



Pedro Henrique Silva

**ANÁLISE NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE BLOCO DE COROAMENTO -
ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de
Engenharia Civil da Faculdade
de Engenharia Civil da
Universidade Federal de
Uberlândia, como requisito
parcial para obtenção do título
de bacharel em Engenharia
Civil.

Orientador:

Prof. Dr. Jean Rodrigo Garcia

UBERLÂNDIA

2026

ANÁLISE NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE BLOCO DE COROAMENTO - ESTUDO DE CASO

Pedro Henrique Silva ¹

Jean Rodrigo Garcia ²

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise numérica tridimensional de uma solução alternativa adotada em uma fundação profunda após a impossibilidade de execução de uma das estacas previstas em projeto. O sistema original consistia em um bloco de coroamento apoiado sobre quatro estacas de concreto armado, sendo substituído por uma configuração com três estacas interligadas por vigas diagonais em “X”. A análise foi realizada no software RS3, com base no Método dos Elementos Finitos, considerando a interação solo-estrutura entre bloco, estacas e maciço de solo. Foram comparados os comportamentos da solução convencional e da alternativa, com foco na capacidade de carga, rigidez e distribuição de esforços. Os resultados indicaram que a solução alternativa apresenta redução na capacidade de carga admissível e maior deformabilidade, associadas à redistribuição não uniforme de esforços entre as estacas. Conclui-se que, embora a solução seja tecnicamente viável, seu desempenho é inferior ao sistema convencional, devendo sua adoção ser acompanhada de análises específicas para garantir a segurança e a eficiência da fundação.

Palavras-chave: Bloco de coroamento; Fundações profundas; Interação solo-estrutura; Análise numérica tridimensional; Método dos Elementos Finitos; Falha de execução.

ABSTRACT

This study presents a three-dimensional numerical analysis of an alternative solution adopted for a deep foundation after the impossibility of executing one of the piles originally specified in the design. The initial system consisted of a pile cap supported by four reinforced concrete piles, which was replaced by a configuration with three piles interconnected by diagonal beams in an “X” arrangement. The analysis was carried out using the RS3 software based on the Finite Element Method, considering the soil-structure interaction between the pile cap, piles, and surrounding soil mass. The behavior of the conventional and alternative solutions was compared in terms of load-bearing capacity, stiffness, and load distribution. The results indicate that the alternative solution presents a reduction in admissible load capacity and increased

deformability, associated with a non-uniform redistribution of loads among the piles. It is concluded that, although the alternative solution is technically feasible, its performance is inferior to the conventional system, and its adoption should be supported by specific analyses to ensure foundation safety and efficiency.

Keywords: Pile cap; Deep foundations; Soil–structure interaction; Three-dimensional numerical analysis; Finite Element Method; Construction defect.

1 INTRODUÇÃO

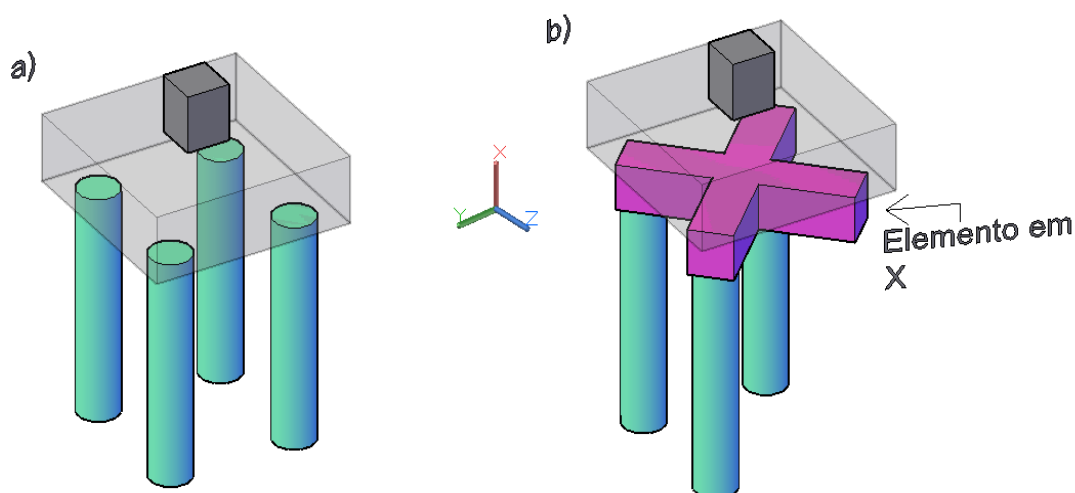
O crescimento do mercado da construção civil no Brasil tem impulsionado o aumento da verticalização das edificações, tornando os edifícios de múltiplos pavimentos cada vez mais presentes nos centros urbanos das cidades. Nesse contexto, as fundações desempenham papel fundamental na transferência das cargas da superestrutura para o solo, garantindo estabilidade, segurança e desempenho adequado das estruturas. Entre as soluções adotadas para suportar cargas elevadas, destaca-se o uso de estacas associadas a blocos de coroamento, sendo este um sistema amplamente conhecido e empregado em edificações de médio e grande porte.

Entretanto, durante a execução de obras, podem ocorrer imprevistos que destoam das condições previstas em projeto, fazendo com que estas não sejam plenamente atendidas, seja por limitações construtivas, interferências no subsolo ou falhas operacionais. Nessas circunstâncias, torna-se necessária a adoção de soluções alternativas para viabilizar a adequada continuidade da obra. Contudo, modificações na configuração do projeto original da fundação podem alterar o mecanismo de transferência de cargas e o comportamento estrutural do sistema fundação-solo, exigindo avaliação técnica adequada.

O caso analisado neste estudo corresponde a uma situação, hipotética, na qual foi adotada uma solução não convencional para solucionar um problema construtivo em obra civil. Durante a execução da fundação de um pilar, uma das estacas do grupo deixou de ser perfurada, o que comprometeu o arranjo originalmente previsto em projeto, composto por quatro estacas, que exigiu a avaliação de alternativas construtivas para a solução do problema. Entre as alternativas consideradas estavam a execução de uma nova estaca na mesma posição, mantendo diâmetro e comprimento, ou a execução de estacas adjacentes que resultaria em nova configuração do bloco e arranjo de estacas, soluções que implicariam custos adicionais e alterações no cronograma da obra. Diante desse cenário, optou-se pela adoção de uma solução alternativa composta por duas vigas diagonais em configuração em “X”, interligando as três estacas remanescentes, ou seja, com redução do número de estacas previsto no projeto original.

Conforme representado na Figura 1.

Figura 1 – Estruturas a serem comparadas no estudo: a) Solução convencional, b) Solução adotada



Fonte: Autores (2026)

Deste modo, no estudo de caso analisado, a fundação foi originalmente concebida para ser um bloco de coroamento com quatro estacas de concreto armado, com 14 metros de comprimento e 40 centímetros de diâmetro, dimensionadas para suportar cargas elevadas provenientes de um pilar central. Configurações com quatro estacas são usualmente adotadas com o objetivo de promover uma distribuição mais uniforme dos esforços, reduzindo a ocorrência de recalques diferenciais e contribuindo para a estabilidade global da estrutura.

A nova configuração introduz uma condição assimétrica ao sistema bloco-estacas, resultando em um comportamento estrutural distinto do originalmente previsto, com redistribuição de esforços entre os apoios e possível alteração na rigidez global da fundação. Além disso, a ausência de uma estaca pode comprometer a eficiência do sistema na mobilização da capacidade resistente do solo, tornando o comportamento mais sensível à interação solo-estrutura. Nesse contexto, é imperativo estudar o funcionamento deste novo sistema para analisar o comportamento e representar de forma mais realista a interação entre os elementos: solo, estacas e bloco de coroamento.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) constitui uma ferramenta adequada para a análise de problemas geotécnicos complexos, permitindo a consideração da não linearidade do solo, da heterogeneidade dos materiais e da interação entre os diferentes componentes do sistema de fundação. O uso de modelagem numérica possibilita análises mais realistas do comportamento do solo e das estruturas associadas. A utilização de modelos tridimensionais tem se consolidado em estudos de fundações estacadas, uma vez que possibilita estimativas

mais precisas de tensões e deslocamentos, incluindo a avaliação de recalques, parâmetro central neste trabalho.

O principal parâmetro adotado para a avaliação do desempenho da fundação é o recalque. A ABNT NBR 6122:2022 estabelece que o recalque corresponde ao deslocamento vertical descendente de um elemento estrutural, fenômeno que pode comprometer o desempenho da edificação quando ocorre de maneira diferencial entre seus diversos elementos. Em razão de seu potencial para gerar manifestações patológicas e danos estruturais, a consideração dos recalques torna-se fundamental nas análises geotécnicas e no projeto de fundações. Adicionalmente, a capacidade de carga de fundações profundas pode ser estimada por diferentes métodos teóricos e empíricos, destacando-se as formulações de Aoki & Velloso (1975); Décourt & Quaresma (1978) e Teixeira (1996).

Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar, por meio de modelagem numérica tridimensional utilizando o Método dos Elementos Finitos, o comportamento estrutural de uma solução alternativa adotada em campo para um bloco de coroamento originalmente projetado com quatro estacas, comparando seu desempenho com a configuração convencional e discutindo suas implicações em termos de segurança e desempenho geotécnico.

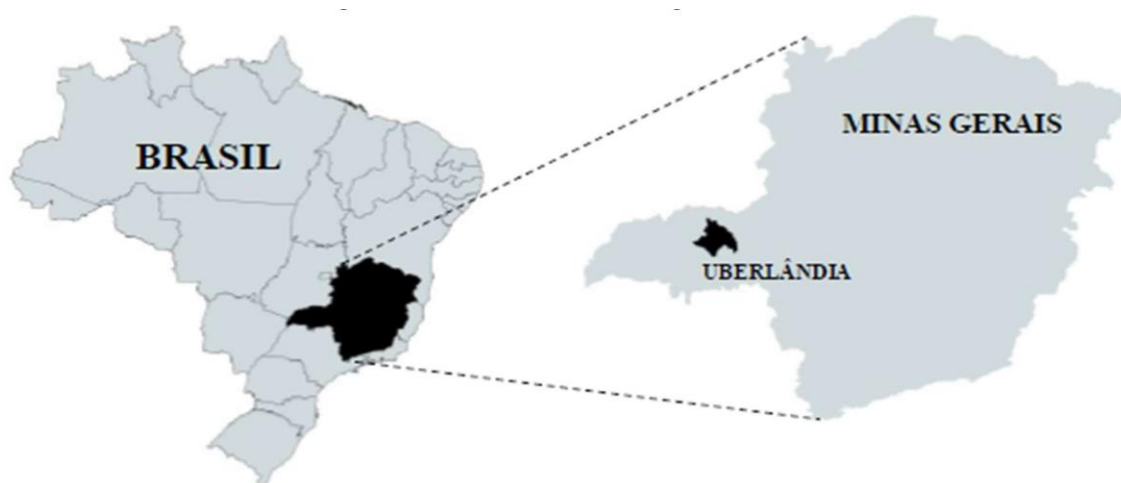
2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho tem como objetivo investigar o comportamento estrutural e geotécnico de um bloco de coroamento com três estacas interligadas por vigas diagonais em “X”, solução adotada em substituição à configuração convencional de quatro estacas, cuja execução foi inviabilizada em campo. As estacas analisadas são do tipo escavadas em concreto armado, com 14 m de comprimento e 0,40 m de diâmetro, pertencentes a um empreendimento de grande porte localizado na região sul de Uberlândia/MG (Figura 1), sendo adotadas como referência para o desenvolvimento deste estudo. A análise busca compreender a redistribuição de esforços decorrente da ausência de uma estaca, bem como avaliar a eficiência da solução adotada quanto à estabilidade e segurança estrutural da fundação, por meio do Método dos Elementos Finitos.

2.1 Localização

A área de estudo está localizada na região sul do município de Uberlândia (MG), inserida na Bacia do Paraná, sobre rochas pertencentes ao Grupo São Bento, notadamente à Formação Serra Geral, conforme mapeamento geológico do Projeto Triângulo Mineiro (CODEMIG/IGC-CPMTC-UFMG, 2017), conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2- Localização da região estudada



Fonte: Fernandes (2024)

O subsolo local é composto predominantemente por solos argilo-arenosos com comportamento colapsível, característica que reforça a necessidade de análise detalhada, devido à sensibilidade desse tipo de solo a variações de umidade e carregamento. Para a caracterização geotécnica, foram utilizados dados de ensaios de sondagem à percussão (SPT) realizados na região, permitindo a definição dos parâmetros necessários à modelagem numérica.

2.2 Parâmetros geotécnicos

A caracterização geotécnica do subsolo foi realizada a partir de ensaios de sondagem à percussão (SPT), que permitiram identificar a estratigrafia local, os valores do índice de resistência à penetração (N_{SPT}) e a localização do nível d'água. Os resultados indicaram a predominância de uma camada de areia argilosa ao longo da profundidade analisada. Dessa forma, adotou-se, para fins de modelagem, um meio homogêneo equivalente, representativo do comportamento médio do solo.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento, representados pela coesão efetiva (c') e pelo ângulo de atrito (ϕ'), bem como os parâmetros de deformabilidade, módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν), foram estimados por meio de correlações semiempíricas amplamente utilizadas na prática geotécnica.

Para a estimativa dos parâmetros de resistência e módulo de deformabilidade, foram adotadas as formulações propostas por Teixeira & Godoy (1996) e Kulhawy & Mayne (1990), representados pelas equações 1 a 3, enquanto os valores de coeficiente de Poisson foram definidos com base em Albuquerque e Garcia (2020), conforme (Tabela 1).

Considerou-se uma camada única com 14 m de profundidade para o desenvolvimento do modelo numérico, permitindo uma representação adequada da resposta do solo.

$$\phi' = 15^\circ + \sqrt{20} \times N_{\text{SPT}} \quad \text{Equação 1}$$

$$\frac{u}{a} = 0,06 \times N_{\text{SPT}(60)} \quad \text{Equação 2}$$

$$E_s = \alpha \times K \times N_{\text{SPT}} \quad \text{Equação 3}$$

Com base na interpretação dos ensaios, consideraram-se uma camada principal ao calcular coeficientes equivalentes na análise. Os parâmetros geotécnicos adotados nas simulações são apresentados na Tabela 3.

Tabela 1- Peso específico natural do solo

Tipo de Solo	N_{SPT}	Peso específico natural (γ) (kN/m ³)
Areia média e fina	0 - 2	17
	3 - 5	18
	6 - 10	18
	11 - 19	19
	≥ 20	20

Tabela 1 - Coeficiente de Poisson

Tipo de Solo	Coeficiente de Poisson
Argila não saturada	0,1 - 0,3
Argila saturada (não drenada)	0,5
Argila saturada (drenada)	0,2 - 0,4
Areia pouco compacta	0,2
Areia compacta	0,3 - 0,4
Areia fofa	0,1 - 0,3
Silte	0,3 - 0,5

Fonte: Albuquerque e Garcia (2020)

Tabela 2 - Parâmetros do solo adotados nas simulações

Material	Camada [m]	$N_{\text{SPT},\text{méd}}$ [golpes/30cm]	γ_{nat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	ϕ' [°]	c' [kPa]	ν [-]	E [kPa]
Areia Argilosa	0 - 14	8	18	19	27	14	0,30	16.000

Fonte: Autores (2026)

Para realizar o estudo adequado e a validação da solução de engenharia adotada, é necessário apresentar as principais características geométricas das fundações, assim como a modificação realizada na fundação especificada no projeto original. Para isso, inicialmente é preciso compreender os esforços atuantes na estrutura, considerando o comportamento global do conjunto formado pelo bloco de coroamento e pelo grupo de estacas.

Como a estrutura original já havia sido previamente dimensionada e os esforços máximos conhecidos, adotou-se um procedimento de verificação baseado na estimativa da capacidade de carga das estacas por meio de correlações semiempíricas com valores do índice de resistência à penetração obtidos no ensaio SPT. A capacidade de carga das estacas foi estimada por meio de métodos semiempíricos baseados em resultados de SPT, destacando-se as formulações de Aoki & Velloso (1975); Décourt & Quaresma (1978) e Teixeira (1996), amplamente empregados na prática geotécnica para a determinação da capacidade de carga axial de estacas.

Esses métodos estimam a capacidade de carga última ($Q_{RUPTURA}$) de uma das estacas a partir da contribuição de duas parcelas principais: a resistência de ponta da estaca e a resistência por atrito lateral ao longo do fuste da estaca. Assim, a carga admissível ($Q_{ADM.CALC}$) pode ser obtida a partir da soma dessas parcelas resistentes e adotando os fatores de segurança (F.S.) igual a 2. A Tabela 4 apresenta os valores estimados para os métodos adotados do ensaio SPT realizado na região de estudo, permitindo a comparação entre os resultados.

Tabela 4 – Estimativa da capacidade de carga última e admissível da estaca tipo.

Método	R_{PONTA} [kN]	$R_{LATERAL}$ [kN]	$Q_{RUPTURA}$ [kN]	$Q_{ADM.CAL}$ [kN]
Décourt-Quaresma	802	1.131	1.934	967
Aoki e Velloso	669	1.307	1.976	988
Teixeira	669	1.877	2.545	1.273
Média	713	1.438	2.152	1.076

Legenda: $Q_{RUPTURA}$ - Carga de ruptura; $Q_{ADM.CAL}$ - Carga admissível; R_{PONTA} – Resistência de ponta; $R_{LATERAL}$ – Resistência lateral.

Fonte: Autores (2026)

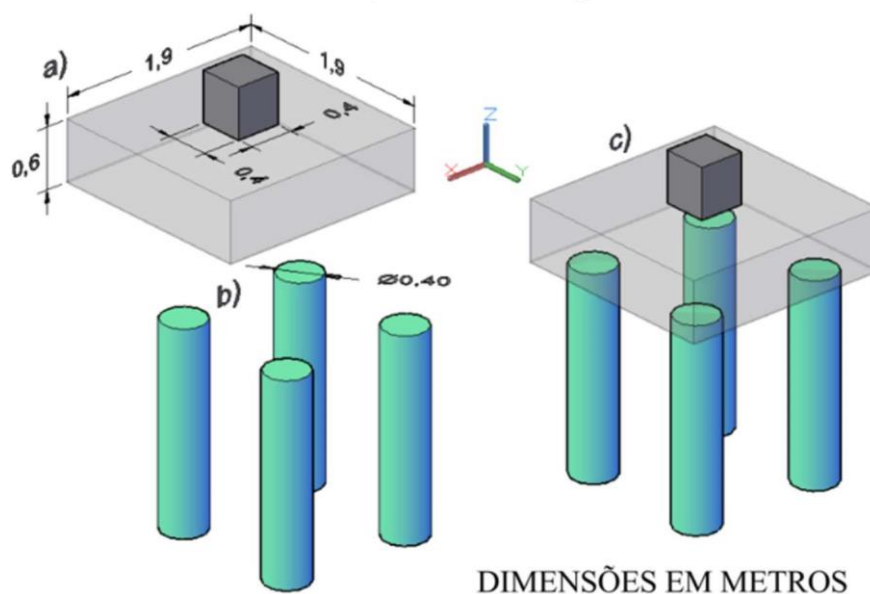
Ressalta-se que as hipóteses adotadas visam permitir uma análise comparativa entre as configurações estudadas, não se configurando como um dimensionamento executivo da solução analisada. O dimensionamento das vigas foi conduzido a partir da idealização do comportamento estrutural do conjunto, considerando a redistribuição de esforços decorrente da

ausência de uma das estacas. Dessa forma, as vigas foram analisadas como elementos estruturais responsáveis pela transferência de cargas entre os apoios, sendo os esforços internos estimados a partir do equilíbrio estático do sistema simplificado.

3 MODELOS ANALISADOS

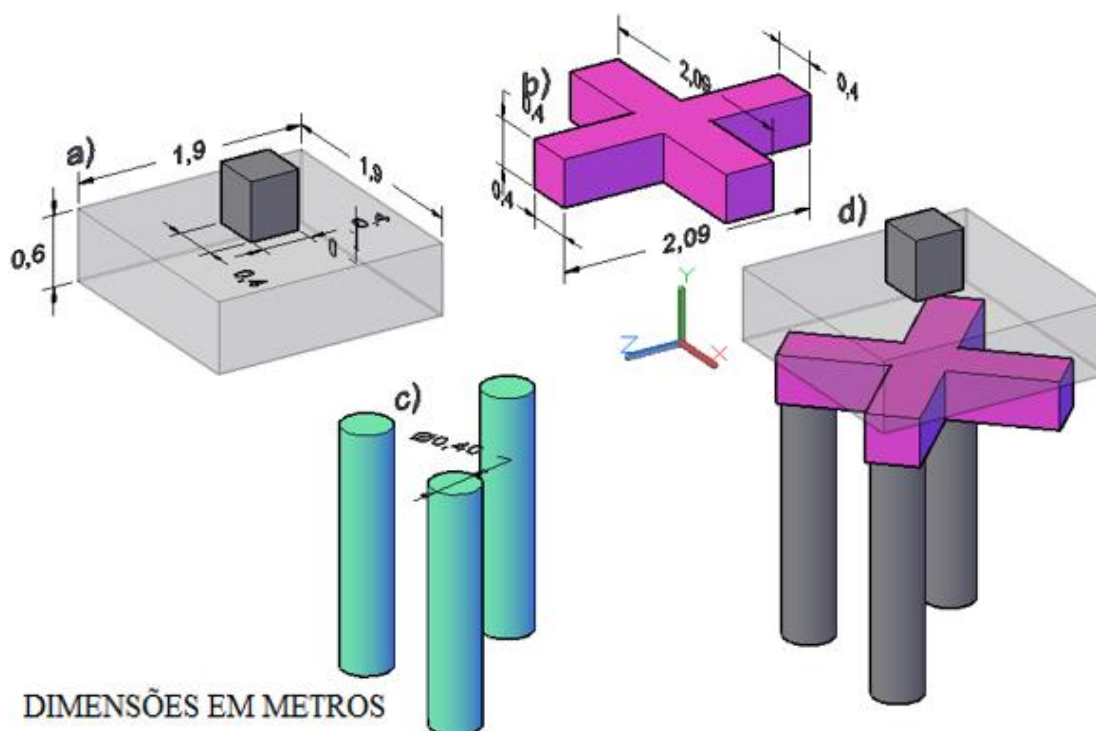
A análise numérica possibilitou a avaliação da distribuição de cargas entre os elementos da fundação, bem como a quantificação dos recalques e a análise do comportamento mecânico global do sistema, incluindo as tensões no topo das estacas. Além disso, permitiu comparar o comportamento estrutural e geotécnico das diferentes configurações analisadas, conforme os modelos apresentados nas Figura 3 e Figura 4.

Figura 3 - Geometria da fundação convencional: a) Bloco de coroamento, b) Grupo de estacas, c) Fundação completa.



Fonte: Autores (2026)

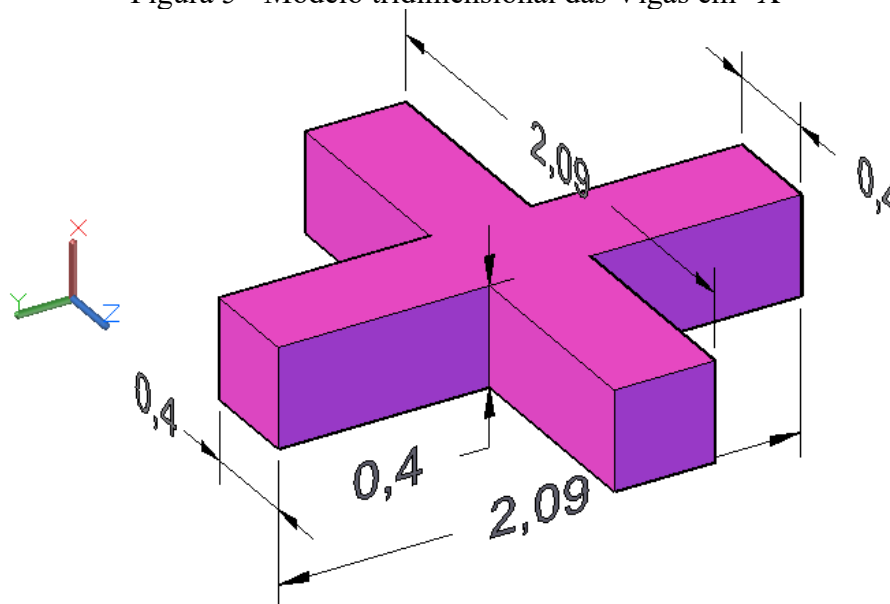
Figura 4 - Geometria da fundação adotada: a) Bloco de coroamento, b) Vigas diagonais em X, c) Grupo de estacas, d) Fundação completa.



Fonte: Autores (2026)

Por se tratar de uma solução adotada em campo, frequentemente empregada em situações de restrição construtiva, observa-se que nem sempre há um dimensionamento detalhado compatível com a configuração original da fundação. Assim, para fins de modelagem, admitiu-se que as vigas diagonais em “X” foram dimensionadas segundo critérios usuais de engenharia, adotando uma configuração estrutural compatível com as dimensões e o arranjo da fundação, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Modelo tridimensional das Vigas em “X”



Fonte: Autores (2026)

4 ANÁLISE NUMÉRICA

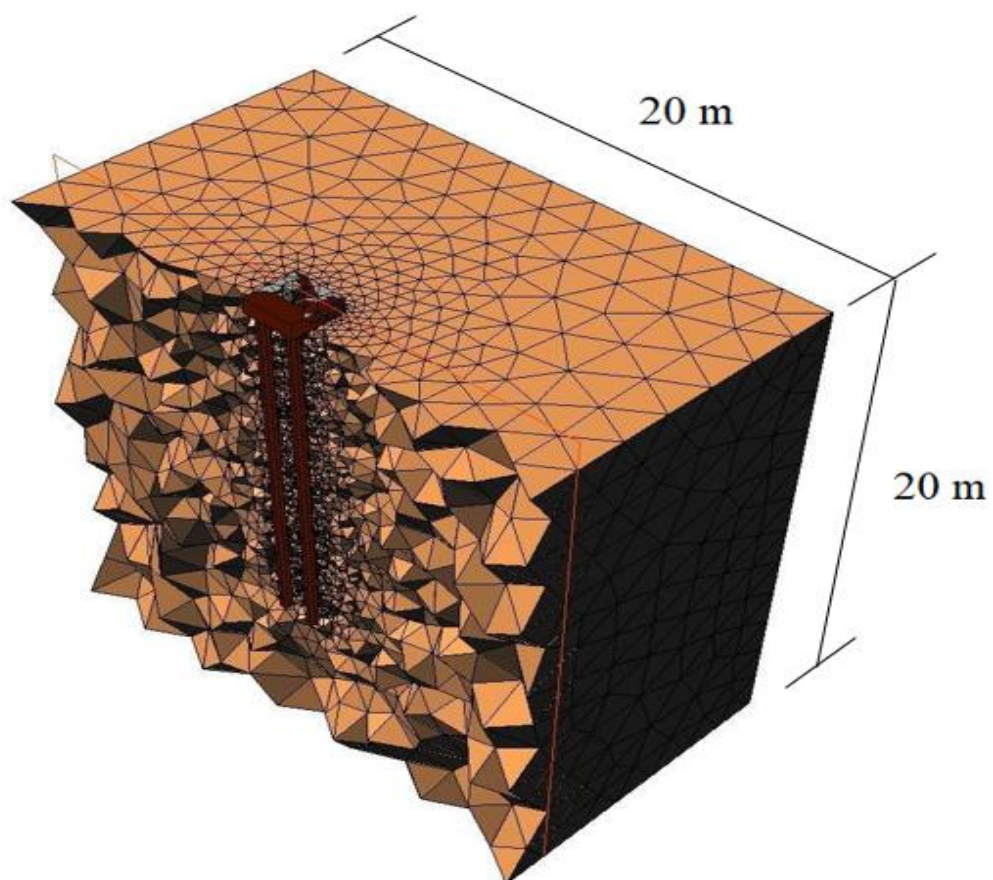
A análise numérica permitiu avaliar a distribuição de cargas entre os elementos da fundação, bem como quantificar os recalques e analisar o comportamento mecânico global do sistema, incluindo as tensões no topo das estacas.

Ressalta-se que a validação de soluções de engenharia deve envolver não apenas o dimensionamento teórico, mas também o controle executivo e a verificação do desempenho em campo, de modo a assegurar a compatibilidade entre o projeto e o comportamento real da fundação, conforme discutido por Velloso e Lopes (2010), que destacam a importância dessa verificação na validação de soluções de fundação.

Para a modelagem, utilizou-se o software Rocscience RS3 na elaboração de modelos tridimensionais das fundações, empregando o Método dos Elementos Finitos (MEF) para a resolução dos problemas geotécnicos envolvidos. O RS3 é amplamente utilizado em análises geotécnicas tridimensionais, permitindo a consideração da interação solo-estrutura, bem como a representação de não linearidades do material e condições de contorno realistas. A Figura 5 ilustra o modelo tridimensional em elementos finitos adotado.

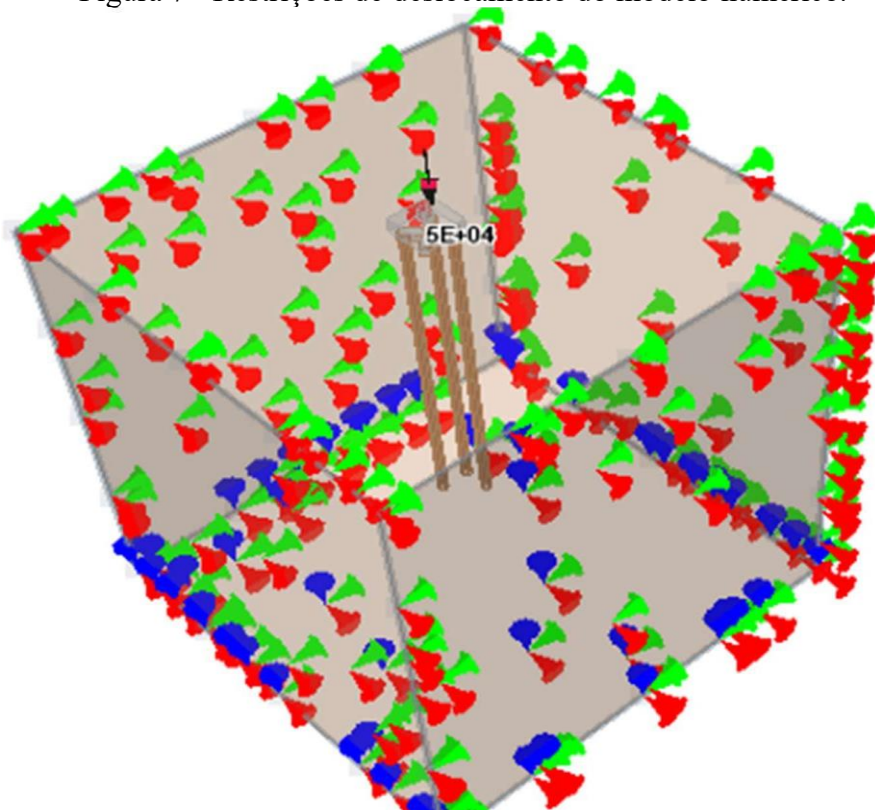
Foram utilizados elementos finitos tetraédricos de quatro nós para a discretização do domínio, resultando em uma malha suficientemente refinada para a adequada representação do comportamento mecânico do sistema. Foram aplicadas restrições de deslocamento nas três direções na base do modelo e nas direções normais às faces laterais Figura 6. Os resultados indicaram deslocamentos desprezíveis nas regiões restritas, confirmando a adequação das condições de contorno adotadas.

Figura 6 – Vista do modelo tridimensional do grupo de estacas.



Fonte: Autores (2026)

Figura 7 - Restrições de deslocamento do modelo numérico.



Fonte: Autores (2026)

O solo foi modelado segundo o critério elastoplástico de Mohr-Coulomb, enquanto o concreto armado foi considerado como material elástico linear, conforme a Lei de Hooke. O carregamento foi aplicado de forma incremental em 10 estágios, com incrementos de 10% a cada etapa.

A relação entre tensões verticais e horizontais foi definida por meio do coeficiente de empuxo em repouso (K_0), estimado a partir da expressão proposta por Jaky (1948) conforme apresentado em Albuquerque & Garcia (2020).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A avaliação numérica de tensões e recalques foi conduzida por meio do módulo *Interpret* do *software* RS3. A obtenção dos dados foi realizada por meio de ferramentas de consulta (*query*) do *software*, posicionadas a 5 cm do topo do pilar e do topo das estacas.

Essa estratégia permitiu avaliar os recalques tanto do sistema global quanto do comportamento isolado do grupo de estacas. Ao posicionar os pontos de análise diretamente sobre as estacas, minimiza-se a influência do contato bloco-solo, possibilitando uma interpretação mais específica do desempenho estrutural do sistema.

5.1 Análise do recalque

Para todas as configurações analisadas, foram obtidas curvas Carga versus Recalque, referentes à fundação convencional e à solução alternativa, apresentadas nas Figura 8 e Figura 9.

A carga de ruptura foi definida com base no critério do Eurocode, segundo o qual a ruptura é associada a um deslocamento equivalente a 10% do diâmetro da estaca. Dessa forma, as análises foram conduzidas até que o recalque atingisse o valor de 40 mm.

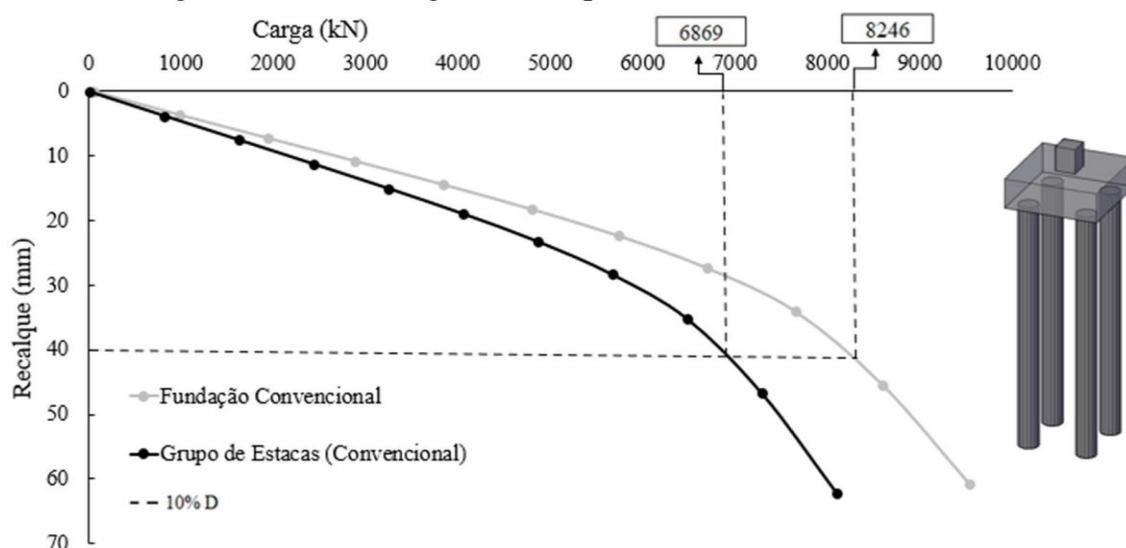
As análises foram realizadas considerando duas abordagens:

- (i) avaliação do comportamento global da fundação, incluindo a interação bloco-solo;
- (ii) análise do grupo de estacas de forma isolada, desconsiderando essa interação.

Essa distinção permite avaliar separadamente os efeitos da redistribuição de esforços e da contribuição do contato bloco-solo no desempenho do sistema.

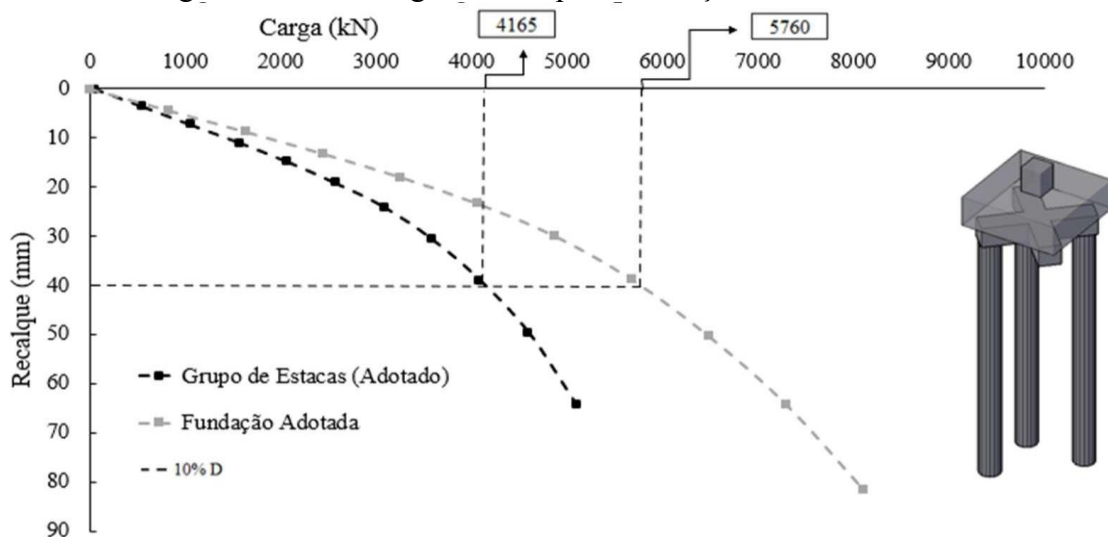
A partir das curvas obtidas, determinou-se a carga última correspondente ao recalque de 40 mm e, adotando um fator de segurança igual a 2, foi calculada a carga admissível para cada configuração.

Figura 8 - Curva carga vs recalque - Fundação convencional



Fonte: Autores (2026)

Figura 9 - Curva carga vs recalque - Fundação adotada



Fonte: Autores (2026)

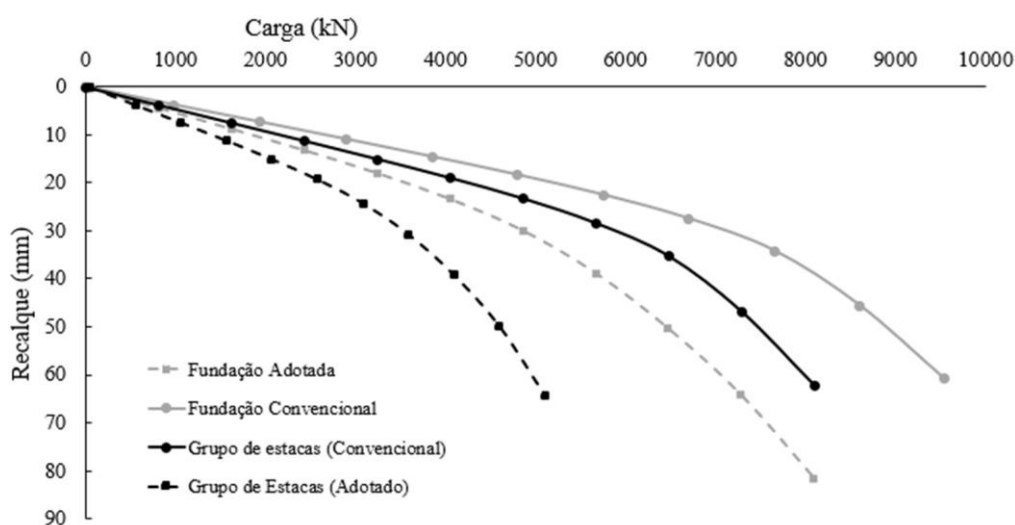
A solução adotada apresenta comportamento mais frágil, caracterizado por menor capacidade de redistribuição de esforços e menor mobilização progressiva da resistência.

Os resultados indicam que a solução adotada apresenta redução significativa na capacidade de carga quando comparada à configuração convencional, da ordem de

aproximadamente 30% para a fundação e 40% para o grupo de estacas. Observa-se ainda que a contribuição do bloco de coroamento é mais expressiva na solução adotada, evidenciando maior dependência do contato bloco-solo para a transferência de cargas. Esse comportamento indica menor eficiência estrutural do sistema, associada à redistribuição não uniforme de esforços e à menor capacidade de mobilização progressiva da resistência.

A Figura 10 apresenta uma comparação consolidada entre todas as configurações analisadas, evidenciando de forma direta a redução de capacidade de carga e a maior deformabilidade da solução adotada em relação à convencional.

Figura 10 - Resumo das curvas carga vs recalque



Fonte: Autores (2026)

O recalque associado à carga admissível foi obtido a partir das curvas carga versus recalque, conforme sintetizado na Tabela 5.

Observa-se que a solução usual de fundação, blocos com grupo simétrico de estacas, apresenta maior capacidade de carga admissível, tanto para a fundação quanto para o grupo de estacas. Além disso, a solução adotada, fundação com grupo de estacas assimétrico, apresenta redução da ordem de aproximadamente 30% na capacidade de carga admissível da fundação e cerca de 40% no grupo de estacas, quando comparada à fundação convencional.

Além disso, a solução convencional mobiliza maiores deformações até a ruptura, com valores de recalque aproximadamente 32% superiores para a fundação e 43% superiores para o grupo de estacas. Esse comportamento, no contexto desta análise, está associado a um desempenho estrutural superior no estado limite.

A análise dos resultados apresentados na Tabela 5 indica que o grupo de estacas, quando analisado isoladamente, apresenta menores valores de recalque sob a carga admissível. Esse comportamento pode ser explicado pela ausência da contribuição da compressibilidade do solo sob o bloco de coroamento, o que reduz a deformabilidade global do sistema, conforme discutido por Garcia *et al.* (2024). Na ausência de pressão de contato entre o bloco e o solo, há redução da compressibilidade do terreno subjacente, refletindo diretamente na diminuição dos recalques.

Tabela 5 - Resultado de capacidade de carga última, carga admissível, recalque e rigidez

Fundações	$Q_{ruptura}$ [kN]	Q_{adm} [kN]	S_c [mm]	K [kN/mm]
Fundação Adotada	5.760	2.880	12,49	231
Fundação Convencional	8.246	4.123	18,36	225
Grupo de Estacas (Adotado)	4.166	2.083	8,68	240
Grupo de Estacas (Convencional)	6.870	3.435	15,19	227

Legenda: $Q_{ruptura}$ - carga de ruptura obtida pela curva carga vs recalque da análise numérico correspondente ao recalque de 10% do diâmetro da estaca.; Q_{adm} - carga admissível para uma FS igual a 2; S_c - Recalque correspondente a carga admissível; K- rigidez.

Fonte: Autores (2026)

A partir dos resultados de carga última e carga admissível obtidos por meio das análises numéricas (Tabela 5) e das estimativas pelos métodos semiempíricos (Tabela 4), foi possível avaliar o desempenho das diferentes configurações de fundação.

Para fins comparativos, foi avaliada a eficiência das fundações analisadas, sendo esta a razão entre a carga de ruptura obtida numericamente para cada configuração e a capacidade última de referência do sistema original, calculada como a soma das capacidades últimas de quatro estacas isoladas estimadas por métodos semiempíricos. Considerando a capacidade última média de uma estaca igual a 2.152 kN, conforme calculado pelos metodos semiempiricos, obteve-se uma capacidade de referência de 8.608 kN.

Os resultados apresentados na Tabela 6 indicam que a fundação convencional apresenta eficiência de 96%, evidenciando elevada capacidade de mobilização da resistência da fundação convencional aliada ao desempenho real em que o contato bloco-solo contribui para a capacidade de carga do sistema. Por outro lado, a solução adotada apresenta redução significativa desse índice, refletindo a perda de desempenho decorrente da redistribuição não

uniforme de esforços.

Observa-se ainda que os valores obtidos para os grupos de estacas são inferiores aos das respectivas fundações, evidenciando a importância da contribuição do contato bloco-solo na capacidade resistente global do sistema.

Adicionalmente, foi avaliada a contribuição do bloco de coroamento por meio da razão entre a capacidade de carga da fundação e a capacidade do grupo de estacas. Os resultados indicam que, para a solução convencional, o bloco contribui com um aumento de aproximadamente 20% na capacidade de carga do sistema, enquanto para a solução adotada essa contribuição é mais significativa, da ordem de 38%, evidenciando maior dependência do contato bloco-solo para a transferência de cargas, devido a menor quantidade de estacas que compõem o grupo.

Esse comportamento reforça que a solução adotada apresenta menor eficiência estrutural e geotécnica, sendo parcialmente compensada pela atuação do bloco de coroamento.

Tabela 6 – Análise da Eficiência das fundações em relação aos métodos de cálculo

Fundações	Q_{RUP} [kN]	Q_{RUP_MET} [kN]	Eficiência [%]
Fundação Adotada	5.760		67%
Fundação Convencional	8.246	8.608	96%
Grupo de Estacas (Adotado)	4.166	($Q_{ref} = 4 \times 2.152$ kN)	48%
Grupo de Estacas (Convencional)	6.870		80%

Legenda: Q_{ref} - carga de ruptura obtida pelos métodos semiempíricos; $Q_{ruptura}$ - carga de ruptura obtida na análise numérica; Q_{RUP_MET} - capacidade última de referência, correspondente à soma das capacidades de quatro estacas isoladas estimadas por métodos semiempíricos; Eficiência - razão entre $Q_{ruptura}$ e Q_{RUP_MET} .

Fonte: Autores (2026)

Os resultados apresentados na Tabela 6 evidenciam diferenças significativas no desempenho das configurações analisadas em termos de eficiência estrutural. A fundação convencional apresentou eficiência próxima à unidade (96%), indicando elevada capacidade de mobilização da resistência do sistema, com comportamento compatível ao somatório das capacidades individuais das estacas. Em contrapartida, o grupo de estacas convencional apresentou eficiência de 80%, refletindo as perdas associadas à interação entre estacas e à influência do maciço de solo. Para a solução adotada, observa-se uma redução expressiva da eficiência, tanto para a fundação (67%) quanto para o grupo de estacas (48%), evidenciando

que a modificação do arranjo estrutural compromete significativamente a redistribuição de esforços e a mobilização dos mecanismos resistentes. Embora a presença do bloco de coroamento contribua para o aumento da capacidade global do sistema, esse efeito não é suficiente para compensar a perda de eficiência decorrente da ausência de uma das estacas e da alteração no caminho de transferência de cargas. Esses resultados indicam que a solução adotada apresenta comportamento menos eficiente e reforçam a importância da configuração geométrica e da interação solo-estrutura no desempenho de fundações profundas.

5.2 Análise do elemento adicionado

A análise do comportamento do elemento em “X” foi realizada considerando a execução de duas vigas de concreto armado dispostas de forma cruzada, interligando as estacas remanescentes.

Admite-se que uma das vigas apresenta comportamento de viga com balanço, enquanto a outra atua como viga biapoiada, sendo responsável por receber e redistribuir os esforços provenientes da primeira. Dessa forma, o sistema estrutural funciona como um mecanismo de transferência de cargas entre os apoios.

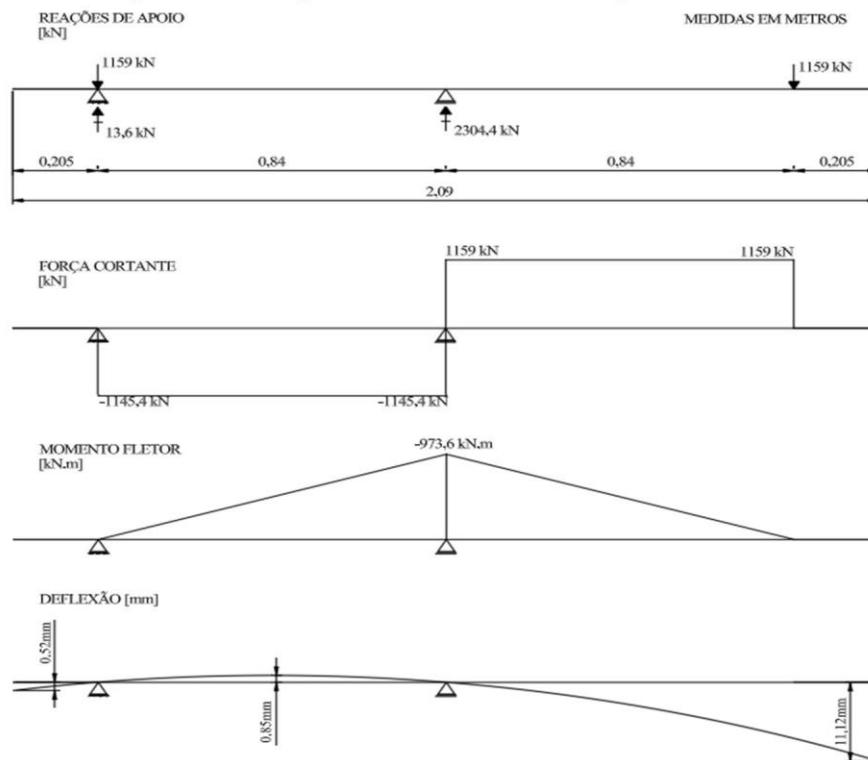
Com base nas cargas estimadas por métodos semiempíricos (Tabela 4), foi realizada uma análise estrutural por meio do software Ftool, permitindo a obtenção dos diagramas de reações de apoio, força cortante, momento fletor e deformações, apresentados nas Figura 11 e Figura 12.

A análise da viga biapoiada coaduna para uma distribuição mais equilibrada dos esforços, com reações de apoio da ordem de 2304 kN e carregamentos aplicados de aproximadamente 1159 kN nas extremidades. O diagrama de momento fletor apresenta valor máximo de 973,6 kN·m, associado a uma deflexão máxima de 4,35 mm no vão central, caracterizando um comportamento estrutural típico e relativamente estável.

Por outro lado, a viga com balanço apresenta comportamento significativamente distinto, com forte assimetria na distribuição de esforços. Observa-se que uma das estacas recebe carga muito reduzida, da ordem de 13,6 kN, enquanto as demais concentram valores significativamente superior, evidenciando uma redistribuição não uniforme dos esforços. Ademais, os diagramas indicam que os esforços cortantes e momentos fletores são mais elevados e concentrados, com deformações assimétricas e maiores deslocamentos na extremidade em balanço, atingindo valores superiores a 11 mm. Esse comportamento evidencia

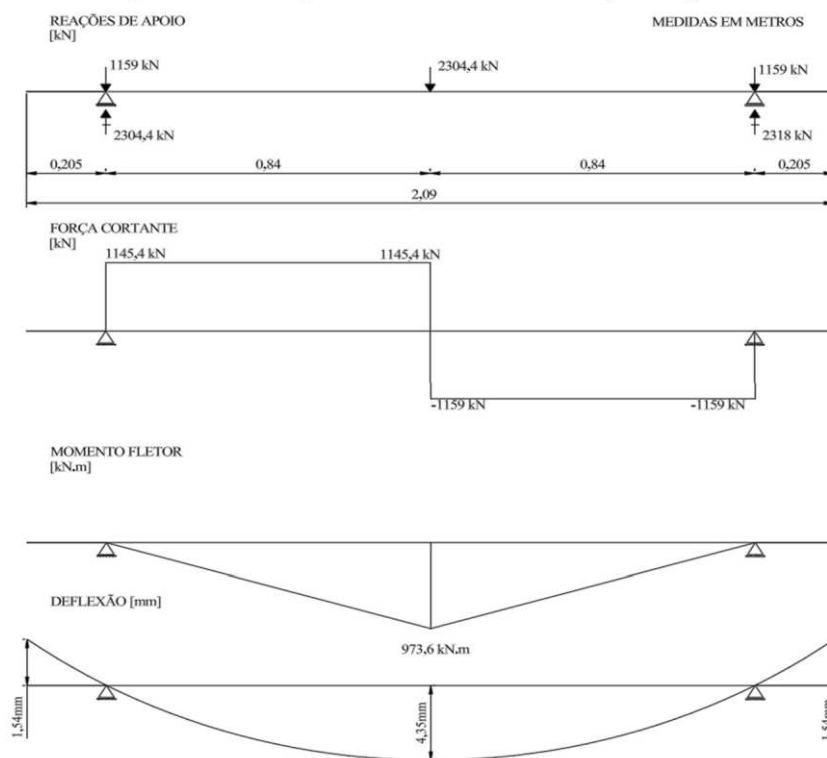
maior solicitação estrutural e menor eficiência na transferência de cargas.

Figura 11 - Diagramas de esforços da viga em balanço.



Fonte: Autores (2026)

Figura 12 - Diagrama de esforços da viga com balanço



Fonte: Autores (2026)

De forma geral, os resultados indicam que a introdução das vigas em “X” não promove uma redistribuição eficiente dos esforços entre as estacas, resultando em concentração de cargas em parte do sistema e subutilização de outros elementos. Esse efeito compromete o desempenho estrutural global da solução adotada.

Adicionalmente, a concentração de esforços em algumas estacas pode levar à mobilização de cargas próximas ou superiores aos valores admissíveis, o que, do ponto de vista normativo (ABNT NBR 6122:2022 e ABNT NBR 6118:2023), indica uma condição desfavorável em termos de segurança e desempenho.

Dessa forma, conclui-se que a solução com vigas cruzadas, embora viável sob o ponto de vista construtivo, apresenta limitações significativas quanto à eficiência estrutural e à adequada distribuição de cargas no sistema de fundação.

5.3 Comparativo entre situação adotada com situação convencional

Os resultados obtidos indicam que a fundação convencional apresenta desempenho superior em termos de capacidade de carga e resposta global do sistema. Conforme evidenciado na Tabela 6, a solução adotada apresenta redução de eficiência da ordem de aproximadamente 30% em relação à configuração convencional, indicando limitações relevantes associadas à modificação do arranjo estrutural.

A análise comparativa evidencia alterações significativas no mecanismo de transferência de cargas e no comportamento deformacional das fundações. Embora os valores de rigidez apresentem variações pouco significativas entre as configurações analisadas, observa-se redução de eficiência da ordem de aproximadamente 32% na comparação entre os grupos de estacas. Esse resultado evidencia o efeito da interação entre estacas e a influência da redistribuição de esforços no sistema.

De acordo com Randolph (1994) e Poulos (2001), a interação entre bloco, estacas e solo desempenha papel fundamental no comportamento de fundações profundas, especialmente quando o bloco contribui na transferência de cargas. Nesse contexto, a simplificação dessa interação, como observado na solução adotada, compromete a mobilização dos mecanismos resistentes e resulta em desempenho inferior.

A análise das cargas admissíveis reforça esse comportamento, com a fundação convencional apresentando valores mais elevados e maior capacidade de mobilização de deformações, enquanto a solução adotada atinge o estado limite com menores deslocamentos

e menor aproveitamento da resistência disponível.

A solução convencional se demonstrou superior, uma vez que apresente mobilização mais eficiente dos mecanismos de resistência, incluindo atrito lateral, resistência de ponta e a participação do contato bloco-solo. Por outro lado, a solução adotada, ao alterar o caminho de transferência de cargas, promove uma redistribuição não uniforme dos esforços, concentrando solicitações em parte das estacas e reduzindo a eficiência global do sistema de fundação.

Embora a solução adotada apresente rigidez ligeiramente superior, essa característica não se traduz em melhor desempenho estrutural, uma vez que o sistema atinge o estado limite com menor capacidade de carga e menor deformabilidade última. Isso indica um comportamento mais rígido, porém menos eficiente.

Dessa forma, conclui-se que a fundação convencional apresenta comportamento mais robusto e adequado para fins de dimensionamento, ao combinar maior capacidade de carga admissível com maior capacidade de deformação, enquanto a solução adotada apresenta desempenho inferior, associado à perda de eficiência estrutural e à redistribuição inadequada dos esforços.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade técnica e estrutural de uma solução não convencional adotada em uma obra de fundação, na qual, devido a um erro de execução, uma das estacas foi descartada e substituída por um sistema de vigas diagonais em “X”, interligando as estacas remanescentes. Por meio de análise numérica tridimensional utilizando o software RS3, foi possível comparar o comportamento dessa solução com o de uma fundação convencional composta por quatro estacas, avaliando a distribuição de esforços, a capacidade de carga, os recalques e a rigidez do sistema.

Os resultados indicaram que, embora a solução adotada seja tecnicamente viável sob o aspecto de capacidade de carga admitindo-se um menor fator de segurança para a fundação, seu desempenho é inferior ao da configuração convencional, tanto sob o aspecto do sistema de fundação quanto como grupo de estacas. Observou-se redução significativa na capacidade de carga admissível e na eficiência do sistema, além de alterações na distribuição de esforços, com maior concentração de cargas em parte das estacas. Esse comportamento está associado à modificação do mecanismo de transferência de cargas, resultando em menor mobilização da resistência global da fundação.

Adicionalmente, verificou-se que a solução adotada atinge o estado limite com menores deslocamentos, indicando menor capacidade de deformação e menor margem de segurança. Embora apresente rigidez ligeiramente superior em alguns casos, essa característica não se traduz em melhor desempenho estrutural.

Dessa forma, conclui-se que a fundação convencional, composta por quatro estacas disposta simetricamente, apresenta comportamento mais eficiente e estável, sendo mais adequada para fins de dimensionamento que garanta a segurança da edificação. A solução alternativa deve ser adotada com cautela, sendo imprescindível a realização de análises específicas que considerem a redistribuição de esforços e a interação solo-estrutura.

Por fim, o estudo reforça a importância da configuração geométrica e da interação entre solo, estacas e bloco de coroamento no desempenho de fundações profundas, destacando que alterações no sistema original podem comprometer significativamente a eficiência e a segurança da estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. . ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ (in Portuguese): [s.n.], 2019.

ALBUQUERQUE, Paulo José Rocha De; GARCIA, Jean Rodrigo. *Engenharia de fundações*. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC-GEN, 2020.

AOKI, Nelson; VELLOSO, Dirceu de Alencar. An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. 1975, Buenos Aires: ICSMFE, 1975. p. 367–376.

BEZERRA, J. E. *Estudo do comportamento de fundações em radier estaqueado: conceitos e aplicações*. 2003. 213 f. 2003.

CODMIG/IGC-CPMTC-UFMG. *Projeto Triângulo Mineiro, folha Uberlândia SE.22-Z-B-VI escala 1:100.000*. . Belo Horizonte: [s.n.], 2017.

DÉCOURT, L. A ruptura de fundações avaliada com base no conceito de rigidez. *Seminário de Engenharia de Fundações Especiais - SEFE III*, v. 1, p. 215–224, 1996.

DÉCOURT, Luciano; QUARESMA, Arthur Rodrigues. Capacidade de carga de estacas a partir de valores SPT. 1978, Rio de Janeiro: ABMS, 1978. p. 45–54.

GARCIA, Jean Rodrigo *et al.* Analysis of the behavior of piled foundations in unconventional soil. *Engineering Structures*, v. 319, p. 118832, nov. 2024. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029624013944>>.

KULHAWY, F.H.; MAYNE, P.W. *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*. New York: Electric Power Research Institute, 1990.

POULOS, H. G. Piled raft foundations: design and applications. *Géotechnique*, v. 51, n. 2, p. 95–113, mar. 2001. Disponível em: <<http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/geot.2001.51.2.95>>.

RANDOLPH, M F. Design Methods for pile groups and pile rafts. 1994, New Delhi: ISSMGE, 1994. p. 61–82.

TEIXEIRA, A.H.; GODOY, N.S. *Análise, Projeto e Execução de Fundações Rasas. Fundação: Teoria e Prática*. São Paulo: Ed. Pini, 1996.

TEIXEIRA, Alberto Henriques. *Análise, Projeto e Execução de Fundações*. 1996, Rio de Janeiro: ABNT: ABMS, 1996. p. 1–18.

VELLOSO, DIRCEU DE ALENCAR; LOPES, FRANCISCO DE REZENDE. *Fundações: Critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas*. . Rio De Janeiro: [s.