

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**VINICIUS LEONARDO WEILER**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS NO  
RECALQUE DE SAPATAS PRÓXIMAS A ESCAVAÇÕES UTILIZANDO ANÁLISE  
ESTATÍSTICA: UM ESTUDO DE CASO EM ALEGRETE-RS**

**Alegrete  
2025**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

VINICIUS LEONARDO WEILER

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS NO RECALQUE  
DE SAPATAS PRÓXIMAS A ESCAVAÇÕES UTILIZANDO ANÁLISE ESTATÍSTICA:  
UM ESTUDO DE CASO EM ALEGRETE-RS

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

Orientador: D.Sc. Diego Arthur Hartmann  
Coorientador: Dr. Alisson Simonetti Milani

Alegrete  
2025

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

W422a Weiler, Vinicius Leonardo

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS NO  
RECALQUE DE SAPATAS PRÓXIMAS A ESCAVAÇÕES UTILIZANDO ANÁLISE  
ESTATÍSTICA: UM ESTUDO DE CASO EM ALEGRETE-RS / Vinicius  
Leonardo Weiler.

60 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA CIVIL, 2025.

"Orientação: Diego Arthur Hartmann".

1. Recalque. 2. Modelagem numérica. 3. Análise estatística.  
4. Sapata. 5. Parâmetros geométricos. I. Título.

VINICIUS LEONARDO WEILER

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS NO RECALQUE DE SAPATAS PRÓXIMAS A ESCAVAÇÕES UTILIZANDO ANÁLISE ESTATÍSTICA: UM ESTUDO DE CASO EM ALEGRETE-RS**

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 julho de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Dr. DIEGO ARTHUR HARTMANN - UNIPAMPA - Orientador

Prof. Dr. ALISSON SIMONETTI MILANI - UNIPAMPA

Profa. Dra. RAQUEL MARIANO LINHARES - UNIPAMPA

Prof. Dr. JAELSON BUDNY - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **JAELSON BUDNY, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/07/2025, às 23:05, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DIEGO ARTHUR HARTMANN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/07/2025, às 13:38, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALISSON SIMONETTI MILANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/07/2025, às 13:50, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **RAQUEL MARIANO LINHARES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/07/2025, às 14:15, 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](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1778069** e o código CRC **74E1D445**.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por ter me dado força, saúde e sabedoria para superar cada desafio ao longo desta jornada.

Agradeço a minha família, pelo amor incondicional, apoio constante e incentivo em todos os momentos, principalmente nas viagens feitas de Campo Bom até Alegrete, sem vocês essa conquista não seria possível.

À minha namorada, agradeço por estar ao meu lado nos dias bons e ruins, oferecendo carinho, paciência e motivação quando mais precisei.

Aos amigos que fiz durante o curso, deixo minha gratidão pelas risadas, pelas trocas de conhecimento e pelo companheirismo que tornaram essa caminhada mais leve e significativa.

Sou grato também ao engenheiro William Weiler, pela oportunidade de estágio, pelas orientações práticas e pela confiança em meu trabalho.

Agradeço especialmente ao meu orientador, Professor Dr. Diego Hartmann, pela paciência, disponibilidade e comprometimento em me guiar com excelência na realização deste trabalho.

Por fim, agradeço à Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) por proporcionar uma formação de qualidade e por ser o espaço onde cresci tanto pessoalmente quanto profissionalmente.

“If they're expecting me to surrender, they'd better sit down and wait”.

Poppy, personagem fictícia do jogo *League of Legends*, desenvolvido pela Riot Games

## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência de parâmetros geométricos no recalque de fundações rasas próximas a escavações, por meio de modelagem numérica e análise estatística. Para isso, foram realizadas simulações no software Rocscience RS2, representando uma sapata corrida submetida a uma tensão constante de 300 kPa, representativa da condição típica do solo na cidade de Alegrete-RS. Um dos parâmetros geométricos do modelo, a profundidade da escavação, foi limitada a 4 metros, baseado também em condições características da cidade de Alegrete-RS. A partir disso, foram conduzidas 27 simulações, variando a largura da sapata, a profundidade da escavação e a distância entre a sapata e a escavação. Com base nos resultados obtidos, foi possível quantificar os recalques gerados em cada simulação e aplicar métodos estatísticos. A análise de variância (ANOVA), realizada no software Statistica, permitiu identificar quais parâmetros geométricos exerceram maior influência sobre o recalque observado. Já a Regressão Linear, também conduzida no mesmo software, possibilitou o desenvolvimento de uma fórmula empírica de estimativa de recalque, onde posteriormente foi analisado a variação entre os valores de recalque através do software e da fórmula. Além dos efeitos isolados de cada variável, também foram analisadas combinações entre os parâmetros geométricos, buscando compreender interações que potencializam os efeitos sobre o recalque. Os resultados indicam que pequenas variações nos parâmetros geométricos podem provocar alterações significativas no comportamento da fundação, especialmente em cenários com escavações próximas. Além disso, a análise estatística permitiu identificar a variável com maior influência sobre o recalque, fornecendo uma base sólida para decisões mais precisas em projetos de fundações. O estudo reforça a importância de considerar essas interações geométricas já na fase de projeto e demonstra que a combinação entre modelagem numérica e análise estatística é uma ferramenta poderosa no suporte à engenharia geotécnica, contribuindo para soluções mais seguras e eficientes em ambientes urbanos.

**Palavras-Chave:** Recalque; Sapata; Modelagem numérica; Análise estatística; Parâmetros geométricos.

## **ABSTRACT**

This study aimed to evaluate the influence of geometric parameters on the settlement of shallow foundations located near excavations, through numerical modeling and statistical analysis. For this purpose, simulations were carried out using the Rocscience RS2 software, representing a strip footing subjected to a constant stress of 300 kPa, representative of the typical soil condition in the city of Alegrete-RS, Brazil. One of the geometric parameters of the model, the maximum excavation depth, was limited to 4 meters, based on typical conditions observed in the city of Alegrete, Brazil. A total of 27 simulations were conducted, varying the footing width, excavation depth, and the distance between the footing and the excavation. Based on the results obtained, it was possible to quantify the settlements generated in each scenario and apply statistical methods. The analysis of variance (ANOVA), performed using the Statistica software, allowed for the identification of the parameters that exerted the greatest influence on the observed settlement. Linear regression, also conducted in the same software, enabled the development of an empirical equation to estimate settlement, with an error margin consistent with the simulated data. In addition to the isolated effects of each variable, combinations between the geometric parameters were also analyzed, aiming to understand interactions that intensify settlement effects. The results indicate that small variations in geometric parameters can significantly affect foundation performance, especially in scenarios involving nearby excavations. Furthermore, the statistical analysis made it possible to identify the parameter with the greatest influence on settlement, providing a solid basis for more accurate foundation design decisions. The study highlights the importance of considering these geometric interactions during the design phase and demonstrates that the combination of numerical modeling and statistical analysis is a powerful tool in supporting geotechnical engineering, contributing to safer and more efficient solutions in urban environments.

**Keywords:** Settlement; Footing; Numerical modeling; Statistical analysis; Geometric parameters.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição do bulbo de tensões sob a base de uma sapata.....	14
Figura 2 - Representação da discretização dos elementos.....	16
Figura 3 - Fluxograma geral do programa.....	21
Figura 4 - Condições finais de malha definida.....	23
Figura 5 - Representação do Modelo.....	24
Figura 6 - Recalques médios Resultantes das 27 Simulações Numéricas com Variação dos Parâmetros Geométricos (A, B, D) .....	28
Figura 7 - Recalque em função da Largura da Base da Sapata (A), base fixa = 0,6 m.....	29
Figura 8 - Recalque em função da Largura da Base da Sapata (A), base fixa = 1,2 m.....	29
Figura 9 - Recalque em função da Largura da Base da Sapata (A), base fixa = 1,8 m .....	30
Figura 10 - Distribuição de tensões no solo com escavação localizada a 0 m da sapata.....	31
Figura 11 - Distribuição de tensões no solo com escavação localizada a 2,5 m da sapata.....	32
Figura 12 - Inserção dos dados no software Statistica (ANOVA).....	34
Figura 13 - Resultados obtidos após a realização do ANOVA.....	34
Figura 14 - Inserção dos dados no software Statistica (Regressão Linear múltipla).....	36
Figura 15 - Resultados obtidos após a realização da Regressão Linear múltipla.....	36
Figura 16 - Gráfico dos recalques previstos X observados.....	38
Figura 17 - Coeficientes e fórmula estruturada.....	38
Figura 18 - Comparação entre valores de recalque e a variação associada a diferença entre os valores previstos e observados.....	39
Figura 19 - Sapata Flexível.....	43
Figura 20 - Malha Geral 0.5 Estilo "Graded".....	43
Figura 21 - Refinamento localizado na base da sapata.....	45
Figura 22 - Variação do Lado Esquerdo.....	45
Figura 23 - Variação do Lado Direito.....	46
Figura 24 - Variação Parte Inferior.....	46
Figura 25 - Malha uniforme com 1k de quadrados ou 0.3.....	47
Figura 26 - Comparação dos Módulos de Rigidez.....	47

Figura 27 - Comparação Malha Geral "Geaded".....	48
Figura 28 - Comparação Local do Refinamento Localizado.....	48
Figura 29 - Comparação da variação do Lado esquerdo.....	49
Figura 30 - Comparação da variação do Lado direito.....	49
Figura 31 - Comparação da variação da Parte Inferior.....	50
Figura 32 - Comparação do tamanho da Malha Uniforme.....	50
Figura 33 - Comparação entre os valores de coesão.....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MEF – Método dos Elemento Finitos

RS – Rio Grande do Sul

CPT – *Cone Penetration Test*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>8</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>8</b>
<b>1.3</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1</b>	<b>Interação Solo-Estrutura.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2</b>	<b>Recalque em fundações Rasas .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3</b>	<b>Simulação Numérica e Modelagem Computacional.....</b>	<b>14</b>
<b>2.4</b>	<b>Condições Hidrogeológicas da Cidade do Alegrete no RS .....</b>	<b>16</b>
<b>2.5</b>	<b>Aplicação de Análise Estatística em Modelagens Geotécnicas .....</b>	<b>17</b>
<b>2.6</b>	<b>Estudos Relacionados a Modelagem Numérica de Recalques e Interação Solo-Estrutura .....</b>	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1</b>	<b>Definição do problema.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Análise do módulo de rigidez da sapata .....</b>	<b>22</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Análise da configuração da malha e das dimensões do modelo.....</b>	<b>22</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Definição Final do Modelo .....</b>	<b>24</b>
<b>3.2</b>	<b>Software e equipamento utilizado.....</b>	<b>25</b>
<b>3.3</b>	<b>Métodos.....</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1</b>	<b>Resultados das simulações.....</b>	<b>27</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Influência da largura da base sapata no recalque.....</b>	<b>30</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Influência da distância da sapata a escavação no recalque .....</b>	<b>30</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Influência da profundidade da escavação no recalque .....</b>	<b>32</b>
<b>4.2</b>	<b>Análise estatística dos resultados.....</b>	<b>32</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Aplicação da ANOVA.....</b>	<b>33</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Aplicação da Regressão Linear múltipla.....</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>43</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A interação solo-estrutura é um aspecto fundamental na engenharia geotécnica e estrutural, sendo determinante para o comportamento e a segurança das fundações. Escavações realizadas em proximidade a fundações existente geram redistribuições das tensões no solo, podendo resultar em recalques diferenciais que comprometam a integridade da estrutura. O entendimento dessas interações é essencial para mitigar riscos e garantir a estabilidade das edificações, especialmente em áreas urbanas. Para aprimorar a previsão desses fenômenos, técnicas de modelagem numérica vêm sendo amplamente utilizadas. Mesmo diante das incertezas nos parâmetros geotécnicos, essas técnicas permitem representar o comportamento do solo de forma mais fiel à realidade, resultando em estimativas mais confiáveis do que aquelas obtidas por métodos puramente empíricos. Essas abordagens auxiliam na identificação de regiões críticas e possibilitam a análise de variáveis que influenciam diretamente o desempenho das fundações em condições complexas de carregamento e geometria.

Entre as abordagens numéricas mais utilizadas, destaca-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), amplamente empregado para representar fundações, escavações e diferentes tipos de solos, como argilas, areias e siltes. Esse método permite, desde que adequadamente utilizado, prever recalques, deslocamentos e redistribuições de tensões com alta precisão. Entre os softwares que utilizam essa metodologia, destaca-se o Rocscience RS2. Sua eficiência na modelagem de fundações e escavações faz com que seja uma ferramenta fundamental para a simulação de condições geotécnicas complexas. Hamediazad e Bahrani (2022) ressaltam que o RS2 é amplamente utilizado devido à sua capacidade de simular interações solo-estrutura com alta precisão, permitindo compreender a redistribuição de tensões no solo e o comportamento de diferentes materiais geotécnicos sob variadas condições de carregamento e deformação.

No presente estudo, o RS2 foi empregado para modelar a interação solo-estrutura na base de uma sapata corrida flexível, considerando os efeitos de uma escavação adjacente nos recalques.

Dessa forma, este trabalho busca contribuir para o entendimento da influência de parâmetros geométricos no comportamento de fundações próximas a escavações,

utilizando modelagem numérica e análise estatística para apoiar decisões em projetos geotécnicos.

### **1.1 Objetivo geral**

O presente estudo teve como objetivo avaliar a influência de parâmetros geométricos e diferentes carregamentos no recalque de uma fundação rasa próxima a uma escavação por meio de modelagem numérica e análise estatística.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Realizar a análise de geometria e de malha do modelo numérico no software Rocscience RS2, identificando os parâmetros e condições adequadas para a simulação do problema;
- Avaliar a influência de diferentes configurações geométricas e de carregamento nos recalques observados na base de uma sapata corrida flexível próxima a uma escavação;
- Identificar os parâmetros geométricos com maior influência no recalque através de análise estatística;
- Desenvolver uma equação empírica de estimativa de recalque com base na análise estatística dos resultados.

### **1.3 Justificativa**

As fundações são elementos fundamentais para a estabilidade e segurança das edificações. Um dos fatores que podem afetar o desempenho das fundações é a presença de escavações próximas, que podem alterar o estado de tensões do solo, provocando recalques diferenciais. Este tipo de situação é comum em ambientes urbanos, onde novas obras frequentemente se desenvolvem ao lado de edificações existentes, exigindo uma análise precisa da interação solo-estrutura. Apesar da sua relevância, a influência de escavações próximas sobre fundações rasas ainda costuma ser subestimada em muitos projetos de engenharia, o que pode levar ao surgimento de patologias como trincas, deslocamentos e, em situações mais críticas, até à perda da estabilidade da edificação. Com os avanços tecnológicos, a simulação

computacional se tornou uma aliada importante no entendimento desses fenômenos, especialmente por meio do Método dos Elementos Finitos.

Dessa forma, o presente estudo justifica-se pela necessidade de compreender de forma mais aprofundada os efeitos de escavações adjacentes a fundações rasas. Além disso, a utilização de uma abordagem estatística, por meio da aplicação de análise de variância (ANOVA) e regressão linear, permite identificar com maior precisão os parâmetros geométricos mais influentes no comportamento da fundação, contribuindo para o aprimoramento dos projetos geotécnicos e para a prevenção de falhas estruturais.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Fundações são elementos estruturais fundamentais que desempenham a função principal de transferência de carga de uma edificação para o subsolo, garantindo desta forma a segurança e estabilidade da estrutura. As fundações são classificadas em dois tipos principais: fundações rasas e fundações profundas.

As fundações profundas são utilizadas quando há necessidade de alcançar camadas mais resistentes em maiores profundidades, sendo recomendadas para terrenos com baixa capacidade de suporte superficial ou para edificações de grande porte. Já as fundações rasas transferem as cargas para as camadas superficiais do subsolo e são amplamente aplicadas quando este apresenta resistência suficiente próximo à superfície. A escolha entre esses dois tipos de fundação depende de fatores como a carga aplicada, a resistência do subsolo e a profundidade do nível freático.

As fundações rasas são amplamente utilizadas na engenharia civil, especialmente quando o subsolo apresenta capacidade de suporte suficiente nas camadas superficiais. Sua aplicação é recomendada quando há viabilidade técnica e econômica para suportar as cargas da edificação sem a necessidade de fundações profundas. As fundações rasas podem ser classificadas de acordo com o tipo de carregamento que suportam, incluindo cargas verticais, horizontais ou combinadas. Essas fundações são influenciadas por diversos fatores técnicos, como a capacidade de carga do solo, a distribuição das tensões no subsolo e a magnitude das cargas provenientes da superestrutura da edificação.

### **2.1 Interação Solo-Estrutura**

A interação solo-estrutura é um campo essencial de estudo na engenharia geotécnica e estrutural, pois analisa o comportamento conjunto entre o solo e as edificações nele apoiadas. Essa interação ocorre por meio da troca de esforços e deslocamentos entre o solo e a estrutura, influenciando diretamente a estabilidade e durabilidade das construções. Além de ser um fator crítico para grandes obras, como túneis e contenções, a interação solo-estrutura também desempenha um papel fundamental em fundações rasas, como as sapatas, onde os recalques diferenciais podem comprometer a segurança estrutural. Segundo Cheng et al. (2020), métodos mais simplificados para estimar os deslocamentos longitudinais e circunferenciais em

túneis escavados reforçam a importância de compreender essa interação para garantir a estabilidade de construções subterrâneas.

A interação dinâmica existente entre o solo e a estrutura é essencial na engenharia geotécnica, especialmente em projetos sujeitos a vibrações e cargas dinâmicas, como fundações de máquinas industriais, viadutos e usinas nucleares. Segundo Li et al. (2023), um framework híbrido baseado em frações contínuas modificadas mostrou-se eficaz na análise da interação entre estacas e solo, permitindo maior precisão na previsão de recalques. Em fundações rasas próximas a escavações, esses efeitos também influenciam os recalques diferenciais, exigindo consideração na modelagem computacional. É de extrema importância que se entenda de forma detalhada que a interação solo-estrutura é um fator essencial em projetos geotécnicos, independentemente da escala da construção. Embora seja amplamente estudada em estruturas de grande porte, sua influência também é crítica em fundações rasas, como sapatas submetidas a escavações adjacentes.

Modelagens computacionais permitem prever esses efeitos e otimizar soluções de engenharia, minimizando impactos adversos na estabilidade da fundação.

A interação solo-estrutura é um fator crítico na análise geotécnica, especialmente no comportamento de sapatas próximas a escavações. O recalque diferencial pode comprometer a estabilidade estrutural, sendo influenciado pelas propriedades do solo e redistribuição de tensões causadas pela proximidade de escavações.

Para prever esses efeitos, o uso de modelagens computacionais tem sido fundamental na engenharia geotécnica

A simulação das deformações do solo por meio de modelagem computacional permite prever com precisão o comportamento de fundações rasas sob diferentes condições de carregamento e escavação. Estudos como o de Li et al. (2023) baseado no Método dos Elementos Finitos demonstram que a escolha adequada dos parâmetros do solo e a calibração do modelo são essenciais para a confiabilidade dos resultados. A definição da malha computacional desempenha um papel essencial na precisão dos modelos numéricos, influenciando a convergência dos resultados e a correta representação das deformações do solo.

## 2.2 Recalque em fundações Rasas

Hossein et al. (2020) propuseram um modelo polinomial para prever recalques em fundações rasas sobre solos não coesivos, utilizando dados obtidos por meio do ensaio de penetração de cone (CPT – *Cone Penetration Test*). O modelo considera variáveis geotécnicas essenciais, como a carga aplicada e a resistência do solo, permitindo estimativas mais precisas do comportamento do recalque sob diferentes condições de carregamento. O recalque que ocorre em fundações rasas é considerado um dos principais desafios a ser enfrentado na engenharia geotécnica, especialmente quando tratado a respeito de solos que possuem características heterogêneas ou não coesivas, como é frequentemente notado em locais com solos arenosos de baixa resistência. O recalque é associado ao assentamento vertical do solo devido às cargas aplicadas pela fundação, que, por sua vez, suporta os esforços oriundos da estrutura. Fatores como a distribuição das cargas e a rigidez do solo influenciam significativamente o comportamento da fundação frente ao recalque. Os recalques diferenciais podem comprometer a integridade estrutural, levando ao surgimento de patologias, como fissuras diagonais em paredes, além de provocar inclinações indesejadas na edificação.

No caso das fundações rasas, as sapatas destacam-se como o tipo mais comumente utilizado e o seu recalque pode ser calculado com base na tensão admissível do solo e no módulo de elasticidade. O método amplamente utilizado para o cálculo de recalque é o método de Terzaghi, que se baseia nas equações de deformação do solo sob a aplicação de uma carga. Para solos arenosos e coesivos o recalque é geralmente classificado em tipos principais, o recalque imediato que ocorre devido a deformação elástica do solo logo após a aplicação de uma carga; o recalque primário, que está associado a expulsão da água dos poros do solo (predominantemente em solos argilosos); e o recalque secundário, relacionado a reorganização estrutural das partículas do solo ao longo do tempo. No caso de solos não coesivos, destaca-se o método baseado nos resultados do CPT, o método de Schmertmann, que utiliza os dados do ensaio CPT para a determinação do recalque com base em parâmetros como a resistência de ponta e a resistência lateral.

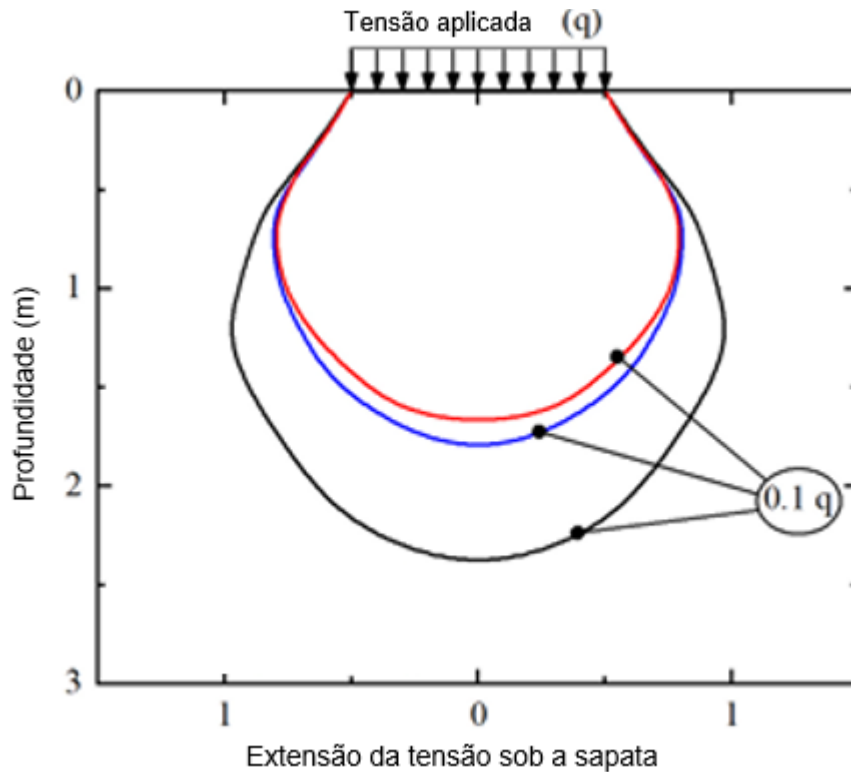
De acordo com Doherty et al. (2022), O comportamento denominado carga-recalque é regido principalmente pela resistência do solo e pela forma de distribuição da carga aplicada. A abordagem de Doherty et al. (2022) enfatiza a importância de

combinar parâmetros geotécnicos detalhados no processo de previsão de recalques, destacando a relevância de simulações computacionais na análise da interação solo-estrutura.

Um aspecto essencial a ser analisado em fundações rasas, sobre solos não coesivos, são fatores externos que podem provocar alterações diretamente no comportamento do solo, como variação sazonal, visto que em determinadas estações, ocorrem variações na temperatura e umidade do solo. Outro fator a ser considerado é a alteração no nível do lençol freático, uma vez que sua elevação aumenta o grau de saturação do solo e o seu teor de umidade, reduzindo sua coesão, resultando em uma menor resistência ao cisalhamento. Por outro lado, a diminuição do nível do lençol freático, tende a reduzir a saturação do solo, acarretando o aumento da resistência ao cisalhamento, pois com o aumento da umidade temos o favorecimento da compactação e com isso temos o aumento da aderência entre as partículas. Essas condições são mais complexas de modelar de forma precisa, mas são cruciais para uma avaliação realista do desempenho da fundação frente ao recalque.

O recalque ocorre em função da carga aplicada e da resistência do solo, resultando em uma distribuição não uniforme de tensões ao longo da profundidade. Essa distribuição é comumente representada pelo bulbo de tensões, que ilustra a dissipação das tensões transmitidas pela fundação ao longo do solo, como pode ser visto na figura 1.

Figura 1 – Distribuição do bulbo de tensões sob a base de uma sapata



Fonte: Adaptado de Mahgoub e Naggar (2020)

### 2.3 Simulação Numérica e Modelagem Computacional

A simulação numérica e a modelagem computacional, vem se tornando ferramentas essenciais na engenharia geotécnica nos últimos anos, devido a capacidade de fornecer uma representação mais precisa e detalhada do comportamento do solo e das fundações quando submetidas a condições diversas. Segundo Pereira (2018) essa abordagem é particularmente importante para representar de maneira confiável o comportamento do solo e prever recalques, desde que se utilizem parâmetros geotécnicos precisos e condições de contorno realistas.

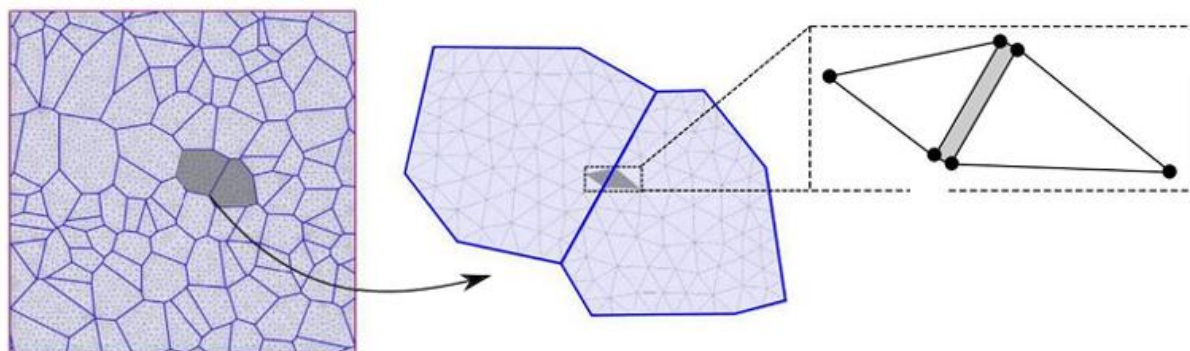
Os métodos de simulação possibilitam a análise de fenômenos complexos, como o recalque em fundações rasas, em condições que seriam difíceis de reproduzir experimentalmente. De acordo com Honório (2021), a modelagem numérica tem se mostrado uma ferramenta eficaz para prever os impactos das escavações em fundações vizinhas, analisando recalques e esforços nas fundações através de

simulações computacionais. Uma das principais vantagens das simulações numéricas, é a capacidade de considerar diversas variáveis que influenciam o comportamento do solo. Entre elas, destacam-se as propriedades geotécnicas do solo, as características das cargas aplicadas e suas variações, além das condições ambientais, que desempenham um papel fundamental na resposta do solo às solicitações externas.

Do ponto de vista prático, a modelagem computacional emprega técnicas avançadas, como o MEF, considerado a abordagem numérica mais eficiente na engenharia. No campo da engenharia estrutural, o MEF é comumente utilizado para resolver problemas relacionados a fundações, recalques, e mais especificamente, a interação solo-estrutura. O MEF, baseia-se na discretização de um modelo contínuo em uma malha composta por pequenos “elementos” conectados entre si. Cada elemento é analisado de maneira individual, mas as interações entre eles são levadas em consideração para determinar qual seria a solução global do sistema. Esse processo de discretização é fundamental para a resolução de problemas mais complexos que dificilmente seriam resolvidos de maneira analítica.

O software Rocscience, foi desenvolvido em 1980, com o intuito de fornecer soluções precisas e eficazes para análises de fundações, estabilidade de taludes e outras estruturas geotécnicas. Atualmente, seu módulo RS2 é amplamente empregado nos estudos acadêmicos e projetos de engenharia, sendo muito utilizado para prever deformações, tensões e recalques em diferentes tipos de solo. Quando comparado a outros softwares de elemento finitos, como Plaxis e Abaqus, o RS2 assim como eles se destacam pela sua interface intuitiva que permite a modelagem de diferentes condições de contorno e carregamento. No entanto, sua aplicação pode ser limitada em análises tridimensionais que forem mais complexas, sendo necessário o uso de softwares específicos para simulações em larga escala. Esse conceito é ilustrado na Figura 2, que apresenta a discretização em elementos finitos, evidenciando a formação da malha através da conexão de elementos e o detalhamento visual de uma região específica do domínio analisado

Figura 2 - Representação da discretização dos elementos



Fonte: Adaptado de Rógenes et al. (2024)

## 2.4 Condições Hidrogeológicas da Cidade do Alegrete no RS

Na cidade do Alegrete localizada no estado do Rio Grande do Sul, observa-se a ocorrência de desafios significativos em obras envolvendo fundações, especialmente em áreas suscetíveis a eventos climáticos extremos, como as enchentes, recorrentes em determinadas épocas do ano. Um exemplo disso foi o evento de maio de 2024, que afetou diversas regiões do estado. Tais eventos são críticos para a engenharia geotécnica, pois podem impactar as características do solo e a estabilidade das fundações, ocorrendo em períodos de precipitação intensa, comprometendo a capacidade de suporte das fundações e gerando riscos associados ao recalque e ao assentamento diferencial das estruturas. De acordo com o Repórter Popular (2024), na zona leste da cidade, que sofre há anos com o problema dos alagamentos, moradores dos bairros Segabinazzi e Dr. Romário tiveram mais uma vez suas residências destruídas. Repórter Popular (2024) afirma que esta região não é atingida somente devido a cheia do Rio Ibirapuitã, mas também devido ao sistema de esgoto e escoamento de águas não funcionar, não existir ou não se manter com devida manutenção, devido à ineficácia e inadequação do sistema de esgoto e drenagem. Relatos indicam que as casas seguidamente sofrem com infiltrações, recalques e danos estruturais, fenômenos que podem estar relacionados a diferentes fatores geotécnicos e construtivos. Enquanto os recalques e os danos estruturais estão diretamente ligados à capacidade do solo de suportar as cargas das edificações, as

infiltrações podem chegar a ocorrer por falhas na drenagem, presença de lençol freático elevado ou ausência de impermeabilização adequada, agravando a degradação estrutural ao longo do tempo.

Diante deste cenário torna-se evidente a análise geotécnica, especialmente nas fases iniciais de um projeto de construção quando abordado sobre as deformações, o comportamento do solo e suas interações com a fundação da edificação. No contexto deste trabalho, a adoção de parâmetros representativos da realidade geotécnica local, como a profundidade do topo do maciço rochoso e a limitação da escavação a até 4 metros, deve-se ao fato de que esse valor corresponde à profundidade média em que o topo desse maciço rochoso é encontrado na cidade de Alegrete/RS, servindo como base para definir o limite das escavações simuladas.

## **2.5 Aplicação de Análise Estatística em Modelagens Geotécnicas**

Com avanço das ferramentas computacionais, a engenharia geotécnica tem incorporado cada vez mais métodos estatísticos na análise dos resultados obtidos por meio de modelagens numéricas. A utilização dessas técnicas permite ter uma compreensão mais aprofundada dos fenômenos analisados, bem como a identificação dos fatores que exercem maior influência sobre as respostas estruturais do solo e da fundação.

Entre os métodos mais utilizados, destacam-se a Análise de Variância (ANOVA) e a Regressão Linear Múltipla. A ANOVA é uma ferramenta estatística que permite avaliar a significância dos efeitos de diferentes variáveis sobre uma outra variável, considerando a variação dos dados em função de distintos fatores. No contexto da engenharia geotécnica, ela pode ser aplicada para identificar quais parâmetros geométricos ou geotécnicos têm influência estatisticamente significativa no recalque ou em outros comportamentos estruturais observados nas simulações (Iliyas et al., 2023).

Por sua vez, a regressão linear possibilita o ajuste de equações que modelam o comportamento de sistemas com base nos dados obtidos nas análises computacionais. Por meio dela, é possível gerar modelos preditivos que relacionam diretamente as variáveis de entrada (como profundidade de escavação, largura da base da sapata e distância até a escavação) com o recalque obtido, facilitando o entendimento da influência relativa de cada parâmetro (Gajjar et al., 2023).

Essas abordagens estatísticas são especialmente úteis quando associadas a estudos paramétricos, onde diferentes combinações de variáveis são simuladas. A análise conjunta dos dados permite identificar padrões, quantificar efeitos individuais e interativos entre variáveis, e propor equações empíricas com base em fundamentos estatísticos sólidos.

Dessa forma, a integração entre modelagens numéricas geotécnicas e análise estatística se apresenta como uma abordagem moderna e eficaz, ampliando o potencial de interpretação dos resultados e contribuindo para decisões mais fundamentadas na engenharia de fundações.

## **2.6 Estudos Relacionados a Modelagem Numérica de Recalques e Interação Solo-Estrutura**

O estudo da interação solo-estrutura e da previsão de recalques em fundações rasas são temas amplamente estudados na literatura acadêmica. Diversos métodos têm sido empregados na análise do comportamento do solo sob carregamento, considerando variáveis determinantes, como a rigidez da fundação, as propriedades geotécnicas do solo e a influência de escavações próximas. Compreender esses fatores é essencial para a avaliação da estabilidade das fundações e a mitigação de recalques diferenciais, permitindo um dimensionamento mais preciso e seguro das estruturas.

Antoniuzzi (2011) reforçam a relevância da consideração da interação solo-estrutura no dimensionamento de edificações com fundações superficiais, apontando que sua desconsideração pode vir a resultar em projetos subdimensionados ou superdimensionados, além de aumentar o risco de patologias estruturais. Essa metodologia, validada por meio de análises com diferentes graus de rigidez solo-estrutura, demonstra que considerar a interação no modelo pode acarretar deformações excessivas no solo, contribuindo para soluções de fundação mais seguras.

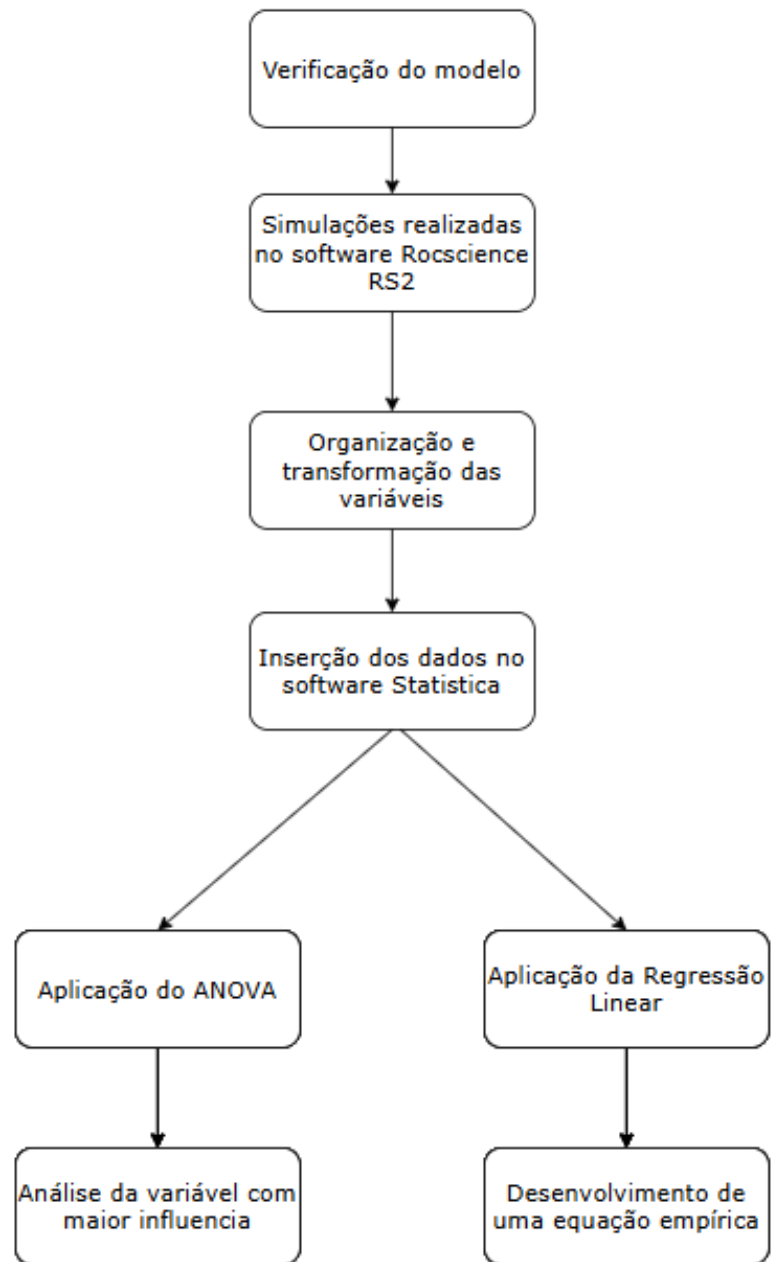
Além disso, Antoniuzzi (2011) ressalta que a representação mais fiel das condições de contorno, como a inclusão de camadas indeslocáveis no modelo de solo, pode influenciar significativamente nos resultados, tornando-os mais próximos dos valores observados em campo.

Iwamoto (2000) destaca a importância de considerar a interação solo-estrutura no dimensionamento de edifícios. O autor apresenta uma abordagem que se baseia na técnica de subestruturação, na qual a fundação em estacas e o solo são modelados de forma integrada utilizando o Método dos Elementos Finitos, permitindo uma análise mais realista dos recalques e da redistribuição dos esforços estruturais. Entre os principais resultados, pode-se observar que a consideração dessa interação possibilita estimar de forma mais precisa os esforços secundários nos elementos estruturais decorrentes de recalques diferenciais, contribuindo assim para projetos mais eficientes e confiáveis. Embora o estudo se concentre em fundações profundas, os conceitos abordados, como a representação acoplada da fundação e do solo e a análise de recalques e a redistribuição de esforços, apresentam forte relação com os aspectos analisados em modelagens aplicadas a fundações rasas, especialmente quando há variações nas condições de contorno, como escavações ou heterogeneidade no solo.

### **3 METODOLOGIA**

O fluxograma ilustrado na Figura 3 representa, de forma geral, os processos envolvidos na análise do modelo de simulação e no tratamento estatístico dos resultados. Nele, estão indicadas as etapas de simulação (análises paramétricas), com foco inicial na análise da interação solo-estrutura, além de apresentar a estrutura metodológica aplicada à análise estatística dos resultados obtidos, incluindo a organização dos dados, a aplicação da ANOVA para identificação da variável com maior influência e o desenvolvimento de uma equação empírica por meio de regressão linear.

Figura 3 - Fluxograma geral do programa



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

### 3.1 Definição do problema

O presente estudo busca avaliar a influência de parâmetros geométricos sobre o recalque de fundações rasas localizadas próximas a escavações. Para isso, foi adotado um modelo bidimensional representando uma sapata corrida isolada posicionada a diferentes distâncias de uma escavação. Em um primeiro momento foi

realizada a análise do módulo de rigidez desta sapata e a verificação das dimensões da malha e do modelo utilizadas, para posterior realização da análise paramétrica.

### **3.1.1 Análise do módulo de rigidez da sapata**

Foi analisada a influência da rigidez da sapata no recalque da fundação, por meio da comparação entre três modelos: (i) uma sapata flexível, (ii) uma sapata rígida com o maior módulo de elasticidade permitido pelo software, e (iii) uma sapata rígida com o módulo médio de rigidez do concreto. Os resultados obtidos demonstraram que as diferenças de recalque graficamente entre os modelos simulados mostram ser pouco significativas (Apêndice B – Figura B.1).

Considerando a baixa variação observada entre os modelos com diferentes módulos de rigidez da sapata, optou-se por utilizar a sapata flexível nas simulações seguintes. Neste estudo optou-se por manter a tensão aplicada ( $Q$ ) constante em todas as simulações, fixada em 300 kPa, representando uma condição típica próxima da tensão admissível do solo na região analisada. Com essa abordagem, a variação da largura da sapata influenciou diretamente o valor da carga total aplicada sobre a fundação, respeitando a relação  $Q = P/A$  (Tensão = Força dividida pela Área). Essa decisão permitiu isolar a influência dos parâmetros geométricos, mantendo a tensão de contato constante entre sapata e solo, de modo a avaliar exclusivamente o efeito da geometria sobre os recalques resultantes.

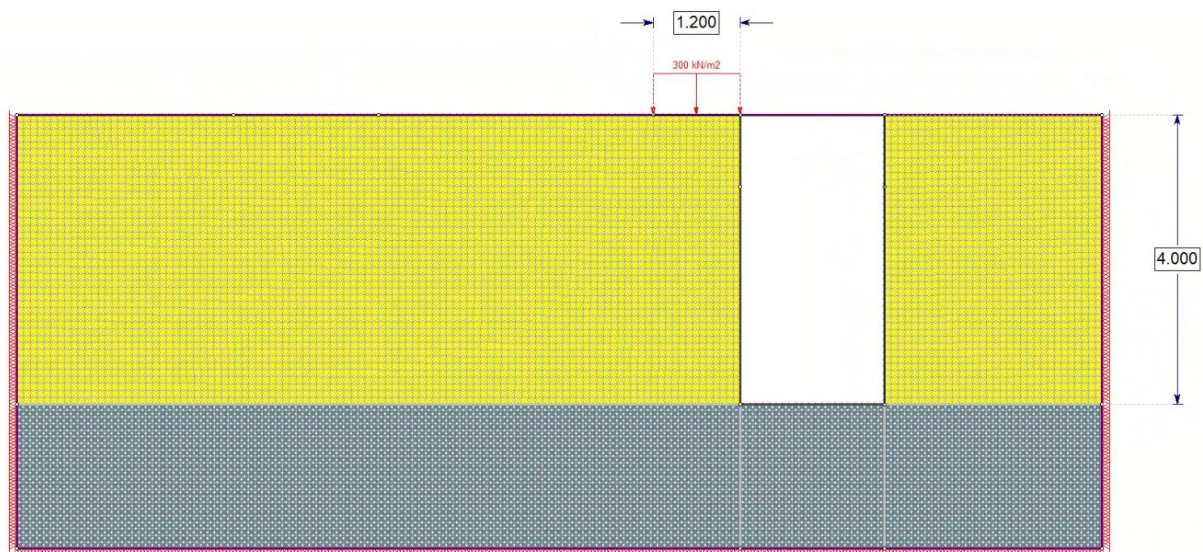
### **3.1.2 Análise da configuração da malha e das dimensões do modelo**

Foram realizadas diversas simulações com o objetivo de avaliar a influência da configuração da malha e das dimensões do modelo nos resultados obtidos. Inicialmente, testaram-se três tamanhos de malha geral: 0,1 m; 0,3 m e 0,5 m. Observou-se que a malha de 0,3 m apresentou um bom equilíbrio entre qualidade dos resultados e desempenho computacional, sendo suficientemente densa para representar os recalques sem comprometer o tempo de processamento. (Apêndice A – Figura A.5). Em relação à comparação entre malha graduada (*graded*) e malha uniforme, foi constatado que a malha *graded* não discretizava adequadamente os elementos da simulação, o que afetava a precisão dos resultados. Por esse motivo,

adotou-se a malha uniforme como padrão. Foram testadas malhas uniformes com 10 mil, 1 mil e 350 elementos. Com base nos resultados, optou-se pela malha uniforme de 10 mil elementos que apresentou a melhor discretização dos elementos e não impactou negativamente na simulação quando comparada com a malha *graded*. Adicionalmente, avaliou-se o efeito do refinamento localizado da malha em regiões específicas do modelo. Utilizou-se a malha geral de 0,3 e o refinamento de 0,1 na base da sapata, no lado esquerdo e no lado direito da escavação. No entanto, os resultados mostraram que esse refinamento não causou variações significativas nos valores de recalque, sendo assim descartado nas simulações finais. (Apêndice A – Figura A.3).

Também foram verificadas as dimensões laterais e inferiores do modelo para garantir que os limites do domínio não interferissem nos resultados da simulação. No lado esquerdo, testaram-se distâncias de 5, 3 e 1 metro até a sapata. Constatou-se que a distância de 3 metros foi suficiente para evitar interferência nos recalques, ao contrário da distância de 1 metro. No lado direito, simularam-se distâncias de 8, 6, 4 e 2 metros até a escavação, e não foram observadas alterações nos resultados. Para manter a simetria, foi adotada a distância de 3 metros. Por fim, na parte inferior do modelo foram testadas profundidades de 6, 4 e 2 metros. A profundidade de 2 metros mostrou-se adequada, visto que os valores de recalque permaneceram estáveis em relação às demais configurações. (Apêndice A – Figuras A.4).

Figura 4 – Condições finais de malha definida

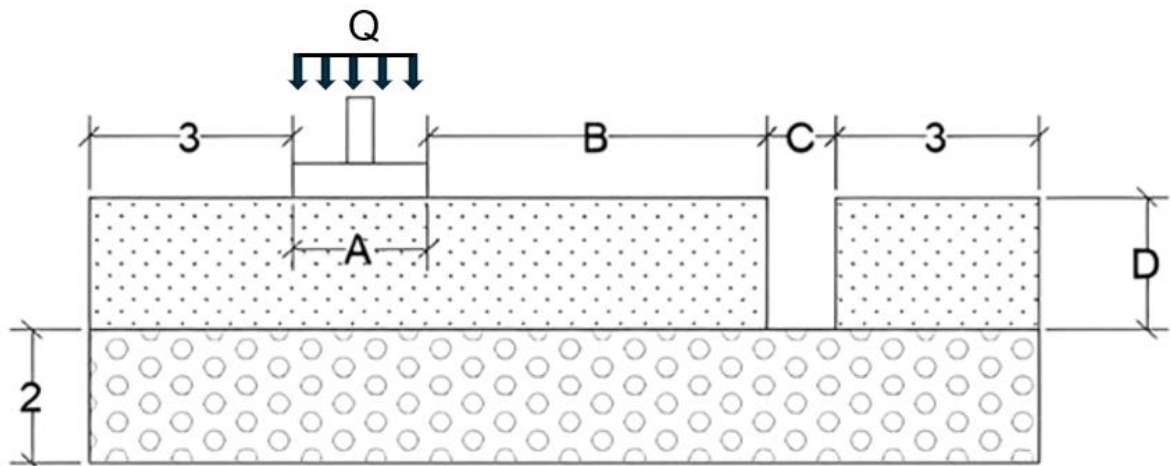


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

### 3.1.3 Definição Final do Modelo

A Figura 5 apresenta o esquema do modelo utilizado, destacando as principais variáveis analisadas e a sua carga  $Q$  aplicada, Todas as dimensões apresentadas estão expressas em metros e a carga  $Q$  em KPA

Figura 5 – Representação do Modelo



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

O modelo geotécnico adotado neste trabalho foi desenvolvido com base nas características genéricas de um solo arenoso, ou seja, adotando parâmetros geotécnicos típicos extraídos da literatura, como coesão, ângulo de atrito interno, massa específica natural e umidade, buscando-se representar condições reais encontradas em obras da região, como é o caso da profundidade da escavação variando em torno de 1 a 4 metros. Foi modelada uma sapata corrida flexível, assentada sobre o solo, considerando variações geométricas nas dimensões mais relevantes: Largura da sapata ( $A$ ), distância da sapata à escavação ( $B$ ) e profundidade da escavação ( $D$ ). A largura da escavação ( $C$ ) foi mantida fixa em 2 metros, por nos testes não apresentar influência significativa no recalque. A profundidade total do modelo foi limitada a 6 metros, sendo considerados 4 metros de solo e 2 metros de rocha, devido as condições geológicas observadas em Alegrete-RS, onde a rocha-mãe costuma ser encontrada até essa profundidade de 4 metros.

### 3.2 Software e equipamento utilizado

O programa empregado para as simulações foi o Rocscience RS2, um software amplamente reconhecido para análises bidimensionais em elementos finitos, especialmente em estudos que envolvem interação solo-estrutura com escavações próximas. Para o tratamento e análise estatística dos resultados obtidos, foi utilizado o software *Statistica*, que possibilita diferentes abordagens de análise de dados. Para a análise das imagens e simulações foi utilizado um computador com um processador Core i9 13900K com 128GB de RAM e uma placa de vídeo GeForce RTX 4090.

### 3.3 Métodos

As simulações foram realizadas alterando os seguintes parâmetros geométricos:

- Largura da sapata (A): 0,6 m; 1,2 m; 1,8 m;
- Distância da sapata à escavação (B): 0 m; 2,5 m; 5 m, e;
- Profundidade da escavação (D): 1 m; 2,5 m; 4 m.

A tensão considerada na base da sapata foi fixada em 300 kPa. Dessa forma, a carga vertical aplicada à fundação variou indiretamente em função da área da sapata, seguindo a relação  $Q = P / A$ . A combinação das possibilidades geométricas adotadas resultou em 27 simulações distintas, compondo um estudo paramétrico aceitável sobre o comportamento do recalque em diferentes cenários. Para cada simulação foi mensurado o recalque médio na base da sapata, considerando a diferença entre a etapa apenas com a edificação e a etapa com a edificação associada à escavação. Esses resultados foram inicialmente organizados em uma planilha do Excel, contendo as variáveis geométricas de cada caso. Em seguida, a planilha foi adaptada para o software *Statistica*, utilizado no processamento estatístico dos dados. No *Statistica*, as variáveis independentes foram codificadas através da metodologia padronizada (-1, 0 e +1), o que viabiliza uma análise estatística balanceada dos efeitos principais e interações, além de permitir a aplicação da Análise de Variância (ANOVA).

Além da análise individual de cada variável, foram também avaliadas as combinações entre os fatores geométricos, incluindo as interações  $A \times B$ ,  $A \times D$ ,  $B \times D$  e  $A \times B \times D$ , com o intuito de verificar possíveis efeitos conjuntos sobre os resultados de recalque. Paralelamente, aplicou-se a técnica de Regressão Linear Múltipla, utilizando os valores reais das variáveis geométricas permitindo o desenvolvimento de uma

equação empírica baseada em dados reais. Isso possibilita a utilização direta da fórmula ajustada para estimativas práticas de recalque, com base nas dimensões geométricas reais de projetos de fundações, fornecendo uma ferramenta de auxílio na hora de tomadas de decisões.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 Resultados das simulações**

Na Figura 6 estão apresentados os resultados obtidos nas 27 simulações realizadas no RS2, indicando os recalques médios gerados a partir das diferentes combinações entre a largura da sapata (A), a distância da base da sapata até a escavação (B) e a profundidade da escavação (D). A tabela está organizada de forma que cada linha representa um caso simulado, com os valores adotados para cada variável e os respectivos recalques, apresentados em metros e em milímetros. Também foram incluídas as interações entre os parâmetros ( $A \times B$ ,  $A \times D$ ,  $B \times D$  e  $A \times B \times D$ ), que servirão de base para as análises estatísticas.

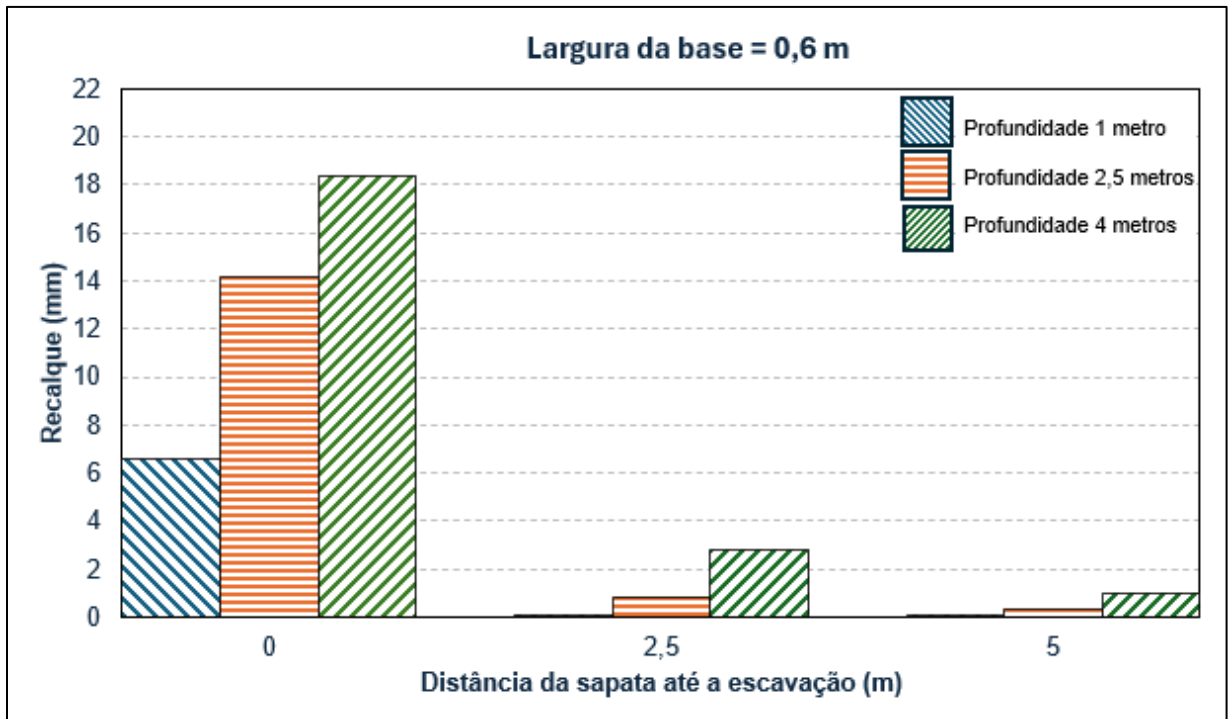
Figura 6 – Recalques médios Resultantes das 27 Simulações Numéricas com Variação dos Parâmetros Geométricos (A, B, D).

Variáveis / simulações	Largura da base da Sapata em m (A)	Distância da sapata até a escavação em m (B)	Profundidade da Escavação em m (D)	Recalque médio mm ( $\delta$ )
1	0,6	0,0	1	6,538
2	0,6	0,0	2,5	14,127
3	0,6	0,0	4	18,373
4	0,6	2,5	1	0,101
5	0,6	2,5	2,5	0,819
6	0,6	2,5	4	2,779
7	0,6	5,0	1	0,049
8	0,6	5,0	2,5	0,336
9	0,6	5,0	4	0,946
10	1,2	0,0	1	5,133
11	1,2	0,0	2,5	15,178
12	1,2	0,0	4	20,608
13	1,2	2,5	1	0,029
14	1,2	2,5	2,5	0,748
15	1,2	2,5	4	2,567
16	1,2	5,0	1	0,049
17	1,2	5,0	2,5	0,315
18	1,2	5,0	4	0,831
19	1,8	0,0	1	3,666
20	1,8	0,0	2,5	13,979
21	1,8	0,0	4	20,224
22	1,8	2,5	1	0,041
23	1,8	2,5	2,5	0,704
24	1,8	2,5	4	2,406
25	1,8	5,0	1	0,050
26	1,8	5,0	2,5	0,307
27	1,8	5,0	4	0,774

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

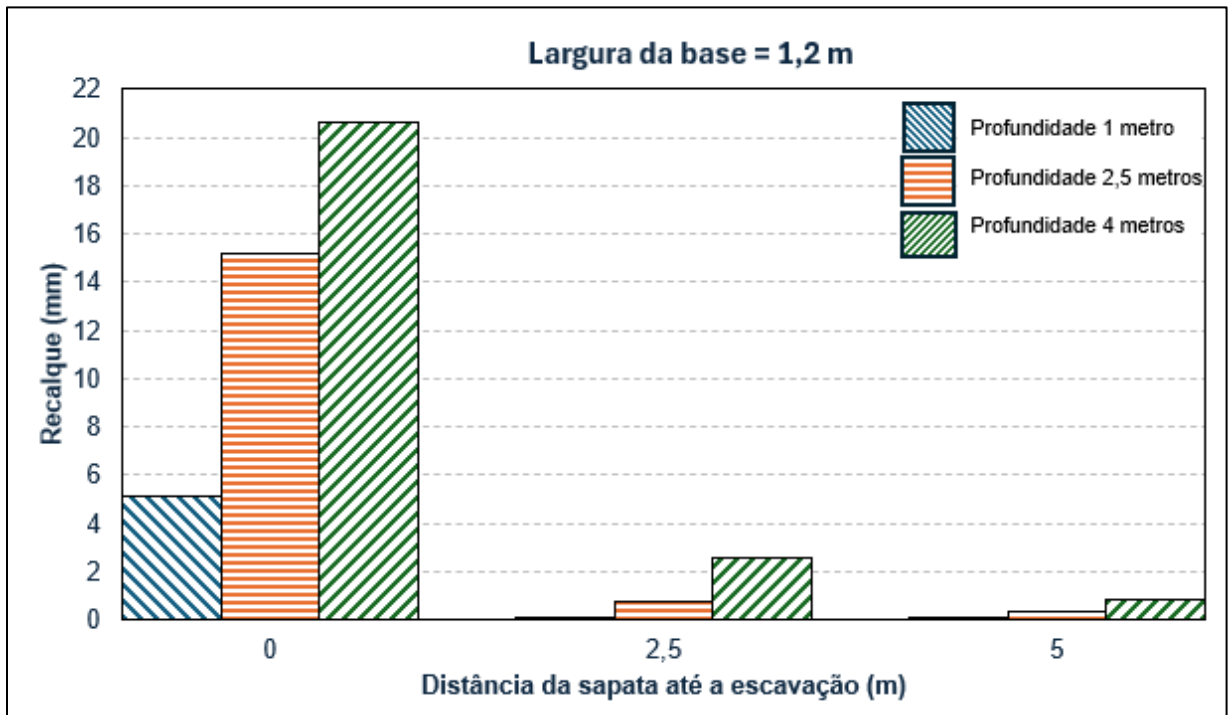
As Figuras 7, 8 e 9 representam, respectivamente, os recalques em relação as distâncias da sapata até a escavação (B) para sapatas de base (A) igual a 0,6, 1,2 e 1,8 m. As figuras também incluem a comparação entre diferentes profundidades de escavação (D)

Figura 7 - Recalque em função da Largura da Base da Sapata (A), base fixa = 0,6 m



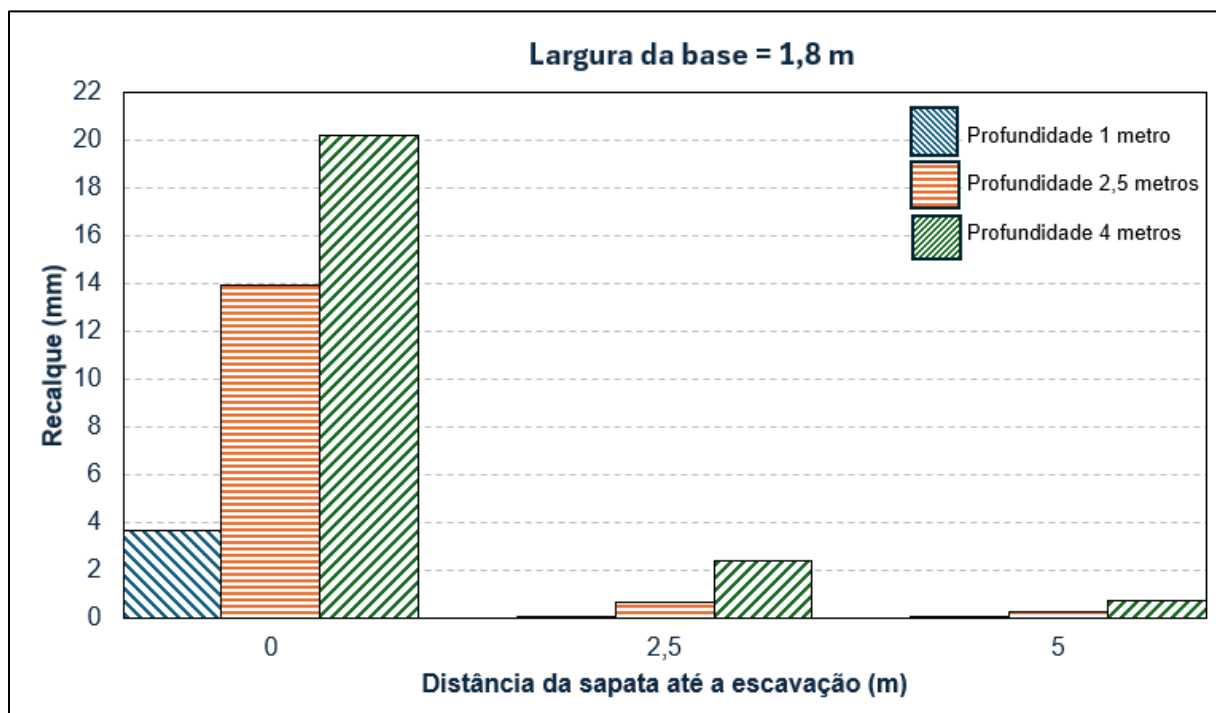
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 8 - Recalque em função da Largura da Base da Sapata (A), base fixa = 1,2 m



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 9 - Recalque em função da Largura da Base da Sapata (A), base fixa = 1,8 m



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A influência de cada parâmetro de forma individualizada será tratada nos itens a seguir.

#### 4.1.1 Influência da largura da base sapata no recalque

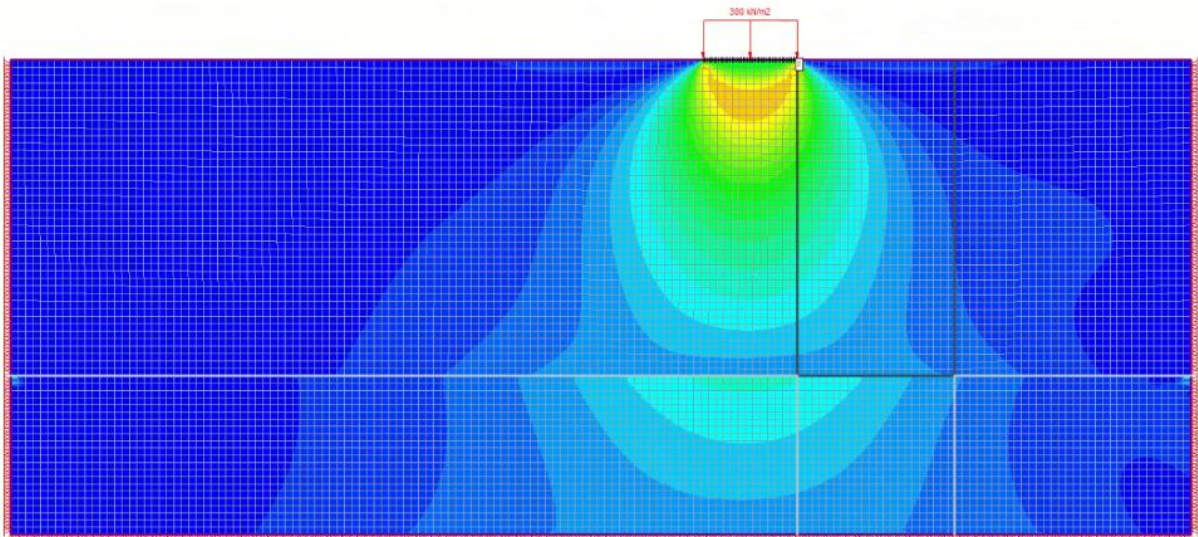
A partir da análise dos resultados obtidos, observou-se que a influência da largura da base da sapata sobre os valores de recalque apresentou comportamento variável, dependendo da combinação com as demais variáveis geométricas. Quando comparadas as médias dos recalques para as larguras de 0,6 m e 1,2 m, houve um aumento de aproximadamente 3,16%. Já ao comparar 0,6 m com 1,8 m, tivemos uma redução de 4,35%. Mostrando que a variável apresenta pouco valor significativo no recalque.

#### 4.1.2 Influência da distância da sapata a escavação no recalque

A análise dos resultados demonstrou uma influência muito significativa da distância da sapata em relação à escavação sobre os valores de recalque. De maneira geral, observou-se que quanto menor a distância até a escavação maiores foram os recalques médios registrados. Com base nos resultados, o recalque médio diminuiu

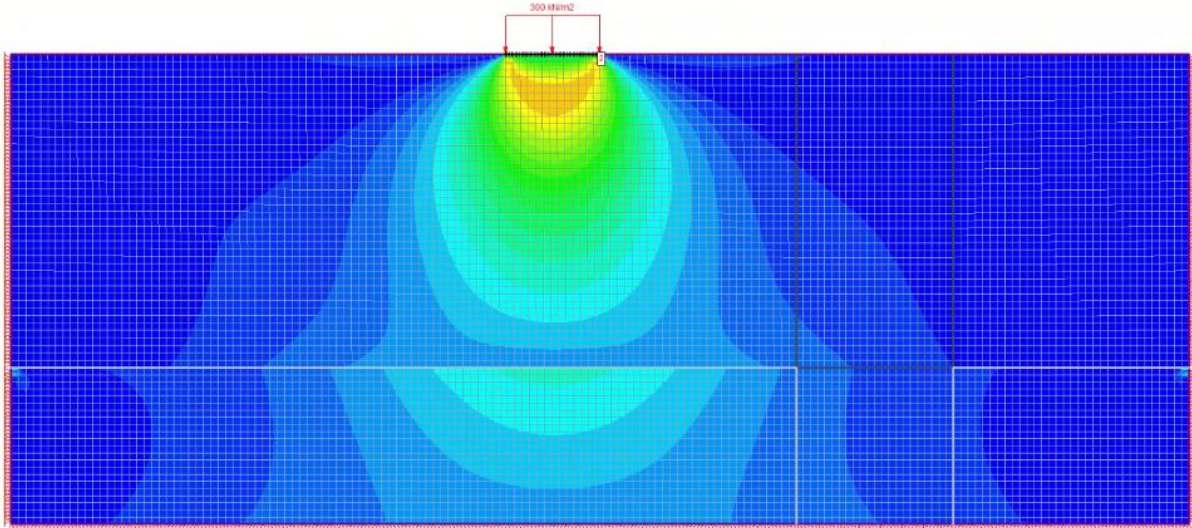
aproximadamente 91,35% ao passar de 0,0 m para 2,5 m, e cerca de 93,83% ao passar de 0,0 m para 5,0 m. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que, quando a escavação está muito próxima da fundação, parte do solo que estaria contribuindo para suportar a carga da sapata é removida. Isso altera a forma como as tensões se distribuem no solo abaixo da fundação, concentrando os esforços em regiões menores e mais comprimidas, o que gera deslocamentos maiores (recalques). As Figuras 10 e 11 ilustram a distribuição de tensões no solo, evidenciando que, quando a escavação está próxima à sapata, ocorre um corte significativo no bulbo de tensões, reduzindo a área efetiva de distribuição dos esforços no solo e contribuindo para o aumento dos recalques.

Figura 10 - Distribuição de tensões no solo com escavação localizada a 0 m da sapata.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 11 - Distribuição de tensões no solo com escavação localizada a 2,5 m da sapata.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

#### 4.1.3 Influência da profundidade da escavação no recalque

De modo geral, observou-se que o aumento da profundidade da escavação resultou em maiores valores de recalque. Quando a profundidade passou de 1 metro para 2,5 metros, o recalque médio aumentou aproximadamente 66,34%. Já ao se aumentar a profundidade de 1 metro para 4 metros, o valor atingido foi de 77,47%. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que escavações mais profundas geram uma maior tendência ao movimento de massa de solo em direção à escavação, o que provoca alívio de tensões no entorno e redistribuição de esforços sob a sapata. Isso compromete a estabilidade do solo de apoio e resulta em maiores deslocamentos totais na base da fundação.

#### 4.2 Análise estatística dos resultados

A partir dos resultados obtidos nas simulações numéricas no software Rocscience RS2, foi possível avaliar a influência relativa de cada parâmetro geométrico no recalque da fundação por meio de análises estatísticas. Nesse contexto, aplicaram-se duas abordagens complementares: a Análise de Variância (ANOVA) e a Regressão Linear Múltipla, ambas viabilizadas pelo software *Statística*. As variáveis

geométricas envolvidas, largura da sapata (A), distância da sapata até a escavação (B) e profundidade da escavação (D), foram organizadas de forma a permitir uma avaliação estatisticamente equilibrada dos efeitos individuais e conjuntos sobre o recalque. A análise permitiu identificar padrões relevantes de significância de cada variável e contribuiu para a formulação de uma equação empírica, baseada na relação entre os parâmetros geométricos e os valores de recalque observados.

#### **4.2.1 Aplicação da ANOVA**

A Análise de Variância foi utilizada para verificar quais dos parâmetros geométricos adotados nas simulações (A, B e D) exerceram influência estatisticamente significativa nos valores de recalque observados. Para viabilizar a aplicação da ANOVA, as variáveis foram padronizadas com os valores  $-1$ ,  $0$  e  $+1$ , correspondentes aos três níveis analisados de cada fator. Essa padronização é essencial para garantir o balanceamento do modelo e permitir a análise dos efeitos principais. No entanto, o software Statistica apresentou limitações na quantidade de variáveis aceitas na análise de variância simultânea. Devido a essa restrição, não foi possível incluir diretamente as interações  $A \times B$ ,  $A \times D$ ,  $B \times D$  e  $A \times B \times D$  na ANOVA. Assim, optou-se por realizar a análise utilizando apenas as três variáveis principais (A, B e D), com o objetivo de identificar qual delas apresentava maior influência individual sobre os recalques observados. Na figura 12 são apresentados os dados inseridos na tabela dentro do software Statistica, e na figura 13 os resultados obtidos após a realização da (ANOVA).

Figura 12 - Inserção dos dados no software Statistica (ANOVA)

	1 Largura da Base da Sapata (A) m	2 Distância da Sapata até a Escavação (B) m	3 Profundidade da Escavação (D) m	4 Recalque em mm
1	-1	-1	-1	0,0065383
2	-1	-1	0	0,0141269
3	-1	-1	1	0,0183725
4	-1	0	-1	0,000101
5	-1	0	0	0,000819
6	-1	0	1	0,0027785
7	-1	1	-1	0,0000487
8	-1	1	0	0,0003356
9	-1	1	1	0,0009458
10	0	-1	-1	0,0051325
11	0	-1	0	0,0151781
12	0	-1	1	0,0206082
13	0	0	-1	0,0000286
14	0	0	0	0,0007484
15	0	0	1	0,0025667
16	0	1	-1	0,0000494
17	0	1	0	0,0003147
18	0	1	1	0,0008305
19	1	-1	-1	0,0036658
20	1	-1	0	0,0139788
21	1	-1	1	0,0202237
22	1	0	-1	0,0000406
23	1	0	0	0,0007039
24	1	0	1	0,0024057
25	1	1	-1	0,000005
26	1	1	0	0,0003069
27	1	1	1	0,0007743

Fonte: Software Statistica, com dados do autor.

Figura 13 – Resultados obtidos após a realização do ANOVA

Effect	Column	Recalque (cm) Beta ( $\beta$ )
Largura da Sapata (A)	1	0,020782
Distância da Sapata até a Escavação (B)	2	-0,447291
Profundidade da Escavação (D)	3	0,034785

Fonte: Software Statistica, com dados do autor.

A partir da análise dos resultados apresentados na Figura 13, observou-se que a distância da sapata até a escavação (B) foi o parâmetro com maior influência sobre os recalques médios, evidenciado pelo maior valor absoluto do coeficiente padronizado. O efeito negativo indica que o aumento da distância até a escavação esteve associado à redução dos recalques, comportamento coerente com os resultados gráficos. Os parâmetros profundidade da escavação (D) e Largura da base

da sapata (A) apresentaram coeficientes positivos, indicando que o aumento da variável, gerou uma ligeira elevação nos recalques médios. Dessa forma, os resultados da ANOVA reforçam a conclusão de que a distância da sapata até a escavação é o fator mais relevante no valor de recalque médio.

#### **4.2.2 Aplicação da Regressão Linear múltipla**

A Regressão Linear múltipla foi utilizada com o objetivo de desenvolver uma equação empírica capaz de estimar os recalques observados em função das variáveis geométricas consideradas: largura da base da sapata (A), distância entre a sapata e a escavação (B) e profundidade da escavação (D).

Diferentemente da ANOVA, que é normalmente utilizada para comparar médias entre grupos categóricos, a Regressão Linear Múltipla permite o uso de variáveis independentes com valores contínuos, o que amplia a precisão e aplicabilidade prática do modelo desenvolvido. Além dos efeitos principais, também foram incluídas as interações entre os fatores, como AxB, AxD, BxD e a interação tripla AxBxD, de modo a representar com maior fidelidade o comportamento conjunto das variáveis geométricas sobre os recalques. Essa abordagem torna a equação mais robusta, permitindo capturar não apenas os efeitos isolados, mas também os efeitos combinados entre os parâmetros analisados.

A equação obtida tem o potencial de ser aplicada em situações práticas, possibilitando estimativas iniciais de recalque em fundações rasas próximas a escavações, especialmente em áreas urbanas onde essas condições são comuns. Na figura 14 são apresentados os dados inseridos na tabela dentro do software *Statística*, na figura 15 é projetado os resultados obtidos após a realização da Regressão Linear múltipla.

Figura 14 - Inserção dos dados no software Statistica (Regressão Linear múltipla)

	1 Largura da Base da Sapata (A) m	2 Distância da Sapata até a Escavação (B) m	3 Profundidade da Escavação (D) m	4 A x B	5 A x D	6 B x D	7 A x B x D	8 Recalque em mm
1	0,6	0	1	0	0,6	0	0	0,0065383
2	0,6	0	2,5	0	1,5	0	0	0,0141269
3	0,6	0	4	0	2,4	0	0	0,0183725
4	0,6	2,5	1	1,5	0,6	2,5	1,5	0,000101
5	0,6	2,5	2,5	1,5	1,5	6,25	3,75	0,000819
6	0,6	2,5	4	1,5	2,4	10	6	0,0027785
7	0,6	5	1	3	0,6	5	3	0,0000487
8	0,6	5	2,5	3	1,5	12,5	7,5	0,0003356
9	0,6	5	4	3	2,4	20	12	0,0009458
10	1,2	0	1	0	1,2	0	0	0,0051325
11	1,2	0	2,5	0	3	0	0	0,0151781
12	1,2	0	4	0	4,8	0	0	0,0206082
13	1,2	2,5	1	3	1,2	2,5	3	0,0000286
14	1,2	2,5	2,5	3	3	6,25	7,5	0,0007484
15	1,2	2,5	4	3	4,8	10	12	0,0025667
16	1,2	5	1	6	1,2	5	6	0,0000494
17	1,2	5	2,5	6	3	12,5	15	0,0003147
18	1,2	5	4	6	4,8	20	24	0,0008305
19	1,8	0	1	0	1,8	0	0	0,0036658
20	1,8	0	2,5	0	4,5	0	0	0,0139788
21	1,8	0	4	0	7,2	0	0	0,0202237
22	1,8	2,5	1	4,5	1,8	2,5	4,5	0,0000406
23	1,8	2,5	2,5	4,5	4,5	6,25	11,25	0,0007039
24	1,8	2,5	4	4,5	7,2	10	18	0,0024057
25	1,8	5	1	9	1,8	5	9	0,000005
26	1,8	5	2,5	9	4,5	12,5	22,5	0,0003069
27	1,8	5	4	9	7,2	20	36	0,0007743

Fonte: Software Statistica, com dados do autor.

Figura 15 - Resultados obtidos após a realização da Regressão Linear múltipla

	R <sup>2</sup> = ,81922826
N=27	B
Intercept	0,004066
Largura da Base da Sapata (A) m	-0,002994
Distância da Sapata até a Escavação (B) m	-0,001114
Profundidade da Escavação (D) m	0,003011
A x B	0,000734
A x D	0,001073
B x D	-0,000595
A x B x D	-0,000272

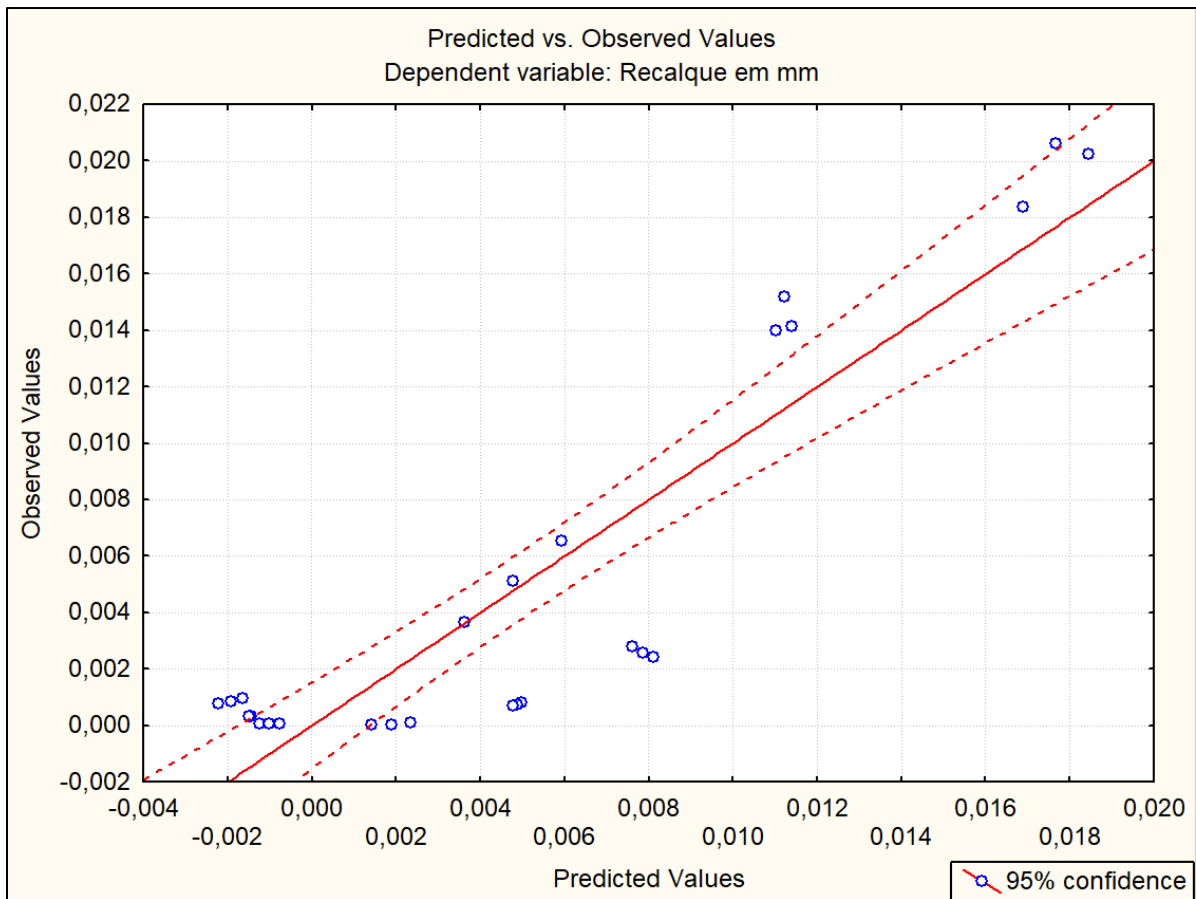
Fonte: Software Statistica, com dados do autor.

Os valores apresentados na coluna B da figura 15 correspondem aos coeficientes estimados para cada variável do modelo de regressão linear múltipla. Esses coeficientes são utilizados na formulação da equação empírica que estima o recalque com base nas variáveis geométricas analisadas e suas interações.

Com base nos resultados obtidos na Regressão Linear Múltipla, foi possível desenvolver uma fórmula empírica que permite estimar o recalque de fundações rasas em função das variáveis geométricas analisadas: largura da base da sapata (A), distância da sapata até a escavação (B) e profundidade da escavação (D). A fórmula foi elaborada a partir dos coeficientes obtidos no modelo ajustado no software Statistica, incluindo o termo independente (intercepto) e os coeficientes associados a cada variável independente e suas interações. Cada coeficiente indica o peso relativo de uma variável sobre o recalque. O intercepto representa o valor do recalque estimado quando todas as variáveis geométricas do modelo (largura da sapata, distância da base da sapata até a escavação e profundidade da escavação) são iguais a zero. Esse valor serve como uma espécie de ponto de partida ou referência na fórmula, a partir do qual os demais termos (coeficientes multiplicados pelas variáveis) vão sendo somados para compor o resultado.

Para validar a aplicação da equação desenvolvida, o software Statistica gerou uma comparação entre os valores de recalque previstos pela fórmula e os valores observados nas simulações realizadas, utilizando os dados reais das variáveis correspondentes às 27 análises numéricas como é mostrado na Figura 16. Na Figura 17 são apresentados os coeficientes obtidos pelo software Statistica, bem como a fórmula completa estruturada com base nesses valores. Já na Figura 18 está apresentada a comparação entre os recalques obtidos nas simulações numéricas e aqueles estimados pela fórmula desenvolvida, incluindo a porcentagem de variação associada a cada valor, permitindo avaliar a precisão da estimativa.

Figura 16 – Gráfico dos recalques previstos X observados.



Fonte: Software Statistica, com dados do autor.

Figura 17 – Coeficientes e fórmula estruturada

	Coeficientes		Coeficientes
A	-0,002994	a1	-0,002994
B	-0,001114	a2	-0,001114
D	0,003011	a3	0,003011
A x B	0,000734	a4	0,000734
A x D	0,001073	a5	0,001073
B x D	-0,000595	a6	-0,000595
A x B x D	-0,000272	a7	-0,000272
Intercepto	0,004066	a0	0,004066
$\delta = a_0 + a_1 \cdot A + a_2 \cdot B + a_3 \cdot D + a_4 \cdot (A \cdot B) + a_5 \cdot (A \cdot D) + a_6 \cdot (B \cdot D) + a_7 \cdot (A \cdot B \cdot D)$			

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 18 – Comparação entre valores de recalque e a variação associada a diferença entre os valores previstos e observados.

Recalque médio m ( $\delta$ )	Recalque médio pela fórmula em m ( $\delta$ )	Variação (%)
0,0065383	0,005924	9,39
0,0141269	0,011407	19,26
0,0183725	0,016889	8,08
0,0001010	0,002345	95,69
0,0008190	0,004984	83,57
0,0027785	0,007623	63,55
0,0000487	-0,001235	2635,11
0,0003356	-0,001439	528,75
0,0009458	-0,001643	273,74
0,0051325	0,004772	7,03
0,0151781	0,011220	26,08
0,0206082	0,017668	14,27
0,0000286	0,001885	98,48
0,0007484	0,004878	84,66
0,0025667	0,007871	67,39
0,0000494	-0,001001	2126,72
0,0003147	-0,001464	565,14
0,0008305	-0,001926	331,96
0,0036658	0,003619	1,27
0,0139788	0,011033	21,07
0,0202237	0,018446	8,79
0,0000406	0,001426	97,15
0,0007039	0,004772	85,25
0,0024057	0,008118	70,37
0,0000500	-0,000768	1635,60
0,0003069	-0,001489	585,08
0,0007743	-0,002210	385,37

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A Figura 16 apresenta o gráfico de dispersão entre os valores de recalque obtidos nas simulações numéricas (observados) e os valores estimados pela equação gerada por regressão linear múltipla (previstos). A afastamento dos pontos da reta de tendência indica um nível ruim de correlação entre os dados, possuindo um coeficiente de determinação de  $R^2=0,8192$ .

Na Figura 17, são apresentados os coeficientes obtidos no software Statistica e a fórmula estruturada que permite calcular o recalque médio estimado ( $\delta$ ) com base nas variáveis. O sinal negativo de alguns coeficientes indica que o aumento daquela variável tende a reduzir o recalque, enquanto coeficientes positivos apontam para uma relação direta com o aumento deste recalque.

Já na Figura 18 é mostrado a comparação direta entre os valores previstos e observados, juntamente com a variação percentual associado a cada valor de recalque, permitindo avaliar a precisão da equação desenvolvida e identificar os casos com maior discrepância entre os resultados.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar a influência de parâmetros geométricos no recalque de fundações rasas próximas a escavações, por meio da combinação entre modelagem numérica e análise estatística. A metodologia adotada envolveu a realização de 27 simulações utilizando o software Rocscience RS2, variando-se a largura da base da sapata (A), a distância da sapata até a escavação (B) e a profundidade da escavação (D), com a tensão aplicada (Q) mantida constante em 300 kPa, representando uma condição típica próxima da tensão admissível do solo da cidade de Alegrete-RS.

A aplicação da Análise de Variância (ANOVA) possibilitou identificar o peso relativo de cada variável sobre o recalque. Constatou-se que a distância da sapata até a escavação (B) foi o parâmetro com maior influência negativa sobre o recalque, seguido pela profundidade da escavação (D). A largura da sapata (A) apresentou o menor impacto individual, com efeito pouco expressivo dentro do intervalo analisado. Esse resultado reforça que, para o cenário estudado, a distância da sapata até à escavação é o fator mais determinante nos valores dos recalques.

A Regressão Linear Múltipla possibilitou o desenvolvimento de uma fórmula empírica capaz de estimar o recalque em função das variáveis geométricas analisadas e suas interações. A fórmula ajustada obteve um coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,8192, representando uma capacidade ruim de ajuste dentro do intervalo simulado. Ressalta-se que sua validade está restrita às condições e faixas de variação utilizadas nas simulações, não devendo ser aplicada diretamente em projetos executivos sem a devida validação com dados reais. Foi identificado um percentual considerável de variação nos valores individuais, com variações relativas elevadas em algumas combinações, indicando limitações da aplicação da equação para casos pontuais.

As interações entre os parâmetros geométricos foram consideradas apenas na análise estatística, como forma de estruturar a fórmula de regressão linear. Cabe destacar que todos os dados e resultados obtidos, incluindo a equação empírica proposta, referem-se a uma condição geotécnica específica da cidade de Alegrete-RS, não sendo recomendada sua aplicação direta em outras regiões sem a devida adaptação e validação.

Conclui-se, portanto, que a metodologia adotada foi eficaz para identificar

tendências e relações entre as variáveis geométricas envolvidas, contribuindo para a compreensão do comportamento de fundações rasas(sapatas) próximas a escavações. O trabalho oferece subsídios relevantes para o desenvolvimento de projetos mais seguros e embasados tecnicamente, mesmo em contextos com informações limitadas.

Observou-se que a Regressão Linear Múltipla não foi capaz de representar com precisão satisfatória o comportamento dos recalques, especialmente devido à natureza não linear do comportamento do solo. O ajuste apresentou limitações na capacidade de análise para diferentes combinações geométricas, sugerindo que modelos lineares podem ser inadequados para captar todas as não linearidades envolvidas no problema. Diante disso, recomenda-se a adoção de modelos não-lineares ou métodos estatísticos mais robustos em estudos futuros.

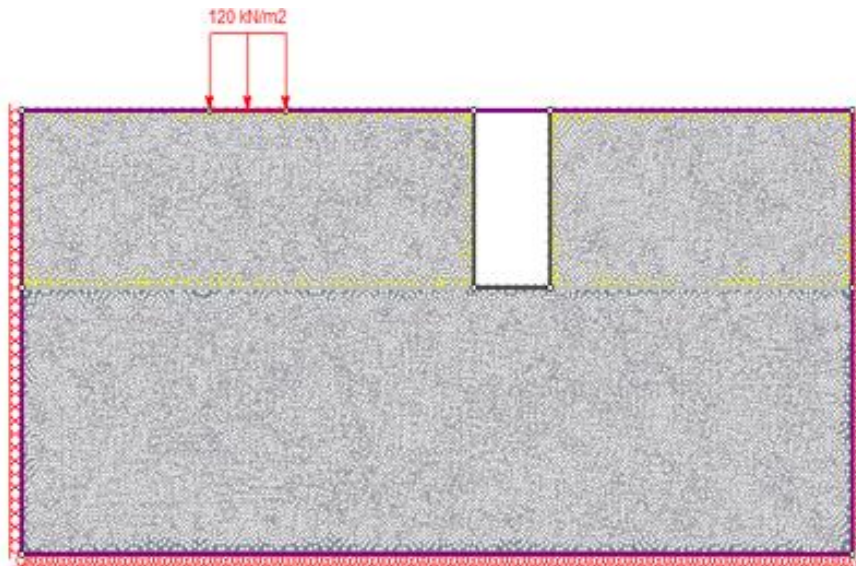
Para estudos futuros, recomenda-se a ampliação da gama de simulações, a inclusão de diferentes tipos de solo e fundações, além da validação dos resultados com ensaios experimentais ou dados de campo. A continuidade da pesquisa poderá tornar as equações mais robustas e aplicáveis a uma variedade maior de cenários geotécnicos e estruturais, diminuindo ainda mais o percentual de valores de recalque

## 6 APÊNDICES

### APÊNDICE A – Imagem das Simulações no Software Rocscience

#### Figura A.1 – Módulo de Rigidez da Sapata

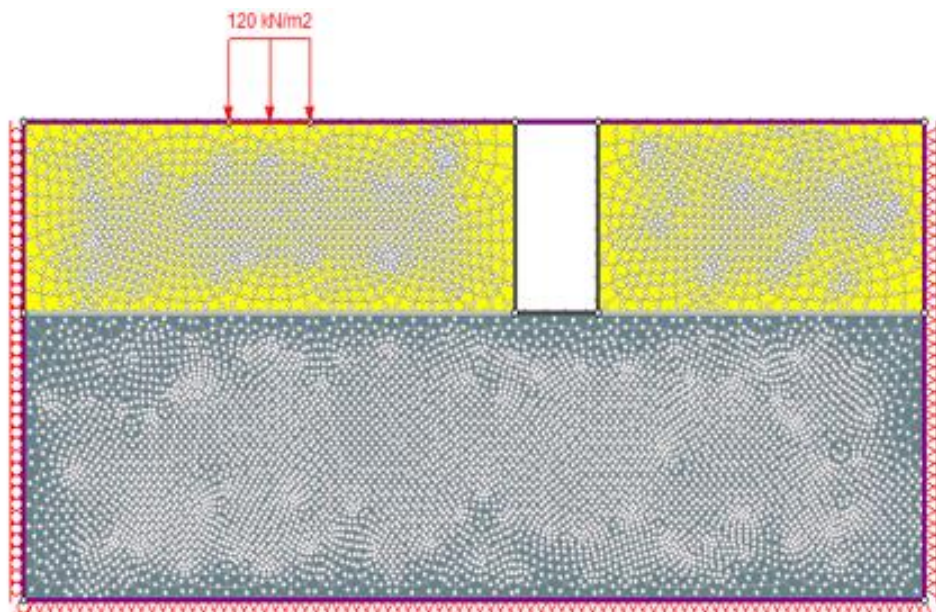
Figura 19 – Sapata Flexível



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

#### Figura A.2 – Tamanho Geral da Malha Estilo “Graded”

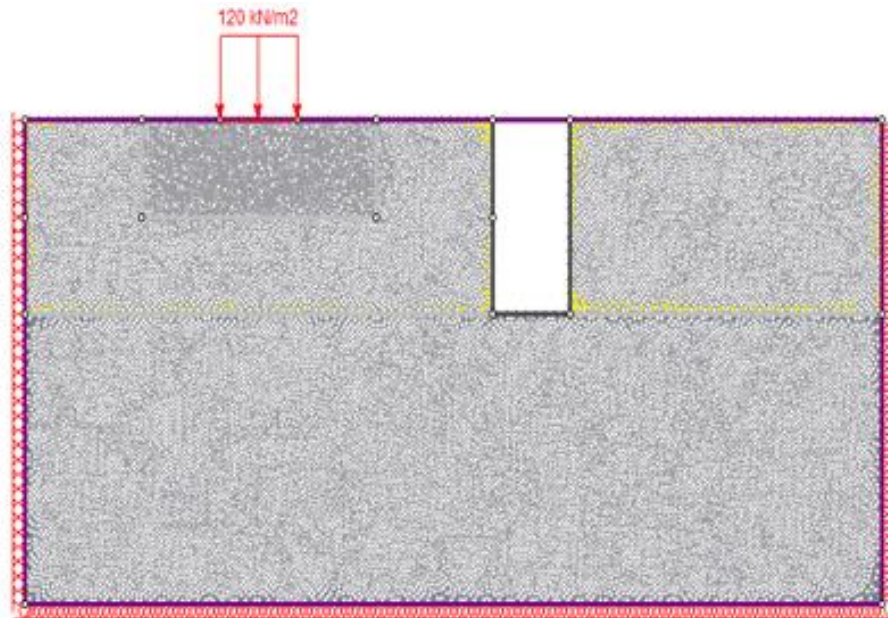
Figura 20 – Malha Geral 0.5 Estilo “Graded”



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

### Figura A.3 – Malha Geral 0.3 com Refinamento localizado

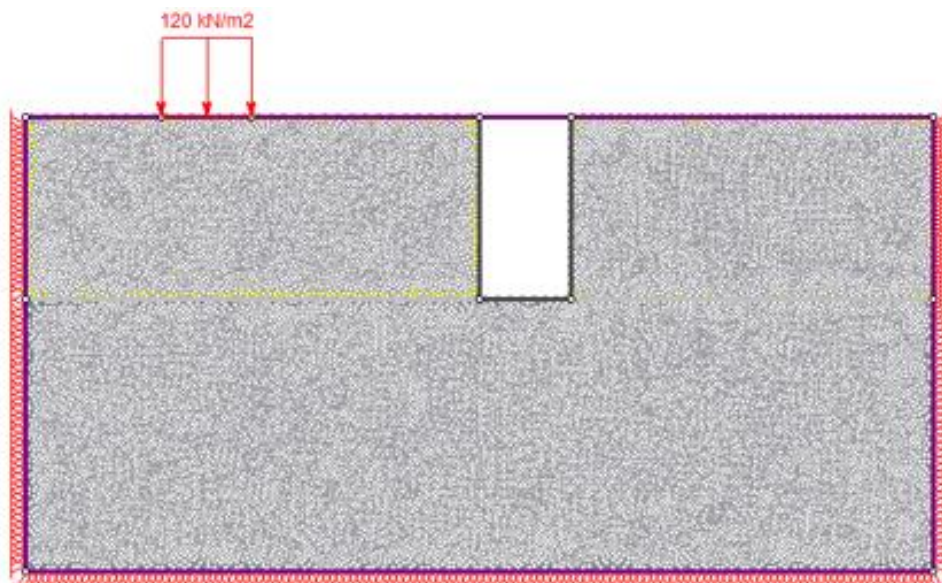
Figura 21 – Refinamento localizado na base da sapata



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

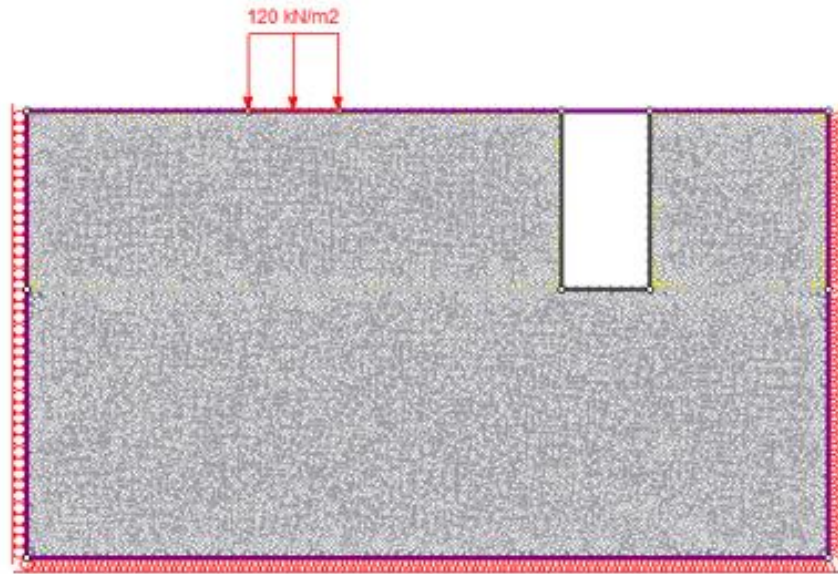
### Figura A.4 – Variação do Tamanho do Modelo

Figura 22 – Variação do Lado Esquerdo



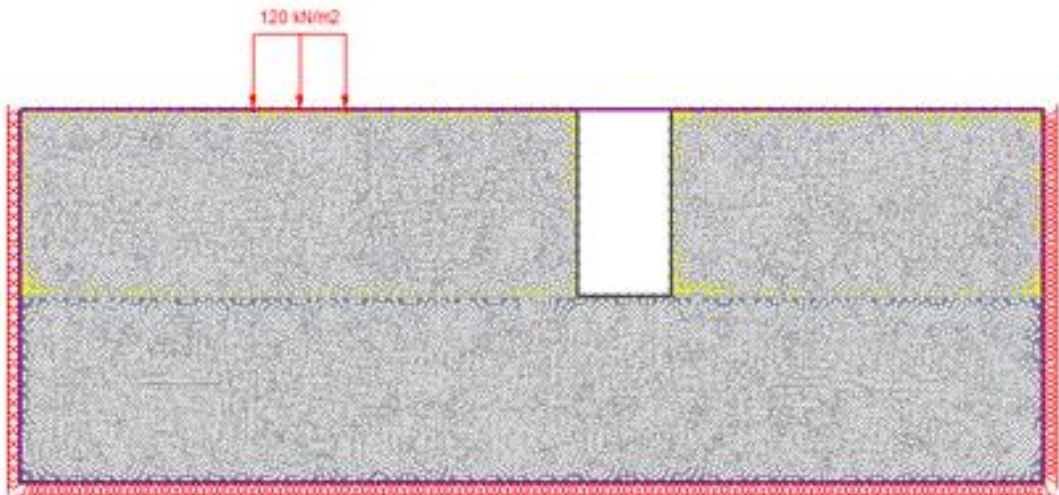
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 23 - Variação do Lado Direito



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

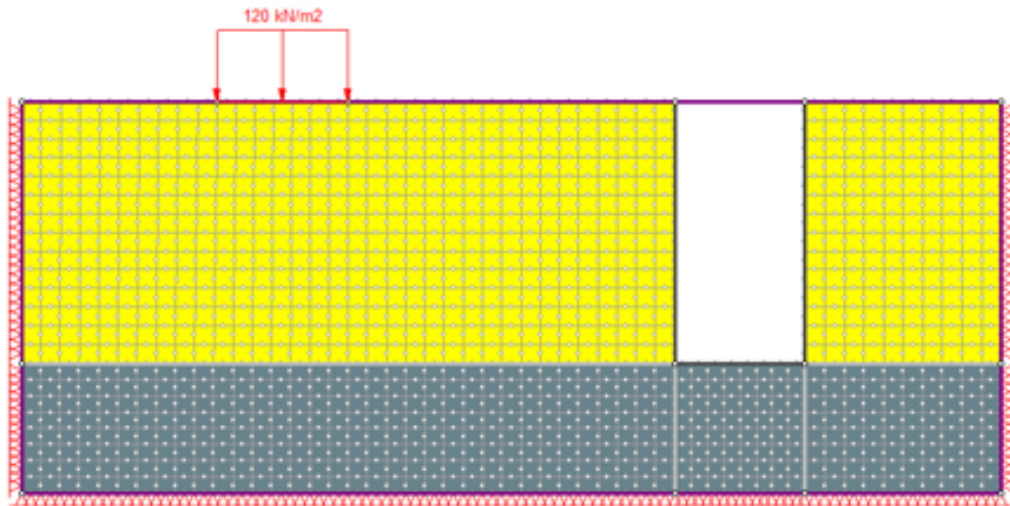
Figura 24 – Variação Parte Inferior



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

## Figura A.5 – Utilização de Uma Malha Uniforme

Figura 25 – Malha uniforme com 1k de quadrados ou 0.3

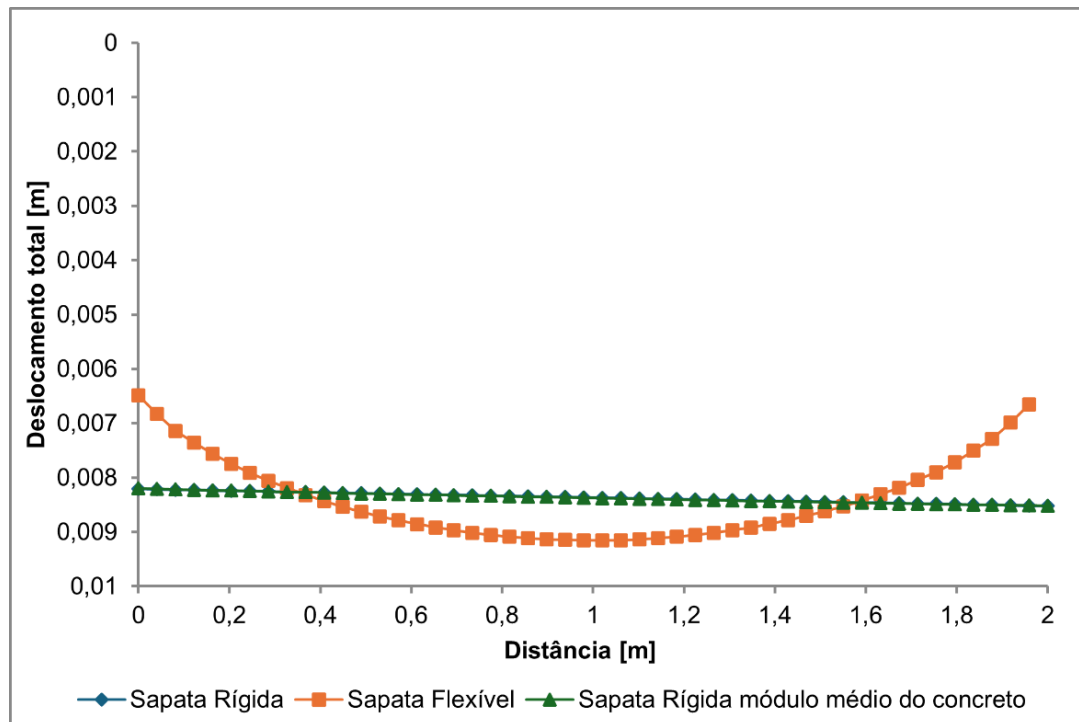


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

## APÊNDICE B – Gráficos utilizados para possíveis conclusões das análises paramétricas

### Figura B.1 – Módulo de Rigidez da Sapata

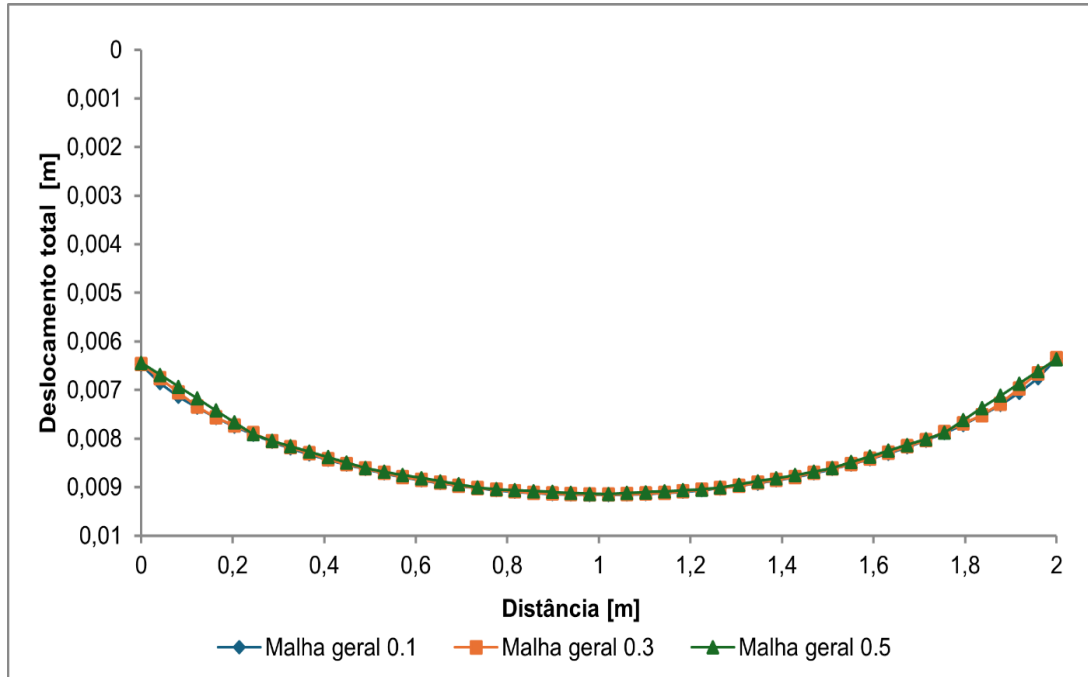
Figura 26 - Comparação dos Módulos de Rigidez



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

**Figura B.2 – Tamanho Geral da Malha “Graded”**

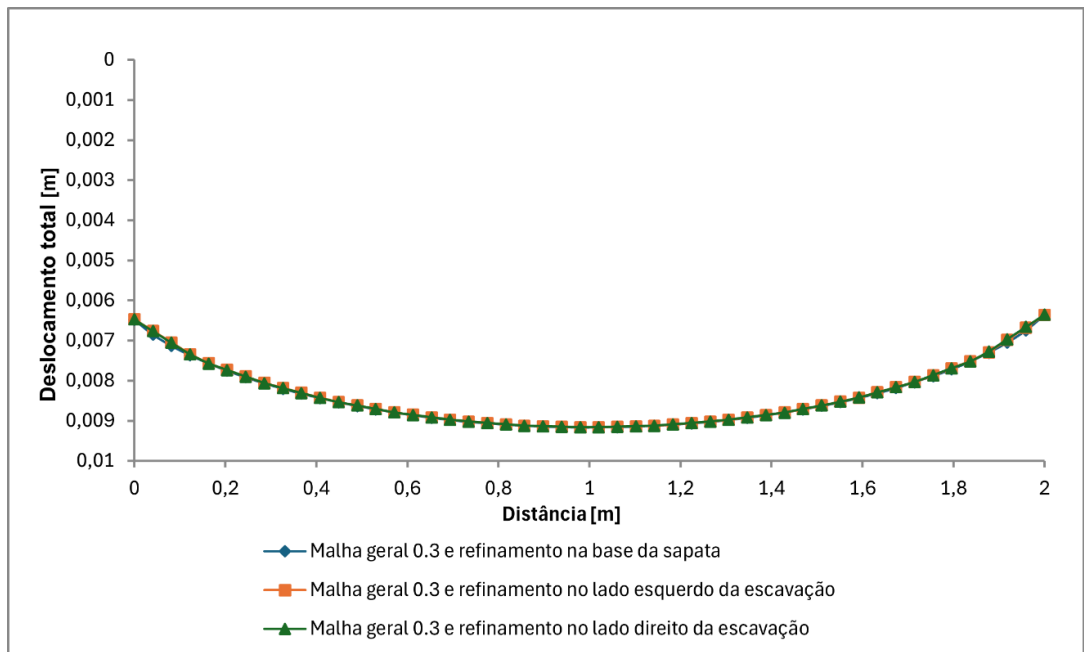
Figura 27 - Comparação Malha Geral "Graded"



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

**Figura B.3 – Malha geral 0.3 com refinamento localizado**

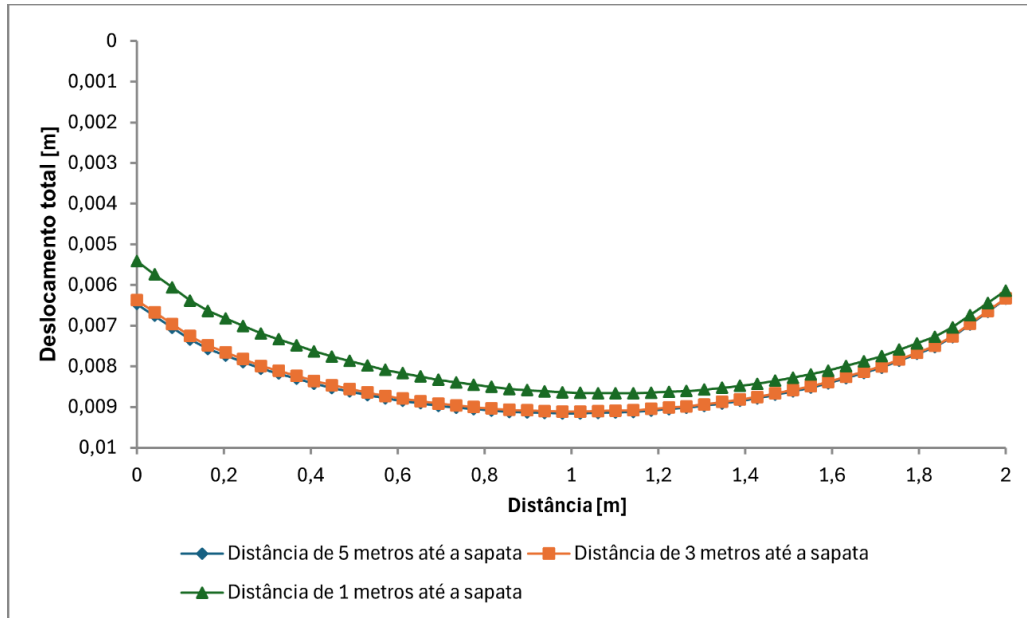
Figura 28 - Comparação Local do Refinamento Localizado



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

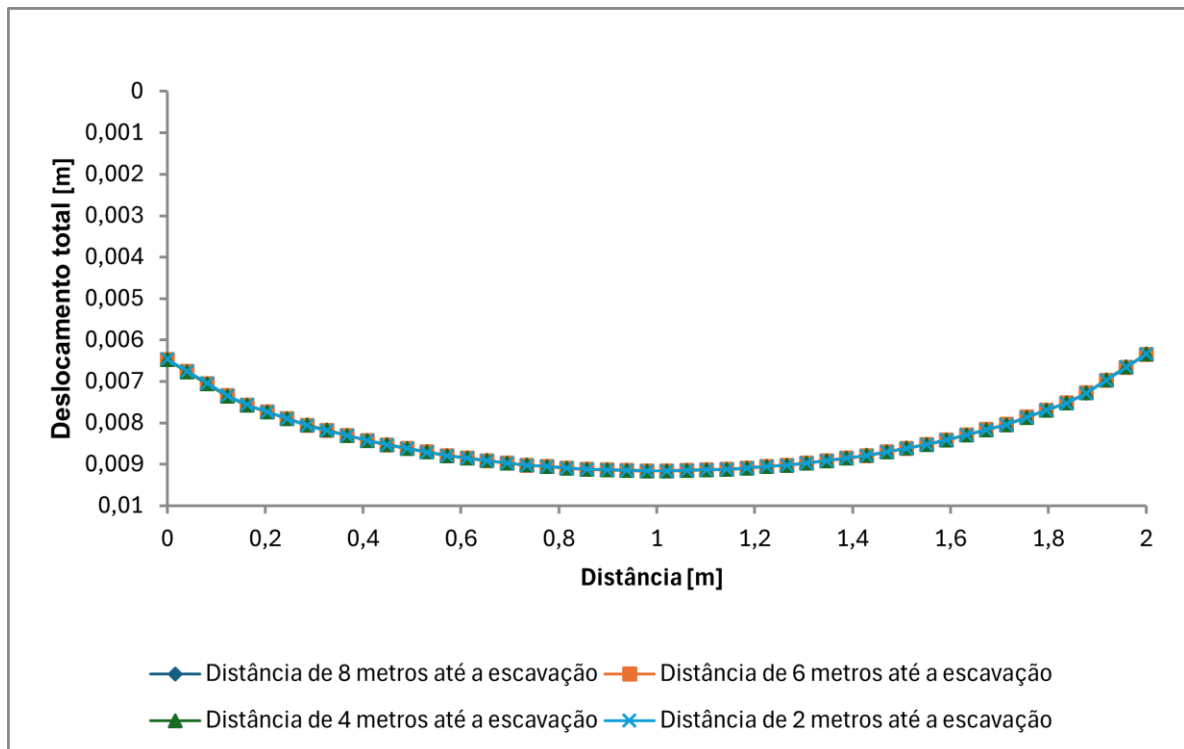
## Figura B.4 – Variação do Tamanho do Modelo

Figura 29 – Comparação da variação do Lado esquerdo



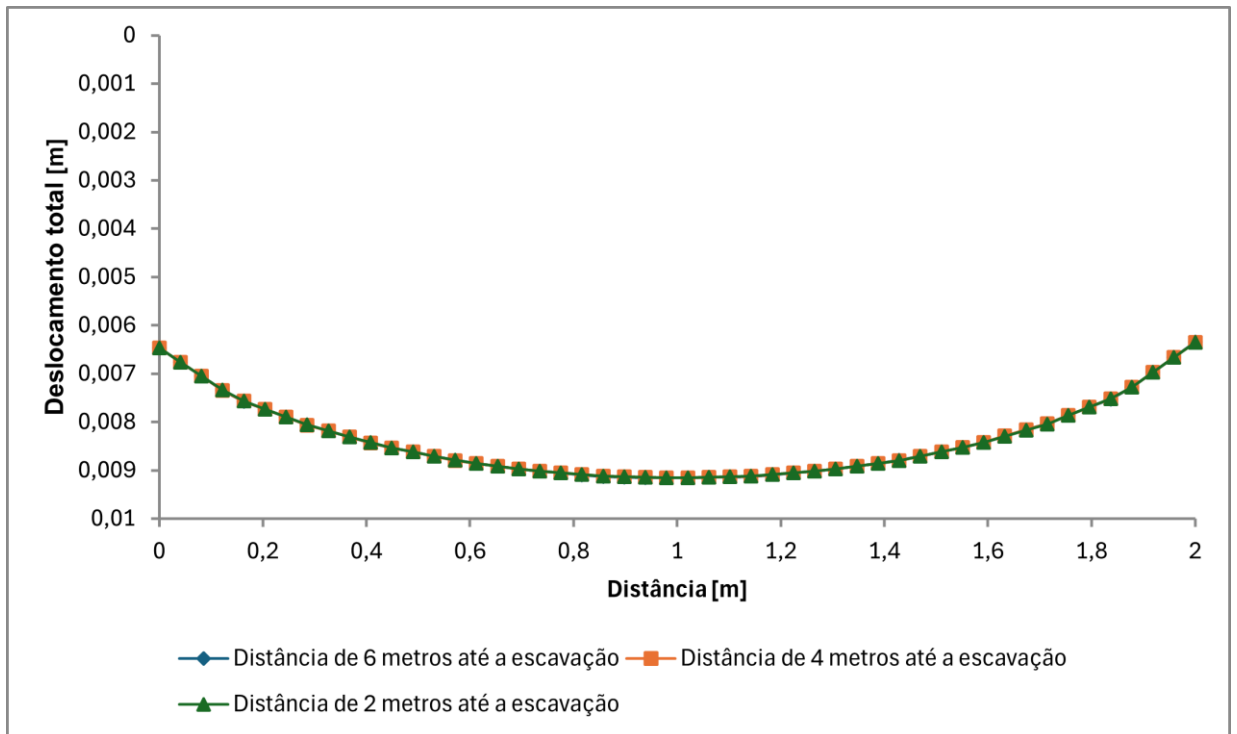
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 30 - Comparação da variação do Lado direito



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

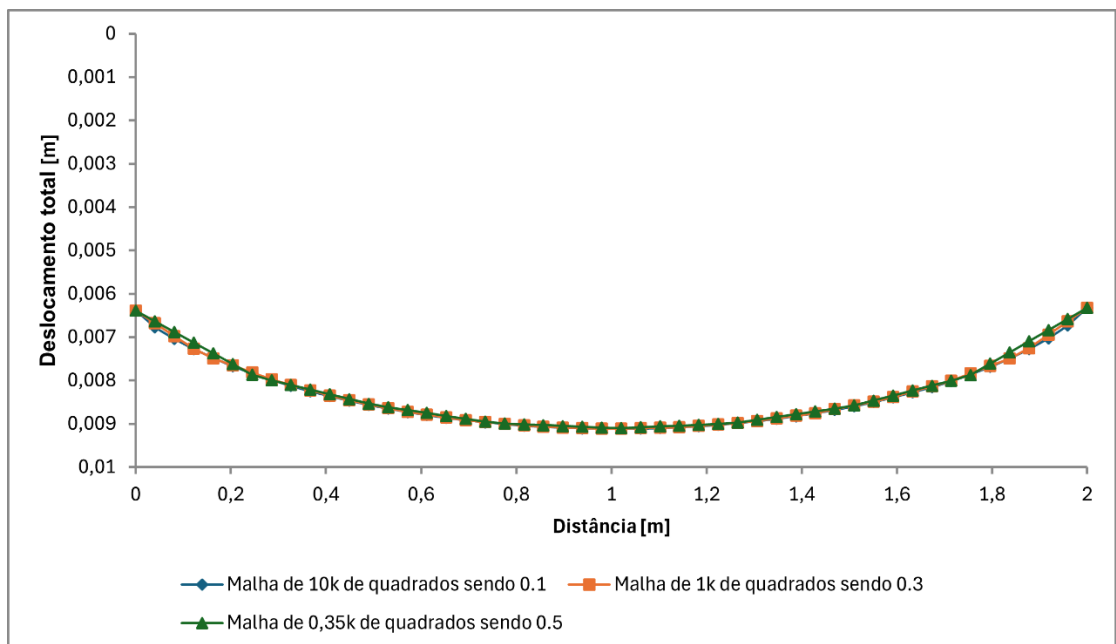
Figura 31 - Comparação da variação da Parte Inferior



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura B.5 – Utilização de Uma Malha Uniforme

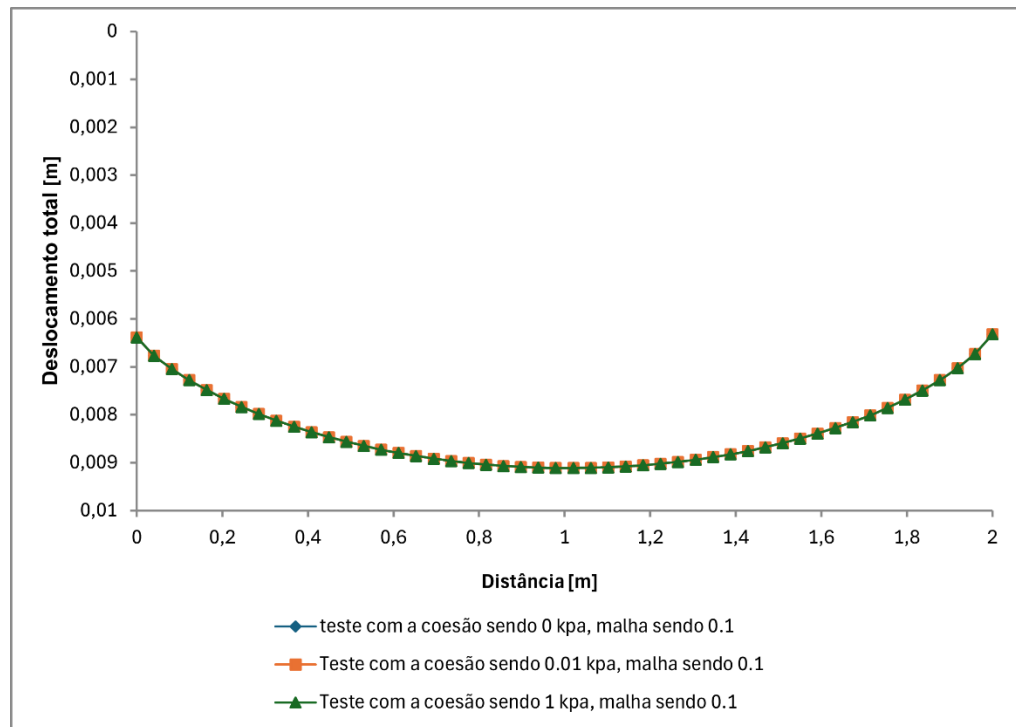
Figura 32 – Comparação do tamanho da Malha Uniforme



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

## Figura B.6 – Possível Erro Numérico Referente a Coesão

Figura 33 - Comparação entre os valores de coesão



## 7 REFERÊNCIAS

ALEGRETE TUDO. Nova queda na obra dos camarotes: ASSERCAL diz que situação era prevista; engenheiro Aquino afirma que obra tem que ser embargada. Disponível em: [https://www.alegretetudo.com.br/nova-queda-na-obra-dos-camarotes-assercal-diz-que-situacao-era-prevista-engenheiro-aquino-afirma-que-obra-tem-que-ser-embargada/#goog\\_rewarded](https://www.alegretetudo.com.br/nova-queda-na-obra-dos-camarotes-assercal-diz-que-situacao-era-prevista-engenheiro-aquino-afirma-que-obra-tem-que-ser-embargada/#goog_rewarded). Acesso em: 16 nov. 2024.

CHENG, Hongzhan; CHEN, Rong; WU, Hao; MENG, Fanyan. **A simplified method for estimating the longitudinal and circumferential behaviors of the shield-driven tunnel adjacent to a braced excavation**. *Computers and Geotechnics*, v. 123, p. 103595, 2020.

DOHERTY, J.P.; GOURVENEK, S.; GAONE, F.M. **Insights from a shallow foundation load-settlement prediction exercise**. *Computers and Geotechnics*, v. 136, p. 104246, 2022.

GU, G., ZHANG, Z., HUANG, X., LI, Y., & LEI, Q. **A finite element-based dynamic simulation method for modeling shield-ground interactions: 3D numerical simulations with comparison to physical experiments**. *Computers and Geotechnics*, 140, 104316, 2022.

HAMEDIAZAD, F.; BAHRANI, N. Simulation of hard rock pillar failure using 2D continuum-based Voronoi tessellated models: The case of Quirke Mine, Canada. *Computers and Geotechnics*, v. 172, p. 104808, 2022.

HONÓRIO, Allan Alexandre. *GRANDES ESCAVAÇÕES EM PERÍMETRO URBANO: ESTUDO DOS DESLOCAMENTOS E VARIAÇÕES DE ESFORÇOS EM FUNDAÇÕES VIZINHAS*. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2021.

HOSSEIN, M.; MOHAMMAD, S.; AGHILEH, K.; JIE, L.; REZA, J. C. **Settlement predictions of shallow foundations for non-cohesive soils based on CPT records-polynomial model**. *Computers and Geotechnics*, v. 128, p. 103836, 2020.

JONG, S. C.; ONG, D. E. L. A Bayesian inference framework for geomaterial characterization and evaluation of complex soil-structure interactions. *Computers and Geotechnics*, v. 172, p. 106452, 2024.

LI, Jianbo; HOU, Hongwei; LI, Zhiyuan; LIN, Gao. **A novel hybrid framework based on modified continued-fraction for pile-soil dynamic interaction of large-scale nuclear power structures**. *Computers and Geotechnics*, v. 172, p. 106452, 2023.

MUKHERJEE, Sougata; BABU, G. L. Sivakumar. Three-dimensional numerical modeling of geogrid reinforced foundations. *Computers and Geotechnics*, v. 116, p. 103209, 2019.

**PEREIRA, Mara Sarro.** *Modelagem física e numérica de solos colapsível reforçado por colunas de solo laterítico compactado.* 2018. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

REPÓRTER POPULAR. Alegrete em luta - 3 meses após as enchentes no RS. O povo tem voz. Disponível em: <https://reporterpopular.com.br/alegrete-em-luta-3-meses-apos-as-enchentes-no-rs/>. Acesso em: 16 nov. 2024.

ANTONIAZZI, Juliana Pippi. *Interação solo-estrutura de edifícios com fundações superficiais.* Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

IWAMOTO, Roberto Kunihiro. *Análise da interação solo-estrutura em fundações profundas por meio da técnica de subestruturação.* 2000. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

**Iliyas, S., Idris, A., Umar, I. H., Lin, H., Muhammad, A., & Xie, L. (2023).** *Experiment and Analysis of Variance for Stabilizing Fine-Grained Soils with Cement and Sawdust Ash as Liner Materials.* *Materials*, 17(6), 2397.

**Gajjar, H. V., Srivastava, A., & Ujeniya, V. D. (2023).** *Application of multi linear regression (MLR) analysis for predicting settlement reduction ratio (Sr) of stone columns reinforced soft ground.* *Materials Today: Proceedings*, 72, 459–464.