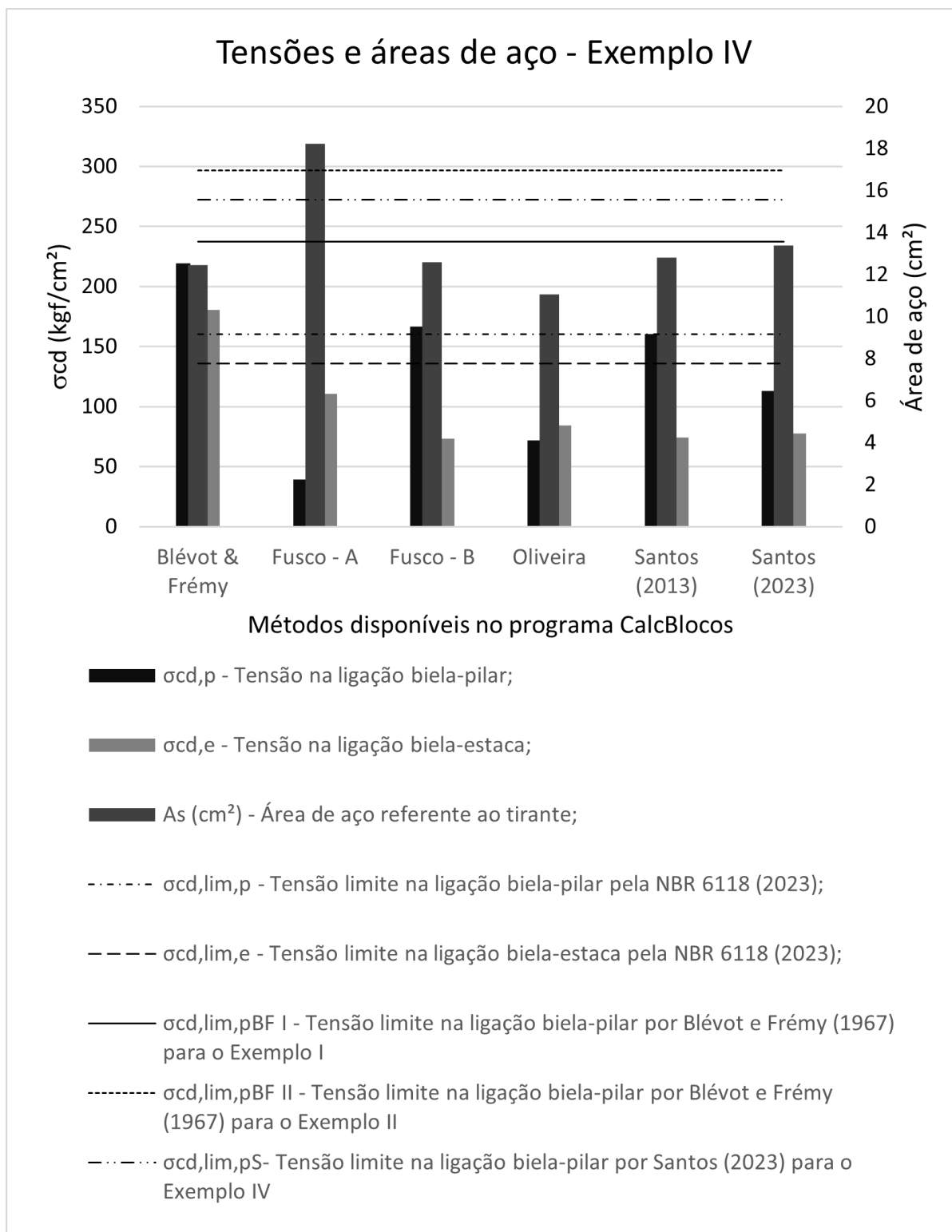
O bloco IV, verificado primeiramente pelo método de Santos 2023 no programa, demonstrou veracidade em seus resultados, quanto à literatura. Algumas diferenças consideráveis no programa podem ser notadas ao comparar Santos (2013) e Santos (2023), pode-se definir como melhorias no método antigo. Santos (2013) aplica a equação por meio de iterações até convergir ao resultado limite no caso da tensão biela-pilar pela NBR 6118 (2023), na Figura 22 é possível confirmar essa informação.

Entretanto, esse processo iterativo, leva em consideração uma profundidade “Y” que pode geometricamente gerar uma área espaiada fora das dimensões do bloco, o que causaria impossibilidade de resolução do bloco sobre estacas. As atualizações propostas por Santos (2023) descartam este método iterativo, propondo espraçamento unilateral para blocos sobre duas estacas, com a finalidade de impossibilitar esta possível falha na resolução dos blocos.

Um ponto notável no método de Santos (2023) é a consideração de uma tensão biela-pilar muito maior que em relação aos limites impostos pela norma brasileira NBR 6118 (2023) que varia de acordo com a quantidade de estacas sob o bloco, constata-se que esta ideia seja oriunda da análise dos efeitos de confinamento do concreto na base do pilar, sendo indicado para blocos sobre 3 ou mais estacas devido ao estado triaxial de tensões gerado nesta região nodal.

Ao analisar o gráfico da Figura 22, verifica-se que bloco do exemplo IV se analisado pelo método de “Fusco – B” não respeitaria os limites impostos pela norma. O método de “Fusco - A” também se destaca negativamente neste exemplo pelo excesso de área de aço, quando comparado aos outros métodos.

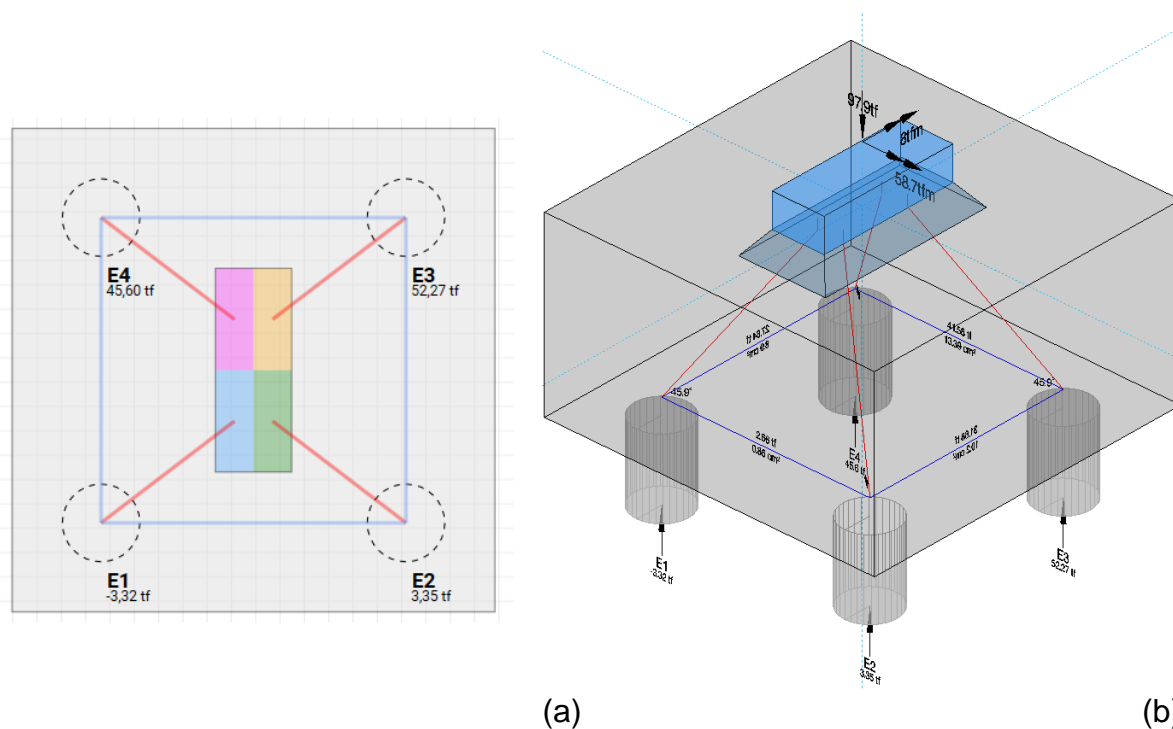
Figura 22 - Gráfico de resultados exemplo IV.



Fonte: Autoria própria

A distribuição dos esforços do pilar para o bloco do exemplo IV é mostrada na Figura 23a indicando as quadrículas, bem como a Figura 23b, expõe o bloco IV tridimensionalmente indicando o ângulo de inclinação das bielas, esforço no tirante, reações nas quatro estacas e a área de espraio do pilar para ambos os lados conforme Santos (2023) prevê para blocos a partir de 3 ou mais estacas.

Figura 23 - a) Quadrículas Bloco IV; b) Bloco IV tridimensional



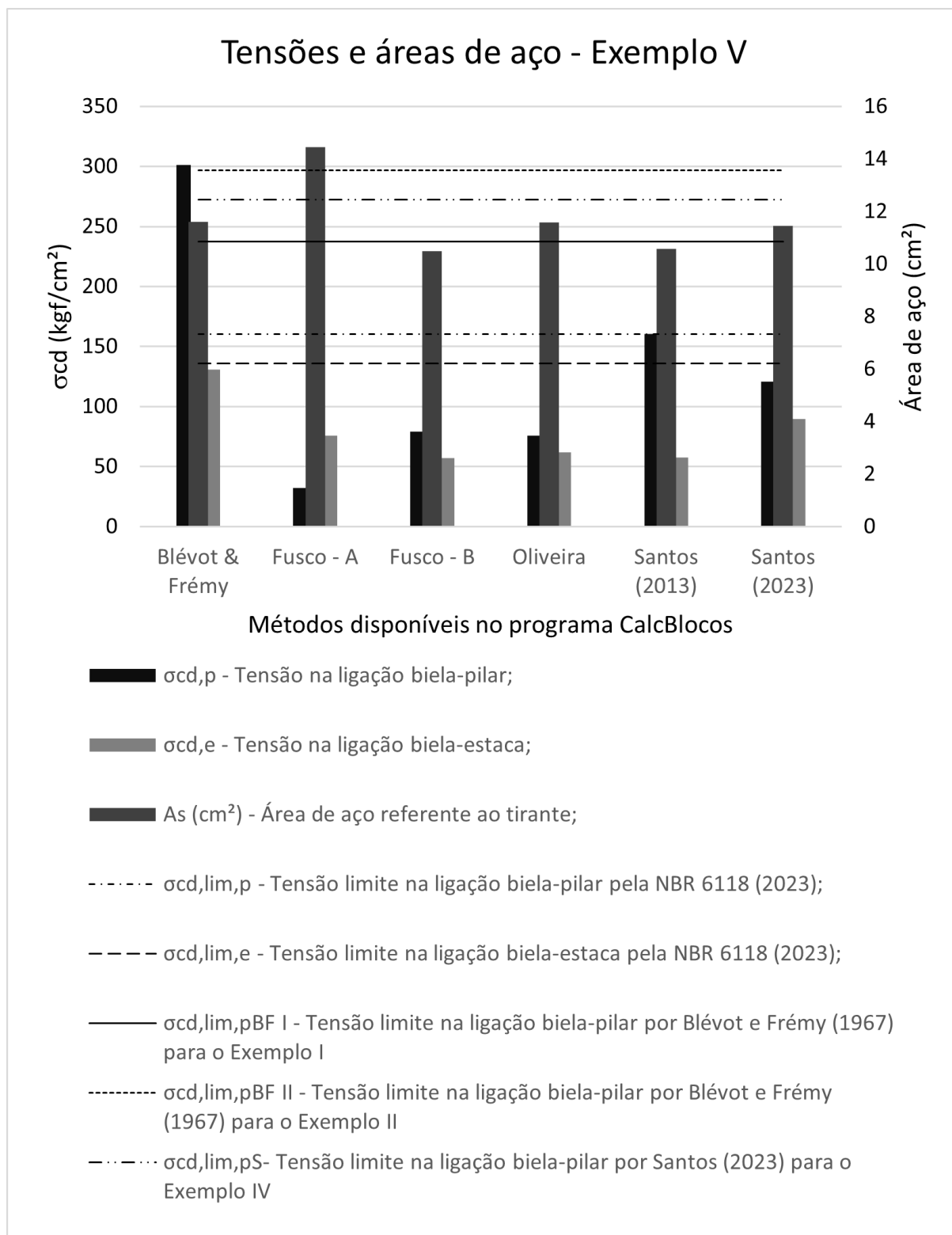
Fonte: Autoria própria

6.5 Exemplo V

O exemplo do Bloco V foi utilizado para calibrar o software por meio do método de "Fusco - B", apresentando tensões e áreas de aço compatíveis com os valores disponíveis na literatura. No entanto, a inserção dos dados referentes ao Bloco V no software revelou-se menos intuitiva, pois ela permite analisar o espraio das bielas em três diferentes alturas: a partir do topo do bloco assim como Blévoit e Frémy (1967); profundidade média do espraio das tensões do pilar como previsto por Oliveira (2009) e Santos (2013 e 2023) e bielas anguladas a partir da base da área ampliada do pilar. Cunha (2021) e demais profissionais, recomendam a utilização da profundidade de espraio da biela partindo do ponto médio, pois assim o bloco

apresenta um comportamento similar aos outros métodos e respeita as limitações de tensão impostas, é possível verificar na Figura 24.

Figura 24 - Gráfico de resultados exemplo V.



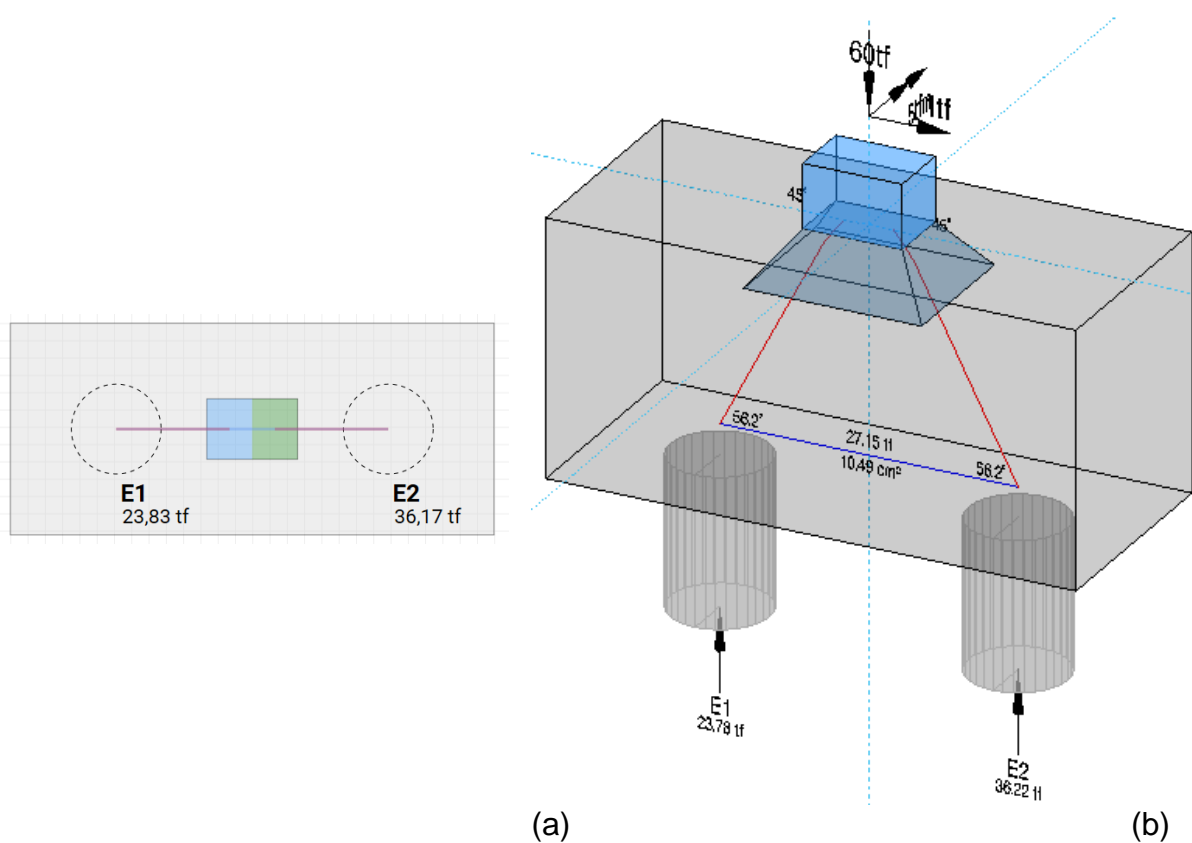
Fonte: Autoria própria

É possível identificar na Figura 24, o valor elevado de área de aço para o bloco quando analisado pelo método de “Fusco – A”, esse comportamento foi observado nos demais blocos calculados, uma justificativa para esses resultados é em relação à equação desenvolvida pela empresa TQS ®, onde considera a razão entre taxa de armadura e 20% da resistência do concreto.

O resultado dessa organização na equação gera uma maior profundidade na área ampliada do pilar, conseqüentemente diminuindo a tensão biela-pilar, aumentando a tensão biela-estaca e demandando mais área de aço nos tirantes.

Na Figura 25b é visível o espraio da área do pilar à 45° e o início do espraio da biela partindo do ponto médio da profundidade “X”, já a Figura 25a trata das quadrículas do bloco V.

Figura 25 - a) Quadrículas Bloco V; b) Bloco V tridimensional



Fonte: Autoria própria

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresentou uma análise comparativa de métodos para o dimensionamento de blocos de coroamento sobre estacas, utilizando o modelo de bielas e tirantes, onde foram identificadas diferenças significativas entre os métodos analisados, destacando as limitações dos métodos tradicionais e os avanços das abordagens mais recentes.

O software CalcBlocos provou-se essencial no processo de dimensionamento, oferecendo precisão nos cálculos de tensões e armaduras. A validação com exemplos retirados da literatura confirmou a confiabilidade dos resultados.

O software CalcBlocos, apresentou discrepância no método de Oliveira (2009) onde a área ampliada é definida por tabelas experimentais, já no software a entrada disponível é em relação à um ângulo de espraio da área ampliada.

Em relação as recomendações normativas, métodos tradicionais, como o de Blévyot e Frémy (1967), mostraram-se inadequados para atender às exigências da NBR 6118 (2023).

As equações de “Fusco - Método A” resultaram em valores elevados na taxa de aço nos tirantes, o que justificaria o desuso do método por questões econômicas, visto que os blocos de coroamento são elementos com um alto volume de armadura naturalmente em outras regiões do bloco.

As abordagens dos métodos de Blévyot e Frémy (1967) e Santos (2023) incorporam aspectos como tensões de confinamento e melhorias nas áreas nodais, isso é representado por limites de tensão biela-pilar maiores que os previstos na NBR 6118 (2023).

O modelo de bielas e tirantes permitiu uma representação realista da transferência de tensões em regiões descontínuas, promovendo maior segurança no dimensionamento, apesar disso, sua aplicação prática ainda é limitada devido à escassez de bibliografia e à necessidade de maior difusão do tema nos cursos de engenharia civil. Espera-se que este estudo contribua para a disseminação do conhecimento técnico sobre blocos de fundação no Brasil.

REFERÊNCIAS

- ADEBAR, P.; KUCHMA, D.; COLLINS, M. P. Strut-and-tie models for the design of pile caps: An experimental study. **ACI Structural Journal**, v. 87, n. 1, p. 81-92, 1990.
- AGUIAR, C. C. P. de; SANTOS S. H. C. Dimensionamento de Estruturas Especiais de Concreto Armado pelo Método de Bielas e Tirantes. *In: X Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas (XCBPE)*, 2018, Rio de Janeiro.
- ALONSO, Urbano Rodriguez. **Dimensionamento de fundações profundas**. 3. Ed. São Paulo, SP: Editora Blucher, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e execuções de fundações - Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2022.
- BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Blocos de Fundação**. Bauru: Universidade Estadual Paulista - UNESP, Faculdade de Engenharia, 2023 73 p. Disponível em: <https://www.feb.unesp.br/pbastos/concreto3/Blocos.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2024.
- BAVARESCO, Danicler. **Análise e dimensionamento de blocos de fundação destinados ao apoio de pilares de geometria complexa**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, 2016.
- BLÉVOT, J.; FRÉMY, R. **Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics. Semelles sur pieux**, 1967.
- CALAVERA, José. **Cálculo de estructuras de cimentación**. Intemac, 1991.
- CAMPOS, João Carlos de. **Elementos de fundações em concreto**. 2. Ed. São Paulo, SP: Editora Oficina de Textos, 2022.
- CUNHA, Márcio. DIM blocos V5. 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=WpF1J-8NEzI>. Acesso em: 05 nov. 2024.
- DELALIBERA, R. G.; GIONGO, J. S. Deformações nas diagonais comprimidas em blocos sobre duas estacas. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, v. 1, p. 121-157, 2008.
- DELALIBERA, Rodrigo Gustavo. **Análise numérica e experimental de blocos de concreto armado sobre duas estacas submetidos à ação de força centrada e excêntrica**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- FUSCO, Péricles Brasiliense. **Técnicas de armar as estruturas de concreto**. São Paulo, SP: Editora Pini, 1994.

IBRACON. **ABNT NBR 6118: 2014—Comentários e Exemplos de Aplicação**. Ibracon São Paulo, 2015.

LADEIRA, Artur Hallack. **Análise de estruturas de concreto armado via modelos de bielas e tirantes e técnicas de otimização topológica**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, 2019.

MONTOYA P. J.; MESEGUER, A.; CABRE, M. **Hormigon Armado**. 14ª edição. Barcelona, Espanha: Editora Gustavo Gili S.A., 2000.

MÖRSCH, E. **Concrete-steel construction**. [S.l.]: The Engineering News Publishing Company, 1909.

OLIVEIRA, Letícia Marchiori de. **Diretrizes para projeto de blocos de concreto armado sobre estacas**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2009.

RITTER, W. **Die Bauweise Hennebique, Schweizerische Bauzeitung**. Zürich, v. 33, p. 41-43, 1899.

SANTOS, D. M. **Theoretical and experimental analysis of pile caps: an approach by strut-and-tie models**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

SCHLAICH, J.; SCHÄFER, K.; JENNEWEIN, M. **Toward a consistent design of structural concrete**. PCI journal, v. 32, n. 3, p. 74-150, 1987.

SILVA, Matheus Castro Nicolau da. **Comparação entre métodos de cálculo para blocos sobre estacas: desenvolvimento de software**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pampa, 2023.

TQS INFORMÁTICA LTDA. **Blocos sobre estacas**. São Paulo: TQS Informática, 2021. Disponível em: <https://docs.tqs.com.br/Docs/Details?id=3870&language=pt-br>. Acesso em: 12 nov. 2024.