

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ADRIÁN CARESANI DA CRUZ

**ANÁLISE DO RECALQUE DE RADIERS ESTAQUEADOS A PARTIR DE
SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E MÉTODOS SEMI-EMPÍRICOS**

ALEGRETE, RS

2025

ADRIÁN CARESANI DA CRUZ

**ANÁLISE DO RECALQUE DE RADIERS ESTAQUEADOS A PARTIR DE
SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E MÉTODOS SEMI-EMPÍRICOS**

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: Diego Arthur Hartmann

ALEGRETE, RS

2025

ADRIAN CARESANI DA CRUZ

**ANÁLISE DO RECALQUE DE RADIERS ESTAQUEADOS A PARTIR DE
SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E MÉTODOS SEMI-EMPÍRICOS**

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 2025.

Banca examinadora:

Prof. Dr. DIEGO ARTHUR HARTMANN - UNIPAMPA - Orientador

Prof. Dr. ALISSON SIMONETTI MILANI - UNIPAMPA

Prof. Dr. JAELSON BUDNY - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **JAELSON BUDNY, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/12/2025, às 22:47, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALISSON SIMONETTI MILANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2025, às 06:53, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DIEGO ARTHUR HARTMANN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2025, às 08:43, 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 **1922841** e o código CRC **AF2B8FBB**.

Dedico este trabalho a toda a minha família: meus pais, que sempre estiveram ao meu lado e que me deram todo o suporte necessário para que esteja aqui nesse momento de consagração, e também à minha namorada, Ana Carolina, que é fundamental na minha vida. Amo vocês!

AGRADECIMENTO

Ao Prof. Dr. Diego Arthur Hartmann.

Aos professores, Alisson Simonetti Milani, Jaelson Budny, Telmo Deifeld, Simone Venquiaruto e a todos os professores que passaram pela minha vida acadêmica

A todos os colegas de curso que sempre estiveram presentes, seja em trabalhos ou pelos corredores da Unipampa. Seja conversando sobre qualquer assunto que não seja o curso ou quando o desespero bate prévio a uma prova revisando conteúdo.

RESUMO

As fundações desempenham função primordial na engenharia geotécnica, garantindo a transferência segura dos esforços da superestrutura para o solo. Dentre as soluções contemporâneas, o radier estaqueado destaca-se como uma fundação híbrida eficiente, que associa a rigidez do elemento superficial à capacidade de carga dos elementos profundos. Esta tipologia é frequentemente adotada em cenários de solos com baixa capacidade de suporte superficial ou quando submetidos a elevadas cargas concentradas. Não obstante suas vantagens, o dimensionamento de radiers estaqueados envolve elevada complexidade, dada a necessidade de compatibilizar a interação tridimensional entre radier, estacas e maciço de solo, somada à não linearidade física dos materiais. Diante das limitações dos métodos analíticos tradicionais, a modelagem numérica via Método dos Elementos Finitos (MEF) emerge como uma ferramenta robusta para a análise desse comportamento. O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de radiers estaqueados por meio de simulações numéricas tridimensionais no software Rocscience RS3. O estudo paramétrico avaliou a influência da geometria das estacas (diâmetro e arranjo) e da rigidez do radier nos recalques totais e diferenciais. Os resultados indicam que a densidade da malha e o diâmetro das estacas são os fatores preponderantes na mitigação de recalques, permitindo otimizar o projeto e ampliar a compreensão técnica sobre a eficiência de fundações híbridas.

Palavras-Chave: Radier estaqueado, geotecnia, simulações numéricas, interação solo-estrutura, Rocscience.

RESUMEN

Las cimentaciones desempeñan una función primordial en la ingeniería geotécnica, garantizando la transferencia segura de los esfuerzos de la superestructura al suelo. Entre las soluciones contemporáneas, el radier pilotado se destaca como una cimentación híbrida eficiente, que asocia la rigidez del elemento superficial a la capacidad de carga de los elementos profundos. Esta tipología es frecuentemente adoptada en escenarios de suelos con baja capacidad de soporte superficial o cuando están sometidos a elevadas cargas concentradas. No obstante sus ventajas, el diseño de radiers pilotados implica una elevada complejidad, dada la necesidad de compatibilizar la interacción tridimensional entre el radier, los pilotes y el macizo de suelo, sumada a la no linealidad física de los materiales. Ante las limitaciones de los métodos analíticos tradicionales, el modelado numérico vía Método de Elementos Finitos (MEF) emerge como una herramienta robusta para el análisis de este comportamiento. El presente trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento de radiers pilotados mediante simulaciones numéricas tridimensionales en el software Rocscience RS3. El estudio paramétrico evaluó la influencia de la geometría de los pilotes (diámetro y disposición) y de la rigidez del radier en los asentamientos totales y diferenciales. Los resultados indican que la densidad de la malla y el diámetro de los pilotes son los factores preponderantes en la mitigación de asentamientos, permitiendo optimizar el diseño y ampliar la comprensión técnica sobre la eficiencia de cimentaciones híbridas.

Palabras Clave: Radier piloteado, geotecnia, simulaciones numéricas, interacción suelo-estructura, Rocscience.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Grelha sobre base elástica.....	18
Figura 2 - Placa sobre apoio elástico.....	18
Figura 3 - Ambiente de trabalho do RS3 mostrando um modelo processado.....	24
Figura 4 - Malha tetraédrica.....	25
Figura 5 - Fluxograma.....	26
Figura 6 - Estratigrafia.....	29
Figura 7 - Detalhe das características do modelo.....	30
Figura 8 - Configurações das malhas de estacas.....	31
Figura 9 - Modelo no RS3 (SIM-D20-E40-S6).....	32
Figura 10 - Gráfico comparando situação sem estacas e com estacas.....	36
Figura 11 - Comparativo visual dos deslocamentos verticais: (a) Radier isolado; (b) Radier estaqueado, evidenciando a redução global dos recalques.....	37
Figura 12 - Comparativo das simulações envolvendo radier com espessura de 40 cm.....	38
Figura 13 - Comparativo das simulações entre estacas envolvendo radier com espessura de 60 cm.....	38
Figura 14 - Comparativo das simulações nas estacas envolvendo radier com espessura de 40 cm.....	40
Figura 15 - Comparativo das simulações nas estacas envolvendo radier com espessura de 60 cm.....	40
Figura 16 - Comparativo do recalque diferencial no radier com 40 cm.....	41
Figura 17 - Comparativo do recalque diferencial no radier com 60 cm.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades dos materiais do modelo.....	27
Tabela 2 - Sequência de simulações.....	34
Tabela 3 - Influência de cada parâmetro no recalque.....	39
Tabela 4 - Grau de eficiência das estacas nas diferentes simulações.....	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Objetivos.....	11
1.1.2 Objetivos específicos.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 Radiers.....	13
2.1.1 Conceitos básicos.....	13
2.1.2 Radier Estaqueado.....	14
2.1.3 Comportamento do Radier Estaqueado.....	15
2.1.4 Métodos de Análise e Dimensionamento de Radiers Estaqueados.....	17
2.1.4.1 Análise de Radier Simples.....	17
2.1.4.2 Análise de Radier Estaqueado.....	20
2.1.4.2.1 Poulos-Davis-Randolph (PDR).....	21
2.3 Simulação Numérica Aplicada em Radiers.....	23
2.3.1 Método dos Elementos Finitos (MEF) na Análise de Radiers.....	23
2.3.2 Softwares de Análise e a Aplicação do Rocscience RS3.....	25
3 METODOLOGIA.....	26
3.1 Definição dos materiais.....	27
3.2 Geometria e condições de contorno.....	27
3.2.1 Tensão de campo inicial e malha de elementos finitos.....	32
3.3 Carregamento e plano de simulações.....	33
3.4 Simulações.....	34
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	36
4.1. Validação do modelo: influência da inserção de estacas.....	36
4.2. Análise dos recalques máximos (centro).....	37
4.3. Análise do Recalque na Borda e Diferencial.....	39
4.4. Eficiência do sistema.....	43
5 CONCLUSÕES.....	45
REFERÊNCIAS.....	47

1 INTRODUÇÃO

As fundações ocupam um papel central na engenharia geotécnica, garantindo a transferência segura de cargas para camadas mais profundas de solo. Dentre as diversas alternativas disponíveis, o radier estaqueado destaca-se como uma solução híbrida, que une o suporte superficial do radier à capacidade de carga adicional fornecida pelas estacas. Essa tecnologia é amplamente empregada em projetos que envolvem solos de baixa resistência ou altas cargas, onde as fundações mais utilizadas não podem ser empregadas (Falconi; Corrêa; Orlando, 2019). Além disso, o radier estaqueado oferece vantagens significativas em termos de segurança e eficiência estrutural.

Entretanto, a concepção e o dimensionamento de radiers estaqueados apresentam desafios técnicos consideráveis, como a previsão da interação entre radier, estacas e solo, assim como o comportamento não linear do solo e a distribuição dos esforços (Freitas Neto, 2015). Adicionalmente, as incertezas na caracterização geotécnica e as limitações dos métodos tradicionais de cálculo dificultam a obtenção de soluções práticas, econômicas e precisas.

Nesse contexto, o desenvolvimento de simulações numéricas têm contribuído com o avanço nas análises geotécnicas, possibilitando maior precisão e flexibilidade na avaliação de fundações, como o radier estaqueado. Softwares como os disponibilizados pela Rocscience destacam-se por suas capacidades avançadas de modelagem 3D, parametrização de análises e interpretação do comportamento estrutural e geotécnico. Tais ferramentas permitem não apenas validar projetos em condições reais, mas também explorar soluções inovadoras para superar os desafios técnicos enfrentados na geotecnia (Medeiros, 2016).

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é compreender, por meio de simulações numéricas tridimensionais, o comportamento de uma fundação em radier estaqueado sob a influência de diferentes parâmetros geométricos do sistema de fundação.

1.1.2 Objetivos específicos

Foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar a influência da densidade da malha de estacas (espaçamento) no comportamento da fundação;
- Analisar a influência da variação do diâmetro das estacas no comportamento da fundação;
- Analisar a influência da rigidez do radier, através da variação da sua espessura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Radiers

2.1.1 Conceitos básicos

As fundações são elementos fundamentais em projetos de engenharia civil, projetadas para transmitir as cargas da superestrutura ao solo de maneira segura e eficiente, prevenindo recalques anormais e evitando possíveis intercorrências estruturais. Elas podem ser classificadas em dois grupos principais: fundações rasas e fundações profundas, cuja escolha depende de fatores como as características do solo, a magnitude das cargas, a profundidade das camadas resistentes e as restrições econômicas e construtivas do projeto (Cintra; Aoki; Albiero, 2011).

As fundações rasas, também denominadas diretas, transmitem a carga ao terreno. Na maioria das vezes, transmitida através de pressões distribuídas sob a base da fundação, em que a profundidade de assentamento é menor que duas vezes a menor dimensão da fundação (Albuquerque; Garcia, 2022). Exemplos incluem sapatas isoladas, sapatas corridas e radier, amplamente utilizados em edificações residenciais, comerciais e industriais de pequeno e médio porte. Por outro lado, as fundações profundas tornam-se necessárias em situações onde as camadas superficiais não possuem resistência suficiente, sendo pertinente a procura por uma superfície com maior capacidade de suporte (Bessa; Monteiro, 2016). Este grupo abrange soluções como estacas e tubulões, frequentemente aplicadas em obras de grande porte.

Segundo Azevedo e Cunha (2021), a seleção adequada do tipo de fundação exige uma análise rigorosa, obtendo informações através de sondagens (sendo o mais comum deles o Standard Penetration Test), ensaios laboratoriais e avaliações de interação solo-estrutura. Esta série de análises visam garantir a estabilidade e a segurança da obra ao longo de sua vida útil, minimizando riscos estruturais e otimizando a viabilidade econômica.

No contexto da engenharia geotécnica, as fundações assumem um papel central, não apenas garantindo a segurança e estabilidade das estruturas, mas

também desempenhando um papel crucial na adaptação às diversas condições geotécnicas, como solos expansivos, compressíveis ou de baixa resistência. Além disso, são projetadas para resistir a ações externas, incluindo cargas dinâmicas e efeitos sísmicos. Uma má escolha ou erro no dimensionamento das fundações pode ocasionar falhas graves, com impactos significativos na segurança dos usuários, no aumento dos custos de manutenção e na redução da durabilidade da estrutura (Nascimento *et al.*, 2023).

2.1.2 Radier Estaqueado

O radier é um tipo de estrutura de fundação superficial, executada em concreto armado, que recebe todas as cargas através dos pilares e alvenarias da edificação, distribuindo-as de forma uniforme ao solo (Carvalho *et al.*, 2022). Sua aplicação é particularmente recomendada em edificações de pequeno e médio porte, visando uma eficaz distribuição de cargas ao solo. Entre suas principais vantagens, destacam-se a capacidade de diminuir recalques diferenciais, aproveitando a resistência do solo. Outra vantagem significativa é a questão econômica, onde apresenta menores custos comparado a outras soluções, como sapatas isoladas e vigas baldrame. Além disso, o radier pode assumir uma função multifuncional, integrando a base da edificação ao sistema de pisos, o que favorece a racionalização dos processos construtivos e a redução dos prazos de execução (Teixeira; Pinheiro, 2022). No entanto, sua eficiência depende de um projeto detalhado que considere as propriedades geotécnicas do solo, as características dos materiais empregados e a interação solo-estrutura. Segundo Bezerra *et al.* (2024), os estudos geotécnicos detalhados, como ensaios de deformabilidade do solo, análises baseadas em métodos analíticos ou numéricos e investigações de campo, são indispensáveis para garantir a segurança e o desempenho da fundação. Ademais, os procedimentos de execução devem ser monitorados cuidadosamente, incluindo a preparação do terreno, a compactação adequada do solo e o controle de patologias.

No âmbito das diferenças, quando feita a comparação entre o radier convencional e o estaqueado é possível encontrar discrepâncias como na forma de transferência de cargas e as condições geotécnicas que influenciam sua aplicação (Miranda; Garcia, 2022). Coelho *et al.* (2017) define radier como uma estrutura de fundação superficial geralmente executada em concreto armado que sustenta as

cargas de pilares e/ou alvenarias da edificação, distribuindo uniformemente ao solo. Em resumo, é uma laje de concreto armado instalada diretamente sobre o terreno. Já o radier estaqueado une a laje de concreto as estacas, que transferem as cargas para camadas mais profundas e resistentes do terreno, sendo utilizado em solos de baixa resistência, alta compressibilidade ou sujeitos a grandes recalques. O projeto desta fundação híbrida exige análises avançadas sobre a interação entre solo, estacas e estrutura, fazendo-se necessária a utilização de modelagens detalhadas e estudos de redistribuição de esforços. Enquanto o radier convencional apresenta menor custo e construção mais simples, o radier estaqueado requer maior investimento inicial e maior tecnicidade no dimensionamento e execução (Antolini, 2024). Em resumo, a escolha entre essas soluções deve estar amparada em análises geotécnicas e estruturais detalhadas, além de considerar critérios econômicos e funcionais, garantindo segurança e desempenho ao longo da vida útil da estrutura.

As melhorias obtidas na utilização de estacas juntas ao radier são notáveis em solos de baixa resistência, posicionando-se como uma solução eficaz e confiável para abordar condições geotécnicas desafiadoras. Entre suas principais vantagens, destaca-se a redução de recalques diferenciais, redistribuição mais eficiente das cargas entre a laje e as estacas, otimizando o dimensionamento estrutural e aumentando a segurança de edificações. Outra vantagem é sua flexibilidade em terrenos com condições geotécnicas variáveis, permitindo ajustes no número, tipo e posição das estacas conforme as necessidades do projeto. Também, o radier estaqueado cumpre um ótimo papel no suporte de cargas dinâmicas, como aquelas presentes em indústrias e pontes, onde os esforços podem variar e comprometer fundações convencionais (D'Antona, 2019). Embora o radier estaqueado seja mais oneroso e apresente maior complexidade de execução, os benefícios a longo prazo, como maior estabilidade, menor incidência de patologias e aumento da vida útil da estrutura, justificam sua aplicação em terrenos que são desejáveis sua presença.

2.1.3 Comportamento do Radier Estaqueado

A interação entre o radier, as estacas e o solo constitui um dos aspectos mais determinantes no dimensionamento e comportamento estrutural do radier estaqueado, exigindo análises rigorosas para que o desempenho e a segurança da

fundação seja assegurado. Essa interação é caracterizada pela transferência de cargas, em que o radier distribui parte das tensões diretamente ao solo, enquanto as estacas conduzem os esforços excedentes para camadas mais profundas e resistentes. A contribuição de cada componente é influenciada por fatores como as propriedades geotécnicas do terreno, o espaçamento entre as estacas, a rigidez da laje e o tipo de carregamento empregado (D'Antona, 2019). Em solos de baixa resistência, as estacas desempenham um papel mais significativo na redução de recalques diferenciais e na estabilidade estrutural, enquanto o radier redistribui tensões para evitar sobrecargas localizadas.

A análise dessa interação exige o emprego de métodos avançados, como modelagens numéricas tridimensionais realizadas por meio de softwares especializados, capazes de simular condições reais de carregamento e representar as propriedades do solo. Junto a isso, deve ter o complemento de ensaios de campo para ter maior representatividade da situação encontrada. Além disso, a redistribuição de esforços ao longo do tempo deve ser considerada, uma vez que processos como a consolidação do solo e os efeitos de longo prazo nas estacas, incluindo fluência e interação negativa devido ao adensamento, podem influenciar significativamente o desempenho do sistema (Pinto, 2021). A compreensão aprofundada desse mecanismo é essencial para otimizar o projeto, reduzindo custos com materiais, aumentando a durabilidade da fundação e mitigando patologias. Assim, a análise integrada do sistema radier-estacas-solo é indispensável na elaboração dessas fundações, fazendo-se necessário o seu estudo.

Vitor (2024) destaca a notoriedade para o desempenho do radier estaqueado a geometria do radier e das estacas, que participa diretamente no comportamento estrutural e do solo. No caso das estacas, parâmetros como diâmetro, comprimento e espaçamento determinam a capacidade de carga individual e coletiva, além da interação com o solo e com a laje do radier. Estacas mais longas e de maior diâmetro são capazes de alcançar camadas mais profundas e resistentes, aumentando a segurança do sistema. Por outro lado, o espaçamento entre as estacas deve ser projetado para evitar o efeito de grupo, que pode comprometer a eficiência da transferência de cargas devido à interação negativa entre elas.

Segundo Aguiar *et al.* (2017), a espessura, rigidez e extensão do radier

também exerce influência direta na redistribuição de tensões entre o solo superficial e as estacas. Radiers com maior espessura e rigidez tendem a promover uma distribuição mais uniforme de cargas, reduzindo tensões localizadas, enquanto radiers de espessura mais fina podem ser mais suscetíveis a deformações e recalques diferenciais. A interação entre a extensão do radier e a disposição das estacas é outro ponto a ser destacado, exigindo uma configuração que maximize o aproveitamento das propriedades do solo e minimize os deslocamentos diferenciais.

2.1.4 Métodos de Análise e Dimensionamento de Radiers Estaqueados

O dimensionamento de fundações do tipo radier, simples ou estaqueado, exige uma análise da interação solo-estrutura, conforme aborda a ABNT NBR 6122. A escolha do método de estudo depende diretamente da complexidade do sistema.

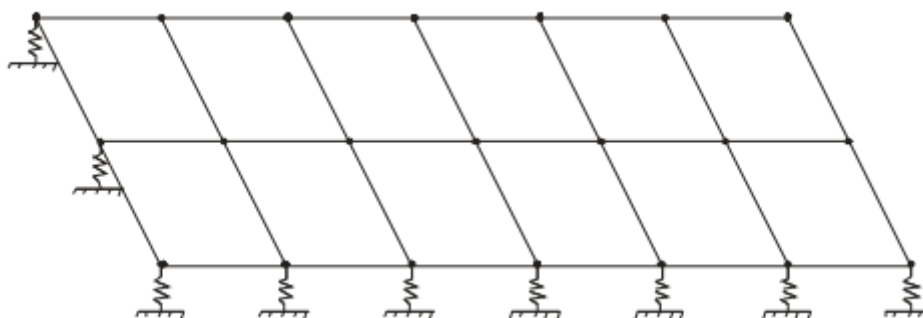
2.1.4.1 Análise de Radier Simples

Poderá ser abordada por modelos distintos, classificados principalmente pela consideração da rigidez da laje (VELLOSO; LOPES, 2004):

- **Método de Corpo Rígido:** Este método assume que a rigidez é infinita, não se deformando sob ação de cargas, fazendo com que a distribuição de recalque seja plana, e as tensões de contato com o solo são redistribuídas. É uma simplificação adequada para análise preliminares, pois possui severas limitações ao não ser corriqueiramente aplicado na prática, utilizado principalmente em radiers de maior espessura;
- **Método da Viga sobre Base Elástica:** Este método separa o radier em dois sistemas de faixas, onde leva em consideração a geometria do radier e a distribuição dos pilares. Cada faixa é analisada com uma viga de fundação sobre base elástica, sem considerar a interação entre elas (Cibulski Junior, 2016). É um método obsoleto devido às aproximações realizadas, enfraquecendo a assertividade dos resultados;
- **Método da Grelha sobre Base Elástica:** Lightfoot e Sawko em 1959 constataram que os procedimentos de análise pelo método dos deslocamentos para pórticos planos e grelhas eram similares, logo, procuraram adaptar um programa inicialmente voltado para cálculo de pórticos para o cálculo de grelhas. Consiste em substituir o radier por uma

grelha composta por barras, determinando uma faixa determinada da laje (Barboza, 1992). Stramandinoli (2003) afirma que o método mostra resultados satisfatórios para uma grande quantidade de pavimentos.

Figura 1 - Grelha sobre base elástica

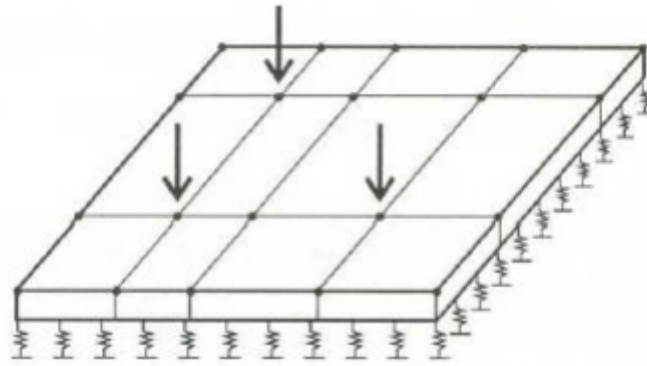


Fonte: Dória (2007)

As rigidezes da laje, tanto à flexão quanto à torção, são concentradas nessas barras equivalentes. O sistema é analisado sobre uma hipotética base elástica que simula o comportamento do solo (Método de Winkler). Hambly (1976) argumenta que, ao submeter a grelha equivalente às mesmas cargas do radier original, o ideal é apresentar deslocamentos idênticos e esforços internos equivalentes. Além disso, ele estabelece critérios para a sua definição, recomendando um maior refinamento em zonas de altas concentrações de esforços;

- **Método da Placa Flexível sobre Base Elástica:** Nesta abordagem, é considerado a deformabilidade. A determinação dos esforços internos e dos recalques diferenciais é feita tratando a laje como uma placa apoiada sobre uma base elástica. A abordagem mais adotada na prática de projetos é o Modelo de Winkler.

Figura 2 - Placa sobre apoio elástico



Fonte: Dória (2007)

O Modelo de Winkler representa o solo de molas elásticas e independentes, onde a pressão de contato (p) em um ponto é diretamente proporcional ao recalque (δ) nesse mesmo ponto. A constante de proporcionalidade é o coeficiente de reação do solo (k_s), expresso por:

$$p = k_s \cdot \delta \quad (\text{Eq.1})$$

É notório assimilar que k_s não é uma propriedade intrínseca do solo, senão um parâmetro que depende da interação do sistema, como as dimensões, formato e a rigidez da fundação. Velloso & Lopes (2004) e Bowles (1996) propõem equações para sua estimativa, baseada na teoria da elasticidade para um meio homogêneo:

$$k_s = \frac{E_s}{B(1-\nu^2)I_s} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

- E_s : Módulo de elasticidade do solo;
 - ν : Coeficiente de Poisson do solo;
 - B : Menor dimensão do radier;
 - I_s : Fator de influência que considera a forma e a rigidez do radier;
- **Métodos dos Elementos Finitos:** Consiste fundamentalmente em dividir o

domínio contínuo da estrutura em uma coleção de subdomínios menores, os elementos finitos ligados por nós (Zienkiewicz; Taylor, 2000 apud Cibulski Junior, 2016). O comportamento é aproximado por funções polinomiais simples, transformando equações diferenciais complexas em um sistema de equações algébricas (Ribeiro, 2004).

Este método já é predominantemente de aplicação computacional. A grande vantagem desta abordagem é de realizar uma completa modelagem, considerando uma interação solo-estrutura mais realista, permitindo analisar geometrias mais complexas, aliando a resultados mais precisos e econômicos (Cibulski Junior, 2016).

2.1.4.2 Análise de Radier Estaqueado

Sendo uma análise que exige maior complexidade, envolve a interação entre o radier, as estacas e o solo. A carga total é compartilhada entre esses elementos. O objetivo da adição das estacas é, via de regra, a redução e a uniformização dos recalques a níveis aceitáveis. No Brasil, a NBR 6122 não prescreve um método de dimensionamento direto, exigindo adaptações e busca em métodos consagrados na literatura.

Poulos (2001) classifica os métodos de análise em duas categorias:

1. **Numéricos Rigorosos:** Sendo o Método dos Elementos Finitos considerado a ferramenta mais completa para a análise de radiers estaqueados, permite modelar a não linearidade do solo e a interação entre todos os componentes envolvidos;
2. **Simplificados (semi-empíricos):** Utilizados para análises preliminares, incluindo o Método do Radier Equivalente e abordagens inspiradas na Teoria da Elasticidade.

Dentre os métodos de análise semi-empírico, impera a utilização do método combinado de Poulos-Davis-Randolph (PDR), formulado por Clancy & Randolph (1993), para a análise manual. Sua recomendação de uso baseia-se na simplicidade e rigor técnico.

2.1.4.2.1 Poulos-Davis-Randolph (PDR)

O método consiste em calcular a rigidez do sistema combinado (K_{pr}) e a divisão de carga a partir da rigidez dos componentes que quantificam a interação entre eles. A lógica do processo envolve:

- **Rigidez do Radier Isolado (K_r):** Representa a rigidez do radier de forma isolada. É a carga necessária para haver um deslocamento unitário, via de regra com base nas soluções da teoria da elasticidade para uma fundação superficial.
- **Rigidez do Grupo de Estacas (K_p):** Representa a rigidez do grupo de estacas de forma isolada. K_p leva em conta o efeito de agrupamento das estacas. O carregamento de uma delas induz recalques nas vizinhas, reduzindo a eficiência do conjunto. Logo, faz-se importante quantificar as variáveis de interação radier-estaca.
- **Fatores de Interação Radier-Estaca (α_{pr} e α_{rp}):** Como mencionado, deve-se considerar as duas vias:
 - Fator α_{pr} quantifica o recalque adicional no grupo de estacas devido a uma carga aplicada no radier;
 - Fator α_{rp} quantifica o recalque adicional no radier causado por uma carga no grupo de estacas.

Pelo teorema da reciprocidade de Betti, os fatores se relacionam através da expressão:

$$\frac{\alpha_{rp}}{K_p} = \frac{\alpha_{pr}}{K_r} \quad (\text{Eq. 3})$$

Com base na compatibilidade de deslocamentos e nas relações de interação, chega-se às equações para a rigidez global do radier estaqueado (K_{pr}) e para a carga absorvida pelo radier (P_r), onde P_t é a carga total aplicada no sistema:

$$K_{pr} = \frac{K_p + K_r(1 - 2\alpha_{rp})}{1 - \alpha_{rp} \frac{K_r}{K_p}} \quad (\text{Eq. 4})$$

Uma vez determinada a rigidez global do sistema, o recalque médio do sistema (ω_{sistema}) é obtido através da relação:

$$\omega_{\text{sistema}} = \frac{P_t}{K_{pr}} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde P_t é a carga total aplicada no sistema de fundação.

Após, a partilha de carga é determinada para entender como a carga total se distribui entre o radier e as estacas, viabilizado pela seguinte expressão, calculando P_r , sendo a carga absorvida pelo radier:

$$P_r = P_t \frac{(1 - \alpha_{pr}) \frac{K_r}{K_p}}{1 + (1 - 2\alpha_{pr}) \frac{K_r}{K_p}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Para quantificar a partilha de carga, Mandolini (2003) propôs o coeficiente de radier estaqueado (αPR), que indica a proporção da carga total absorvida pelas estacas:

$$\alpha PR = \frac{\text{carga absorvida pelas estacas}}{\text{carga total aplicada}} \quad (\text{Eq. 7})$$

Este coeficiente, que varia de 0 (carga totalmente no radier) a 1 (carga totalmente nas estacas), é um parâmetro fundamental para avaliar o comportamento do sistema.

Apesar de sua eficiência no dimensionamento, este método tem suas limitações claras. Uma delas é derivada devido a sua fundamentação com base no comportamento elástico-linear do solo, logo, não mapeia fenômenos não lineares, como a plastificação do solo, ocorrida em carregamentos mais elevados. Com isso, faz-se necessário a introdução de uma análise via métodos numéricos rigorosos, como o MEF.

2.3 Simulação Numérica Aplicada em Radiers

Os métodos tradicionais de cálculo de fundações, baseados em hipóteses simplificadoras como a de um solo homogêneo e de comportamento linear-elástico, apresentam limitações significativas, pois não capturam adequadamente a variabilidade natural e o comportamento não linear dos solos (Gerscovich, 2016). Além disso, abordagens convencionais tendem a desconsiderar a interação entre elementos de fundação adjacentes, o que pode levar a imprecisões na determinação da capacidade de carga (Tavares, 2013).

Para superar essas simplificações, a engenharia geotécnica contemporânea emprega simulações numéricas como uma abordagem mais sofisticada e realista. Ferramentas computacionais, fundamentadas em métodos matemáticos como o Método dos Elementos Finitos (MEF), permitem modelar o comportamento complexo do solo e das estruturas, facilitando a resolução das equações diferenciais que regem o sistema (Vieira, 2009)

2.3.1 Método dos Elementos Finitos (MEF) na Análise de Radiers

O MEF permite obter soluções aproximadas para as equações diferenciais parciais que governam o comportamento de sistemas complexos. Zienkiewicz & Taylor (2000) e Assan (2017) descrevem o método de forma cujo conceito consiste em dividir um domínio contínuo em uma coleção de subdomínios menores, os elementos finitos conectados por elementos nodais.

Para a análise de radiers, as principais vantagens do MEF sobre os métodos tradicionais são mencionadas vastamente na literatura:

- **Análise de Interação Solo-Estrutura:** Este método permite uma análise com maior detalhe sobre a interação solo-estrutura, considerando a deformabilidade tanto do radier quanto do solo (cabe ressaltar que no presente estudo esta análise não será o foco do trabalho);
- **Modelagem de Geometrias Complexas:** Permite a representação fiel de geometrias de maior complexidade, como de radier irregulares e a disposição exata das estacas;
- **Comportamento Não-Linear do Solo:** Permite a incorporação de modelos

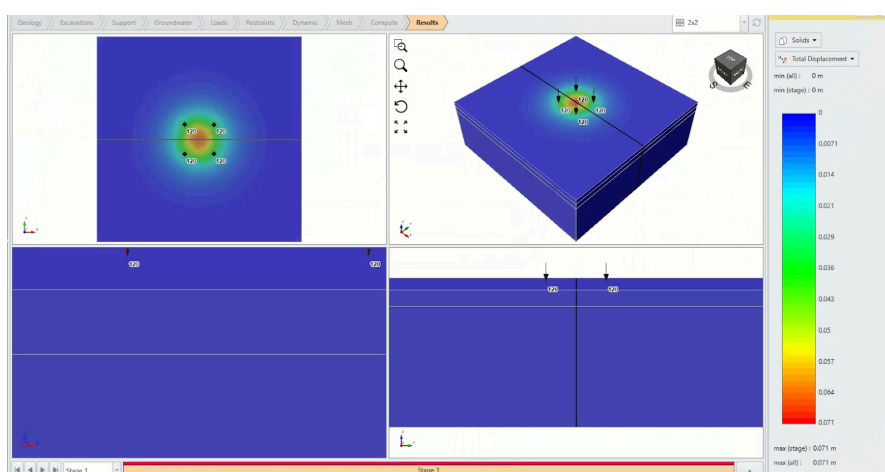
constitutivos avançados que descrevem esse comportamento, como a elasto-plasticidade, fenômeno que influencia diretamente a partilha da carga e os recalques;

- **Análise Paramétrica:** É possível variar sistematicamente parâmetros como a espessura do radier ou comprimento e diâmetro das estacas, por exemplo, de uma forma mais simplificada em comparação à métodos manuais.

O fluxo de trabalho para uma análise de radier via MEF, conforme padrão encontrado em publicações, como em Tankut, Tankut e Zor (2014), e em manuais de software, temos:

1. **Pré-processamento:** Fase da construção do modelo. Envolve a definição da geometria, a discretização do domínio em uma malha de elementos finitos, atribuição das propriedades dos materiais e a aplicação de condições de contorno;
2. **Processamento:** O software realiza a montagem e resolve numericamente o sistema global de equações para encontrar as variáveis primárias;
3. **Pós-processamento:** Os dados numéricos brutos são transformados em resultados que possam ser interpretados pelo usuário, como mapas de tensões e recalques.

Figura 3 - Ambiente de trabalho do RS3 mostrando um modelo processado



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3.2 Softwares de Análise e a Aplicação do Rocscience RS3

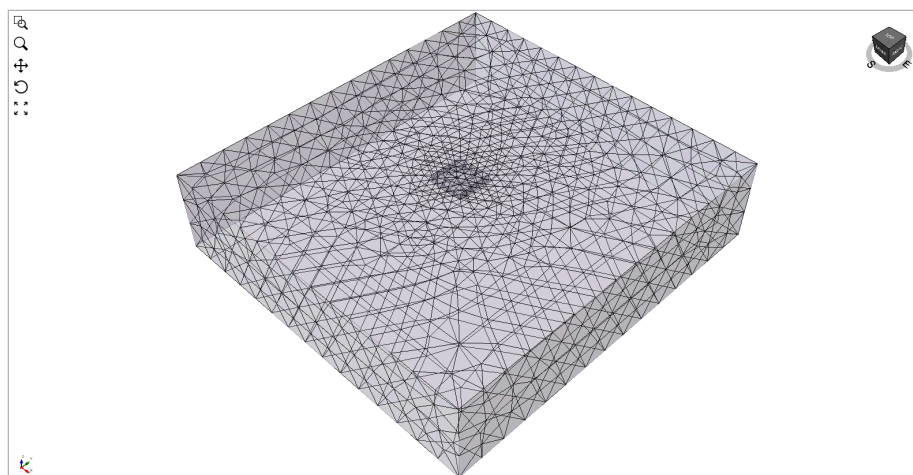
Há uma vasta gama de opções de software comerciais para análise de radiers em MEF, como PLAXIS, Abaqus, GeoStudio e a suíte de softwares da Rocscience.

Este último, escolhido para ser utilizado no presente trabalho por meio do software RS3, que permite (Rocscience, 2025):

- **Modelagem Tridimensional (3D):** Permite capturar com maior fidelidade os efeitos espaciais de distribuição de carga e deformação, algo que em softwares que trabalham com uma análise 2D é simplificado. O software utiliza malhas avançadas de elementos tetraédricos de 10 nós, que garante maior precisão e melhores resultados;
- **Biblioteca de Modelos Constitutivos:** Vastas opções de modelos para solos e rochas, permitindo ao usuário introduzir o mais adequado para o modelo. Mohr-Coulomb, Hoek-Brown e Hardening Soil são alguns deles;
- **Modelagem de Elementos Estruturais:** O RS3 inclui elementos para modelar estacas (pile) e revestimentos (liner), permitindo a modelagem delas assim como do radier.

Com isso, é viabilizado a execução de estudos paramétricos detalhados que são inviáveis de serem feitos em escala real, fomentando a investigação científica.

Figura 4 - Malha tetraédrica

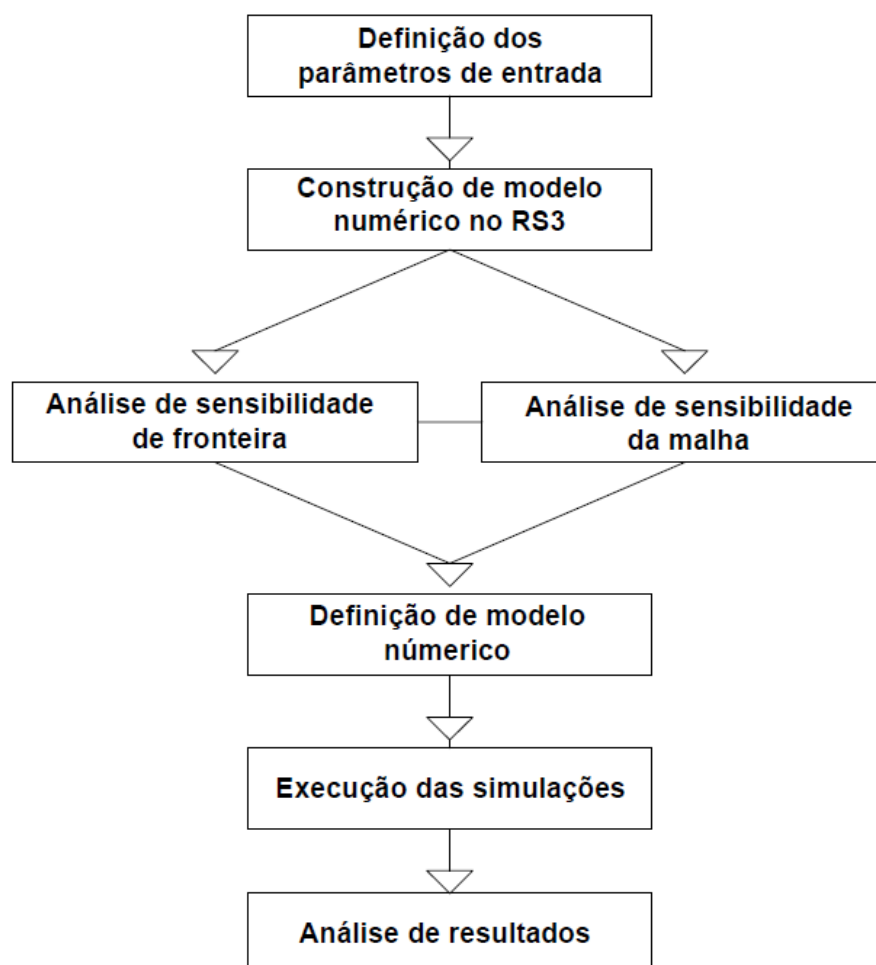


Fonte: Retirado do aba de tutoriais do RS3.

3 METODOLOGIA

O presente capítulo descreve os procedimentos metodológicos adotados para a análise do comportamento tensão-deformação de radiers estaqueados. A abordagem fundamenta-se em simulações numéricas tridimensionais utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), processadas através do software Rocscience RS3. O desenvolvimento da pesquisa foi estruturado de maneira sequencial e sistemática, englobando desde a definição dos parâmetros geotécnicos e geométricos até a execução de análises de sensibilidade para validação do modelo numérico. Para facilitar a visualização das etapas percorridas e da lógica de trabalho, apresenta-se o fluxograma geral da pesquisa na Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Definição dos materiais

Para a modelagem numérica, foram definidos os materiais para os três estratos de solo que compõem o perfil geotécnico, bem como para os elementos de fundação (radier e estacas).

O comportamento do solo foi representado por meio de um modelo construtivo elástico. Esse limite é definido pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Para o concreto, tanto do radier quanto das estacas, adotou-se um modelo constitutivo elástico-linear, definido pelo seu módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Embora na prática de projetos os concretos para radier e estacas possam ter especificidades distintas, para este estudo foram adotados parâmetros únicos para ambos, sendo uma simplificação válida, permitindo focar na influência das variações geométricas. Esta abordagem é amparada por trabalhos com o de Kim et al. (2001).

Tabela 1 - Propriedades dos materiais do modelo

Propriedade	Aterro	Argila siltosa c/ pouca areia	Areia compactada	Concreto usado na fundação
Critério	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Peso específico (γ)	18 kN/m ³	20 kN/m ³	20 kN/m ³	24 kN/m ³
Módulo de Elasticidade (E)	10 MPa	15 MPa	80 MPa	36 GPa
Coeficiente de Poisson (ν)	0,35	0,3	0,3	0,16
Coesão (c')	5 kPa	5 kPa	1 kPa	-
Ângulo de atrito (ϕ)	24°	25°	38°	-

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em valores típicos da literatura geotécnica para solos de características semelhantes (Albuquerque; Garcia, 2022)

3.2 Geometria e condições de contorno

A definição da geometria do modelo numérico foi pautada na necessidade de representar o comportamento da interação entre todos os elementos da fundação, garantindo que as fronteiras do domínio estivessem suficientemente afastadas da

zona de influência das tensões geradas pela fundação.

Para a definição das dimensões finais do domínio numérico, procedeu-se a uma análise de sensibilidade das fronteiras, visando mitigar a influência das condições de contorno sobre o campo de tensões e deformações na região de interesse. A determinação da extensão lateral (a), definida como a distância ortogonal entre a borda do radier e a fronteira lateral do modelo, foi obtida através de um estudo iterativo de convergência. Foram modelados cenários com extensões de 5, 10, 12, 13, 15 e 20 metros. A análise dos deslocamentos verticais máximos revelou o seguinte comportamento:

1. **Instabilidade em Domínios Reduzidos:** Modelos com fronteiras muito próximas ($a < 10$ metros) apresentaram perturbações significativas nos resultados. A redução da extensão de 10 metros para 5 metros resultou em uma discrepância de 2,33% no recalque médio. Ao comparar a extensão de 12 metros com 10 metros, observou-se ainda uma variação de 0,75%, indicando que 10 metros não seriam suficientes para garantir a isenção de efeitos de contorno.
2. **Ponto de Convergência:** A estabilidade numérica foi alcançada na extensão de 12 metros. A comparação entre os modelos de 13 metros e 12 metros demonstrou uma variação desprezível de apenas 0,02% nos resultados.
3. **Validação:** O aumento da extensão para 15 metros e 20 metros confirmou a tendência assintótica, não resultando em alterações significativas que justificassem o custo computacional adicional.

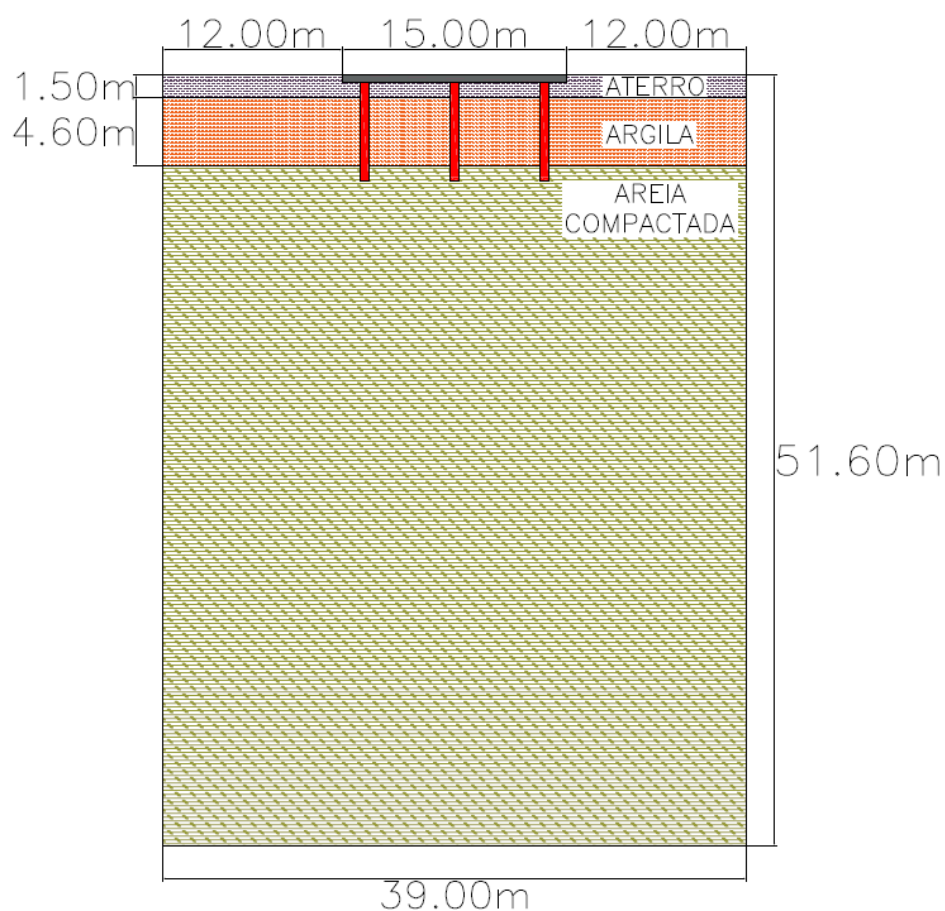
Dessa forma, fixou-se a extensão lateral em 12 m, resultando em uma largura total do modelo de 39,0 metros (15 m do radier + 2 x 12 m laterais).

Em relação à profundidade do domínio (eixo Z), a fronteira inferior foi estabelecida na cota de -51,6 metros. Esta definição baseou-se na estratigrafia local e no conceito de rigidez relativa. Em análises numéricas, o aprofundamento arbitrário do modelo em materiais elásticos pode induzir ao acúmulo de recalques espúrios. Portanto, optou-se por ancorar a base do modelo no interior da camada de

areia compactada. Este estrato, devido ao seu elevado Módulo de Elasticidade ($E = 80 \text{ MPa}$) em comparação às camadas sobrejacentes, atua mecanicamente como uma base indeformável para fins de cálculo de recalques imediatos.

O perfil estratigráfico modelado reproduz as condições locais, sendo constituído por três horizontes distintos, conforme ilustrado na Figura 6:

Figura 6 - Estratigrafia



Fonte: Elaborado pelo autor.

- Camada Superficial: Aterro com 1,50 m de espessura;
- Camada Intermediária: Argila Siltosa com 4,60 m de espessura (camada compressível);
- Camada Base: Areia Compactada, estendendo-se da cota -6,10 m até a base do modelo.

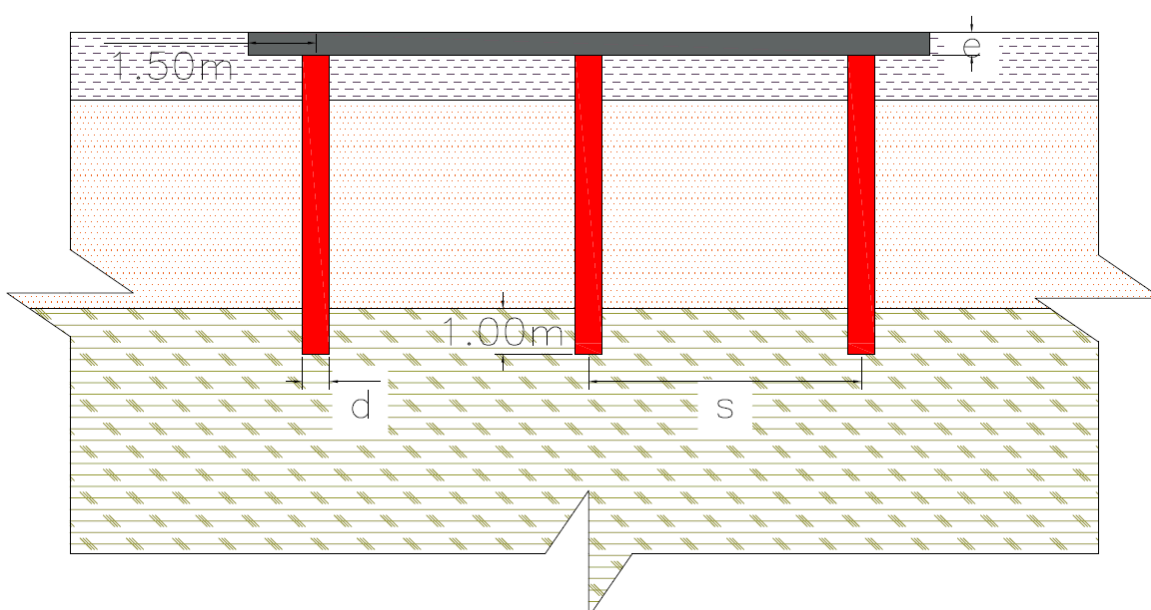
A fundação analisada consiste em um radier quadrado de concreto armado, com dimensões em planta de 15 m X 15 m. Para avaliar a influência da rigidez da laje, o elemento foi modelado com duas espessuras distintas (e): 40 cm e 60 cm.

O sistema de estaqueamento foi configurado solidário à base do radier. O comprimento efetivo das estacas foi calculado geometricamente para garantir, em todos os cenários, um embutimento de 1,0 metro na camada resistente de areia compactada. Como a cota de arrasamento das estacas depende da espessura do radier, os comprimentos foram definidos da seguinte forma:

- Para o radier com 40 cm de espessura: Estacas com comprimento de 6,70 m;
- Para o radier com 60 cm de espessura: Estacas com comprimento de 6,50 m.

O detalhe do embutimento de 1,0 m na camada de areia, fundamental para a mobilização da capacidade de carga de ponta, é apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Detalhe das características do modelo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

- d: Diâmetro de estaca;
- s: Espaçamento entre eixos de estacas;
- e: Espessura de radier.

Para a disposição das estacas em planta, adotou-se um arranjo simétrico com espaçamentos variáveis, configurando três densidades de malha distintas, conforme detalhado na Figura 8:

Figura 8 - Configurações das malhas de estacas



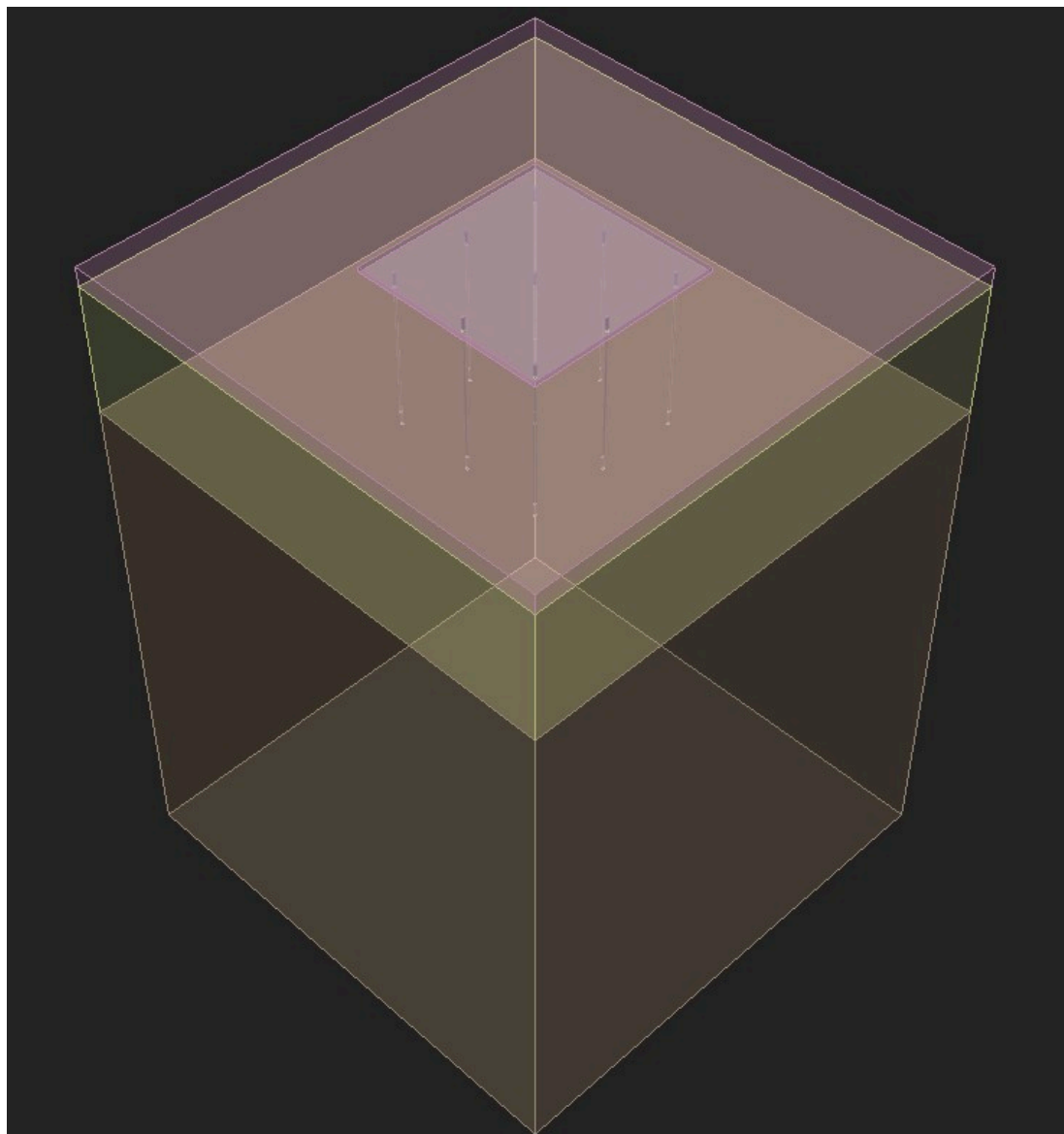
Fonte: Elaborado pelo autor.

- Malha 3x3: 9 estacas, espaçamento de 6,0 m entre eixos;
- Malha 4x4: 16 estacas, espaçamento de 4,0 m entre eixos;
- Malha 5x5: 25 estacas, espaçamento de 3,0 m entre eixos.

As condições de contorno foram aplicadas às faces externas do modelo para simular a continuidade do maciço terroso:

- Faces Laterais: Restrição aos deslocamentos horizontais (eixos X e Y), permitindo recalques verticais;
- Base do Modelo: Restrição total aos deslocamentos (engaste nos eixos X, Y e Z).

A Figura 9 mostra o modelo já apresentado no software:

Figura 9 - Modelo no RS3 (SIM-D20-E40-S6)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1 Tensão de campo inicial e malha de elementos finitos

O estado de tensões inicial do solo foi definido considerando o coeficiente de empuxo no repouso (K_0). Visando garantir a consistência interna do modelo, K_0 foi calculado para a camada de solo a partir da fórmula de Jaky (1944) para solos normalmente adensados:

$$K_0 = 1 - \sin(\phi') \quad (\text{Eq. 6})$$

- Para o aterro ($\phi = 24^\circ$): $K_0 = 1 - \sin(24^\circ) = 0,59$;
- Para a argila siltosa ($\phi = 25^\circ$): $K_0 = 1 - \sin(25^\circ) = 0,58$;
- Para a areia compactada ($\phi = 38^\circ$): $K_0 = 1 - \sin(38^\circ) = 0,38$.

Para a discretização do domínio numérico, adotou-se uma malha não estruturada composta por elementos finitos tetraédricos de 4 nós. A escolha por este tipo de elemento permitiu uma discretização eficiente do domínio tridimensional, equilibrando a representação geométrica com o custo computacional.

A definição da densidade da malha foi baseada em uma análise de sensibilidade (estudo de convergência), visando garantir a independência dos resultados em relação ao tamanho dos elementos. O processo seguiu etapas de refinamento progressivo:

1. **Malha de referência:** Iniciou-se com uma malha global densa (elementos entre 0,1 m e 0,5 m) para estabelecer uma configuração de grande refinamento.
2. **Malha intermediária:** Com elementos entre 0,2 m e 1,2 m, houve uma otimização do tempo computacional.
3. **Malha escolhida:** Por fim, a malha escolhida possui elementos entre 0,2 m e 2,4 m, garantindo precisão nos resultados de recalque com desvio inferior a 2% em relação à malha de referência, porém com tempo de processamento otimizado.

3.3 Carregamento e plano de simulações

O carregamento da superestrutura foi baseado em uma edificação hipotética de 12 pavimentos, empregando uma estimativa de 10 kN/m², gerando uma carga de 2.250 kN por pavimento, totalizando 27.000 kN considerando toda a estrutura. Foi introduzido no software o valor de 120 kPa em forma de pressão uniforme.

O estudo paramétrico foi estruturado para avaliar a sensibilidade do sistema a diferentes configurações geométricas. As simulações foram organizadas em grupos, alterando-se uma variável por vez enquanto as demais permaneciam constantes, permitindo isolar a influência de cada fator no comportamento da fundação. As

variáveis analisadas foram:

- Densidade da malha de estacas: 3x3, 4x4 e 5x5 (alterando o espaçamento entre eixos)
- Espessura do radier: 40 cm e 60 cm;
- Diâmetro das estacas: 20 cm, 40 cm e 60 cm.

Adicionalmente, foram realizadas simulações de referência (modelos de controle) contemplando apenas o radier em fundação direta (sem estacas) para as duas espessuras avaliadas, servindo como base comparativa para o cálculo da eficiência do estaqueamento.

3.4 Simulações

Com o modelo numérico consolidado e verificado, conforme as seções anteriores, a próxima etapa é executar o estudo paramétrico, visando o cumprimento dos objetivos estabelecidos no trabalho.

Para isolar o efeito de cada parâmetro variado, modificou-se um parâmetro por vez, mantendo as demais constantes. O fluxo de simulações está detalhado na Tabela 2.

Tabela 2 - Sequência de simulações

Grupo	Nome do Arquivo	Diâmetro	Espessura	Espaçamento	Quantidade de Estacas
Referência	SIM-E40	-	40 cm	-	Apenas radier
Referência	SIM-E60	-	60 cm	-	Apenas radier
Malha 3x3	SIM-D20-E40-S6	20 cm	40 cm	6,0 m	9 Estacas
Malha 3x3	SIM-D20-E60-S6	20 cm	60 cm	6,0 m	9 Estacas
Malha 3x3	SIM-D40-E40-S6	40 cm	40 cm	6,0 m	9 Estacas
Malha 3x3	SIM-D40-E60-S6	40 cm	60 cm	6,0 m	9 Estacas
Malha 3x3	SIM-D60-E40-S6	60 cm	40 cm	6,0 m	9 Estacas
Malha 3x3	SIM-D60-E60-S6	60 cm	60 cm	6,0 m	9 Estacas

Malha 4x4	SIM-D20-E40-S4	20 cm	40 cm	4,0 m	16 Estacas
Malha 4x4	SIM-D20-E60-S4	20 cm	60 cm	4,0 m	16 Estacas
Malha 4x4	SIM-D40-E40-S4	40 cm	40 cm	4,0 m	16 Estacas
Malha 4x4	SIM-D40-E60-S4	40 cm	60 cm	4,0 m	16 Estacas
Malha 4x4	SIM-D60-E40-S4	60 cm	40 cm	4,0 m	16 Estacas
Malha 4x4	SIM-D60-E60-S4	60 cm	60 cm	4,0 m	16 Estacas
Malha 5x5	SIM-D20-E40-S3	20 cm	40 cm	3,0 m	25 Estacas
Malha 5x5	SIM-D20-E60-S3	20 cm	60 cm	3,0 m	25 Estacas
Malha 5x5	SIM-D40-E40-S3	40 cm	40 cm	3,0 m	25 Estacas
Malha 5x5	SIM-D40-E60-S3	40 cm	60 cm	3,0 m	25 Estacas
Malha 5x5	SIM-D60-E40-S3	60 cm	40 cm	3,0 m	25 Estacas
Malha 5x5	SIM-D60-E60-S3	60 cm	60 cm	3,0 m	25 Estacas

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados extraídos destas simulações constituem a base para a análise comparativa apresentada no capítulo subsequente, permitindo quantificar a influência das variáveis e discutir a eficiência do sistema de fundação proposto.

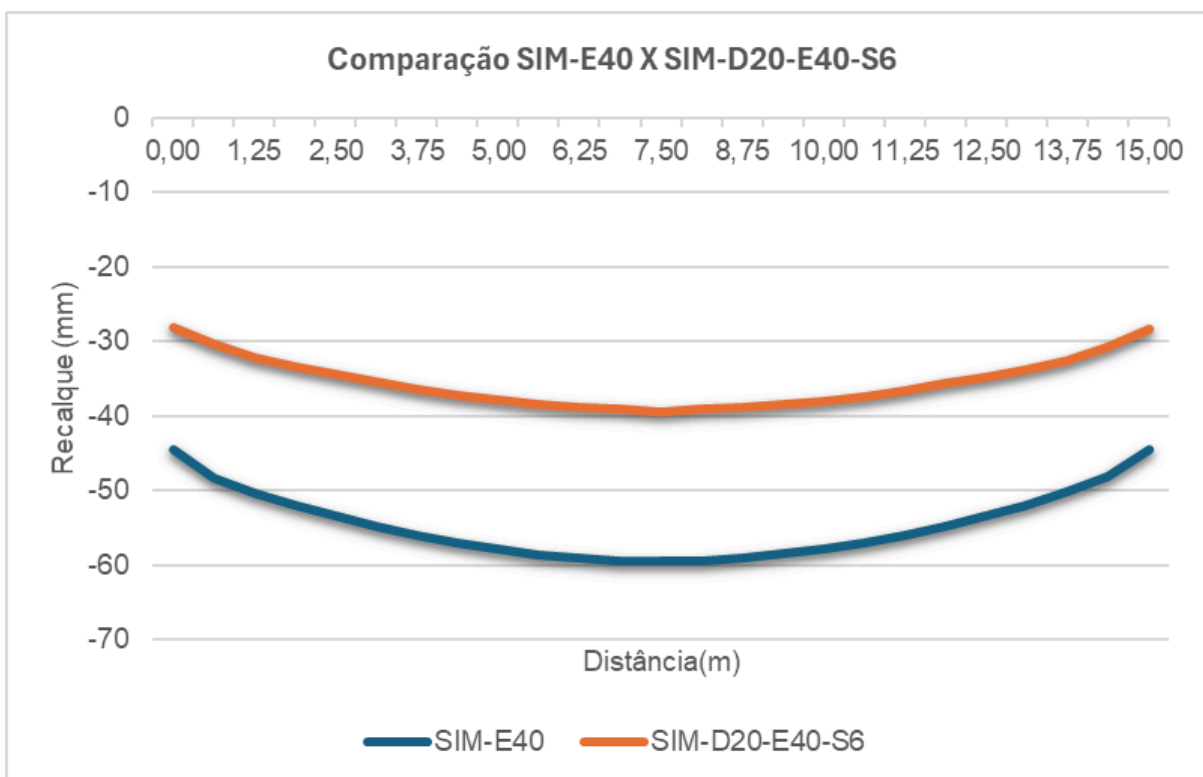
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos através das simulações numéricas no software RS3. A análise foca no comportamento de recalques (máximos e diferenciais) e na eficiência do sistema (partilha de carga) variando-se a geometria das estacas e da laje.

4.1. Validação do modelo: influência da inserção de estacas

Como etapa inicial de validação, comparou-se o desempenho do radier em fundação direta (sem estaqueamento) com a configuração mista de menor densidade (Malha 3x3). A Figura 10 apresenta os perfis de recalque obtidos ao longo do eixo central da fundação.

Figura 10 - Gráfico comparando situação sem estacas e com estacas

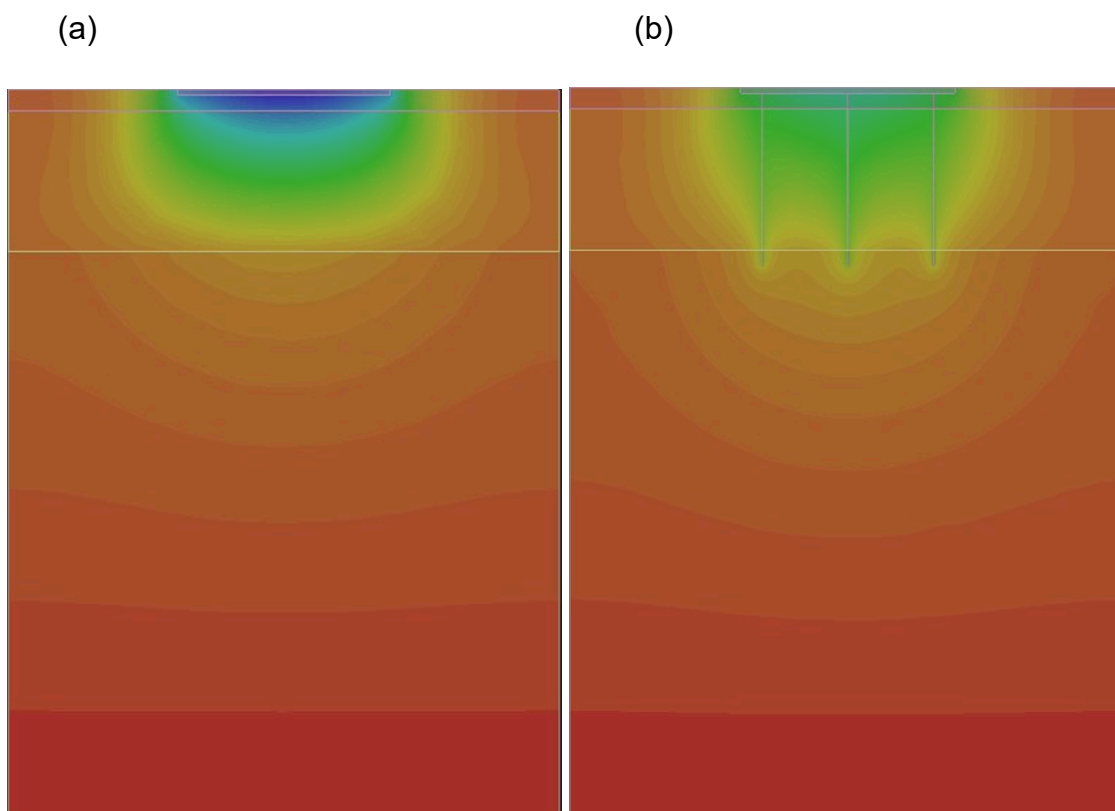


Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que a incorporação das estacas promoveu uma redução imediata na ordem de 35% nos recalques máximos centrais. Além da redução da magnitude, nota-se uma suavização da curvatura da laje.

A Figura 11 ilustra visualmente este comportamento através dos mapas de deslocamento vertical obtidos no RS3.

Figura 11 - Comparativo visual dos deslocamentos verticais: (a) Radier isolado; (b) Radier estaqueado, evidenciando a redução global dos recalques

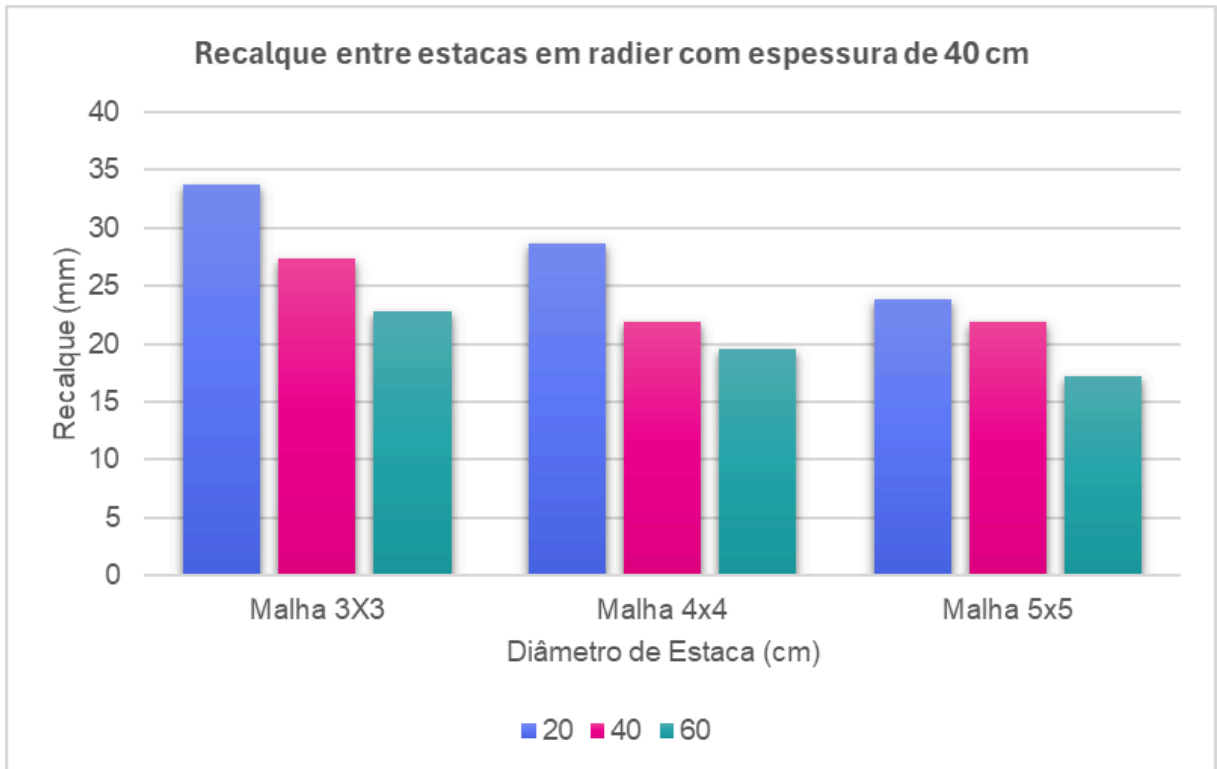


Fonte: Elaborado pelo autor.

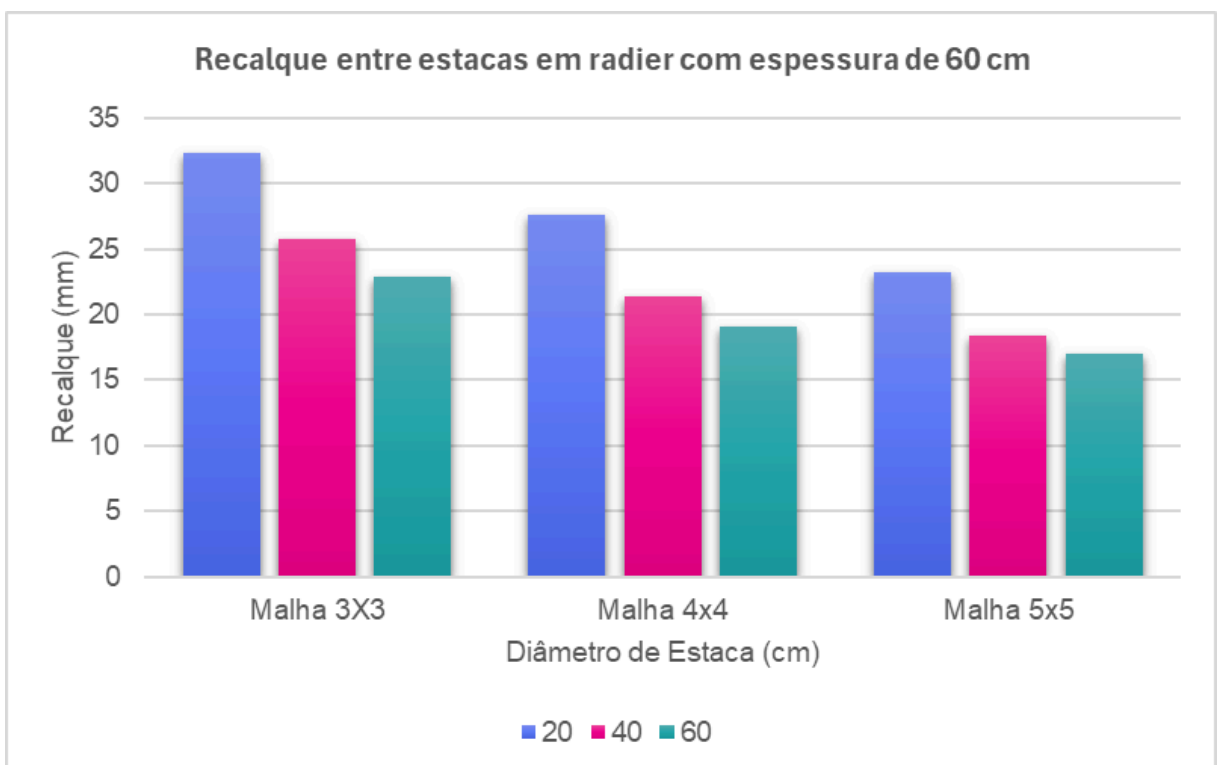
Fica evidente na imagem (a) que o radier isolado apresenta uma zona de concentração de recalques excessivos, representado pela cor azul escura, muito mais abrangente. Já na imagem (b), a presença das estacas cria pontos de suporte rígidos que suportam o maciço, distribuindo as tensões para camadas inferiores e aliviando a deformação superficial.

4.2. Análise dos recalques máximos (centro)

As Figuras 11 e 12 apresentam os valores de recalque máximo medidos no centro geométrico do radier para as espessuras de 40 cm e 60 cm, respectivamente, variando-se o diâmetro e a densidade da malha.

Figura 12 - Comparativo das simulações envolvendo radier com espessura de 40 cm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 - Comparativo das simulações entre estacas envolvendo radier com espessura de 60 cm

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise das figuras permite observar que:

1. **Influência do Diâmetro:** O aumento da rigidez axial (diâmetro de 20 para 60 cm) reduz progressivamente os recalques. O ganho de desempenho é mais notável ao passar de 20 cm para 40 cm.
2. **Influência da Malha:** A configuração 5x5 (25 estacas) mostrou-se a mais rígida. A malha 3x3, devido ao grande espaçamento entre apoios (6,0 m), permitiu maiores deformações do solo entre as estacas, resultando em recalques maiores.

A influência em número é mostrada na seguinte tabela:

Tabela 3 - Influência de cada parâmetro no recalque

Fator Analisado	Recalque máximo (mm)	Recalque mínimo (mm)	Influência (Redução %)
Densidade (Malha)	(a) 25,7	(b) 18,44	28%
Diâmetro (mm)	(c) 27,57	(d) 19,09	31%
Espessura (cm)	(e) 21,84	(f) 21,51	1%

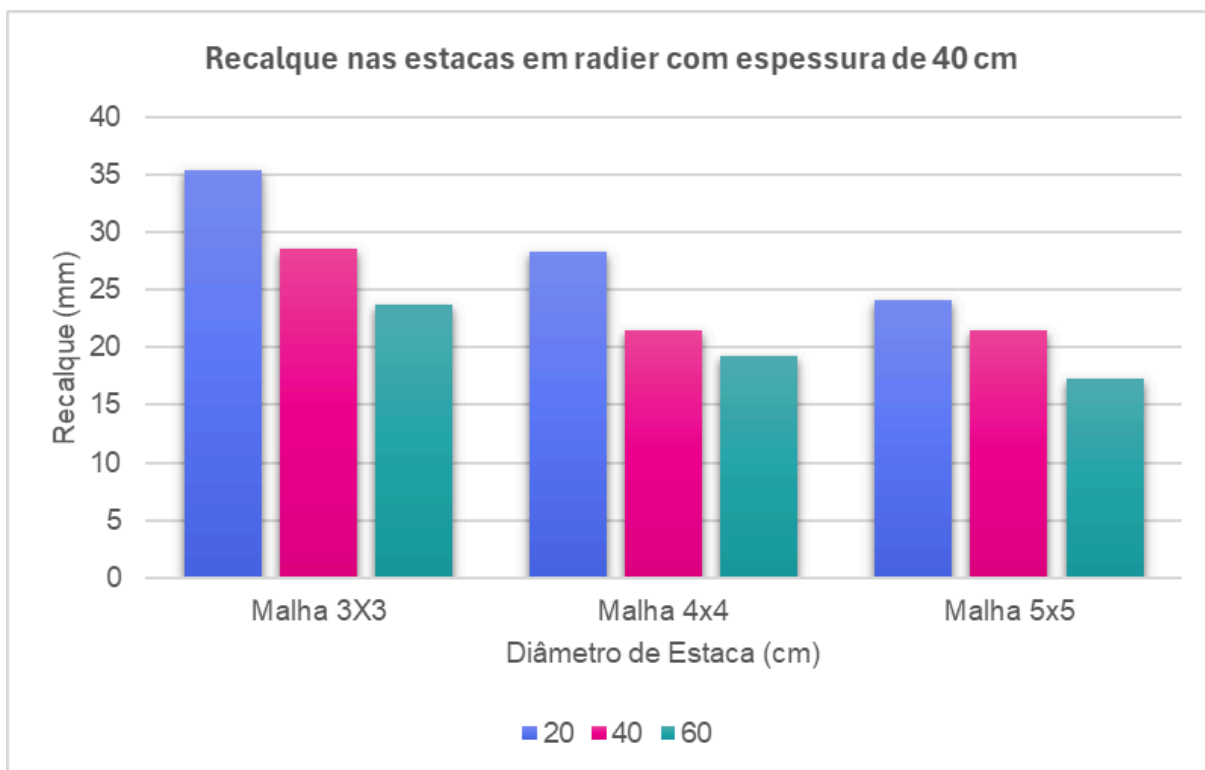
Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram comparados as seguintes simulações para chegar nesse resultado:

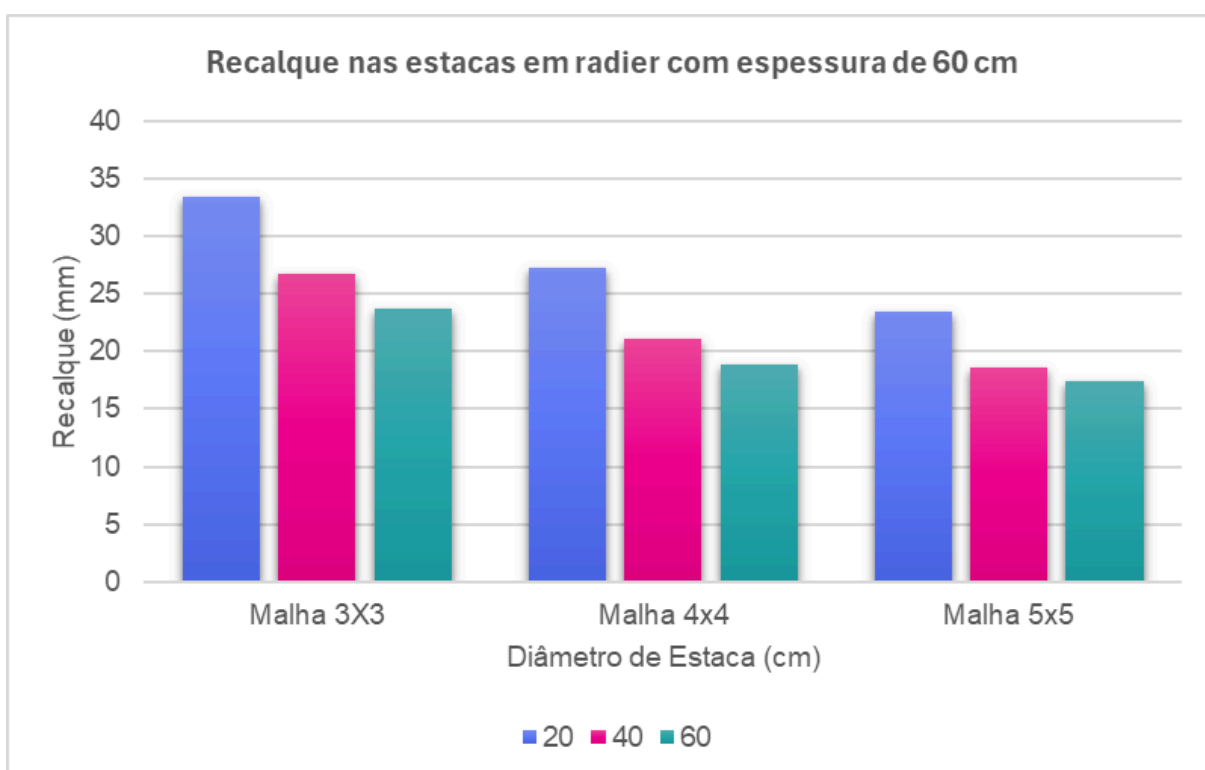
- Densidade da Malha: (a) SIM-D40-E60-S6 e (b) SIM-D40-E60-S3;
- Diâmetro da Estaca: (c) SIM-D20-E60-S4 e (d) SIM-D60-E60-S4;
- Espessura do Radier: (e) SIM-D40-E40-S4 e (f) SIM-D40-E60-S4.

4.3. Análise do Recalque na Borda e Diferencial

A avaliação dos recalques diferenciais é fundamental para verificar o desempenho da fundação quanto aos Estados Limites de Serviço (ELS), prevenindo danos à superestrutura. As Figuras 13 a 16 apresentam o comportamento comparativo dos deslocamentos verticais entre o centro e a periferia do radier.

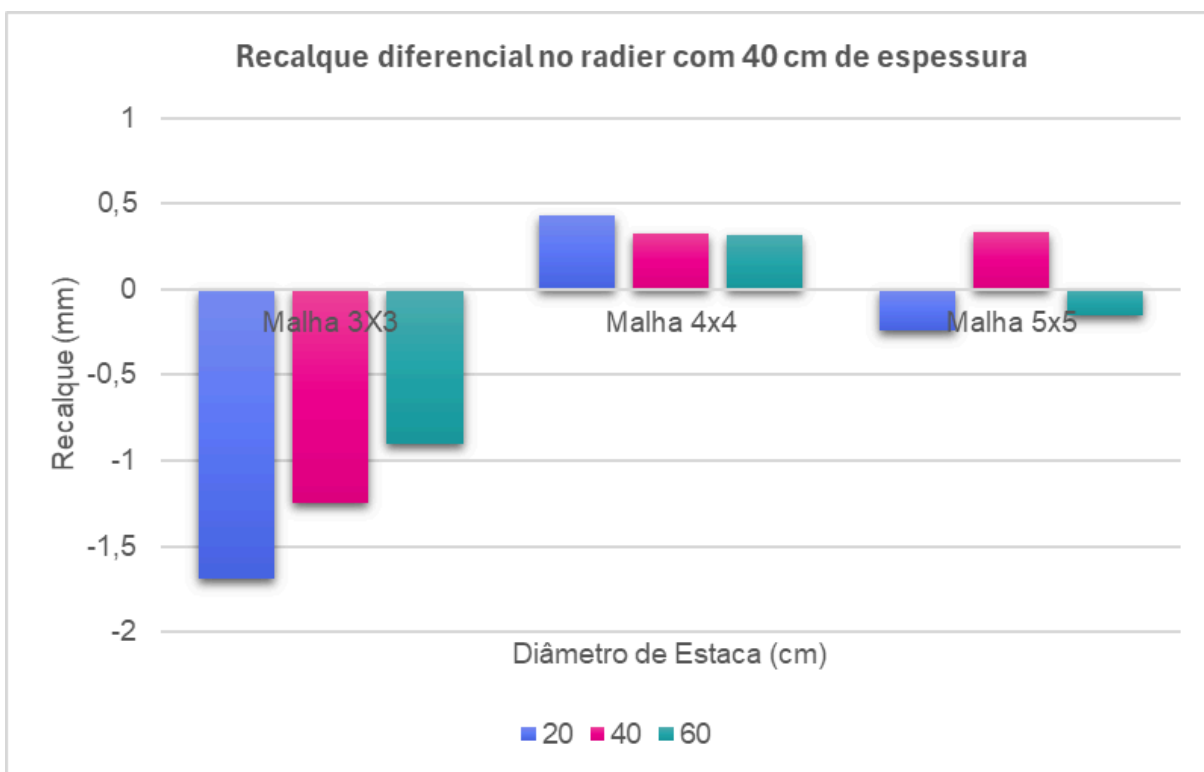
Figura 14 - Comparativo das simulações nas estacas envolvendo radier com espessura de 40 cm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 - Comparativo das simulações nas estacas envolvendo radier com espessura de 60 cm

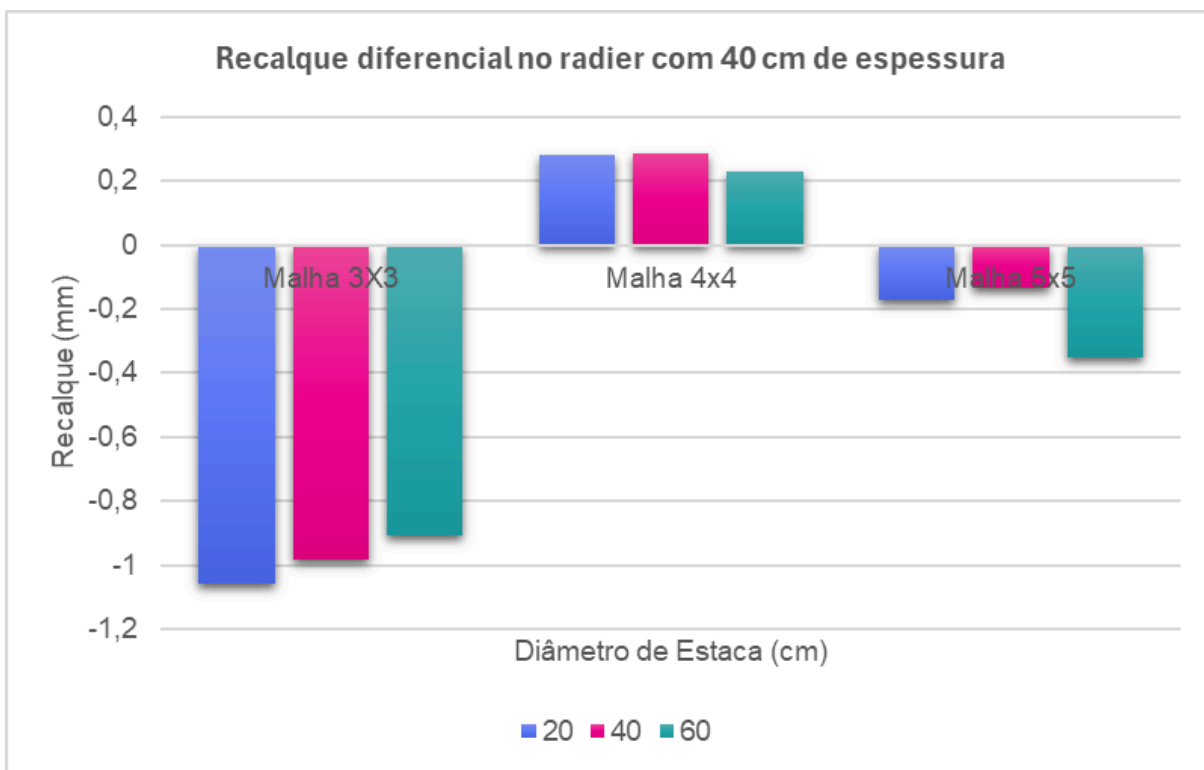
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 - Comparativo do recalque diferencial no radier com 40 cm



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 - Comparativo do recalque diferencial no radier com 60 cm



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise dos resultados evidencia a influência direta da geometria e da rigidez do conjunto na magnitude das distorções:

1. **Comportamento de Corpo Rígido:** Nas configurações de maior densidade (malha 5x5), especialmente quando combinadas com estacas de maior diâmetro, o recalque diferencial tende a zero. Isso indica que o sistema radier-estaca movimenta-se de forma solidária e uniforme, comportando-se como um bloco rígido indeformável.
2. **Efeito de Bacia de Recalque:** Em contrapartida, nas malhas mais esparsas (3x3), observa-se uma acentuada deflexão na região central da laje em relação às bordas. Este fenômeno é mais crítico no radier de menor espessura (40 cm), evidenciando que a baixa rigidez à flexão da laje, combinada com o grande espaçamento entre apoios, resulta em maiores distorções angulares. Tal comportamento sugere a necessidade de aumentar a rigidez da fundação ou da superestrutura para garantir a compatibilidade de deformações.

4.4. Eficiência do sistema

A eficiência do sistema de fundação mista é quantificada pelo coeficiente de partilha de carga, definido como a proporção da carga vertical total absorvida pelo grupo de estacas em relação à carga total aplicada pela superestrutura. Os valores obtidos para as diferentes simulações estão detalhados na Tabela 4.

Tabela 4 - Grau de eficiência das estacas nas diferentes simulações

Grupo	Nome do Arquivo	Diâmetro	Espessura	Espaçamento	Quantidade de Estacas	Eficiência
Malha 3x3	SIM-D20-E40-S6	20 cm	40 cm	6 m	9 Estacas	68%
Malha 3x3	SIM-D20-E60-S6	20 cm	60 cm	6 m	9 Estacas	60%
Malha 3x3	SIM-D40-E40-S6	40 cm	40 cm	6 m	9 Estacas	100%
Malha 3x3	SIM-D40-E60-S6	40 cm	60 cm	6 m	9 Estacas	85%
Malha 3x3	SIM-D60-E40-S6	60 cm	40 cm	6 m	9 Estacas	100%
Malha 3x3	SIM-D60-E60-S6	60 cm	60 cm	6 m	9 Estacas	100%
Malha 4x4	SIM-D20-E40-S4	20 cm	40 cm	4 m	16 Estacas	77%
Malha 4x4	SIM-D20-E60-S4	20 cm	60 cm	4 m	16 Estacas	69%
Malha 4x4	SIM-D40-E40-S4	40 cm	40 cm	4 m	16 Estacas	100%
Malha 4x4	SIM-D40-E60-S4	40 cm	60 cm	4 m	16 Estacas	91%
Malha 4x4	SIM-D60-E40-S4	60 cm	40 cm	4 m	16 Estacas	100%
Malha 4x4	SIM-D60-E60-S4	60 cm	60 cm	4 m	16 Estacas	100%
Malha 5x5	SIM-D20-E40-S3	20 cm	40 cm	3 m	25 Estacas	79%
Malha 5x5	SIM-D20-E60-S3	20 cm	60 cm	3 m	25 Estacas	73%
Malha 5x5	SIM-D40-E40-S3	40 cm	40 cm	3 m	25 Estacas	89%
Malha 5x5	SIM-D40-E60-S3	40 cm	60 cm	3 m	25 Estacas	80%
Malha 5x5	SIM-D60-E40-S3	60 cm	40 cm	3 m	25 Estacas	87%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados demonstram a transição de comportamento do sistema:

1. **Malha 3x3:** Nas configurações mais esparsas, especialmente com estacas de menor diâmetro (20 cm), a eficiência variou entre 60% e 68%. Isso caracteriza o funcionamento ideal de um radier estaqueado, onde o solo superficial contribui ativamente suportando cerca de 30% a 40% da carga, otimizando o custo da fundação.
2. **Malha 4x4:** Ao densificar a malha para 4x4, observa-se um incremento na participação das estacas (77% para D20). Para diâmetros maiores, a eficiência atinge rapidamente 90% a 100%, indicando que a rigidez axial das estacas passa a prevalecer, aliviando quase totalmente a tensão de contato no radier.
3. **Malha 5x5:** Nas configurações de maior rigidez, a carga tende a ser integralmente absorvida pelas estacas (aproximando-se de 100% em diversos casos). Tecnicamente, o sistema deixa de operar como radier estaqueado e passa a funcionar como um Grupo de Estacas convencional com bloco de coroamento. Embora seguro, este comportamento sugere uma ineficiência econômica, pois a capacidade de suporte da camada superficial de solo sob o radier é desperdiçada.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou, por meio de modelagem numérica tridimensional via Método dos Elementos Finitos (MEF), o comportamento de fundações em radier estaqueado, avaliando a sensibilidade do sistema a variações geométricas e de rigidez. A partir dos resultados obtidos e das discussões realizadas, apresentam-se as seguintes conclusões:

1. **Eficácia da Solução Híbrida:** A análise comparativa inicial comprovou a eficiência técnica do radier estaqueado frente à fundação direta. A introdução das estacas, mesmo na configuração de menor densidade (malha 3x3), promoveu uma redução imediata de aproximadamente 35% nos recalques máximos centrais, validando o uso desta solução para o controle de deslocamentos em solos com camadas superficiais compressíveis.
2. **Influência do Diâmetro das Estacas:** Dentre as variáveis geométricas analisadas, o diâmetro das estacas revelou-se o parâmetro de maior influência no comportamento da fundação. O aumento da seção transversal (de 20 cm para 60 cm) proporcionou uma redução de **31%** nos recalques totais. Observou-se que o ganho de desempenho não é linear, sendo mais expressivo nas transições iniciais de diâmetro, o que sugere a existência de um ponto ótimo de dimensionamento econômico.
3. **Influência da Densidade da Malha:** O espaçamento entre estacas demonstrou ser o segundo fator mais relevante, com um impacto de 28% na redução dos recalques ao se densificar a malha de 3x3 para 5x5. A redução do espaçamento aumenta a rigidez global do grupo, mobilizando maior volume de solo e sobrepondo os bulbos de tensão, o que mitiga as deformações.
4. **Influência da Espessura do Radier:** A variação da espessura da laje (de 40 cm para 60 cm) apresentou influência desprezível (**1%**) na redução dos recalques máximos absolutos. Conclui-se que o aumento da espessura do radier atua primordialmente no aumento da rigidez à flexão e na redistribuição de esforços (controle de recalques

diferenciais), não sendo, isoladamente, uma medida eficaz para a redução de recalques totais.

5. **Mecanismo de Compartilhamento de Carga:** As simulações evidenciam uma clara transição de comportamento em função da densidade da malha.
 - Nas malhas esparsas (3x3), o sistema operou como um verdadeiro radier estaqueado misto, com o solo superficial absorvendo entre 20% e 40% da carga total, otimizando o uso dos materiais.
 - Nas malhas densas (5x5) ou com grandes diâmetros, a eficiência das estacas aproximou-se de 100%. Neste cenário, o radier deixa de contribuir como elemento de apoio direto e passa a atuar meramente como um bloco de coroamento rígido. Embora tecnicamente segura, essa configuração pode indicar um sobredimensionamento do número de estacas, tornando a solução economicamente menos eficiente ao desperdiçar a capacidade de suporte do solo superficial.
6. **Recalques Diferenciais:** O adensamento da malha mostrou-se eficaz na eliminação de recalques diferenciais, induzindo o sistema a comportar-se como um corpo rígido. Contudo, em configurações otimizadas (malhas mais espaçadas), verificou-se o efeito de "bacia de recalque", exigindo atenção à verificação de distorções angulares e à rigidez da superestrutura.

Em suma, o estudo conclui que o projeto eficiente de radiers estaqueados não deve buscar apenas a minimização absoluta de recalques através do adensamento excessivo de estacas, mas sim o equilíbrio entre espaçamento e diâmetro. O objetivo deve ser mobilizar a capacidade de carga do radier (contato solo-estrutura) mantendo os deslocamentos dentro dos limites normativos de serviço, garantindo assim a economia e a segurança da solução.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, L. V. A. de et al. Estudo paramétrico sobre recalque de radiers estaqueados utilizando o método dos elementos finitos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., 2017, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABMS, 2017.

ALBUQUERQUE, P. J. R. de; GARCIA, J. R. **Engenharia de fundações**. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

ANTOLINI, L. S. **Análise computacional da interação solo-estrutura em edificações de alvenaria estrutural com fundações em radier estaqueado**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2024.

ANTONIAZZI, J. P. **Interação solo-estrutura de edifícios com fundações superficiais**. 2011. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2022.

AZEVEDO, M. C.; CUNHA, R. P. **Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

BARBOSA, V. D. **Análise de fundações profundas de plataformas marítimas fixas considerando o comportamento não linear do solo num modelo pleno 3D**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.

BESSA, A. K. S.; MONTEIRO, F. F. **Análise de Métodos de Interpretação de Curva Carga x Recalque de Provas de Carga Estática em Fundações Profundas**. Fortaleza: Engenheiros do Nordeste, 2016.

BEZERRA, B. O.; SANTOS NETO, E. F.; SOUZA, D. S. Elementos de fundação:

indicação de aplicação partindo do pré-projeto. **Cadernos de Graduação**, Aracajú, v. 8, n. 2, p. 25-41, maio 2024.

BOWLES, J. E. **Foundation analysis and design**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1996.

CARVALHO, I. F. de; CAVALCANTI NETO, S. N. de A.; ARAÚJO, F. I. de S. Fundações radier: análise de viabilidade técnica e econômica. **Revista de Gestão, Ciência e Inovação (RGCI)**, v. 16, n. 3, 2022. DOI: 10.55908/RGCV16N3-016.

CIBULSKI JUNIOR, O. L. **Estudo da modelagem de radier rígido em concreto armado na análise da interação solo-estrutura**. 2016. 99 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2016.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Fundações Diretas: Projeto Geotécnico**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

CLANCY, P.; RANDOLPH, M. F. An approximate analysis procedure for piled raft foundations. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 17, n. 12, p. 849-869, 1993.

COELHO, A. O. et al. Estudo comparativo do custo benefício de fundações: sapatas isoladas e radier em uma edificação em Teófilo Otoni-MG. *In*: SEMANA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 7., 2017, Teófilo Otoni. **Anais...** Teófilo Otoni: UFVJM, 2017.

D'ANTONA, F. S. **Estudo e análise da fundação do tipo radier estaqueado**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

DÓRIA, L. E. S. **Projeto de estrutura de fundação em concreto do tipo radier**. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

FALCONI, F.; CORRÊA, C. N.; ORLANDO, C. **Fundações: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

FREITAS NETO, O. **Avaliação experimental e numérica de radiers estaqueados**

com estacas defeituosas em solo tropical do Brasil. 2015. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

GARCIA, J. R. **Análise experimental e numérica de radiers estaqueados executados em solo da região de Campinas/SP**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GUSMÃO, A. D.; GUSMÃO FILHO, J. A. Avaliação da influência da interação solo-estrutura. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA (COBRAMSEG), 10., 1994, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABMS, 1994.

HAMBLY, E. C. **Bridge deck behavior**. 1. ed. London: Chapman and Hall, 1976.

JAKY, J. The coefficient of earth pressure at rest. **Journal for Society of Hungarian Architects and Engineers**, p. 355-358, out. 1944.

KIM, K. N. et al. Optimal pile arrangement for minimizing differential settlements in piled raft foundations. **Computers and Geotechnics**, v. 28, n. 4, p. 235-253, 2001.

MANDOLINI, A. Design of piled raft foundations: practice and development. **Soils and Foundations**, v. 43, n. 4, p. 1-10, 2003.

MEDEIROS, L. M. L. **Análise das fundações do reservatório R-10 do Campus Central da UFRN**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MIRANDA, G. S.; GARCIA, J. R. Análise do Efeito de Contato em Fundações Estaqueadas Compostas por Uma Estaca. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA (COBRAMSEG), 20., 2022, Campinas. **Anais...** Campinas: Galoá, 2022.

NASCIMENTO, V. F. do; MARCO, G. De; FLORIAN, F. Fatores que determinam a escolha da fundação: análise dos critérios para escolha do tipo de fundação de uma obra localizada em Uberlândia/MG - Um estudo de caso. **RECIMA21 - Revista**

Científica Multidisciplinar, v. 4, n. 1, e414709, 2023.

PÉREZ LEÓN, R. F. **Interação solo-suporte de túneis construídos em solo mole em processo de adensamento**. 2024. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2024.

PINTO, C. P. J. **Análise de estrutura com interação solo-estrutura e as molas de Winkler**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

POULOS, H. G. Piled raft foundations: design and applications. **Géotechnique**, v. 51, n. 2, p. 95-113, 2001.

RIBEIRO, F. L. B. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos**. Notas de aula, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 2004.

ROCSCIENCE. **Rocscience History**. Disponível em: <https://www.rocscience.com/about/history>. Acesso em: 5 mai. 2025.

SILVA, G. C. F.; AZEVEDO, R. B. **Avaliação da sondagem SPT via estudo de caso**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2021.

STRAMANDINOLI, J. S. B. **Contribuições à Análise de Lajes Nervuradas por Analogia de Grelha**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

TAVARES, S. R. de L. **Técnicas de remediação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

TEIXEIRA, J. I. H.; PINHEIRO, E. C. N. M. Processo executivo de uma fundação do tipo radier: um estudo de caso na cidade de Iranduba-AM. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 12, p. 79533-79542, 2022.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

VIEIRA, C. de S. et al. Aplicação do acoplamento entre o método dos elementos de contorno e o método dos elementos finitos para a análise bidimensional da interação solo-estrutura. *In*: CONGRESSO DE MÉTODOS NUMÉRICOS EM ENGENHARIA, 27., 2009, Lisboa. **Anais...** Lisboa: APMTAC, 2009.

VITOR, K. A. **Um modelo simplificado de radier estaqueado em solo estratificado aplicado a casos com interação solo x estrutura**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.