

Universidade Federal de Uberlândia
Campus Santa Mônica

Faculdade de Engenharia Civil

Natália Yamanaka

**OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE FUNDAÇÃO EM CONSTRUÇÕES
POPULARES: UM 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
2025

OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE FUNDAÇÃO EM CONSTRUÇÕES POPULARES: UM ESTUDO DE CASO

Natália Yamanaka ¹

Jean Rodrigo Garcia ²

RESUMO

As fundações em habitações populares brasileiras frequentemente enfrentam problemas devido a solos colapsíveis, que sofrem deformações significativas sob variações de umidade, resultando em trincas e recalques diferenciais. Este trabalho analisa a eficácia do radier estaqueado como alternativa à viga baldrame tradicional, visando otimizar custos, segurança e desempenho estrutural em solos de baixa capacidade de suporte. Por meio de modelagem tridimensional no *software RS3*, com base no Método dos Elementos Finitos, foram simulados dois cenários: um Projeto Convencional(viga baldrame + 12 estacas) e um otimizado (radier + 9 estacas). Os resultados demonstraram que o radier estaqueado distribui tensões de forma mais homogênea e diminui a espessura da fundação, além de apresentar vantagens ambientais, como menor consumo de concreto e redução de resíduos. Comparado à viga baldrame, o sistema otimizado mostrou-se mais eficiente economicamente e tecnicamente viável, atendendo aos critérios das normas ABNT NBR 6118, ABNT NBR 6120 e ABNT NBR 6122. Conclui-se que o radier estaqueado é uma solução viável para construções populares, combinando desempenho estrutural, sustentabilidade e redução de custos.

Palavras-chave: Radier estaqueado; Viga baldrame; Fundações otimizadas; Construções populares; Análise numérica.

ABSTRACT

Foundations in low-income Brazilian housing often face challenges due to collapsible soils, which undergo significant deformations under moisture variations, leading to cracks and differential settlements. This study evaluates the effectiveness of a piled raft system as an alternative to traditional strip footings, aiming to optimize cost, safety, and structural performance in low-bearing-capacity soils. Using 3D modeling in RS3 *software*, based on Finite Element Method, two scenarios were simulated: a conventional design (strip footing + 12 piles) and an optimized design (piled raft + 9 piles). The results demonstrated that the piled raft distributes stresses more evenly, reduces foundation thickness, and offers environmental benefits, such as lower concrete consumption and reduced waste. Compared to strip footings, the optimized system proved more cost-effective and technically superior, complying with the Brazilian standards ABNT NBR 6118, ABNT NBR 6120, and ABNT NBR 6122. The study concludes that piled rafts are a viable solution for low-income housing, combining stability, sustainability, and cost reduction.

Keywords: Piled raft; Ground beam; Optimized foundations; Low-income housing; Numerical analysis.

¹ Graduanda em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). E-mail: natalia.yamanaka@ufu.br

² Professor na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). E-mail: jean.garcia@ufu.br

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o déficit habitacional e a busca por moradias acessíveis têm motivado a adoção de soluções padronizadas na construção civil, principalmente nos programas de habitação popular. Projetos como os elaborados pela Caixa Econômica Federal visam compatibilizar custo e qualidade, permitindo construções em larga escala e com prazos otimizados. No entanto, a replicação desses modelos em diferentes contextos geotécnicos, muitas vezes sem estudos detalhados do subsolo, pode comprometer o desempenho das fundações e, consequentemente, a segurança das edificações.

Esse risco se agrava em regiões tropicais, onde é comum a ocorrência de solos colapsáveis, que são definidos como aqueles que apresentam uma brusca redução de volume quando submetidos a acréscimos de umidade, sob a ação de carga externa. O fenômeno é intensificado pelos ciclos climáticos típicos dessas regiões, com alternância entre períodos secos prolongados e chuvas intensas, o que altera o teor de umidade do solo e favorece a instabilidade estrutural (BRAND et al., 1972). Como ressalta Hamdy (2024, p. 401), “a identificação de solos colapsáveis durante a exploração de campo é crucial para prevenir problemas estruturais como trincas e danos em edifícios”. A presença desses solos, aliada à ausência de investigações geotécnicas adequadas, pode ocasionar recalques diferenciais significativos, comprometendo o Estado Limite de Serviço (ELS), afetando o conforto dos moradores e, em casos extremos, podendo evoluir para o Estado Limite Último (ELU). Conforme Clemence e Finbarr (1981), projetos executados sobre solos colapsáveis requerem cuidados especiais de dimensionamento, e a negligência quanto a isso expõe a população a riscos estruturais desnecessários.

Diante desse cenário, o radier estaqueado surge como uma alternativa eficaz para mitigar os recalques e otimizar o dimensionamento de fundações em solos com baixa capacidade de suporte (MANDOLINI, 2003). Essa técnica, que combina um radier (fundação rasa) com estacas (fundação profunda), permite reduzir a espessura do radier e o efeito de punção, além de aumentar a capacidade de carga e controlar recalques diferenciais (GARCIA, 2019). De acordo com Zeevaert (1957), o principal objetivo da inserção de estacas em fundações rasas é a redução dos deslocamentos verticais a valores aceitáveis, sendo que a interação entre o radier, as estacas e o solo proporcionam um comportamento mais eficiente do que o de fundações constituídas apenas por estacas ou radier isoladamente (MANDOLINI, 2003).

A complexidade dessa interação solo-estrutura merece atenção especial, pois envolve a transferência de cargas entre os elementos estruturais e o solo, sendo influenciada pelo atrito lateral e pela resistência de ponta das estacas, bem como pela contribuição do contato bloco-solo (JANDA et al., 2009; RANDOLPH, 1994). Como observam França e Rodrigo (2023), a presença do radier altera significativamente a distribuição de tensões e deslocamentos no solo, modificando o comportamento das estacas em comparação a estacas isoladas ou em grupo sem radier. Lopes e Garcia (2024) demonstra, em sua pesquisa, que o somatório das capacidades de carga dos elementos isolados difere daquela do radier estaqueado, evidenciando que essas interações modificam o comportamento da fundação do tipo radier estaqueado. Esse compartilhamento de carga entre o radier e as estacas é um aspecto fundamental, cuja proporção depende de diversos fatores, como o comprimento e o espaçamento das estacas, a espessura do radier e as propriedades do solo (MANDOLINI et al., 2005; ATES; SADOGLU, 2022).

A análise numérica tridimensional, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), permite simular com precisão o comportamento das estruturas sob diversas condições de carregamento (JANDA et al., 2009). Estudos demonstram que a contribuição do radier para o suporte de carga pode chegar a até 70% em alguns casos (MANDOLINI et al., 2005), corroborado por pesquisas que evidenciaram contribuições significativas do contato radier-solo na capacidade total da fundação, chegando até 36% em análises numéricas e 21% em ensaios experimentais em solos brasileiros (GARCIA, 2015). Trabalhos posteriores destacaram ainda que a consideração integrada do radier com estacas resulta em reduções significativas nos recalques totais e diferenciais, além de ganhos substanciais de capacidade de carga comparados a métodos convencionais (MACHADO; GARCIA, 2020). Em solos colapsíveis, especificamente, a importância da consideração adequada das condições de umidade e pré-carregamento também foi destacada, mostrando reduções consideráveis na resistência do solo quando saturado (PEREIRA; OLIVEIRA; GARCIA, 2024). Portanto, é evidente a importância de uma abordagem integrada e adaptada às condições geotécnicas locais no dimensionamento.

Sob a perspectiva ambiental, o radier estaqueado apresenta vantagens em relação à viga baldrame tradicional. Enquanto sistemas convencionais demandam maior volume de escavações, consumo de formas de madeira e geração de resíduos de concreto, o radier estaqueado otimiza o uso de materiais, reduzindo tanto o desperdício quanto o impacto

ambiental da construção (ARAÚJO, 2002). Essa eficiência material se alinha com os princípios da construção sustentável, pois minimiza a pegada ecológica da fundação - desde a extração de recursos até a gestão de resíduos - sem comprometer o desempenho estrutural, tornando-o uma solução tecnicamente viável e ambientalmente mais responsável.

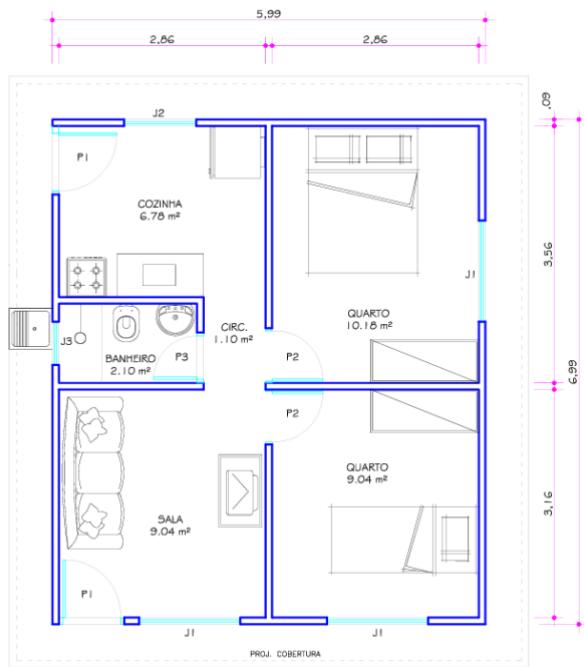
2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho visa analisar os aspectos técnicos das fundações profundas com o uso combinado de radier e estacas estrategicamente posicionadas, avaliando o impacto da otimização do projeto para uma construção popular localizada em Uberlândia (MG). Para isso, foi adotada uma abordagem numérica baseada no Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando modelagem tridimensional no *software* RS3 da Rocscience, para simular o comportamento estrutural sob diversas condições de carregamento e interação solo-estrutura. Esse arranjo busca otimizar o compartilhamento de carga entre o radier e as estacas, promovendo uma distribuição mais equilibrada das tensões no solo e aumentando a eficiência estrutural.

O objetivo é comparar o desempenho da fundação entre um Projeto Convencional e um Projeto Otimizado com o uso de radier e estacas, evidenciando melhorias em termos de segurança, estabilidade e eficiência.

Além disso, serão analisados os impactos econômicos e ambientais, ressaltando os benefícios da otimização no contexto de construções populares. Para a análise, adotou-se como referência o projeto padrão de casas populares de 42m² da Caixa Econômica Federal, representado na Figura 1

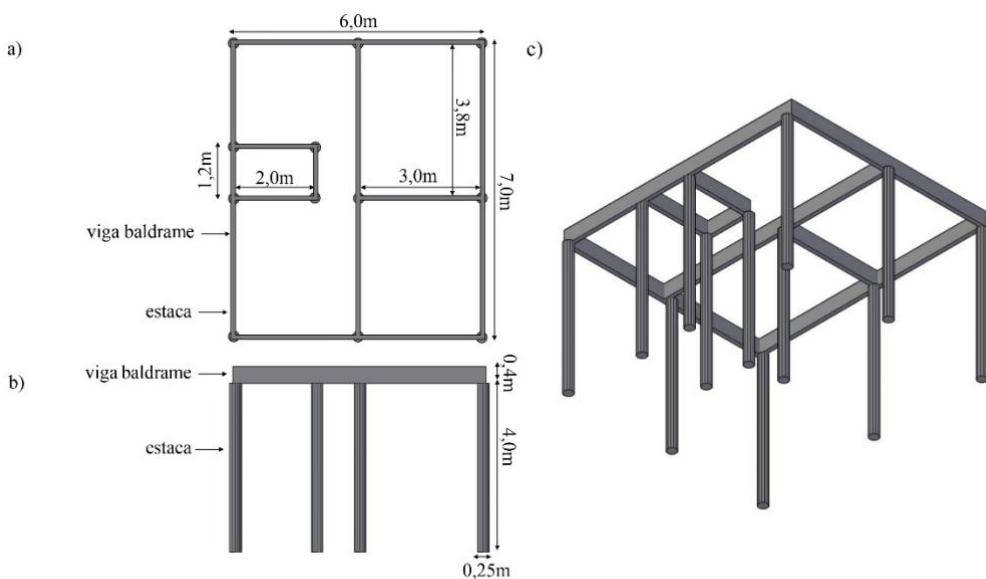
Figura 1 – Planta baixa do modelo habitacional padrão Caixa



Fonte: Caixa Econômica Federal. Projeto Casa 42m². Disponível em:
https://www.caixa.gov.br/Downloads/banco-projetos-projetos-HIS/casa_42m2.pdf. Acesso em:
 02 abr. 2025.

A fundação do Projeto Convencional é composta por viga baldrame e 12 estacas posicionadas no encontro de paredes para garantir maior estabilidade estrutural e melhor distribuição das cargas, a qual está representada pela Figura 2.

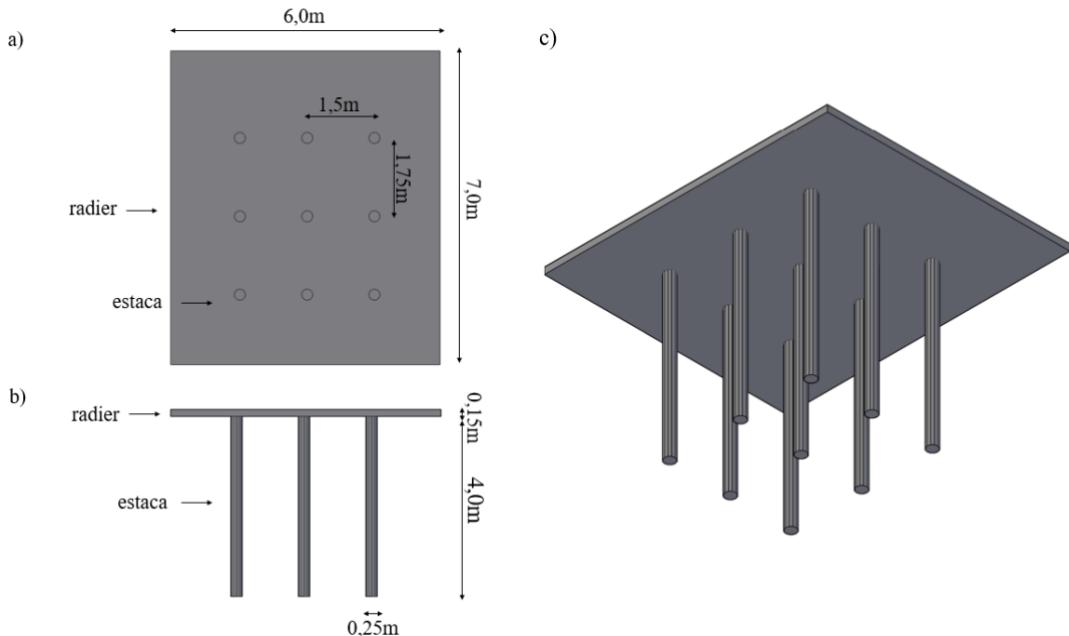
Figura 2 – Vista superior (a), frontal (b) e 3D (c) do Projeto Convencional



Fonte: Autores (2025)

A fundação do Projeto Otimizado é composta por radier e 9 estacas posicionadas de forma equidistante, o que garante uma distribuição uniforme das cargas e maior eficiência estrutural, a qual está representada pela Figura 3.

Figura 3 – Vista superior (a), frontal (b) e 3D (c) do Projeto Otimizado



Fonte: Autores (2025)

Os parâmetros geotécnicos, como: peso específico, coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade, coesão e ângulo de atrito, foram obtidos dos resultados de ensaios de carregamento estático de estacas escavadas em solo tropical, conforme apresentado por Oliveira e Garcia (2023).

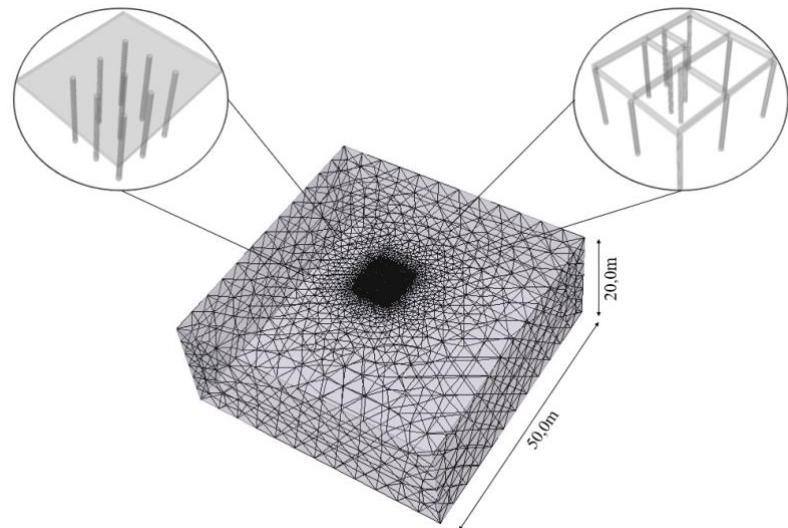
Tabela 1 – Propriedades dos materiais

Material	Peso específico (kN/m ³)	Coeficiente de Poisson	Módulo de elasticidade (kPa)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Solo	16	0,35	12000	9,4	26,4
Concreto	25	0,2	20000000	450	45

Fonte: Autores (2025)

No software RS3 não é possível considerar o solo como um todo, consequentemente, é modelada uma parcela representativa do solo. As condições de contorno foram estabelecidas em um volume de 50m x 50m x 20m, conforme Figura 4.

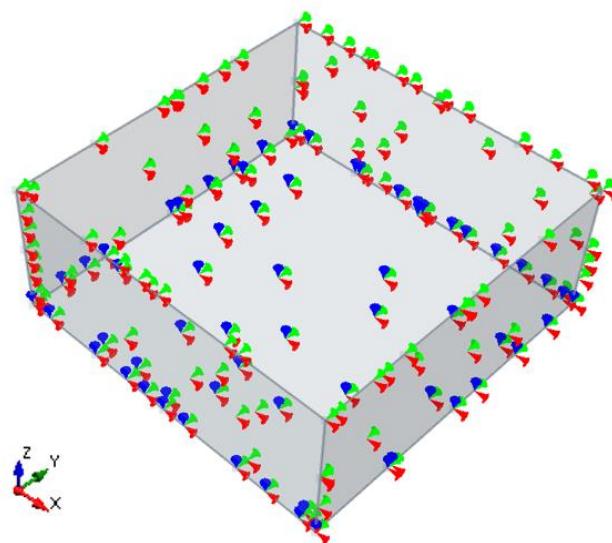
Figura 4 – Representação da malha do solo



Fonte: Autores (2025)

Para garantir a convergência numérica, os movimentos das faces laterais foram restringidos em X e Y, e os movimentos da face inferior em X, Y e Z, ilustrado na Figura 5. Essa restrição é essencial para evitar deslocamentos incompatíveis com a realidade, garantindo que a resposta do solo às cargas aplicadas seja coerente, além de manter a precisão e a confiabilidade dos resultados.

Figura 5 – Representação das restrições do solo



Fonte: Autores (2025)

A norma ABNT NBR 6120 – Ações para o cálculo de estruturas de edificações foi utilizada para estimar o peso próprio da estrutura, especificado conforme Tabela 3. Para as cargas permanentes, foram consideradas: laje com espessura de 0,08 m, alvenaria com altura de 2,6 m e espessura de 0,12 m (0,09 m do bloco + 0,03 m de reboco), e cobertura de telha cerâmica com estrutura de madeira. Para a carga accidental, considerou-se o acesso para manutenção. Não foram consideradas a carga hidráulica da caixa d’água, por se tratar de elemento externo à projeção da fundação, e a carga do contrapiso, uma vez que este é apoiado diretamente sobre o solo.

Tabela 2 – Cargas Estimadas da Superestrutura

Item	Carga (kN)
Laje	84,0
Alvenaria	268,6
Cobertura	58,6
Acidental	63,0
Total	474,3

Fonte: Autores (2025)

A fim de determinar a aplicação da carga em cada tipo de fundação, foi considerada a distribuição do peso próprio da estrutura sobre a área de contato com o solo.

- Radier: A carga total da estrutura foi dividida pela área total do radier, o qual possui uma dimensão de $6m * 7m$, resultando em uma área de $42m^2$. Dessa forma, a carga aplicada ao radier foi obtida por:

$$\frac{\text{Carga Total}}{\text{Área do Radier}} = \frac{474,3\text{kN}}{42\text{m}^2} = 11,29 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

- Viga Baldrame: Considerou-se a distribuição da carga ao longo do perímetro da viga baldrame. O comprimento total da viga foi de 41m, com uma espessura de 0,15m, resultando em uma área de contato de:

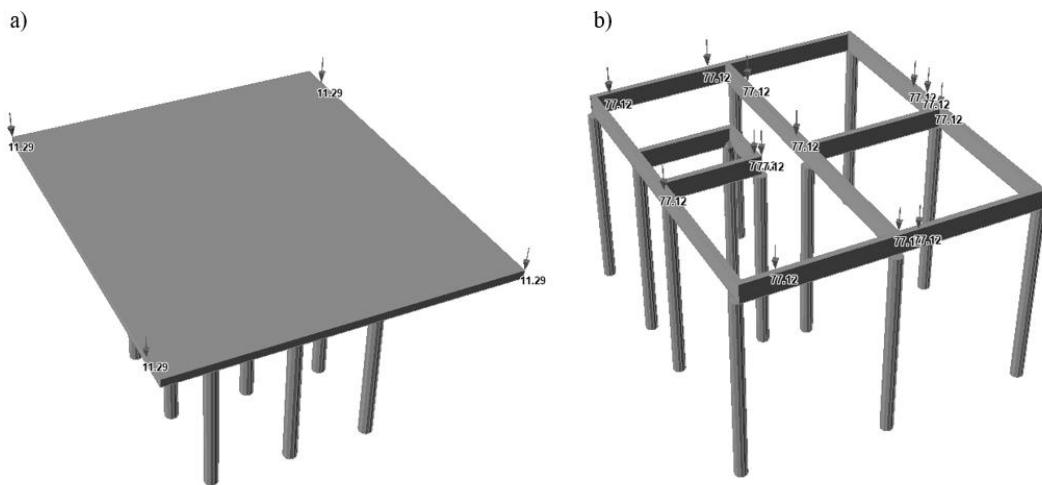
$$41\text{m} * 0,15\text{m} = 6,15 \text{ m}^2$$

Assim, a carga aplicada à viga baldrame foi calculada como:

$$\frac{\text{Carga Total}}{\text{Área da Viga Baldrame}} = \frac{474,3\text{kN}}{6,15\text{m}^2} = 77,12 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

A Figura 6 ilustra a distribuição das cargas aplicadas em cada fundação, a qual permite uma análise comparativa da distribuição das tensões e seus impactos estruturais.

Figura 6 – Aplicação da carga



Fonte: Autores (2025)

Para a visualização dos resultados no modelo tridimensional, foi necessária a adição de um *liner*, que consiste em um comando do software utilizado para delimitar o plano de corte onde os resultados serão exibidos. Esse plano foi inserido na metade da fundação: na metade da espessura do radier e na metade da altura da viga baldrame. Conforme projeto padrão da Caixa Econômica Federal, foi considerado concreto C20, ou seja, cujo f_{ck} é 20 MPa. Dessa forma, é possível calcular o módulo de elasticidade correspondente, conforme Equação 1.

$$E_{CI} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{Equação 1})$$

Portanto, foi calculado o módulo de elasticidade (E_{CI}) de $2,5 \cdot 10^7$ kPa. Por fim, possibilita que o *software* calcule os esforços a partir destes dados de entrada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

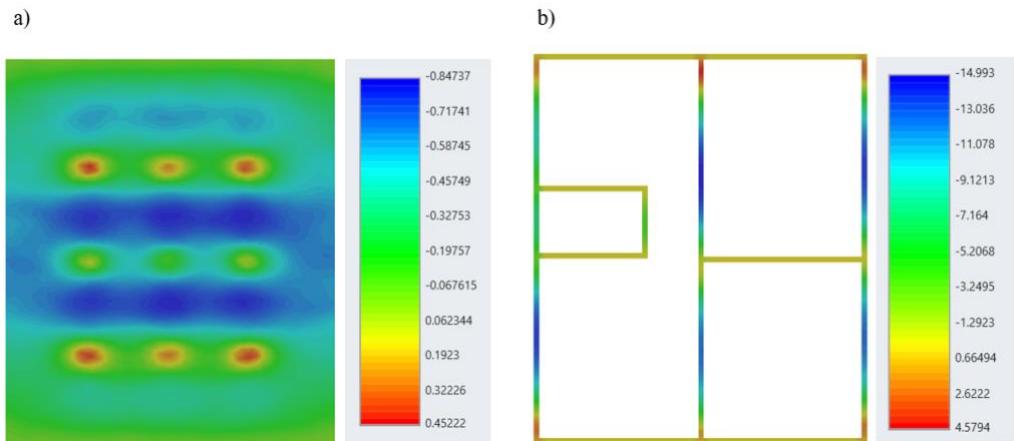
3.1. ANÁLISE ESTRUTURAL

Os resultados obtidos utilizam um gráfico de intensidade de cor, no qual as variações cromáticas indicam a magnitude dos momentos fletores e forças cortantes ao longo da fundação. As regiões com cores mais quentes (vermelho, laranja e amarelo) representam áreas de maior solicitação estrutural, enquanto as cores mais frias (verde e azul) indicam zonas com menores esforços. Essa abordagem gráfica permite uma

interpretação visual rápida e intuitiva, facilitando a comparação entre o Projeto Otimizado (a) e o Projeto Convencional(b).

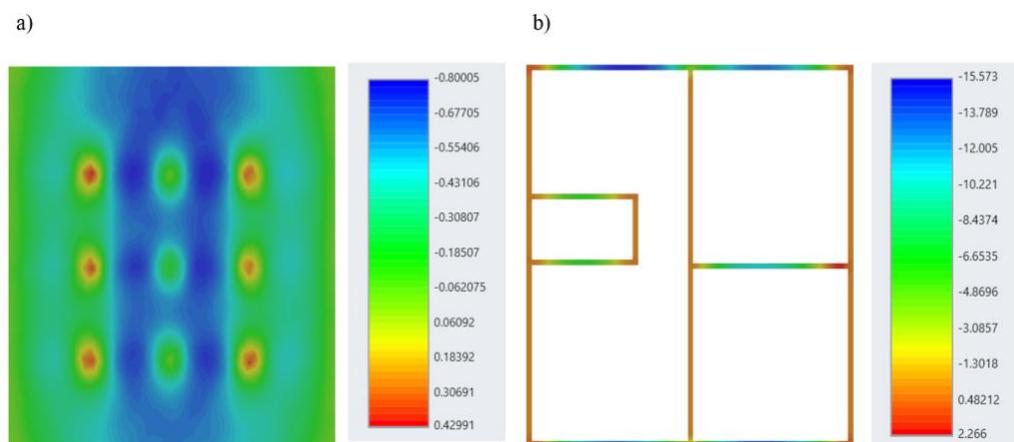
A seguir, são apresentadas as imagens correspondentes a cada análise realizada, evidenciando as diferenças na distribuição dos esforços entre os modelos estudados.

Figura 7 – Momento Fletor em X (kN.m/m)



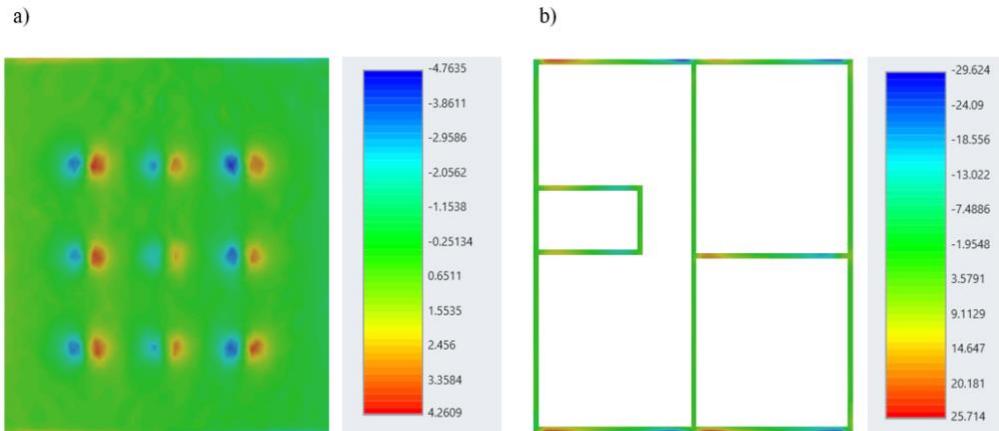
Fonte: Autores (2025)

Figura 8 – Momento Fletor em Y (kN.m/m)



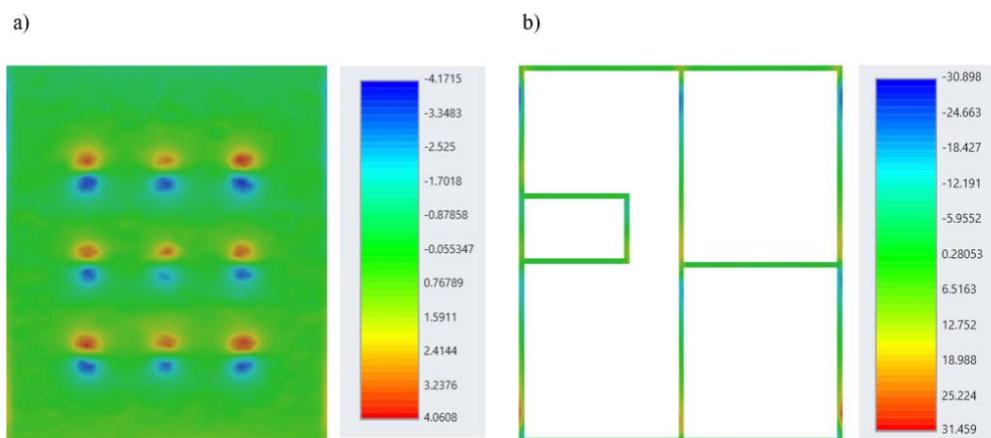
Fonte: Autores (2025)

Figura 9 – Força Cortante em XZ (kN/m)



Fonte: Autores (2025)

Figura 10 – Força Cortante em YZ (kN/m)



Fonte: Autores (2025)

Na análise estrutural entre o Projeto Otimizado e o projeto convencional, foi realizada uma análise quantitativa das reduções nos momentos fletores máximos e forças cortantes máximas. A Tabela 3 apresenta os valores obtidos para ambos os modelos.

Tabela 3 – Esforços máximos

	Projeto Otimizado	Projeto Convencional
Momento Fletor Máximo em X (kN.m/m)	0,85	14,99
Momento Fletor Máximo em Y (kN.m/m)	0,80	15,57
Força Cortante Máxima em XZ (kN/m)	4,76	29,62
Força Cortante Máxima em YZ (kN/m)	4,17	31,46

Fonte: Autores (2025)

Os resultados indicam reduções significativas nos esforços atuantes na estrutura quando o Projeto Otimizado é adotado. O momento fletor máximo sofreu uma redução superior a 94%, demonstrando uma distribuição mais eficiente dos esforços e menor exigência estrutural. As forças cortantes também apresentaram uma expressiva diminuição, atingindo reduções de 83,93% no plano XZ e 86,75% no plano YZ.

Essa otimização estrutural evidencia a eficácia do modelo adotado na redistribuição dos esforços, promovendo um melhor desempenho da fundação e potencializando ganhos em termos de economia de material e segurança estrutural. Assim, os dados reforçam a viabilidade da aplicação do Projeto Otimizado como uma solução mais eficiente para construções populares.

3.2. ANÁLISE FINANCEIRA

A análise financeira comparativa entre o radier estaqueado e a viga baldrame foi realizada com base nos valores obtidos através do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), considerando-se a tabela não desonerada do estado de Minas Gerais referente ao ano de 2024. Para o dimensionamento, adotaram-se as armaduras mínimas estabelecidas pelas normas vigentes, em especial a ABNT NBR 6118 (2023), para o dimensionamento estrutural, e a ABNT NBR 6122 (2022), para os critérios de projeto de fundações. O projeto convencional, representado pela viga baldrame, está detalhado na Tabela 4, enquanto o Projeto Otimizado, correspondente ao radier estaqueado, encontra-se na Tabela 5.

Tabela 4 – Orçamento Projeto Convencional

Projeto Convencional					
	Unidade	Quantitativo	Valor unitário	Valor total	
Estacas				R\$ 7.583,01	
Armação de aço CA- 50 8mm					
Aço CA-50 8 mm	kg	154,36	R\$ 8,30	R\$ 1.281,19	
Serviço de armação	kg	154,36	R\$ 9,60	R\$ 1.481,86	
Arame recozido	kg	2,00	R\$ 0,55	R\$ 1,10	
Estaca escavada Ø 25cm					
Serviço de escavação estaca Ø 25cm	m	48,00	R\$ 63,85	R\$ 3.064,80	
Concreto 20 MPa	m ³	2,36	R\$ 615,37	R\$ 1.449,93	
Serviço de lançamento concreto	m ³	2,36	R\$ 41,02	R\$ 96,65	
Serviço de arrasamento estacas	un	12,00	R\$ 17,29	R\$ 207,48	
Viga Baldrame					
Armação de aço CA-50 8mm					
Aço CA-50 8 mm	kg	105,30	R\$ 8,30	R\$ 873,99	

Serviço de armação	kg	105,30	R\$ 9,60	R\$ 1.010,88
Arame recozido	kg	2,00	R\$ 0,55	R\$ 1,10
Forma				
Forma de madeira	m ²	16,40	R\$ 37,32	R\$ 612,05
Desmoldante líquido	l	18,00	R\$ 6,15	R\$ 110,70
Serviço de forma e desforma	m ²	16,40	R\$ 102,24	R\$ 1.676,74
Serviço de escavação manual	m ³	4,92	R\$ 102,24	R\$ 503,02
Lastro de brita				
Brita 01	m ³	0,62	R\$ 129,25	R\$ 79,49
Concreto 20 MPa				
Concreto 20 MPa	m ³	2,46	R\$ 615,37	R\$ 1.513,81
Serviço de lançamento concreto	m ³	2,46	R\$ 41,02	R\$ 100,91
			Total	R\$ 14.065,69

Fonte: Autores (2025)

Tabela 5 – Orçamento Projeto Otimizado

Projeto Otimizado					
	Unidade	Quantitativo	Valor unitário	Valor total	
Estacas				R\$ 5.687,25	
Armação de aço CA-50					
Aço CA-50 8 mm	kg	115,77	R\$ 8,30	R\$ 960,89	
Serviço de armação	kg	115,77	R\$ 9,60	R\$ 1.111,39	
Arame recozido	kg	1,50	R\$ 0,55	R\$ 0,83	
Estaca escavada Ø 25cm					
Serviço de escavação estaca Ø 25cm	m	36,00	R\$ 63,85	R\$ 2.298,60	
Concreto 20 MPa	m ³	1,77	R\$ 615,37	R\$ 1.087,45	
Serviço de lançamento concreto	m ³	1,77	R\$ 41,02	R\$ 72,49	
Serviço de arrasamento estacas	un	9,00	R\$ 17,29	R\$ 155,61	
Radier				R\$ 5.683,59	
Serviço de regularização de terreno					
com compactação	m ²	42,00	R\$ 0,69	R\$ 28,98	
Lastro de Brita	m ³	4,20	R\$ 129,25	R\$ 542,85	
Lona	m ²	42,00	R\$ 2,05	R\$ 86,10	
Tela Armada	m ²	42,00	R\$ 21,20	R\$ 890,40	
Concreto Usinado 20MPa	m ³	6,30	R\$ 615,37	R\$ 3.876,83	
Lançamento de concreto	m ²	6,30	R\$ 41,02	R\$ 258,43	
			Total	R\$ 11.370,84	

Fonte: Autores (2025)

Nota-se que o Projeto Otimizado (radier estaqueado) apresentou um custo total de R\$ 11.370,84, enquanto o Projeto Convencional(viga baldrame) totalizou R\$ 14.065,69, representando uma redução de 19,15% nos totais. Essa vantagem econômica decorre principalmente de quatro fatores:

1. Redução de 25% no número de estacas (de 12 para 9 unidades), possibilitada pela maior eficiência do radier na distribuição de cargas, reduzindo o custo de R\$ 7.583,01 para R\$ 5.687,25 (-25%);
2. Economia significativa na armação, com redução de R\$ 1.685,24, sendo R\$ 4.647,92 no Projeto Convencional (R\$ 2.763,05 em estacas + R\$ 1.884,87 no baldrame) para R\$ 2.962,68 no Projeto Otimizado. Essa economia foi alcançada devido à redistribuição mais eficiente das cargas.
3. Eliminação dos componentes típicos do sistema de baldrame, como formas, lastro de brita e serviços associados, reduzindo custos e simplificando a execução;
4. Racionalização dos serviços de escavação e concretagem, com reduções de R\$ 1.449,93 para R\$ 1.087,45 na escavação de estacas e de R\$ 304,13 para R\$ 258,43 na concretagem, além de contribuir significativamente para a redução do tempo de execução desses serviços.

Sendo assim, tendo em vista os resultados supracitados, é válido afirmar que o Projeto Otimizado revelou-se promissor na redução de custos e racionalização dos serviços, mantendo a segurança estrutural da fundação. A eliminação de componentes do sistema convencional e a eficiência do radier na redistribuição de cargas permitiram otimizar o uso de materiais e reduzir a necessidade de escavações e concretagens adicionais.

Com base nisso, foi viável simplificar a análise e aplicação da metodologia proposta, permitindo sua replicação em outros cenários estruturais com características semelhantes, como em casas populares.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo analisar a viabilidade técnica e econômica da otimização de fundações em construções populares, comparando o sistema convencional de viga baldrame com estacas e o sistema otimizado de radier estaqueado. Utilizando como referência o projeto padrão da Caixa Econômica Federal para habitações de 42 m², foram realizadas simulações numéricas tridimensionais no *software* RS3 com base no Método dos Elementos Finitos, considerando parâmetros geotécnicos representativos de solos de clima tropical e carregamentos normativos.

Os resultados demonstraram que o radier estaqueado apresenta vantagens em relação ao sistema convencional. Do ponto de vista estrutural, o radier distribui as tensões de

forma mais homogênea no solo, reduzindo os momentos fletores e as forças cortantes em comparação com a viga baldrame. Essa distribuição mais equilibrada das cargas permitiu a redução do número de estacas de 12 para 9, mantendo o desempenho estrutural da fundação, conforme os critérios das normas ABNT NBR 6118, ABNT NBR 6120 e ABNT NBR 6122.

Economicamente, o sistema otimizado mostrou-se mais eficiente, com uma redução de 19,15% nos custos totais da fundação. Essa economia foi alcançada devido à menor quantidade de estacas, à racionalização do uso de materiais (como concreto e aço) e à eliminação de etapas construtivas associadas ao baldrame, como formas de madeira e serviços de escavação adicional. Além disso, o radier estaqueado apresentou benefícios ambientais, como menor geração de resíduos e redução no consumo de recursos, alinhando-se aos princípios da construção sustentável.

Em síntese, o radier estakeado mostrou-se uma solução viável para fundações em construções populares, especialmente em solos de baixa capacidade de suporte. A combinação de eficiência estrutural, redução de custos e sustentabilidade reforça sua aplicabilidade em projetos habitacionais de grande escala, como os desenvolvidos pela Caixa Econômica Federal. Recomenda-se, contudo, a realização de estudos geotécnicos detalhados em cada localidade para garantir a adaptação do sistema às condições específicas do terreno, assegurando assim o desempenho esperado da fundação.

Por fim, este trabalho contribui para a disseminação de alternativas tecnológicas que equilibrem custo, segurança e desempenho, oferecendo um caminho promissor para a otimização de fundações no contexto das habitações populares brasileiras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelo suporte fornecido na obtenção da licença do *software* utilizado neste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, A. F. A aplicação da metodologia de produção mais limpa: estudo em uma empresa do setor de construção civil.** 2002. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:2023. Projeto de estruturas de concreto.** Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120:2019. Ações para o cálculo de estruturas de edificações.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122:2022. Projeto e execução de fundações.** Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ATES, A.; SADOGLU, E. Numerical analysis of piled raft foundations under various soil conditions.** Geotechnical and Geological Engineering, v. 40, n. 4, p. 1783-1801, 2022.
- BRAND, E.W.; PHILLIPSON, H.B.; MALLETT, C.W. Collapsible soils in engineering practice.** Proceedings of the ICE - Ground Engineering, v. 5, n. 3, p. 153-183, 1972.
- CAIXA ECONÔMICA FEDERAL; INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil – SINAPI: Tabela de Composições e Insumos – Minas Gerais – Não Desonerado.** Brasília: CAIXA/IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 02 abr. 2025.
- CLEMENCE, S. P.; FINBARR, A. O. Design considerations for collapsible soils.** Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, v. 107, n. GT3, p. 305-317, 1981.
- FRANÇA, A.G.; RODRIGO, G.J. Influence of pile cap-ground contact geometry on the behavior of piled foundations.** Arabian Journal for Science & Engineering, v. 48, n. 10, p. 14029-14041, 2023.
- GARCIA, J. R. Analysis of the contribution of the block-soil contact in piled foundations.** Latin American Journal of Solids and Structures, v. 16, n. 6, p. 1-22, 2019.
- GARCIA, J. R. Análise experimental e numérica de radiers estaqueados executados em solo da região de Campinas/SP.** 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.
- HAMDY, D. B. Origin and characteristics of collapsible soils: state of the art report.** Innovative Infrastructure Solutions, v. 9, article 401, 2024.
- JANDA, T.; CUNHA, R. P.; KUKLIK, P.; ANJOS, G. M. Three-dimensional finite element analysis and back-analysis of CDA standard pile groups and piled rafts founded on tropical soil.** Soil and Rocks, v. 32, n. 1, p. 3-18, 2009.

MACHADO, L. B.; GARCIA, J. R. **Análise numérica tridimensional de fundações em radier estaqueado.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

MANDOLINI, A. **Design of piled raft foundations: practice and development.** BAP IV, International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, v. 1, p. 59-80, 2003.

MANDOLINI, A.; RUSSO, G.; VIGGIANI, C. **Piled foundations: Experimental investigations, analysis and design. State-of-the-Art Report.** Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE), Osaka, Japão, v. 1, p.177-213, 2005.

OLIVEIRA, E. A. S.; GARCIA, J. R. **An analysis of static loading tests on short bored pile in tropical soil.** Arabian Journal of Geosciences, v. 16, n. 299, p. 1-10, 2023. DOI: 10.1007/s12517-023-11399-w

PEREIRA, B. E.; OLIVEIRA, E. A. S.; GARCIA, J. R. **Análise experimental de sapatas isoladas em solo colapsível sob diferentes condições de umidade e pré-carregamento.** In: XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2024, Balneário Camboriú, SC. Anais... Balneário Camboriú, 2024.

RANDOLPH, M. F. **Design methods for pile groups and piled rafts.** In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 13., 1994, Nova Delhi. Proceedings. Nova Delhi, v. 5, p. 61-82, 1994.

ZEEVAERT, L. **Compensated friction-pile foundation to reduce the settlement of buildings on highly compressible volcanic clay of Mexico City.** In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 4., Londres, 1957. Proceedings. Londres, v. 2, p. 81-86, 1957.