



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANNA CAROLINA NÓBREGA DINIZ

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA NA
DETERMINAÇÃO DE ESFORÇOS PARA O CÁLCULO ESTRUTURAL**

CARAÚBAS/RN

2024

ANNA CAROLINA NÓBREGA DINIZ

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA NA
DETERMINAÇÃO DE ESFORÇOS PARA O CÁLCULO ESTRUTURAL**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientador: Prof. Dr. Gilvan Bezerra dos
Santos Júnior,

CARAÚBAS/RN

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

D585a Diniz, Anna Carolina Nóbrega.
Análise da influência da interação solo-
estrutura na determinação de esforços para o
cálculo estrutural / Anna Carolina Nóbrega Diniz. -
2024.
65 f. : il.

Orientador: Gilvan Bezerra dos Santos Júnior .
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2024.

1. reações de apoio. 2. recalque. 3. interação
solo-estrutura. 4. sap2000. I. Júnior , Gilvan
Bezerra dos Santos, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ANNA CAROLINA NÓBREGA DINIZ

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA NA
DETERMINAÇÃO DE ESFORÇOS PARA O CÁLCULO ESTRUTURAL**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Engenheira Civil.

Defendida em: 22/10/ 2024.

BANCA EXAMINADORA

Gilvan Bezerra dos Santos Júnior, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Prof. Dr. Paulo Henrique Araújo Bezerra (UFERSA)
Membro Examinador

Prof. Dr. Eduardo Moraes de Medeiros (UFCG)
Membro Examinador

Dedico este trabalho à minha avó materna, Iraci
Nóbrega (in memoriam), obrigada por tudo e tanto
desde sempre. Te amo eternamente!

E a minha mãe, Adriana Angélica Nóbrega,
essa conquista é nossa! Te amo!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que tem sido meu guia e fortaleza a cada dia, me mantendo forte durante essa jornada, capacitando-me e sendo meu refúgio nos momentos mais desafiadores.

À minha mãe, Adriana Angélica Nóbrega, expresso minha mais profunda gratidão por todo amor, carinho e apoio incondicional que recebi ao longo da vida. Sua confiança em mim e sua presença constante são minha fonte diária de força. Ao meu pai, Maxwell Holanda Diniz, e aos meus irmãos, Anna Clara, Marianna e João Henrique, agradeço por tornarem meus dias mais leves e alegres. Vocês são minha maior motivação, tudo por vocês!

Não posso deixar de mencionar meu padrasto, Ramaley Ferdinando de Araújo Nóbrega, que, ao lado da minha mãe, nunca mediu esforços para me apoiar nesta caminhada e enfrentar todos os desafios. Sem vocês, essa conquista não seria possível.

Um agradecimento especial à minha avó materna, Iraci Nóbrega (in memoriam), que esteve ao meu lado em todas as fases da vida, sempre demonstrando imensa alegria e orgulho com cada conquista. Essa conquista é nossa! Também agradeço à minha tia, Andréa de Cássia, por ser uma presença essencial em minha jornada. Vocês têm minha eterna gratidão, assim como toda a minha família – primos, tios e tios-avós –, que desempenharam um papel fundamental nesse processo.

Por fim, agradeço ao meu orientador, Gilvan Bezerra dos Santos Junior, por sua dedicação, paciência e constante incentivo. Sua confiança me deu coragem para seguir em frente. Estendo ainda meu agradecimento a todos os professores que contribuíram para meu aprendizado ao longo da graduação, e aos amigos que caminharam ao meu lado, direta ou indiretamente, na realização desse sonho. Meu sincero muito obrigada a todos!

RESUMO

O sistema estrutural de uma edificação é composto por dois componentes principais: a superestrutura (lajes, vigas e pilares) e a infraestrutura (fundação), que conecta a superestrutura ao solo, transferindo as cargas. O cálculo tradicional considera que as fundações são rígidas e não se deslocam ao receber as forças da superestrutura, o que não reflete a realidade geotécnica, pois as deformações no solo influenciam o comportamento estrutural, especialmente as translações e rotações. A interação solo-estrutura (ISE) é crucial para entender como a edificação se comporta, pois o solo se deforma sob carregamento, o que começa durante a construção e continua até atingir um estado de equilíbrio. A falta de análise do solo ou considerações inadequadas durante o projeto podem resultar em deformações indesejáveis e redistribuição dos esforços. Ao incorporar a ISE no projeto, é possível prever os recalques e otimizar o dimensionamento da estrutura, aumentando sua durabilidade e evitando problemas patológicos, além de prevenir super e subdimensionamentos. Neste trabalho o cálculo dos recalques foi realizado através dos métodos de cálculo propostos por Schertmann (1970), Decóurt (1998), e Berberian (1992); e a ISE foi aplicada através do programa SAP 2000, versão 2026, que atua com base no Método dos Elementos Finitos (MEF), atribuindo molas nas condições de apoio. Este trabalho alcançou os resultados esperados, uma vez que foi possível visualizar a redistribuição dos esforços nos pilares à medida que a estrutura recebe um carregamento e se deforma, como quando calculado pelo método de Schertmann, em que se teve um aumento de 6% no valor das reações de apoio dos pilares da extremidade, e uma redução de 13% no pilar central da estrutura; pôde-se observar ainda, dentre os métodos de cálculo de recalque, uma variação significativa em seus resultados, entre os métodos de Schmertmann (1970) e de Decóurt (1998) com os demais, sendo em alguns casos de até 26%, enquanto que entre o método Simplificado de Berberian (1992) e o método Semiempírico de Beberian (1992), os valores das reações de apoio variaram em apenas 1%, no máximo.

Palavras-chave: Reações de apoio. Recalque. Interação solo-estrutura. SAP 2000.

ABSTRACT

The structural system of a building is made up of two main components: the superstructure (slabs, beams and pillars) and the infrastructure (foundation), which connects the superstructure to the ground, transferring the loads. The traditional calculation considers that foundations are rigid and do not move when receiving forces from the superstructure, which does not reflect geotechnical reality, as deformations in the soil influence structural behavior, especially translations and rotations. Soil-structure interaction (ISE) is crucial to understanding how a building behaves, as the soil deforms under loading, which begins during construction and continues until it reaches an equilibrium state. Lack of soil analysis or inadequate considerations during design can result in undesirable deformations and redistribution of efforts. By incorporating ISE into the project, it is possible to predict settlements and optimize the sizing of the structure, increasing its durability and avoiding pathological problems, in addition to preventing over- and under-sizing. In this work, the calculation of settlements was carried out using the calculation methods proposed by Schmertmann (1970), Decourt (1998), and Berberian (1992); and ISE was applied through the SAP 2000 program, version 2026, which operates based on Finite Element Methods (FEM), assigning springs to support conditions. This work achieved the expected results, since it was possible to visualize the redistribution of efforts in the pillars as the structure receives a load and deforms, as when calculated using the Schertmann method, in which there was a 6% increase in the value of the support reactions of the end pillars, and a 13% reduction in the central pillar of the structure; it was also possible to observe, among the settlement calculation methods, a significant variation in their results between the methods of Schmertmann (1970) and Decourt (1998) with the others, being in some cases up to 26%, while between the Simplified method of Berberian (1992) and the Semi-empirical method of Berberian (1992), the values of the support reactions varied by only 1%, at most.

Keywords: Supportive reactions. Repression. Soil-structure interaction. SAP 2000.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Recalques absolutos e diferenciais	21
Figura 2 - Fator de influência na deformação vertical.....	22
Figura 3 - Representação da hipótese de Winkler (1867)	28
Figura 4 - a) coeficiente de mola; b) módulo de reação vertical.	28
Figura 5 - Interface inicial do SAP 2000, versão 26.	29
Figura 6 - Módulos e sequência lógica para modelagem no SAP 2000.	30
Figura 7 - Etapas do trabalho.....	32
Figura 8 - Boletim de sondagem do solo pré-definido	34
Figura 9 - Material: Concreto C25	35
Figura 10 - Material: Aço CA-50	35
Figura 11 - Seção de viga: 18 x 40	36
Figura 12 - Seção de pilar: 20 x 40.....	36
Figura 13 - Seção da laje: H= 10 cm	37
Figura 14 - Casos de cargas.....	37
Figura 15 - Combinação de cargas no ELU	38
Figura 16 - Carregamento atuante em P1 e P2	39
Figura 17 - Aplicação do engaste	39
Figura 18 - Aplicação do coeficiente de mola.....	41
Figura 19 - Modelagem do Pórtico 1 - P1 (Engastado).....	42
Figura 20 - Modelagem do Pórtico 2 - P2 (Engastado).....	43
Figura 21 - Aplicação de mola na fundação do Pórtico 1 – P1	43
Figura 22 - Aplicação da mola na fundação do Pórtico 2 - P2.....	44
Figura 23 - Cálculo de recalque pelo Método de Schmertmann (1970).....	64
Figura 24 - Cálculo de recalque pelo Método Simplificado de Berberian (1992)	64
Figura 25 - Cálculo de recalque pelo Método de Decóurt.....	64
Figura 26 - Cálculo de Recalque pelo Método Semiempírico de Berberian (1992)	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Variação das Reações de Apoio no Pórtico 1	52
Gráfico 2 - Variação das Reações de Apoio – SCHMERTMANN (1970).....	53
Gráfico 3 - Variação das Reações de Apoio - SIMPLIFICADO DE BERBERIAN (1992)....	54
Gráfico 4- Variação das Reações de Apoio - SEMIEMPÍRICO DE BERBERIAN (1992)	55
Gráfico 5 - Variação das Reações de Apoio - DECÓURT (1998).....	56
Gráfico 6 - Comparativo das Reações de Apoio entre os métodos de cálculo de recalque – Mola 1	57
Gráfico 7 - Comparativo das Reações de Apoio entre os métodos de cálculo de recalque – Mola 2	57
Gráfico 8 - Comparativo das Reações de Apoio entre os métodos de cálculo de recalque – Mola 3	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fator referente a natureza do solo	23
Tabela 2 - Fator adimensional de correção de largura, F_b	24
Tabela 3 - Fator adimensional de forma e rigidez, F_f	24
Tabela 4 - Fator de correção da espessura de camada mole, F_h	25
Tabela 5 - Fator de influência do tempo, F_t	25
Tabela 6 - Fator de influência do OCR, F_{oc}	25
Tabela 7 - Fator de influência da rigidez da estrutura nos recalques, ISE	25
Tabela 8 - Recalque - P1 Engastado.....	44
Tabela 9 - Coeficiente de mola - P1 Engastado.....	45
Tabela 10 - Recalque - P1 - Mola 1	45
Tabela 11 - Coeficiente de mola - P1 - Mola 1	45
Tabela 12 - Reações de apoio pelo Método de Schmertmann (1970)	46
Tabela 13 - Reações de apoio pelo Método Simplificado de Berberian (1992).....	47
Tabela 14 - Reações de apoio pelo Método Semiempírico de Berberian (1992).....	49
Tabela 15 - Reações de apoio pelo Método de Decourt (1998)	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
ISE	Interação Solo-Estrutura
NBR	Norma Brasileira
NSPT	Índice de Resistência a Penetração do Solo
P1	Pórtico 1
P2	Pórtico 2

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Recalque total
ρ_c	Recalque por adensamento
ρ_i	Recalque imediato
m	Metros
C_1	Fator de correção do recalque
C_2	Fator de correção do tempo de recalque
σ^*	Acréscimo de tensão aplicado pela sapata
σ	Tensão atuante sob a sapata
q	Tensão geostática na base da sapata
kPa	Quilopascal
I_z	Fator adimensional de influência na deformação
Es	Módulo de deformabilidade
Δz	Espessura de camada homogênea
t	Tempo
σ_v	Tensão vertical efetiva
σ'	Tensão aplicada no solo subtraído o alívio de tensão
Fs	Fator referente a natureza do solo
NSPT SPT brasileiro	
Fb	Fator adimensional de correção de largura
Ff	Fator adimensional de forma e rigidez
Fh	Fator adimensional de correção referente a existência de camadas duas incompressíveis dentro da zona de influência
Ft	Fator adimensional de correção dependente do tempo
Fz	Fator adimensional de profundidade
Foc	Fator adimensional de correção referente a condição de adensamento da areia
N	Número de NSPT
B	Largura
Mpa	Megapascal
cm	Centímetro
k_v	Módulo de reação vertical
d	Deformação

k_m Coeficiente de mola

σ_{adm} Tensão admissível

F Força

N Newton

kN Quilonewton

A Área

mm Milímetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos específicos	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Elementos estruturais	19
2.2	Recalque.....	20
2.2.1	Método de Schmertmann (1970)	21
2.2.2	Método simplificado de Berberian (1992).....	23
2.2.3	Método semiempírico de Berberian (1992)	23
2.2.4	Método de Decourt (1998).....	25
2.3	Interação Solo-Estrutura (ISE)	26
2.4	Análise computacional para a ISE – SAP2000.....	29
3	METODOLOGIA.....	32
3.1	Visão geral	32
3.2	Base de dados	33
3.3	Modelagem da estrutura no SAP 2000 - Engastado	34
3.4	Cálculo do recalque	40
3.5	Determinação do coeficiente de mola.....	40
3.6	Aplicação do coeficiente de mola	40
3.7	Comparação dos esforços.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
4.1	Modelagem dos pórticos P1 e P2 no SAP 2000	42
4.2	Resultados da Interação Solo-Estrutura.....	44
4.2.1	Pórtico 1	44
4.2.2	Pórtico 2	46
4.3	Comparativo das Reações de Apoio	51
4.3.1	Pórtico 1	52
4.3.2	Pórtico 2	52
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60

REFERÊNCIAS62

APÊNDICE A64

1 INTRODUÇÃO

O sistema estrutural de uma edificação se dá em dois componentes, a superestrutura, constituída usualmente por lajes, vigas e pilares, e a infraestrutura, com as estruturas de fundações. Sendo este último, o meio de ligação entre a superestrutura e o solo de suporte, com a função de transferir suas respectivas cargas para ele. Comumente, o cálculo de estruturas ainda é realizado considerando que as forças oriundas da superestrutura serão transmitidas às fundações e estas apresentarão comportamento rígido, isto é, mesmo com o recebimento desses esforços elas não se deslocarão.

Segundo Colares (2006), essa consideração não condiz com a realidade geotécnica, uma vez que a intensidade dessas deformações irá influenciar inclusive no modelo estrutural, considerando que o tipo de vinculação dos apoios está diretamente relacionado com as translações e rotações nas três dimensões.

Portanto, para um completo entendimento do comportamento da estrutura, torna-se de suma importância o estudo da interação solo-estrutura, que se dá pela análise do conjunto estrutura (super e infraestrutura) e maciço do solo. Tendo em vista que o solo é propício a deformar-se ao sofrer um carregamento vertical, sejam essas deformações excessivas ou milimétricas.

Em concordância com Colares (2006), esta interação inicia-se ainda durante a fase de construção da edificação, pois à medida que se aumenta o carregamento, a estrutura já começa a deslocar-se, e isso continua até o momento que ela atinge um estado de equilíbrio, onde as tensões e deformações se tornam constantes. Além disso, tem-se as verificações de critérios de segurança à ruptura e de deformações limites, pois ainda que o solo de assentamento da fundação esteja em segurança quanto à ruptura, os recalques calculados precisam ser compatíveis com os tolerados pela estrutura.

Sabe-se que a forma como uma edificação se comporta durante sua vida útil depende diretamente de sua fundação, podendo ocorrer casos de edificações que sofreram deformações indesejáveis por estas não serem previstas. Esse problema pode ocorrer pela falta de estudo do solo na qual a fundação será assentada ou nas considerações feitas na fase de projeto, quando considerados apoios indeslocáveis e solos rígidos. Quando isso acontece, esses deslocamentos não previstos inicialmente podem acarretar na redistribuição dos esforços.

Portanto, busca-se neste trabalho analisar a relevância de se utilizar um modelo recorrendo-se a interação solo-estrutura no cálculo dos esforços de uma edificação, a partir de uma análise computacional em um programa de elementos finitos. Admite-se que ao ponderar

a ISE durante a fase de projeto, torna-se possível calcular os efeitos da redistribuição dos esforços na estrutura e assim prever com melhor precisão os recalques que as fundações tendem a sofrer, além do dimensionamento correto dos elementos estruturais. Desse modo, faz-se projetos mais apropriados e eficientes, uma vez que se tem a otimização da estrutura com o aumento de sua vida útil, prevenindo diretamente a edificação de manifestações patológicas e evitando super e subdimensionamentos.

1.1 Objetivos

Nesta seção, serão discutidos os objetivos deste trabalho, divididos em um objetivo geral e objetivos específicos, com a finalidade de destacar os principais aspectos da pesquisa.

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a influência da utilização da interação solo-estrutura no cálculo das reações de apoio em um modelo estrutural.

1.1.2 Objetivos específicos

- Identificar os modelos mais relevantes de interação solo-estrutura;
- Desenvolver um modelo em um programa de análise estrutural em elementos finitos para avaliar a interação solo-estrutura;
- Analisar a resposta da determinação das reações de apoio utilizando modelos de interação solo-estrutura, identificando possíveis redistribuições.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção tratará dos princípios teóricos e dos conceitos essenciais para o desenvolvimento da pesquisa.

2.1 Elementos estruturais

Para estudar os elementos estruturais de uma edificação e como eles se comportam, faz-se necessário entender que a estrutura se divide em superestrutura, que são as lajes, vigas e pilares, e infraestrutura, a sua fundação, sendo esta parte do sistema responsável por transmitir os esforços da superestrutura ao maciço do solo.

O solo comumente é heterogêneo e deformável, logo, passível a sofrer deformações ao receber um carregamento vertical. Com isso, é necessário que exista um diálogo entre o engenheiro projetista da superestrutura e o engenheiro projetista das fundações. De acordo com Iwamoto (2000), a divergência entre ambos inicia desde da escolha do sistema de referência e na posição da sua origem, já que consideram a origem do sistema em um ponto da base da estrutura. Sendo na visão estrutural com sentido para cima, é referenciada por um sistema de coordenadas localizado na base de um dos pilares, e para baixo na visão geotécnica, localizado a partir de eixos XYZ na superfície do terreno, o que torna esse ponto de referência inadequado dado que ele é deslocável.

Após a análise adequada do maciço de solo onde serão assentados os elementos estruturais da infraestrutura (como sapatas, estacas e tubulões), é necessário verificar se a transmissão dos esforços da superestrutura ocorrerá de maneira correta, respeitando dois requisitos fundamentais: a segurança contra ruptura e recalques compatíveis com a estrutura. Ou seja, o maciço não pode entrar em colapso ou sofrer ruptura. Além disso, mesmo que esteja garantida a segurança contra a ruptura, os recalques devem estar dentro dos limites toleráveis pela estrutura. A segurança contra ruptura, por si só, não garante um bom desempenho do sistema de fundação; é imprescindível também verificar se os recalques, tanto absolutos quanto diferenciais, estão de acordo com as exigências de desempenho, segurança e funcionalidade. (Colares, 2006)

A superestrutura, parte do sistema estrutural de uma edificação, é a porção que se encontra acima da fundação, apoiada no solo. Ela é composta por elementos como pilares, vigas e lajes. Para o seu dimensionamento, é necessário considerar as ações permanentes, variáveis e excepcionais que atuam sobre ela, conforme especificado pela NBR 8681/2003. Essa norma

também define as combinações dessas ações que devem ser aplicadas para a verificação dos estados limites da estrutura: o estado limite último (ELU), relacionado ao colapso parcial ou total da estrutura, e o estado limite de serviço (ELS), referente a fissuras e deformações que podem comprometer tanto o uso quanto a vida útil da edificação.

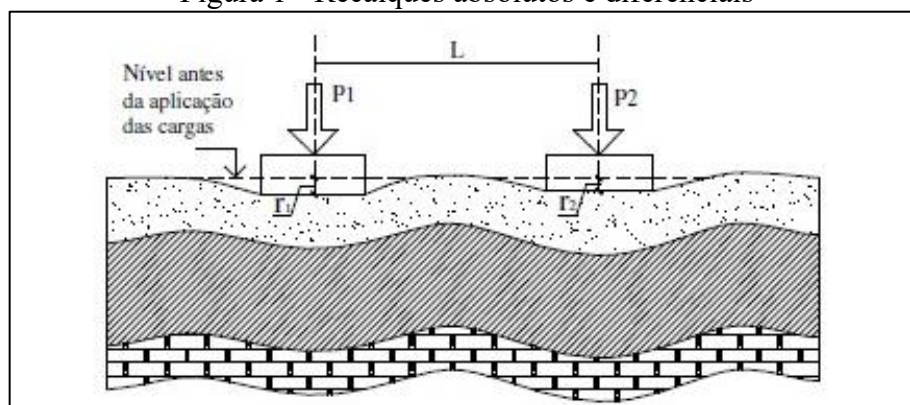
2.2 Recalque

De acordo com Cintra *et al.* (2011), os recalques correspondem a deslocamentos verticais para baixo que ocorrem nos pontos de apoio de uma estrutura, resultantes da deformabilidade do solo entre a base da sapata (em fundações diretas) ou do bloco de coroamento (em fundações por estacas) até uma superfície de referência considerada fixa, como um topo rochoso, por exemplo. Esses deslocamentos são causados por deformações que ocorrem devido à diminuição de volume e/ou alteração na forma do maciço de solo presente nesse intervalo.

Apesar de já ser reconhecido e bastante estudado, a previsão de recalques ainda é um desafio no cálculo estrutural de uma edificação, e isso se dá principalmente pela heterogeneidade do solo. À vista disso, aprimorar as técnicas de investigação do solo, desenvolver modelos representativos mais elaborados e promover uma análise interativa com a estrutura são abordagens que têm levado a uma determinação mais precisa dos recalques. (Colares, 2006).

Na análise das estruturas, identificam-se dois tipos de recalques: o recalque total e o recalque diferencial. O recalque total refere-se ao deslocamento completo de um dos apoios da estrutura ou do conjunto da estrutura em si. Por outro lado, o recalque diferencial ocorre quando há uma diferença nos recalques totais de duas fundações distintas, como mostra a Figura 1, resultado da aplicação de diferentes carregamentos, variações nas geometrias das fundações e divergências nas características do solo.

Figura 1 - Recalques absolutos e diferenciais



Fonte: Alonso, 1989

Cintra *et al.* (2011) afirma que o recalque total de uma fundação se decompõe em duas formas, recalque imediato e recalque por adensamento, como mostra a Equação (1).

$$\rho = \rho_c + \rho_i \quad (1)$$

Temos,

ρ = recalque total;

ρ_c = recalque por adensamento;

ρ_i = recalque imediato.

O recalque imediato, como o próprio nome sugere, corresponde à deformação inicial da fundação que ocorre quase simultaneamente à aplicação do carregamento. Já o recalque por adensamento se desenvolve ao longo do tempo, resultante da expulsão de água do solo e da consequente redução dos vazios. (Cintra *et al.*, 2011).

Neste trabalho, utilizou-se de alguns métodos de cálculo semiempíricos para previsão de recalques, como o de Schmertmann (1970), simplificado de Berberian (1992), semiempírico de Berberian (1992) e Décourt (1998), que serão discutidos a seguir.

2.2.1 Método de Schmertmann (1970)

Este método tem como base a teoria da elasticidade, em que subdivide o perfil de sondagem do maciço de solo onde a fundação está assentada em semi-espacos elásticos, homogêneos e isotrópicos, de modo que o módulo de deformabilidade, E_s , seja considerado constante. A equação proposta neste método é apresentada na Equação 2.

$$\rho = C_1 \cdot C_2 \cdot \sigma^* \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{I_z}{E_s \cdot \Delta z} \right) \quad (2)$$

Sendo, ρ (m) = recalque; σ^* (kPa) = acréscimo de tensão aplicado pela sapata, $\sigma - q$, com σ (Kpa) = tensão atuante sob a sapata e q (kPa) = tensão geostática na base da sapata; Δz (m) = espessura de cada camada homogênea; E_s (kPa) = módulo de deformabilidade; I_z = fator adimensional de influência na deformação; n = número de camadas.

Para um maior embutimento da fundação superficial do tipo sapata no solo, este método propõe um fator de correção do recalque (C_1) variando de 1 a 0,5, como mostra a Equação 3.

$$C_1 = 1 - 0,5 \cdot \frac{q}{\sigma^*} \geq 0,5 \quad (3)$$

Onde: q é a tensão vertical efetiva à cota de apoio da fundação, sobrecarga, e σ^* é o acréscimo de tensão aplicado pela sapata, $\sigma - q$.

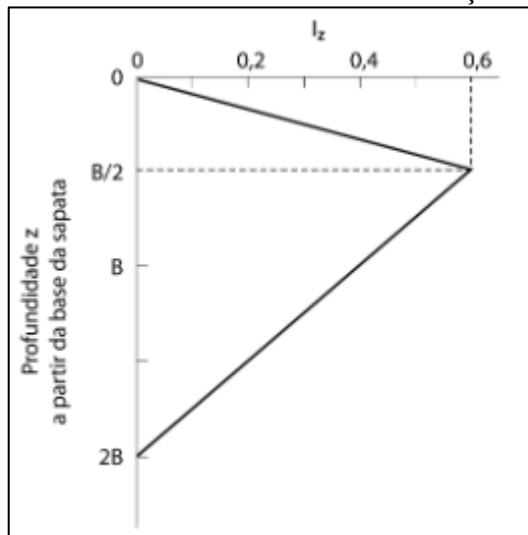
Outra correção adotada por Schmertmann (1970), é o fator de correção C_2 , que tem relação com o tempo em que outra parcela do recalque se desenvolve, este calculado a partir da Equação 4.

$$C_2 = 1 + 0,2 \cdot \log \frac{t}{0,1} \quad (4)$$

Onde: t (anos) = tempo.

Schmertmann (1970) compreende em seu método que as deformações ocorrem em um bulbo de profundidade $2B$, em que B é a largura da sapata, e a deformação máxima do solo ocorre a uma profundidade de $z = B/2$, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 - Fator de influência na deformação vertical



Fonte: Cintra *et al.* (2011)

Para calcular o valor máximo da deformação do solo, que se dá a uma profundidade $z = B/2$ para sapatas quadradas, utiliza-se da Equação 5.

$$I_{zmáx} = 0,5 + 0,1 \sqrt{\frac{\sigma_v^*}{\sigma_v}} \quad (5)$$

Onde: σ_v é a tensão vertical efetiva na profundidade correspondente a $I_{zmáx}$.

2.2.2 Método simplificado de Berberian (1992)

Berberian (1992) propõe um método semi-empírico para a estimativa de recalque imediato de fundações superficiais do tipo sapata (quase-rígida, $R_r = 0,8$) assente em solos granulares, a partir da Equação 6.

$$\rho = \left(17 \cdot \sigma' \cdot F_s / N_{72} \right) \quad (6)$$

Onde: ρ (m) = recalque elástico, após aproximadamente 5 anos; σ' (kPa) = tensão aplicada no solo subtraído o alívio de tensão; F_s = fator referente a natureza do solo, como mostra a Tabela 1; NSPT = SPT brasileiro, número médio de golpes para uma penetração de 30 cm.

Tabela 1 - Fator referente a natureza do solo

Fator do solo F_s			
Berb.	USCS	Solo	F_s
S	S	Areia grossa pura	0,9
S	S	Areia média e fina	1,0
S6M,C	SM,C	Areia muito siltosa ou argilosa	1,7
S5M,C	SM,C	Areia siltosa ou argilosa	1,6
S4M,C	SM,C	Areia pouco siltosa ou argilosa	1,3
S3M,C	SM,C	Areia muito pouco siltosa ou argilosa	1,1
C,M	C,M	Argilas e siltes porosos	1,8
C6S,M	CS,M	Argilas e siltes muito arenosos	1,4
C5S,M	CS,M	Argilas e siltes arenosos	1,5
C4S,M	CS,M	Argilas e siltes pouco arenosos	1,7
KF		Argilas siltosas porosas laterítica meta estáveis	1,6

Fonte: Adaptado de Berberian (2015)

2.2.3 Método semiempírico de Berberian (1992)

Neste método, algumas hipóteses simplificadoras vistas no método simplificado são eliminadas por Berberian (1992). São considerados dados médios em obras com sapatas. A formulação é apresentada na Equação 7.

$$\rho = \left(17 \cdot \sigma' \cdot F_b \cdot F_s \cdot F_f \cdot F_h \cdot F_t \cdot F_z \cdot F_{oc} / N \cdot ISE \right) \quad (7)$$

Onde: ρ (cm) = recalque; σ' (kPa) = tensão aplicada no solo subtraído o alívio de tensão; F_b = fator adimensional de correção de largura, para quando a largura (B) for diferente de 2,0 m, utilizar a Tabela 2; F_s = fator adimensional de correção do solo; F_f = fator adimensional de forma e rigidez, para quando B for diferente de L, utilizar a Tabela 3; F_h = fator adimensional de correção referente a existência de camadas duras incompressíveis dentro da zona de influência, existente na Tabela 4; F_t = fator adimensional de correção dependente do tempo, determinado pela Tabela 5; F_z = Fator adimensional de profundidade; F_{oc} = fator adimensional de correção referente a condição de adensamento da areia, para areias pré-adensadas, calculado a partir da Equação 8 e determinado na Tabela 6; N = número de Nspt; ISE = fator adimensional de influencia da rigidez da estrutura, conforme a Tabela 7.

Tabela 2 - Fator adimensional de correção de largura, F_b

B (m)	F_b
1	0,615
2	1
3	1,328
≥ 4	1,625

Fonte: Adaptado de Berberian (2015)

Tabela 3 - Fator adimensional de forma e rigidez, F_f

Tipo de Placa	Rígida	Semi-Rígida $R_r = 80\%$			Flexível		
		Centro	Borda ou Canto	Média	Centro	Borda ou Canto	Média
Circular	0,79	0,86	0,78	0,82	1	0,64	0,85
Quadrada	1	1,04	0,8	0,92	1,11	0,56	0,78
Retangular	L/B = 1,5	1,05	1,12	1	1,06	1,36	1,15
	L/B = 2	1,17	1,3	1,16	1,23	1,52	1,3
	L/B = 3	1,48	1,64	1,34	1,49	1,78	1,52
	L/B = 5	1,66	1,86	1,62	1,74	2,1	1,83
	L/B = 10	2	2,22	2	2,11	2,54	1,9

Fonte: Adaptado de Berberian (2015)

Tabela 4 - Fator de correção da espessura de camada mole, Fh

H/Zf	Fh
1	1
0,75	0,937
0,5	0,75
0,25	0,35

Fonte: Adaptado de Berberian (2015)

Tabela 5 - Fator de influência do tempo, Ft

Tempo	Cargas Estáticas	Cargas Repetitivas
3 anos	1	1
6 anos	1,05	1,15
9 anos	1,1	1,3
12 anos	1,15	1,45
15 anos	1,22	1,6
20 anos	1,3	1,9
30 anos	1,4	2,2

Fonte: Adaptado de Berberian (2015)

$$Foc = \frac{1}{OCR} \quad (8)$$

Tabela 6 - Fator de influência do OCR, Foc

Areias bastante pré-adensadas	OCR = 3 a 4	Foc = 0,25
Areias pré-adensadas	OCR = 2	Foc = 0,5
Areias normalmente adensadas	OCR = 1	Foc = 1
Areias envelhecidas	OCR = 0,5	Foc = 2

Fonte: Adaptado de Berberian (2015)

Tabela 7 - Fator de influência da rigidez da estrutura nos recalques, ISE

Estruturas muito flexíveis	1
Estruturas baixas até 2 pontos isostáticos	1,3
Estruturas hiperestáticas até 5 pontos	1,3
Estruturas hiperestáticas acima de 5 pontos	1,4

Fonte: Adaptado de Berberian (2015)

2.2.4 Método de Decourt (1998)

Decourt (1998) apresenta uma formulação semi-empírica para a determinação do recalque imediato em função do N_{spt} , em solos granulares, como pode ser visto na Equação 9.

$$\rho = \frac{2,7 \cdot \sigma \cdot B^{0,7}}{Nspt} \quad (9)$$

Onde: ρ (cm) = recalque imediato; σ (Mpa) = pressão aplicada pela fundação; B (m) = largura (menor dimensão da fundação); Nspt = SPT brasileiro.

Todas considerações feitas para o cálculo de recalque pelos métodos citados são expostos no Apêndice A, ao final deste trabalho.

2.3 Interação Solo-Estrutura (ISE)

Usualmente, ao projetar o sistema estrutural de uma edificação não se avalia a interação solo-estrutura (ISE), que consiste na análise do conjunto superestrutura e infraestrutura como uma só estrutura junto ao maciço de solo. Geralmente, têm-se de um lado o projetista estrutural desenvolvendo o projeto tomando como base a existência de apoios indeslocáveis, e do outro, o projetista de fundações considerando as ações dos apoios recebidas de maneira que os deslocamentos sejam compatíveis com a superestrutura. Ou seja, desconsideram os efeitos da rigidez da estrutura, e seu processo construtivo, logo tem-se a não consideração da interação solo-estrutura (ISE).

Se analisarmos uma fundação em sapata rígida, e considerarmos apoios indeslocáveis, quer dizer que temos a total restrição à translação vertical e ao giro nas duas direções ortogonais nas extremidades dos pilares, temos pilares engastados no solo. Apesar de em alguns casos essa hipótese parecer satisfatória, seja pela pouca deformabilidade do solo em questão, ou por se tratar de uma obra de pequeno porte, em outros a desconsideração da deformabilidade do solo pode trazer consequências negativas, tanto em relação a segurança da edificação, e vida útil, quanto do ponto de vista econômico. (Antoniuzzi, 2011).

Na realidade, o solo é passível a deformar-se. Portanto, essas deformações oriundas da aplicação de um carregamento geram uma alteração no fluxo de cargas da estrutura, isto é, os valores dos esforços nos elementos estruturais são modificados, e essa redistribuição de esforços acaba por ocasionar manifestações patológicas na estrutura. A análise da interação solo-estrutura considera que o deslocamento ocorre e avalia seu impacto na estrutura. (Holanda Jr, 1998).

A NBR 6122:2022, Projeto e execução de fundações, em seu item 5.5 Análise interação fundação-estrutura, atesta que “Em

estruturas nas quais a deformabilidade das fundações pode influenciar na distribuição de esforços, deve-se estudar a interação fundação-estrutura, sendo obrigatório esse estudo nos seguintes casos:

- a) estruturas nas quais a carga variável é significativa em relação à carga total, tais como silos e reservatórios;
- b) estruturas com mais de 55,0 de altura, medida do térreo até a laje de cobertura do último piso habitável;

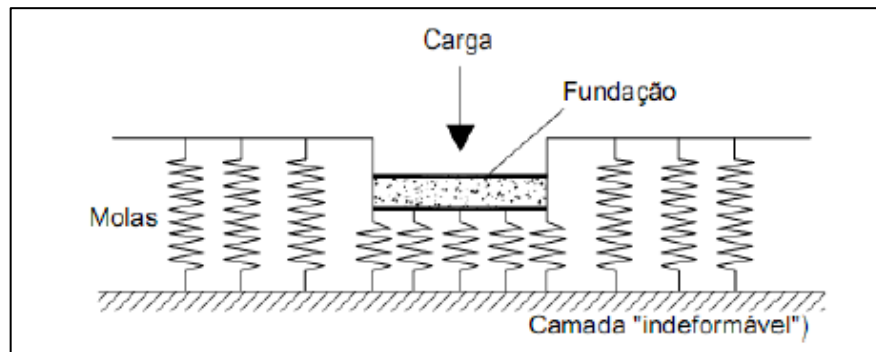
Interação fundação-estrutura: “processos de análise estrutural que consideram conjuntamente as deformabilidades das fundações e da superestrutura.” (NBR 6122:2022).

Ao considerar a ISE na análise estrutural de uma edificação, ainda em fase de projeto, constatou-se que os deslocamentos das fundações podem provocar uma redistribuição dos esforços operantes naqueles elementos. Gusmão (1990) afirma ainda, que com essa redistribuição dos esforços, tem-se um alívio das cargas dos pilares com maiores recalques e um acréscimo de carregamento nos pilares com deslocamentos verticais menores.

Uma maneira de incorporar a Interação Solo-Estrutura (ISE) no cálculo e no projeto estrutural é através de modelos que representem a deformabilidade do solo por meio de molas elásticas. Esses modelos utilizam o coeficiente de mola ou o módulo de reação vertical, levando em consideração não apenas as propriedades mecânicas do solo, mas também a compatibilização dos recalques. (Antoniazzi, 2011).

Neste trabalho, os modelos utilizados para simulação da ISE serão com base na hipótese de Winkler (1867), no qual o solo é tido como um sistema de molas lineares e independentes entre si, considerando-se apenas as deformações ocorridas onde há carregamento, ou seja, na região das fundações, como é representado na Figura 3.

Figura 3 - Representação da hipótese de Winkler (1867)



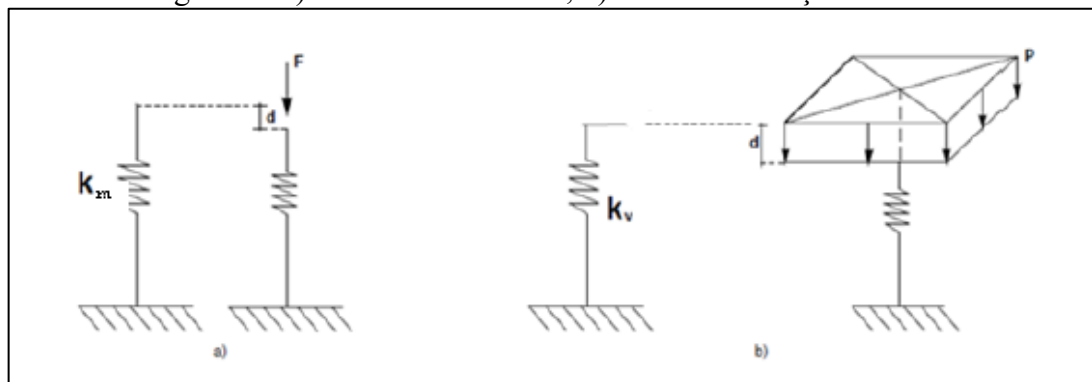
Fonte: Antoniazzi (2011)

Winkler (1867) compreende que as tensões são proporcionais aos deslocamentos. Daí surge o módulo de reação vertical, que consiste na reação do solo ao receber determinada tensão da superestrutura, ou de forma análoga, o coeficiente de mola, em que a força é proporcional ao recalque, como definem a Equação 10 e 11, respectivamente, e são ilustrados na Figura 4.

$$P = k_v \cdot d \quad (10)$$

$$F = k_m \cdot \rho \quad (11)$$

Figura 4 - a) coeficiente de mola; b) módulo de reação vertical.



Fonte: Antoniazzi (2011)

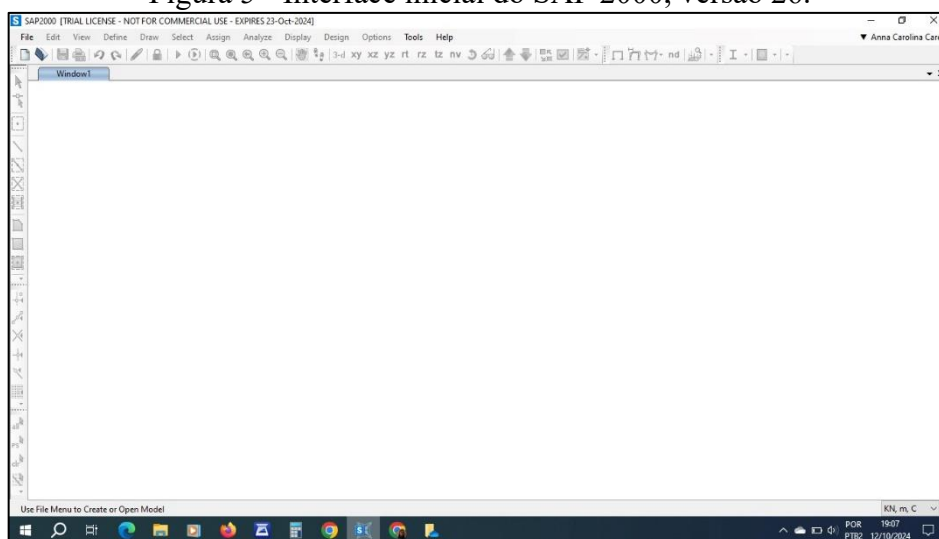
Contudo, Gusmão Filho (2002) aponta algumas incertezas na modelagem da ISE como: a modelagem da sequência construtiva da superestrutura e as propriedades reológicas dos materiais; a dificuldade de análise do solo que muitas vezes é heterogêneo e anisotrópico em todas as direções, como também o fato de os parâmetros dos solos serem referentes a apenas

uma parcela do maciço, ao invés de abranger o seu comportamento como um todo. Entretanto, vale destacar que a não consideração da ISE pode resultar em alguns pontos negativos como na segurança da estrutura, e surgimento de manifestações patológicas prejudicando sua vida útil.

2.4 Análise computacional para a ISE – SAP2000

Dentre os mais versáteis softwares que existem para análise estrutural com base no Método dos Elementos Finitos, Melo (2016) afirma que o SAP 2000 se torna interessante pois em sua versão fornece-se os esforços para a estrutura, para que seja feito seu dimensionamento e detalhamento. A Figura 5 mostra sua interface inicial.

Figura 5 - Interface inicial do SAP 2000, versão 26.

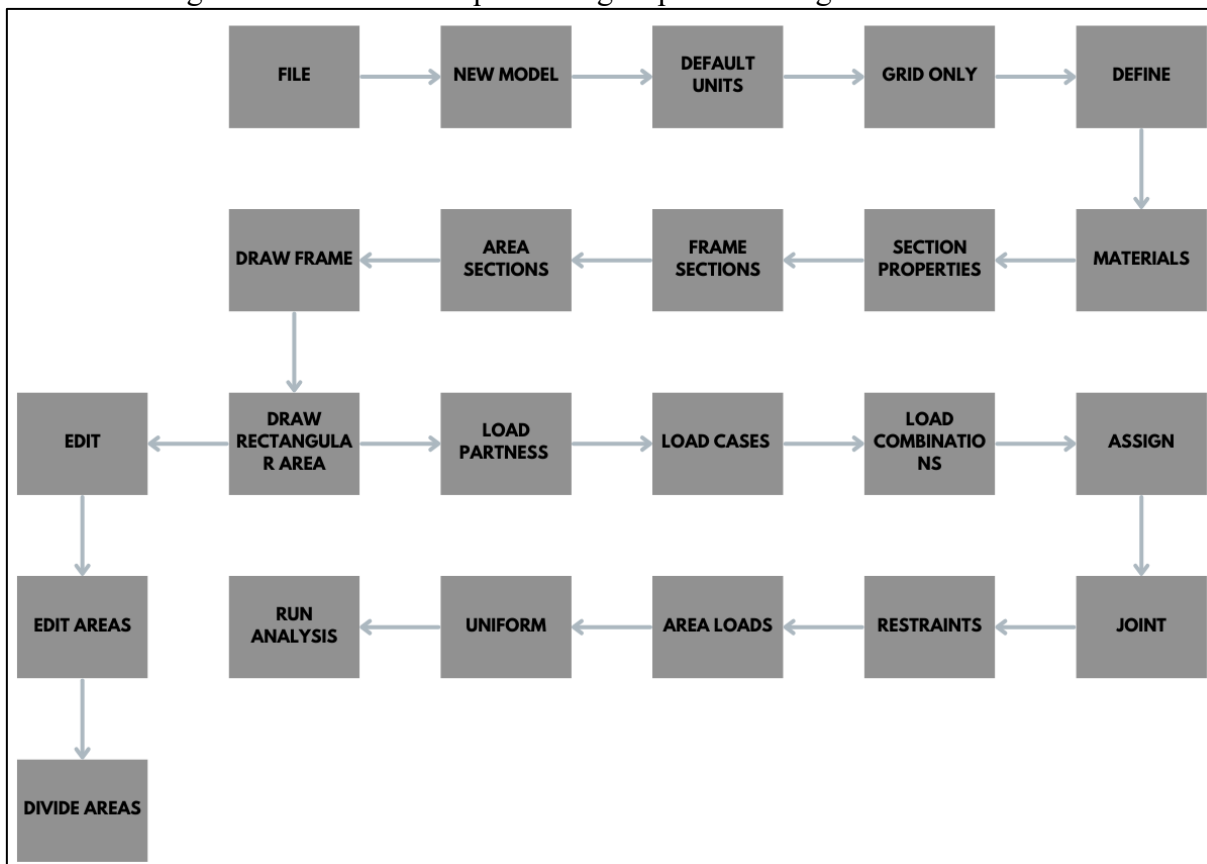


Fonte: Autoria própria, 2024.

O SAP 2000 é um software altamente versátil, capaz de modelar desde vigas simples até estruturas tridimensionais complexas, como pórticos 3D, lajes, cascas e treliças espaciais. O programa oferece a possibilidade de considerar diferentes tipos de carregamentos, esforços dinâmicos, efeitos de gradiente de temperatura e pressões. Além disso, permite analisar esforços resultantes de deslocamentos impostos, como recalques de fundação, e suporta até a simulação de estruturas em concreto protendido. (Melo, 2016).

O SAP 2000 em sua interface inicial apresenta uma sequência lógica para criação do modelo, seguindo os módulos no canto superior da tela, da esquerda para a direita. Os módulos e a respectiva sequência utilizados para neste trabalho são dados na Figura 6.

Figura 6 - Módulos e sequência lógica para modelagem no SAP 2000.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Primeiro passo a ser dado é a criação de um novo modelo ao clicar no módulo “File” e em seguida em “New Model”, sendo assim possível determinar as unidades de entrada na qual os resultados serão dados, na opção “Default Units”, como por exemplo kN, m, °C; em seguida pede-se para escolher em qual modelo a análise será feita, adotando o Grid Only tem-se uma malha de referência para modelagem da estrutura nas três direções, XYZ, sendo Z a direção da gravidade.

Feito isso, segue para o módulo “Define” onde serão feitas as escolhas dos materiais, em “Materials”, e posteriormente determinada as propriedades das seções da estrutura, em “Section Properties”, para vigas e pilares em “Frame Sections”, e para laje em “Area Sections”. Após a escolha do modelo de referência e entrada de dados, inicia-se a modelagem.

Em “Draw Frame” e “Draw Rectangular Area” o usuário cria as barras representativas de vigas e pilares e a seção da laje, respectivamente. Antes de iniciar a etapa de carregamento, no módulo “Edit/”Edit Areas/”Divide Areas” faz-se a discretização da malha podendo assim escolher o número de elementos em cada direção.

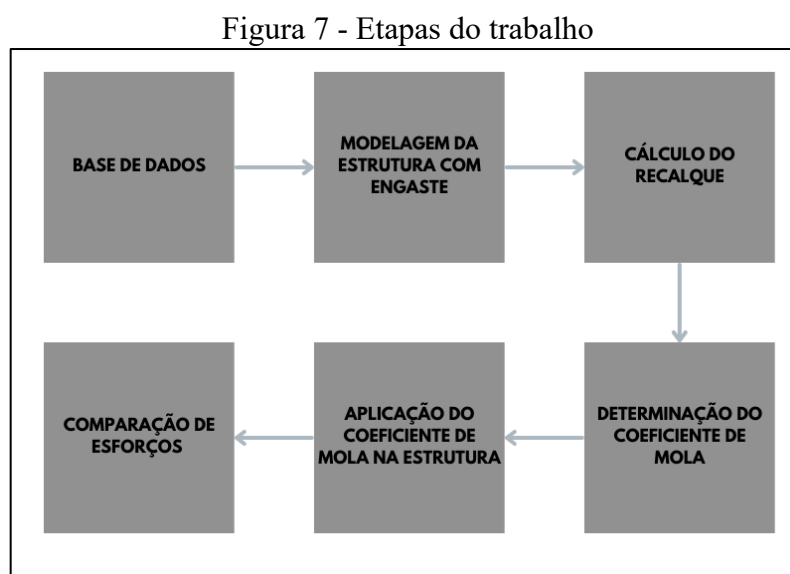
Carregamento determinado, é chegada a hora de aplicar o tipo de apoio de vinculação da fundação, em “Assign”/”Joint”/”Restraints”; e em seguida, aplica-se o carregamento uniformemente na seção da laje, em “Area Loads”/”Uniform”. Por fim, o modelo está pronto para rodar e analisar todos os resultados dos esforços, em “Run Analysis”.

3 METODOLOGIA

3.1 Visão geral

Esse trabalho teve como base o Método de Elementos Finitos aplicado na modelagem de duas estruturas diferentes no software SAP 2000, versão 2026.

Este foi dividido, de forma geral, nas seguintes etapas, como mostra a Figura 7.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Os procedimentos metodológicos utilizados nesta pesquisa foram de caráter bibliográfico e exploratório. Dessa forma, foi feita uma pesquisa bibliográfica acerca do tema proposto, baseando-se na revisão de livros, artigos, teses e dissertações.

A princípio foi coletada e adotada uma base de dados para a modelagem da estrutura no software SAP 2000, como a escolha de um solo pré-definido a partir de seu laudo de sondagem SPT, e posteriormente o cálculo de sua tensão admissível; ainda, determinou-se uma fundação superficial do tipo sapata quadrada, assentada a 1 metro de profundidade do nível do terreno.

Feitas essas considerações, deu-se início a modelagem das estruturas de pórtico engastados no software SAP 2000, sendo um de 3x3m composto por quatro pilares e 3 m de altura, que será chamado de P1, e o outro com dimensões 6x9m, e 9 pilares com 3 metros de altura, que será o P2. Nesta etapa foi feito todo o processo necessário para a modelagem, como a determinação dos materiais, propriedades das seções e carregamento. Iniciada a análise dos esforços, obtém-se as reações de apoio.

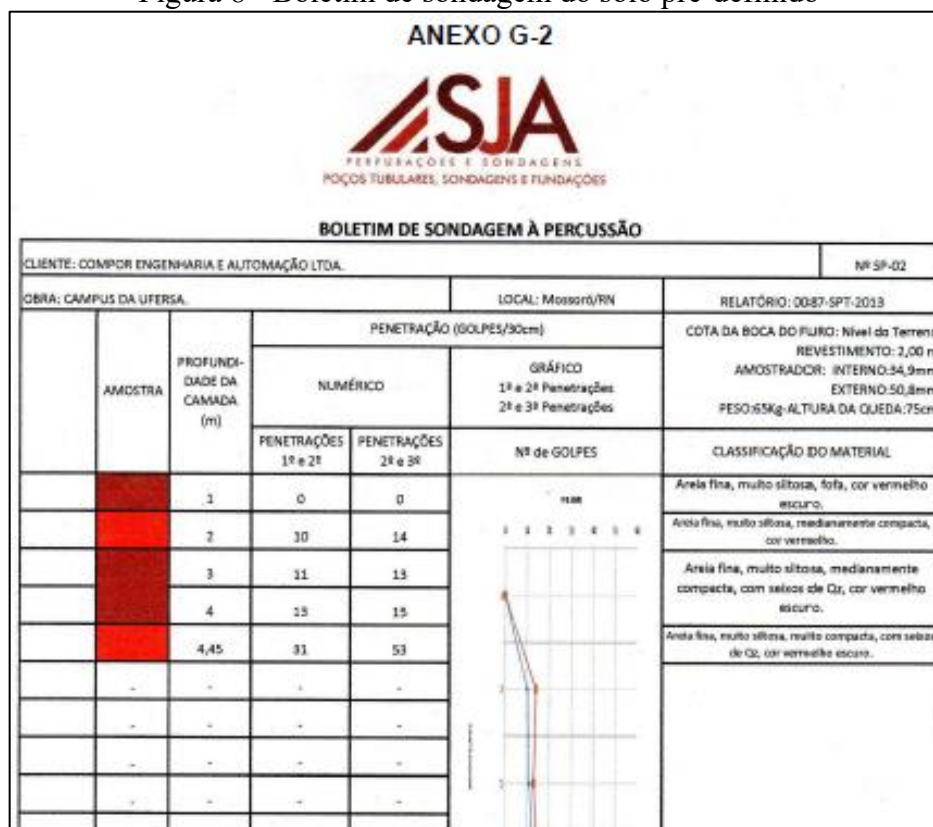
Com as reações de apoio, seguiu-se para o cálculo de recalques pelos métodos semiempíricos de Schmertmann (1970), simplificado de Berberian (1992), semiempírico de Berberian (1992) e Decourt (1998), e assim define-se o coeficiente de mola. Este coeficiente de mola quando aplicado na mola que substitui o engaste na estrutura, tende a alterar o fluxo dos esforços e assim tem-se a redistribuição dos esforços e conseqüentemente novas reações de apoio.

Este mesmo processo é feito até que as reações de apoio se tornem razoavelmente constantes e se estabilizem, para os dois modelos de pórtico. Por fim, compara-se as duas considerações de apoio feitas, quando com engaste e quando com a mola, se houveram grandes variações.

3.2 Base de dados

Nesta etapa são feitas todas as considerações necessárias para modelagem da estrutura no programa. Para a definição do solo, utilizou-se do Boletim de Sondagem à Percussão feito pela empresa Perfurações e Sondagens (SJA), esta realizada no Campus da UFRSA de Mossoró/RN, presente no Anexo G-2 do trabalho de Bezerra (2017), como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Boletim de sondagem do solo pré-definido



Fonte: Bezerra, 2017

Definiu-se ainda a utilização de uma fundação superficial de sapata, uma vez que se trata de duas estruturas de pequeno porte, e também com base nas características do solo em questão, assentada a 1 m de profundidade do nível do terreno. A partir do N_{SPT} do solo pré-definido, foi possível determinar sua tensão admissível, a partir de Equação 12.

$$\sigma_{adm} = \frac{N_{SPT}}{50} \quad (12)$$

3.3 Modelagem da estrutura no SAP 2000 - Engastado

Para modelagem das estruturas P1 e P2, de início adotou-se os mesmos materiais, C25 para o concreto, Figura 9, e CA-50 para o aço, Figura 10; e mesmas seções para viga (18x40), pilares (20x40) e laje (H=10), como mostram as Figuras 11, 12 e 13, respectivamente. Aplicou-se os mesmos casos de carga (peso próprio, sobrecarga e revestimento), Figura 14, logo foi feita a mesma combinação no Estado Limite Último (ELU) da estrutura, Figura 15, totalizando em um carregamento de 12 kN/m² por se tratar de um valor médio usual em projeto, como pode ser visto na Figura 16.

Figura 9 - Material: Concreto C25

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color

C25

Material Type

Concrete

Material Grade

Material Notes

Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume

25,

Mass per Unit Volume

2,5493

Units

KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E

2,100E+08

Poisson, U

0,2

Coefficient Of Thermal Expansion, A

1,000E-05

Shear Modulus, G

87500000,

Other Properties For Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, fc

25000,

Expected Concrete Compressive Strength

25000,

☐ Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor

☐ Switch To Advanced Property Display

OK

Cancel

Fonte: SAP 2000, 2024

Figura 10 - Material: Aço CA-50

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color

CA-50

Material Type

Rebar

Material Grade

Material Notes

Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume

78,5

Mass per Unit Volume

8,0048

Units

KN, m, C

Uniaxial Property Data

Modulus Of Elasticity, E

2,100E+08

Poisson, U

0,

Coefficient Of Thermal Expansion, A

1,000E-05

Shear Modulus, G

Other Properties For Rebar Materials

Minimum Yield Stress, Fy

500000,

Minimum Tensile Stress, Fu

550000,

Expected Yield Stress, Fye

500000,

Expected Tensile Stress, Fue

550000,

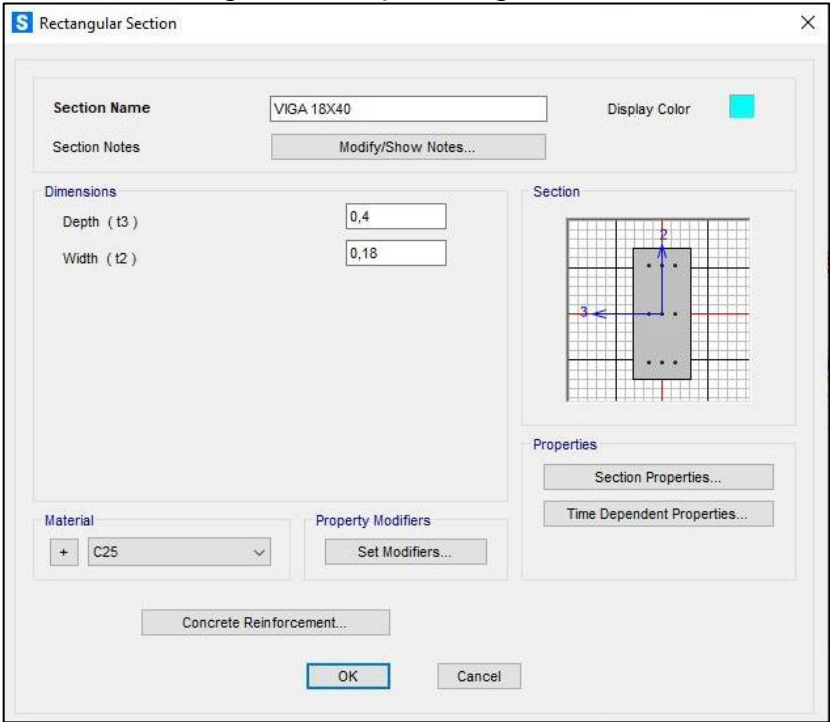
☐ Switch To Advanced Property Display

OK

Cancel

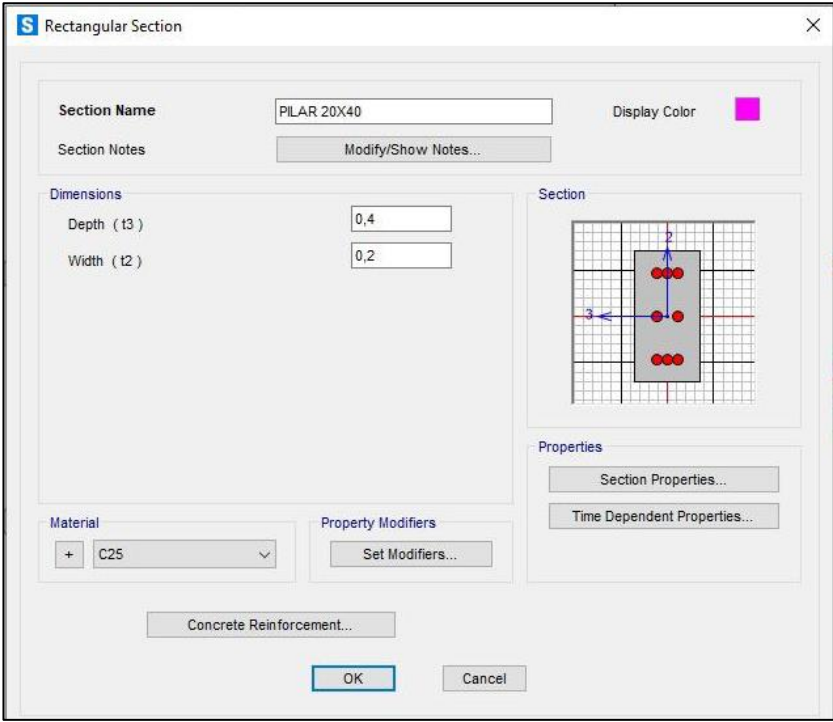
Fonte: SAP 2000, 2024

Figura 11 - Seção de viga: 18 x 40



Fonte: SAP 2000, 2024

Figura 12 - Seção de pilar: 20 x 40



Fonte: SAP 2000, 2024

Figura 13 - Seção da laje: H= 10 cm

Shell Section Data

Section Name

LAJE H = 10 CM

Display Color

Section Notes

Modify/Show...

Type

☒ Shell - Thin

☐ Shell - Thick

☐ Plate - Thin

☐ Plate Thick

☐ Membrane

☐ Shell - Layered/Nonlinear

Modify/Show Layer Definition...

Concrete Shell Section Design Parameters

Modify/Show Shell Design Parameters...

Thickness

Membrane

0,1

Bending

0,1

Material

Material Name

+ C25

Material Angle

0,

Time Dependent Properties

Set Time Dependent Properties...

Stiffness Modifiers

Set Modifiers...

Temp Dependent Properties

Thermal Properties...

OK

Cancel

Fonte: SAP 2000, 2024

Figura 14 - Casos de cargas

Define Load Cases

Load Cases

Load Case Name	Load Case Type
Peso Próprio	Linear Static
Revestimento	Linear Static
Sobrecarga	Linear Static

Click to:

Add New Load Case...

Add Copy of Load Case...

Modify/Show Load Case...

Delete Load Case

Display Load Cases

Show Load Case Tree...

OK

Cancel

Fonte: SAP 2000, 2024

Figura 15 - Combinação de cargas no ELU

S

Load Combination Data

×

Load Combination Name

(User-Generated)

ELU

Notes

Modify/Show Notes...

Load Combination Type

Linear Add

▼

Options

Convert to User Load Combo

Create Nonlinear Load Case from Load Combo

Define Combination of Load Case Results

Load Case Name	Load Case Type	Mode	Scale Factor
Peso Próprio	Linear Static		1,
Peso Próprio	Linear Static		1,
Revestimento	Linear Static		1,
Sobrecarga	Linear Static		1,

Add

Modify

Delete

OK

Cancel

Fonte: SAP 2000, 2024

Figura 16 - Carregamento atuante em P1 e P2

Object Model - Area Information

Location Assignments Loads

Identification

Label: 91

GUID: 21ed8658-cda7-4f9f-b161-6ea2ec1d9e2f

Load Pattern	Peso Próprio
Uniform Load	
Coordinate System	GLOBAL
Load Direction	Gravity
Force/Area	5,
Load Pattern	Revestimento
Uniform Load	
Coordinate System	GLOBAL
Load Direction	Gravity
Force/Area	2,
Load Pattern	Sobrecarga
Uniform Load	
Coordinate System	GLOBAL
Load Direction	Gravity
Force/Area	5,

Assign Load...

KN, m, C

Reset All

Update Display

Modify Display

OK

Cancel

Double click white background cell to edit item.

Fonte: SAP 2000, 2024

Definidos os materiais, as seções e o carregamento, nesta etapa o apoio de vinculação da fundação é considerado engastado no solo, uma vez que neste primeiro momento considera-se que o maciço de solo é indeslocável, como mostra a Figura 17.

Figura 17 - Aplicação do engaste

Assign Joint Restraints

Restraints in Joint Local Directions

☒ Translation 1 ☒ Rotation about 1

☒ Translation 2 ☒ Rotation about 2

☒ Translation 3 ☒ Rotation about 3

Fast Restraints

OK Close Apply

Fonte: SAP 2000, 2024

3.4 Cálculo do recalque

Estruturas modeladas, e analisadas pelo software SAP 2000, o próprio programa fornece as reações de apoio de cada fundação. Com estas reações e a tensão admissível para aquele solo, é possível determinar as dimensões de cada sapata quadrada, B (m), através da Equação 13.

$$\sigma \text{ (MPa)} = \frac{F \text{ (N)}}{A \text{ (mm}^2\text{)}} \quad (13)$$

Onde: σ (MPa) = tensão admissível do solo; F (N) = reação de apoio; A (mm²) = área em que a força é aplicada.

Em seguida é possível fazer o cálculo do recalque, utilizando de cada método citado anteriormente, Schmertmann (1970), simplificado de Berberian (1992), semiempírico de Berberian (1992) e Decóurt (1998).

3.5 Determinação do coeficiente de mola

Determina-se o coeficiente de mola com base na hipótese de Winkler (1867), considerando que a deformação é o recalque sofrido pela fundação e a força corresponde a reação de apoio naquele mesmo ponto, como mostra a Equação 14.

$$F = k_m \cdot \rho \quad (14)$$

Onde: F (kN) = reação de apoio do solo; k_m = coeficiente de mola; ρ (mm) = recalque da estrutura.

3.6 Aplicação do coeficiente de mola

Este coeficiente de mola será aplicado ao trocar o apoio de engaste da estrutura para uma mola, demonstrando assim o deslocamento da fundação no maciço do solo. Enquanto que a estrutura engastada possuía restrição nas três direções, XYZ, com a aplicação da mola, a estrutura agora será restrita apenas em X e Y, tendo em Z, direção da gravidade, a adoção do coeficiente de mola, como pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 - Aplicação do coeficiente de mola

Assign Joint Springs

Spring Type

- ☒ Simple
- ☐ Advanced - Coupled 6x6 Spring

[Modify/Show Advanced Spring Stiffness...](#)

Spring Coordinate System

Direction: Local

Simple Spring Stiffness

Translation 1	0	kN/m
Translation 2	0	kN/m
Translation 3	0	kN/m
Rotation about 1	0	kN-m/rad
Rotation about 2	0	kN-m/rad
Rotation about 3	0	kN-m/rad

Options

- ☒ Add to Existing Springs
- ☐ Replace Existing Springs
- ☐ Delete Existing Springs

[Reset Form to Default Values](#)

[OK](#) [Close](#) [Apply](#)

Fonte: SAP 2000, 2024

3.7 Comparação dos esforços

Ao final, obtêm-se os valores dos esforços à medida que muda o apoio e considera-se o maciço do solo deformável. Nesta etapa, observou-se se houve redistribuição dos esforços e comparou-os para dois modelos diferentes a influência da ISE.

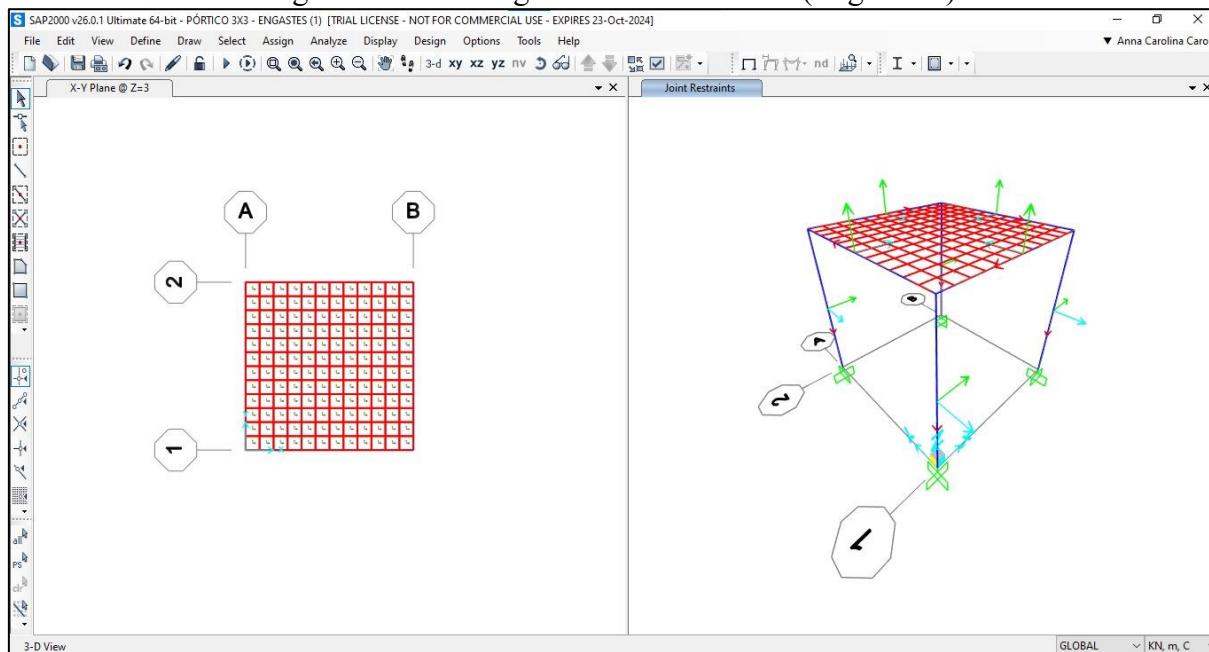
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item serão apresentados os resultados obtidos pelo SAP 2000 da modelagem das estruturas de pórticos, P1 e P2, com base na hipótese de Winkler (1867). Como também os resultados dos esforços observados após a consideração da ISE na estrutura, comparando-os entre si.

4.1 Modelagem dos pórticos P1 e P2 no SAP 2000

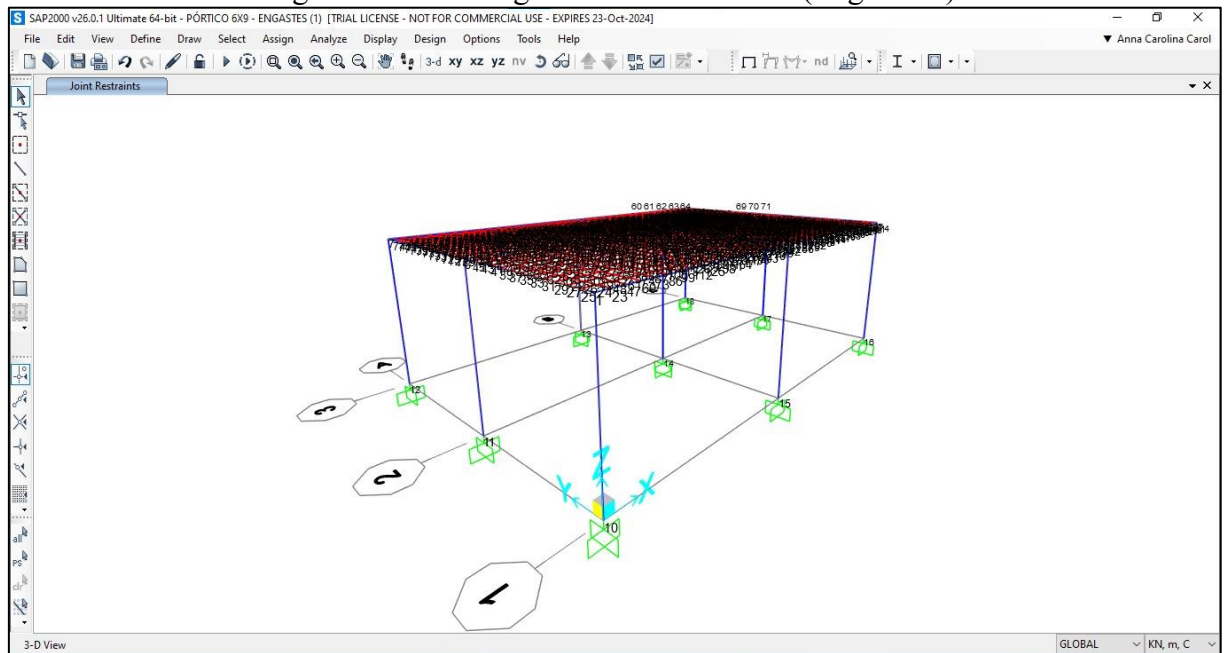
Foram considerados dois modelos de estrutura em pórtico, com dimensões e distribuição de pilares diferentes, o P1 com dimensões 3x3m e quatro pilares localizados em suas extremidades de canto, e o P2 com dimensões 6x9m e nove pilares, sendo oito deles distribuídos em seu entorno e um localizado no centro da edificação, para uma melhor observação da redistribuição dos esforços quando aplicada a ISE; tendo em um primeiro momento o engastamento das fundações no solo em ambos os modelos, como mostram as Figuras 19 e 20, e posteriormente a substituição do engaste pela mola, demonstrando assim o deslocamento da fundação no solo ao receber um carregamento, como é visto nas Figuras 21 e 22.

Figura 19 - Modelagem do Pórtico 1 - P1 (Engastado)



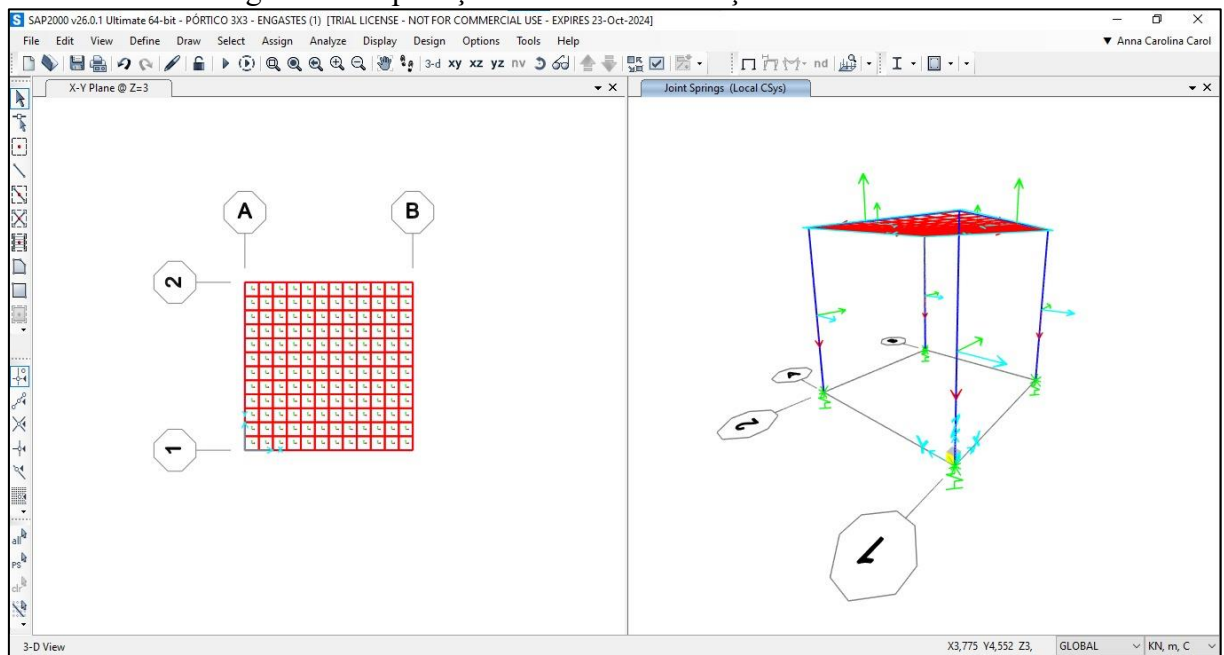
Fonte: SAP 2000, 2024

Figura 20 - Modelagem do Pórtico 2 - P2 (Engastado)



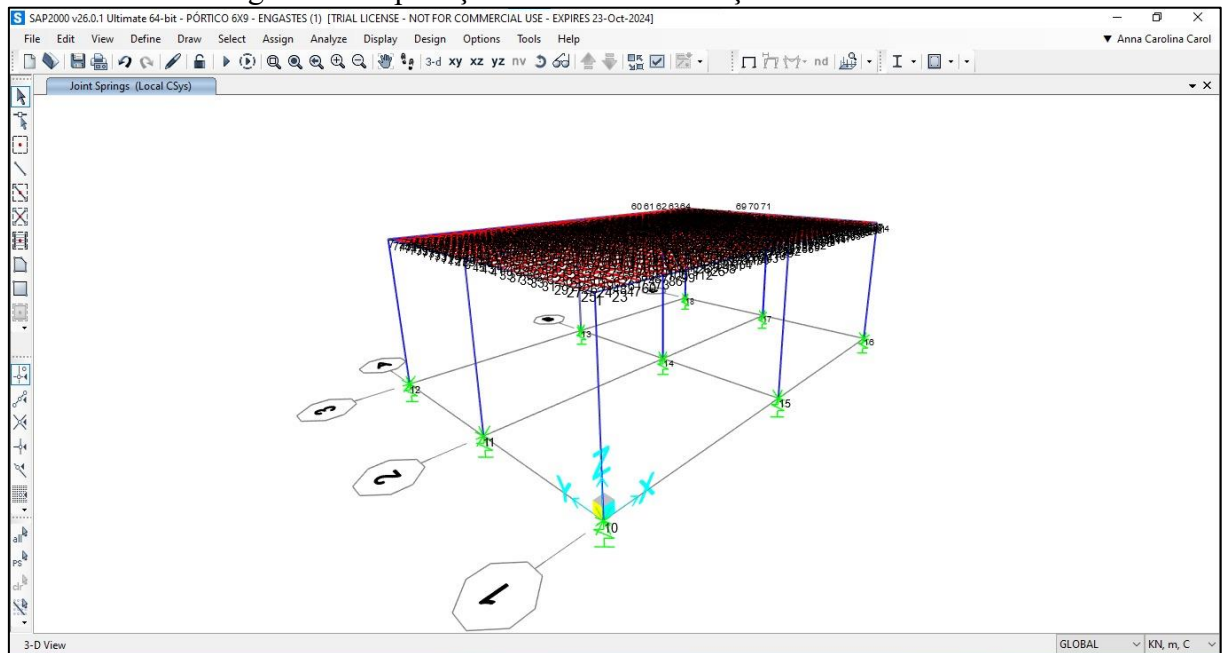
Fonte: SAP 2000, 2024

Figura 21 - Aplicação de mola na fundação do Pórtico 1 – P1



Fonte: SAP 2000, 2024

Figura 22 - Aplicação da mola na fundação do Pórtico 2 - P2



Fonte: SAP 2000, 2024

4.2 Resultados da Interação Solo-Estrutura

Neste tópico serão discutidos os resultados obtidos da aplicação da ISE para o Pórtico 1 e Pórtico 2, a partir do cálculo de recalque pelos métodos de Schmertmann (1970), simplificado de Berberian (1992), semiempírico de Berberian (1992) e Decourt (1998), e seu respectivo coeficiente de mola, pelo método de Winkler (1867), no software SAP 2000, versão 2026.

A aplicação das molas se deu até que a variação dos valores das reações de apoio fosse menor que 5%, dessa forma, até a Mola 3.

4.2.1 Pórtico 1

A Tabela 8 apresenta o cálculo de recalques, a partir das reações de apoio fornecidas pelo SAP 2000.

Tabela 8 - Recalque - P1 Engastado
PÓRTICO 3X3 - ENGASTADO

PILARES	REAÇÕES DE APOIO (kN)	DIMENSÃO DA SAPATA (m)	CÁLCULO DE RECALQUES			
			SCHMERTMANN (m)	SIMP. DE BERBERIAN (m)	SEMI. DE BERBERIAN (m)	DECOURT (m)
1	44,025	0,6	0,006	0,055	0,025	0,009
2	44,025	0,6	0,006	0,055	0,025	0,009

3	44,025	0,6	0,006	0,055	0,025	0,009
4	44,025	0,6	0,006	0,055	0,025	0,009

Fonte: Autoria própria, 2024

A Tabela 9 apresenta o cálculo dos coeficientes de mola, a partir dos recalques calculados.

Tabela 9 - Coeficiente de mola - P1 Engastado

PÓRTICO 3X3 – ENGASTADO						
PILARES	REAÇÕES DE APOIO (kN)	DIMENSÃO DA SAPATA (m)	COEF. DE MOLA (KN/M)			
			SCHMERTMANN (kN/m)	SIMP. DE BERBERIAN (kN/m)	SEMI. DE BERBERIAN (kN/m)	DECOURT (kN/m)
1	44,025	0,6	7104,071	795,229	1768,182	4640,873
2	44,025	0,6	7104,071	795,229	1768,182	4640,873
3	44,025	0,6	7104,071	795,229	1768,182	4640,873
4	44,025	0,6	7104,071	795,229	1768,182	4640,873

Fonte: Autoria própria, 2024.

A Tabela 10 e Tabela 11 apresentam o cálculo dos novos coeficientes de mola, para a nova reação de apoio, após aplicação da mola 1.

Tabela 10 - Recalque - P1 - Mola 1

PÓRTICO 3X3 – MOLA 1						
PILARES	REAÇÕES DE APOIO (kN)	DIMENSÃO DA SAPATA (m)	CÁLCULO DE RECALQUES			
			SCHMERTMANN (m)	SIMP. DE BERBERIAN (m)	SEMI. DE BERBERIAN (m)	DECOURT (m)
1	44,025	0,6	0,006	0,055	0,025	0,009
2	44,025	0,6	0,006	0,055	0,025	0,009
3	44,025	0,6	0,006	0,055	0,025	0,009
4	44,025	0,6	0,006	0,055	0,025	0,009

Fonte: Autoria própria, 2024

Tabela 11 - Coeficiente de mola - P1 - Mola 1

PÓRTICO 3X3 – MOLA 1						
PILARES	REAÇÕES DE APOIO (kN)	DIMENSÃO DA SAPATA (m)	COEF. DE MOLA (KN/M)			
			SCHMERTMANN (kN/m)	SIMP. DE BERBERIAN (kN/m)	SEMI. DE BERBERIAN (kN/m)	DECOURT (kN/m)
1	44,025	0,6	7104,071	795,229	1768,182	4640,873
2	44,025	0,6	7104,071	795,229	1768,182	4640,873

3	44,025	0,6	7104,071	795,229	1768,182	4640,873
4	44,025	0,6	7104,071	795,229	1768,182	4640,873

Fonte: Autoria própria, 2024

Neste modelo de pórtico, criado como modelo de teste, por se tratar de uma estrutura em que a área de influência de cada pilar é igual, sendo essa apenas com quatro pilares localizados em cada vértice da seção de laje, o carregamento se distribuiu uniformemente, resultando em reações de apoio iguais nos quatro pilares. Após o cálculo dos coeficientes de mola, e aplicação da Mola 1 na estrutura, observou-se ainda que as reações de apoio permaneceram constantes, sem quaisquer variações.

4.2.2 Pórtico 2

Para análise dos resultados da ISE no Pórtico 2, apresentou-se as respostas para cada método de cálculo de recalque, uma vez que os pilares apresentaram reações de apoio diferentes a depender de sua localização, e em cada método.

A Tabela 12 mostra os resultados obtidos pelo método Schmertmann (1970).

Tabela 12 - Reações de apoio pelo Método de Schmertmann (1970)

MÉTODO DE SCHERTMANN (1970)				
APOIO DO TIPO ENGASTE				
PILAR	REAÇÃO DE APOIO (KN)	DIMENSÃO DA SAPATA (M)	RECALQUE (M)	COEFICIENTE DE MOLA (KN/M)
10, 12, 16 E 18	46,99	0,6	0,0062	7582,52
11 E 17	121,08	0,67	0,00688	17594,4
13 E 15	106,34	0,63	0,00639	16632,7
14	275,18	1,01	0,01003	27436,6
MOLA 1				
PILAR	REAÇÃO DE APOIO (KN)	DIMENSÃO DA SAPATA (M)	RECALQUE (M)	COEFICIENTE DE MOLA (KN/M)

10, 12, 16 E 18	59,07	0,6	0,0062	9531,79
11 E 17	109,33	0,63	0,00649	16842,43
13 E 15	108,29	0,63	0,00649	16882,22
14	246,42	0,95	0,00956	25775,19
MOLA 2				
PILAR	REAÇÃO DE APOIO (KN)	DIMENSÃO DA SAPATA (M)	RECALQUE (M)	COEFICIENTE DE MOLA (KN/M)
10, 12, 16 E 18	52,87	0,6	0,0062	8531,33
11 E 17	116,54	0,65	0,00669	17428,37
13 E 15	114,41	0,65	0,00669	17109,83
14	244,59	0,95	0,00956	25583,77
MOLA 3				
PILAR	REAÇÃO DE APOIO (KN)	DIMENSÃO DA SAPATA (M)	RECALQUE (M)	COEFICIENTE DE MOLA (KN/M)
10, 12, 16 E 18	50,46	-	-	-
11 E 17	119,93	-	-	-
13 E 15	116,51	-	-	-
14	243,22	-	-	-

Fonte: Autoria própria, 2024

A Tabela 13 mostra os resultados obtidos pelo método Simplificado de Berberian (1992).

Tabela 13 - Reações de apoio pelo Método Simplificado de Berberian (1992)

MÉTODO SIMPLIFICADO DE BERBERIAN (1992)
APOIO DO TIPO ENGASTE

PILAR	REAÇÃO DE APOIO (KN)	DIMENSÃO DA SAPATA (M)	RECALQUE (M)	COEFICIENTE DE MOLA (KN/M)
10, 12, 16 E 18	46,99	0,6	0,06	848,79
11 E 17	121,08	0,67	0,06	2187,08
13 E 15	106,34	0,63	0,06	1920,83
14	275,18	1,01	0,06	4970,61
MOLA 1				
PILAR	REAÇÃO DE APOIO (KN)	DIMENSÃO DA SAPATA (M)	RECALQUE (M)	COEFICIENTE DE MOLA (KN/M)
10, 12, 16 E 18	46,76	0,6	0,06	844,63
11 E 17	120,68	0,66	0,06	2179,86
13 E 15	106,53	0,62	0,06	1924,26
14	276,49	1,01	0,06	4994,27
MOLA 2				
PILAR	REAÇÃO DE APOIO (KN)	DIMENSÃO DA SAPATA (M)	RECALQUE (M)	COEFICIENTE DE MOLA (KN/M)
10, 12, 16 E 18	46,48	0,6	0,06	839,57
11 E 17	120,42	0,66	0,06	2175,16
13 E 15	106,67	0,62	0,06	1926,79
14	277,46	1,01	0,06	5011,79
MOLA 3				
PILAR	REAÇÃO DE APOIO (KN)	DIMENSÃO DA SAPATA (M)	RECALQUE (M)	COEFICIENTE DE MOLA (KN/M)
10, 12, 16 E 18	46,37	-	-	-

11 E 17	120,3	-	-	-
13 E 15	106,8	-	-	-
14	278,25	-	-	-

Fonte: Autoria própria, 2024

A Tabela 14 mostra os resultados obtidos pelo método Semiempírico de Berberian (1992).

Tabela 14 - Reações de apoio pelo Método Semiempírico de Berberian (1992)

MÉTODO SEMIEMPÍRICO BERBERIAN (1992)				
APOIO DO TIPO ENGASTE				
PILAR	REAÇÃO DE APOIO (KN)	DIMENSÃO DA SAPATA (M)	RECALQUE (M)	COEFICIENTE DE MOLA (KN/M)
10, 12, 16 E 18	46,99	0,6	0,02	1887,27
11 E 17	121,08	0,67	0,02	4862,95
13 E 15	106,34	0,63	0,02	4270,95
14	275,18	1,01	0,02	11052,09
MOLA 1				
PILAR	REAÇÃO DE APOIO (KN)	DIMENSÃO DA SAPATA (M)	RECALQUE (M)	COEFICIENTE DE MOLA (KN/M)
10, 12, 16 E 18	46,59	0,6	0,02	1871,2
11 E 17	120,46	0,66	0,02	4838,05
13 E 15	106,65	0,62	0,02	4283,4
14	277,37	1,01	0,02	11140,05
MOLA 2				
PILAR	REAÇÃO DE APOIO (KN)	DIMENSÃO DA SAPATA (M)	RECALQUE (M)	COEFICIENTE DE MOLA (KN/M)

10, 12, 16 E 18	46,35	0,6	0,02	1861,56
11 E 17	120,18	0,66	0,02	4826,8
13 E 15	106,82	0,62	0,02	4290,22
14	278,59	1,01	0,02	11189,04
MOLA 3				
PILAR	REAÇÃO DE APOIO (KN)	DIMENSÃO DA SAPATA (M)	RECALQUE (M)	COEFICIENTE DE MOLA (KN/M)
10, 12, 16 E 18	46,19	-	-	-
11 E 17	120,07	-	-	-
13 E 15	106,9	-	-	-
14	279,25	-	-	-

Fonte: Autoria própria, 2024

A Tabela 15 mostra os resultados obtidos pelo método de Decourt (1998).

Tabela 15 - Reações de apoio pelo Método de Decourt (1998)

MÉTODO DECÓURT (1998)				
APOIO DO TIPO ENGASTE				
PILAR	REAÇÃO DE APOIO (KN)	DIMENSÃO DA SAPATA (M)	RECALQUE (M)	COEFICIENTE DE MOLA (KN/M)
10, 12, 16 E 18	46,99	0,6	0,0095	4953,43
11 E 17	121,08	0,67	0,0102	11814,80
13 E 15	106,34	0,63	0,0097	10955,41
14	275,18	1,01	0,0136	20287,25
MOLA 1				
PILAR	REAÇÃO DE APOIO (KN)	DIMENSÃO DA SAPATA (M)	RECALQUE (M)	COEFICIENTE DE MOLA (KN/M)

10, 12, 16 E 18	48,47	0,6	0,0095	5109,44
11 E 17	121,86	0,67	0,0102	11890,91
13 E 15	114,23	0,65	0,0100	11385,37
14	251,9	0,96	0,0132	19109,29
MOLA 2				
PILAR	REAÇÃO DE APOIO (KN)	DIMENSÃO DA SAPATA (M)	RECALQUE (M)	COEFICIENTE DE MOLA (KN/M)
10, 12, 16 E 18	48,95	0,6	0,0095	5160,04
11 E 17	121,97	0,67	0,0102	11901,64
13 E 15	116,76	0,65	0,0100	11637,53
14	244,68	0,95	0,0131	18698,13
MOLA 3				
PILAR	REAÇÃO DE APOIO (KN)	DIMENSÃO DA SAPATA (M)	RECALQUE (M)	COEFICIENTE DE MOLA (KN/M)
10, 12, 16 E 18	49,06	-	-	-
11 E 17	121,94	-	-	-
13 E 15	118,03	-	-	-
14	241,79	-	-	-

Fonte: Autoria própria, 2024

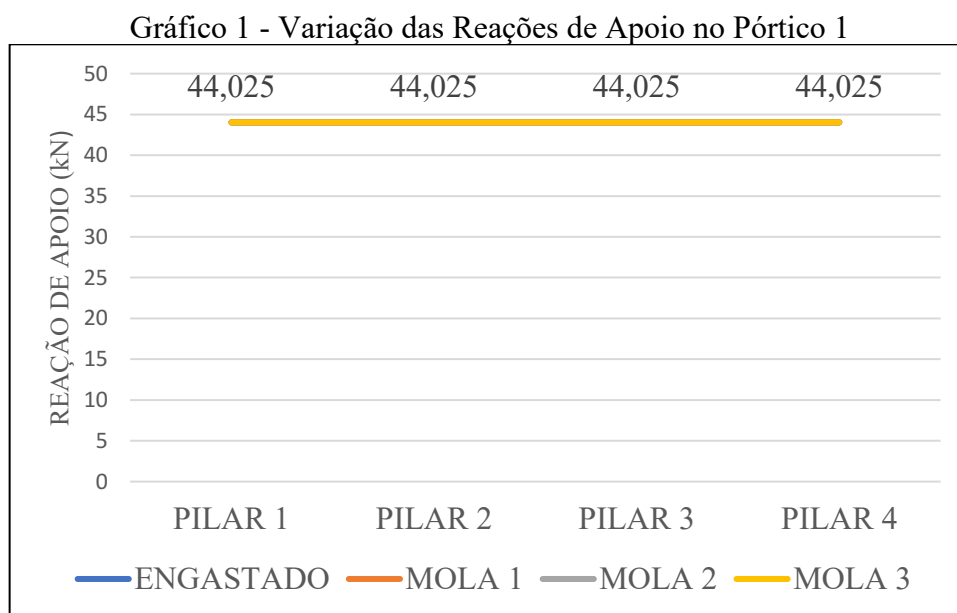
No Pórtico 2, por apresentar mais elementos estruturais se comparado ao P1, e em diferentes localizações, distribuí o carregamento aplicado na estrutura de forma heterogênea. Ao aplicar a ISE neste caso, observou-se claramente a redistribuição dos esforços, confirmando o que foi dito por Gusmão (1990), os pilares com maiores recalques passam por um alívio de cargas, enquanto que os que apresentavam um deslocamento vertical menor recebem um acréscimo de carregamento.

4.3 Comparativo das Reações de Apoio

Neste subtópico será feita a comparação dos resultados das reações de apoio quando engastada e logo após quando aplicada a Interação Solo – Estrutura, por meio da substituição do engaste pela mola. Esta análise será feita para o Pórtico 1 e Pórtico 2, inicialmente para cada método e posteriormente entre eles.

4.3.1 Pórtico 1

Observou-se que neste modelo as reações de apoio permaneceram constantes, ao introduzir a mola no apoio da fundação, no cálculo dos quatro métodos. Logo, não houve variação das reações de um pilar para o outro, bem como de um método para o outro, como ilustra o Gráfico 1.



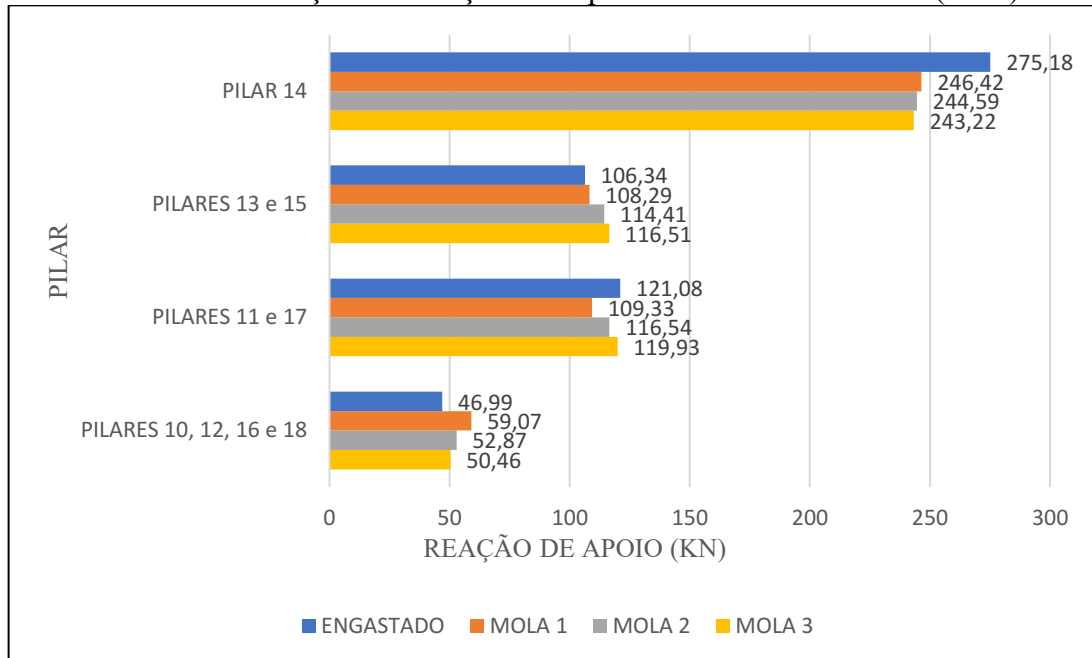
Fonte: Autoria própria, 2024

4.3.2 Pórtico 2

Entretanto no Pórtico 2, houveram variações das reações de apoio com a introdução da ISE para cada método de cálculo de recalque, bem como houveram variações dos resultados entre eles. A aplicação de molas no modelo se deu até que a variação dos valores de reação de

apoio fosse menor que 5%. O Gráfico 2 mostra a variação das reações de apoio quando o recalque é calculado pelo método de Schmertmann (1970).

Gráfico 2 - Variação das Reações de Apoio – SCHMERTMANN (1970)



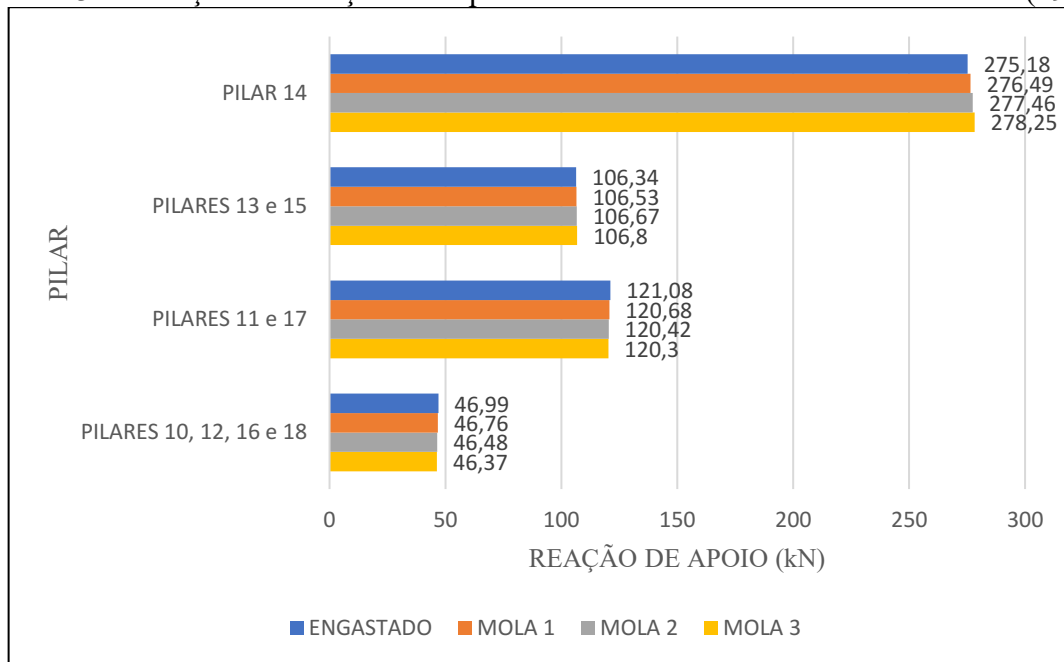
Fonte: Autoria própria, 2024

Neste gráfico é possível observar que houve um aumento no valor da reação de apoio, quando substituído o engaste pela mola na estrutura, de 6% nos pilares 10, 12, 16 e 18, que

estão localizados nos vértices da estrutura; nos pilares 11 e 17, a variação se deu de aproximadamente 1% para menos; aproximadamente 9% para mais nos pilares 13 e 15; e uma maior variação se deu no pilar 14, localizado no centro da estrutura, diminuindo em 13% o valor da reação de apoio.

O Gráfico 3 ilustra a variação das reações de apoio quando o recalque é calculado pelo método Simplificado de Berberian (1992).

Gráfico 3 - Variação das Reações de Apoio - SIMPLIFICADO DE BERBERIAN (1992)



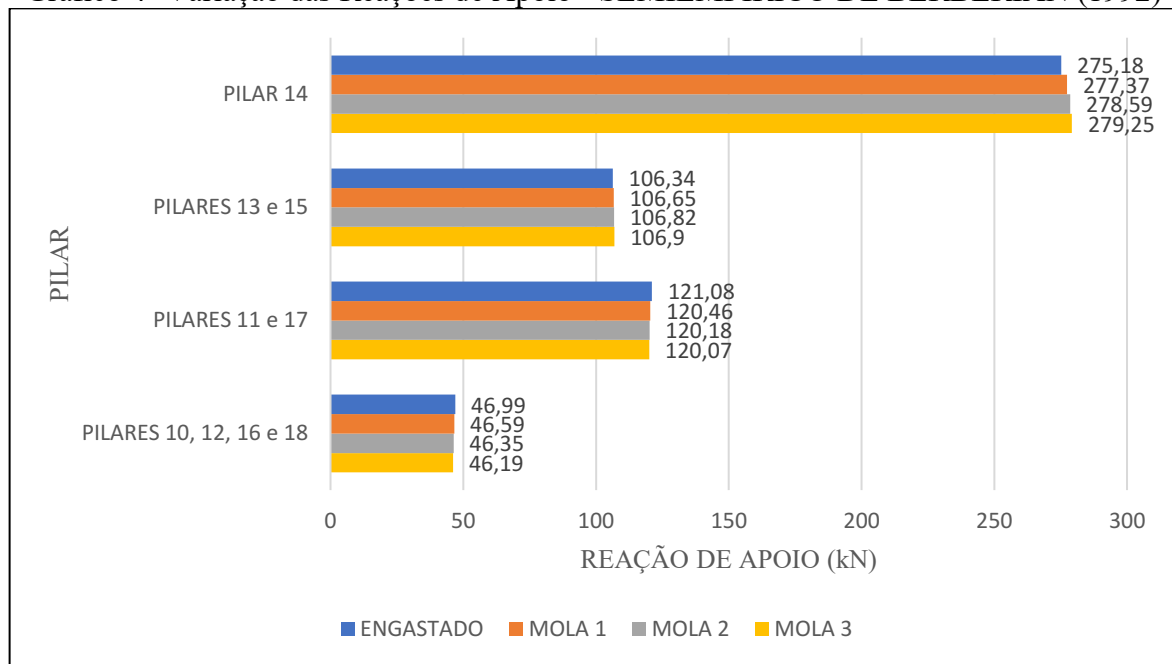
Fonte: Autoria própria, 2024

Observou-se que houveram pequenas variações nos valores das reações de apoio usando deste método, quase que inexistentes, sendo a maior delas nos pilares 10, 12, 16 e 18, aqueles

situados nos vértices da estrutura, de 1,33% para menos; e no pilar central da estrutura, pilar 14, com um acréscimo de carregamento de aproximadamente 1,10%.

A variação das reações de apoio quando o recalque é calculado pelo método Semiempírico de Berberian (1992) são apresentadas no Gráfico 4.

Gráfico 4- Variação das Reações de Apoio - SEMIEMPÍRICO DE BERBERIAN (1992)

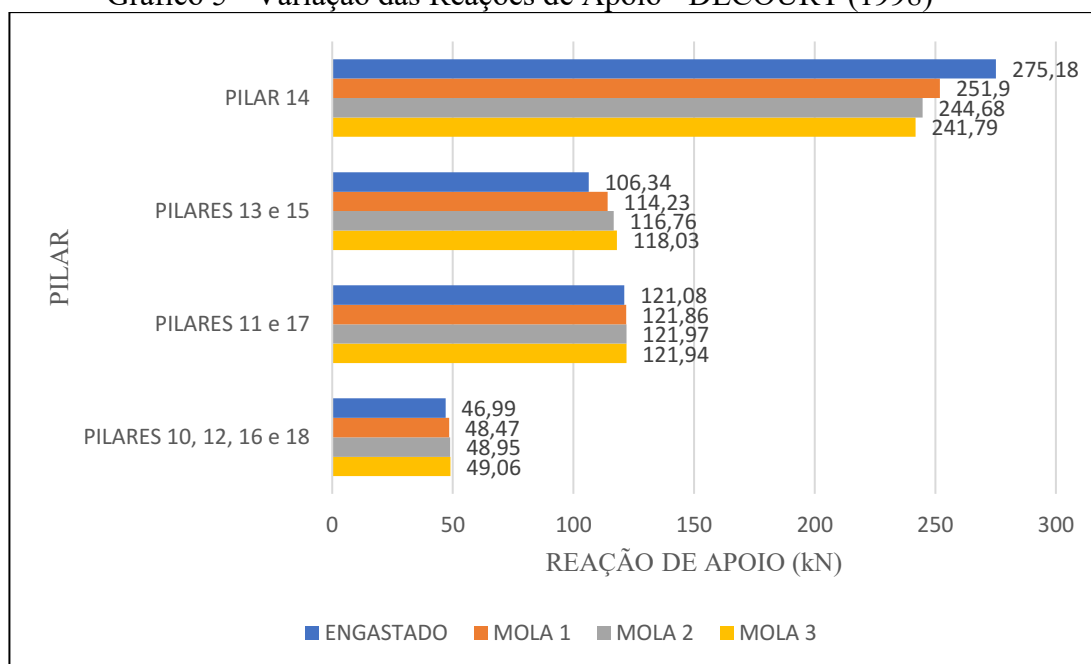


Fonte: Autoria própria, 2024

Neste método pôde-se observar uma variação semelhante a que ocorreu no Método Simplificado de Beberian (1992), em que as variações mais significativas se deram nos pilares 10, 12, 16 e 18 e no pilar 14, de 1,73% para menos e 1,45% para mais, respectivamente.

No Método de Decóurt (1998) a variação dos valores das reações de apoio se dá no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Variação das Reações de Apoio - DECÓURT (1998)

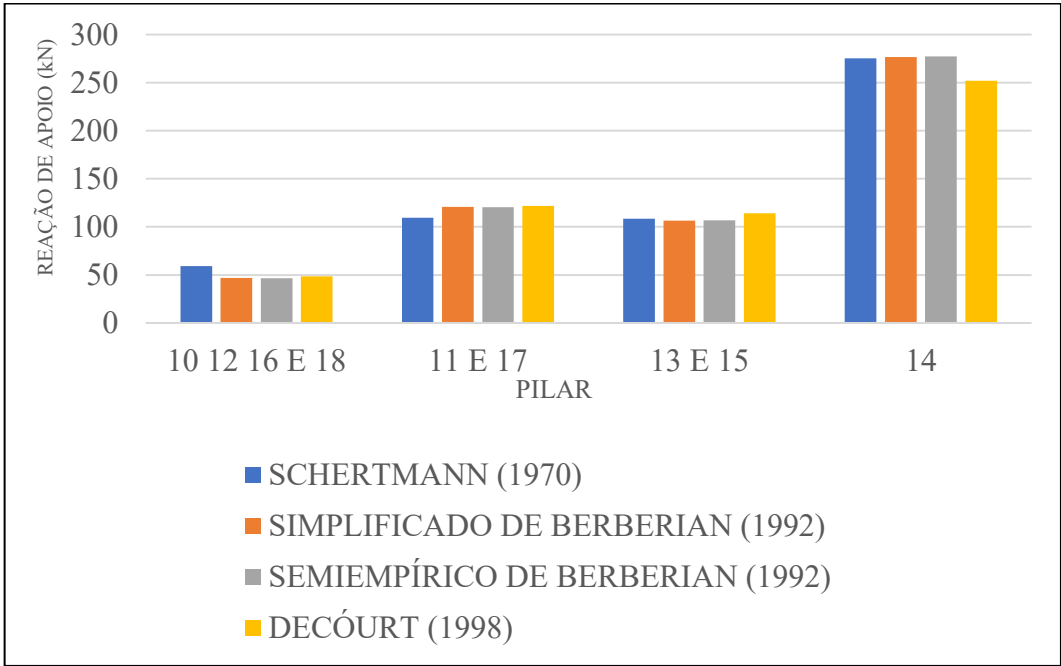


Fonte: Autoria própria, 2024

Neste gráfico é possível observar que houve um aumento no valor da reação de apoio, quando substituído o engaste pela mola na estrutura, de 4% nos pilares 10, 12, 16 e 18, que estão localizados nos vértices da estrutura; nos pilares 11 e 17, a variação se deu de aproximadamente 1% para mais; 9,1% para mais nos pilares 13 e 15; e uma maior variação se deu no pilar 14, localizado no centro da estrutura, diminuindo em aproximadamente 14% o valor da reação de apoio.

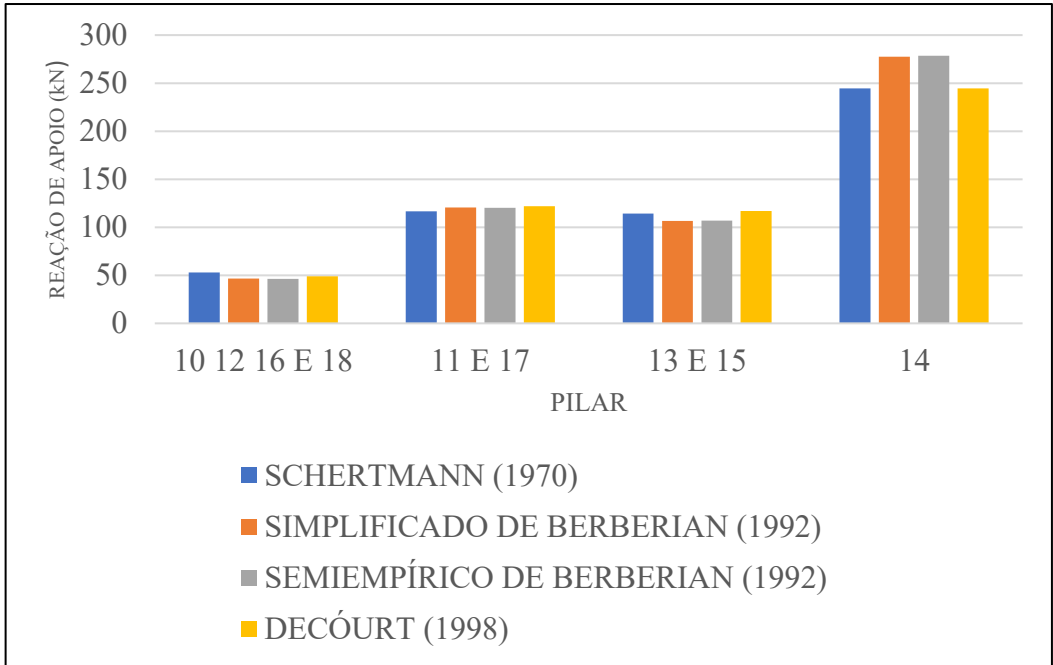
Quanto a análise de variação dos resultados dentre os métodos utilizados, pode ser observado melhor a partir dos Gráficos 6, 7 e 8.

Gráfico 6 - Comparativo das Reações de Apoio entre os métodos de cálculo de recalque – Mola 1



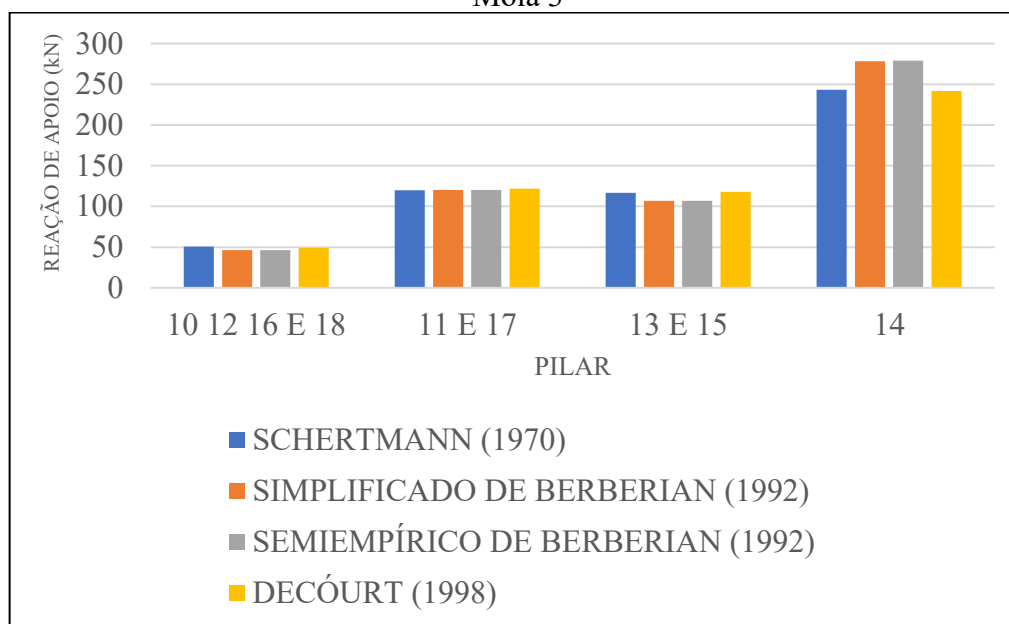
Fonte: Autoria própria, 2024

Gráfico 7 - Comparativo das Reações de Apoio entre os métodos de cálculo de recalque – Mola 2



Fonte: Autoria própria, 2024

Gráfico 8 - Comparativo das Reações de Apoio entre os métodos de cálculo de recalque – Mola 3



Fonte: Autoria própria, 2024

A vista disso, pode-se observar que os resultados obtidos estão convergindo, na maioria dos casos. Tendo apenas os Métodos de Schmertmann (1970) e de Decourt (1998) variando um pouco mais dos restantes, principalmente no pilar 14, localizado no cento da estrutura; os métodos de Berberian (1992), tanto o simplificado como o semiempírico, sempre com valores bem próximos, e por fim, mas não menos importante, uma atenção para a tendência a estabilização dos valores em todos os métodos de cálculo a partir da Mola 2.

Em termos percentuais, constatou-se na aplicação da Mola 1, uma diferença expressiva entre o método de Schmertmann (1970) e todo o restante, sendo nos Pilares 10, 12, 16 e 18 de aproximadamente 26% para menos, nos pilares 11 e 17 de 10% para mais, nos pilares 13 e 15, para os métodos de Berberian (1992) uma variação decrescente de 1,5% e crescente de 5% para o método de Decourt; enquanto no pilar 14 observou-se uma pequena variação de 0,7% para menos entre Schmertmann (1970) e Berberian (1992) e uma variação de 9% para mais entre Schmertmann (1970) e Decourt (1980). A variação entre o método Simplificado de Berberian (1992) e Semiempírico de Berberian (1992) em todos os pilares se deram menor que 1%, seja para mais ou para menos. Entretanto, além da variação significativa com o método de Schmertmann (1970), Decourt apresentou uma diferença também entre os métodos de Beberian (1992), variando entre 1% a 10%, dentre os pilares.

Na aplicação da Mola 2, as variações entre os métodos aconteceram de forma semelhante, quando comparada a Mola 1, tendo destaque o pilar 14 com variações mais

expressivas entre o método de Schmertmann (1970) e Berberian (1992), de aproximadamente 12%, bem como entre Decourt (1998) e Berberian (1992), com variações de 13%. Assim como na aplicação da Mola 1, as variações entre os cálculos de recalque pelos métodos de Berberian (1992) permanecem menores que 1%.

As variações na Mola 3 se configuraram de forma semelhante a Mola 2, com variações mais significativas entre o Método de Schmertmann (1970) e Berberian (1992), de até 12% para mais no Pilar 14, e entre o método de Decourt (1998) e Berbetian (1992), de até 15% para menos, também no Pilar 14.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho ressaltou a importância de uma análise estrutural de forma mais completa, levando em consideração desde sua fase de concepção, uma vez que evidenciou a relação direta entre o solo e a estrutura. Usualmente o cálculo estrutural é feito pelo projetista estrutural e o projetista de fundações utilizando como base de referência origens diferentes; além das considerações simplificadas de que o solo seria indeslocável.

Neste trabalho utilizou-se de quatro métodos de cálculo de recalque, Schmertmann (1970), Simplificado de Berberian (1992), Semiempírico de Berberian (1992) e Decourt (1998), e a partir dos valores do recalque, calculou-se o coeficiente a ser aplicado na mola para uma nova reação de apoio, com base no recalque sofrido por aquela estrutura.

Dado o exposto, considera-se que este trabalho alcançou os resultados esperados, uma vez que foi possível visualizar a variação das reações de apoio nos pilares à medida que a estrutura recebe um carregamento e se deforma, e assim compreender que uma análise conjunta do solo com a estrutura é imprescindível. Pôde-se ainda confirmar a assertiva de Gusmão (1990), de que os pilares que sofrem maiores recalques experimentam um alívio de carga, enquanto aqueles com menor deslocamento vertical acaba recebendo um acréscimo de carregamento; e isso ocorre devido à redistribuição de esforços na estrutura, que busca compensar os recalques diferenciais, transferindo parte das cargas para os pilares que permanecem mais estáveis.

Em todos os métodos, para o Pórtico 2, constatou-se variações mais significativas dos valores das reações de apoio nos pilares 10, 12, 16 e 18, e no pilar 14, estes localizados nos vértices da estrutura e em seu centro, respectivamente, com destaque dos métodos de Schmertmann (1970) e Decourt (1998), com percentuais crescentes de aproximadamente 4 a 6% nos pilares 10, 12, 16 e 18, e decrescentes de 13 a 14% no pilar 14.

Dentre os métodos de cálculo de recalque observou-se uma variação em seus resultados significativa entre os métodos de Schmertmann (1970) e de Decourt (1998) em relação aos demais, sendo em alguns casos de até 26%, enquanto que entre os métodos Simplificado e Semiempírico de Beberian (1992), os valores das reações de apoio variaram no máximo 1%. Possivelmente, o fato dos valores encontrados pelos métodos de Beberian (1992) serem convergentes entre si, e divergentes quanto aos métodos de Schmertmann (1970) e Decourt (1998) se dê pela desconsideração das dimensões das sapatas, logo, trabalha-se mais com parâmetros fixos e pré-determinados.

Esta análise se fez relevante, uma vez que evidenciou a redistribuição dos esforços na superestrutura, ao aplicar-se um carregamento, fazendo-se possível analisar os recalques de forma mais precisa, e assim projetar a estrutura para receber e suportar os recalques diferenciais passíveis a ela. A partir deste estudo, é possível se obter bases para se realizar projetos mais eficientes, aumentando a vida útil da estrutura, prevenindo o aparecimento de manifestações patológicas.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, U. R. (1989). **Dimensionamento de fundações profundas**. São Paulo: Edgard Bluncher.
- ANTONIAZZI, J.P. (2011). **Interação Solo-Estrutura de Edifícios com Fundações Superficiais**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003.
- BERBERIAN, D. (2015). **Engenharia de fundações**. Brasília, DF. INFRASOLO, 2ª EDIÇÃO. Vol único, 906p.
- BEZERRA, KENNEDY MAYK. **Estudo de subsolo na área urbana de Mossoró/RN baseado em relatórios de pontos de sondagem**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Centro de Engenharias, Mossoró, 2017
- CINTRA, J.C.A.; AOKI, N.; ALBIERO, J.H (2011). **Fundações diretas: projeto geotécnico**. São Paulo: Oficina de Textos.
- COLARES, GEORGE MOURA. **Programa para análise da interação solo-estrutura no projeto de edifícios**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, 2006.
- COMPUTERS AND STRUCTURES, INC. **SAP2000: Integrated Software for Structural Analysis and Design**, versão 2026. Walnut Creek, CA: CSI, 2026.
- DÉCOURT, L., ALBIERO, J. H. E CINTRA, J. C. A., (1998). **Análise de Projeto de Fundações Profundas. Fundações: teoria e prática**. Hachich, W., Falconi, F. F., Saes, J. L., Frota, R. G. Q., Carvalho, C. S., Niyama, S., 2. ed., Editora PINI Ltda, São Paulo, SP.
- GUSMÃO, ALEXANDRE DUARTE. **Estudo da interação solo-estrutura e sua influência em recalques de edificações**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, COPPE - UFRJ, Rio de Janeiro, 1990.
- GUSMÃO FILHO, JAIME A. **Fundações: Do conhecimento geológico à prática da engenharia**. Pernambuco: Editora universitária UFPE, 2002.
- HOLANDA JÚNIOR, O. G. (1998). **Interação solo - estrutura para edifícios de concreto armado sobre fundações diretas**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

IWAMOTO, ROBERTO KUNIHIRO. **Alguns aspectos dos efeitos da interação solo estrutura em edifícios de múltiplos andares com fundação profunda**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, 2000.

MELO, CARLOS EDUARDO LUNA DE. **Análise estrutural com o SAP 2000**. 2016. Material didático. Universidade de Brasília – UnB, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Brasília, 2016.

PINTO, CAMILA PATRÍCIA JERONYMO. **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.

APÊNDICE A

Figura 23 - Cálculo de recalque pelo Método de Schmertmann (1970)

MÉTODO SCHERTMANN							
B = L (M)	COTA DE APOIO (M)	NSPT	TENSÃO ADMISSÍVEL (MPA)	PESO ESPECÍFICO DO SOLO (KN/M³)	q (KPA)	σ* (Kpa)	C1
	1	14	0,28	17			
CAMADAS							
CAMADA 1 - Z < B/2				CAMADA 2 - B/2 < Z < 2B			
CAMADA	ΔZ (m)	lz	NSPT	Es (MPa)	(lz*ΔZ)/Es	SOMATÓRIO	
1						0	
2							
3							
C1	C2 (imediatos)	σ* (mpa)	SOMATÓRIO	RECALQUE (m) (IMEDIATO)	RECALQUE (mm) (IMEDIATO)	C2 (PARA 5 ANOS)	RECALQUE (M) (5 ANOS)
0	0	0	0,000000	0,000000	0,000000		0
CÁLCULO DO COEFICIENTE DE MOLA							
REAÇÃO (KN)	RECALQUE E (m)	COEF. DE MOLA (KN/M)	RECALQUE (M) (5 ANOS)	COEF. DE MOLA (KN/M) (5 ANOS)			

Fonte: Autoria própria, 2024

Figura 24 - Cálculo de recalque pelo Método Simplificado de Berberian (1992)

MÉTODO SIMPLIFICADO BERBERIAN					
σ* (Kg/cm²)	FS	17	NSPT	RECALQUE (A 5 ANOS) (CM)	RECALQUE (5 ANOS) (M)
	1,7	17	14		
CÁLCULO DO COEFICIENTE DE MOLA					
REAÇÃO (KN)	RECALQUE (M)	COEF. DE MOLA (KN/M)			

Fonte: Autoria própria, 2024

Figura 25 - Cálculo de recalque pelo Método de Decourt

MÉTODO DE DECOURT					
2,7	σ ADM (MPa)	B (cm)	NSPT	RECALQUE (CM)	RECALQUE (M)
2,7	0,28		14		
CÁLCULO DO COEFICIENTE DE MOLA					
REAÇÃO (KN)	RECALQUE (M)	COEF. DE MOLA (KN/M)			

Fonte: Autoria própria, 2024

Figura 26 - Cálculo de Recalque pelo Método Semiempírico de Berberian (1992)

MÉTODO SEMIEMPÍRICO BERBERIAN								
17	σ ADM (MPa)	FS	FF	FT (P/ 30 ANOS)	ISE	FOC	NSPT	RECALQUE (CM)
17		1,7	1	1,4	1,3	4	14	
CÁLCULO DO COEFICIENTE DE MOLA								
REAÇÃO (KN)	RECALQUE (M)	COEF. DE MOLA (KN/M)						

Fonte: Autoria própria, 2024