

APLICAÇÃO DO ANSYS NO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISE DE SOLO

Alexandre Propício de Pina Filho

Bacharel em Engenharia Civil (pina7946@gmail.com)

José Henrique Oliveira Duarte

Bacharel em Engenharia Civil (josehenrique895@gmail.com)

Ramiro Henrique Santos Moraes

Bacharel em Engenharia Civil (rhaismoraes@gmail.com)

Yasmin Fonseca Souto

Bacharela em Engenharia Civil (yasmin.engc@gmail.com)

Aginaldo Antonio Moreira Teodoro da Silva

*Mestre, Docente da Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA
(agnaldo.silva@docente.unievangelica.edu.br)*

RESUMO

O solo é um elemento essencial e complexo da engenharia civil, exigindo análises detalhadas para projetos seguros e eficientes. Eis que surge uma gama de possibilidades de análise que vem abrangendo cada vez mais as áreas de estudo que interagem com todos os setores da engenharia, dentre essas ferramentas de estudo, escolheu-se o software Ansys®, que utiliza o método dos elementos finitos, que consegue proporcionar um dimensionamento e estudo aprofundado sobre as interações entre Solo-Estrutura. Este trabalho tem como objetivo Utilizar o Método dos Elementos Finitos aplicado no software “Ansys” para construir uma análise da deformação na interação entre solo e estrutura utilizando um objeto de estudo fictício, sendo que, será pego um exemplo de solo com propriedades reais e dimensionado em proposições lógicas. Para o aprofundamento e apresentação do funcionamento do software foram apresentados dois exemplos de situações retiradas de artigos existentes, nos quais o objeto de estudo é demonstrado no software, dando segmento então com o objeto de estudo, onde se avaliou a aplicação de cargas variadas através do software em um dimensionamento real e fidedigno de um solo com propriedades “reais”, demonstrando então a viabilidade do uso desse método para uma análise precisa e rica em detalhes.

PALAVRAS-CHAVE: Solo-Estrutura; Ansys; Software; Análise solo-estrutura.

1 INTRODUÇÃO

A terra é quase uma esfera, com 6.378Km de raio na linha do equador e 6.357Km de raio polar, tendo a forma de um esferóide ligeiramente achatado nos polos. A camada “sólida” externa que compõe a terra é denominada crosta terrestre ou litosfera. É na crosta terrestre, próximo da superfície, que se encontram todas as obras de engenharia civil, que podem atingir alguns quilômetros de profundidade, como na construção de grandes túneis (Queiroz, 2018). Faz-se necessário então o surgimento de uma área de estudo que tenha como foco o estudo do solo. Qualquer fundação, quando carregadas, solicitam o terreno, este se deforma resultando em deslocamentos verticais (recalques), horizontais e rotações. Isso modifica as cargas iniciais interferindo na hipótese usual de apoios indeslocáveis. Chega-se, assim, ao problema da interação solo-estrutura (Velloso, 2011).

A interação solo-estrutura representa um desafio significativo na engenharia civil, exigindo métodos avançados, como o MEF (Método dos Elementos Finitos), que permite prever com precisão comportamentos estruturais complexos.

A análise de elementos finitos originou-se como um método de análise de tensões no projeto de aeronaves. Tudo começou como uma extensão do método matricial de análise estrutural. Hoje este método é utilizado não apenas para a análise em mecânica dos sólidos, mas mesmo na análise de fluxo de fluidos, transferência de calor, campos elétricos e magnéticos e muitos outros. Os engenheiros civis utilizam este método extensivamente para a análise de vigas, estruturas espaciais, placas, cascas, placas dobradas, fundações, problemas de mecânica das rochas e análise de infiltração de fluidos através de meios porosos. Problemas estáticos e dinâmicos podem ser resolvidos pela análise de elementos finitos. Utilizando-o para a análise e projeto de navios, aeronaves, naves espaciais, motores elétricos e motores térmicos (Bhavikatti, 2005).

As limitações da mente humana são tais que ela não consegue compreender o comportamento de seus ambientes complexos e criações em uma única operação. Assim, o processo de subdivisão, todos os sistemas em seus componentes ou “elementos” individuais, cujos comportamentos prontamente compreendidos e, em seguida, reconstruir o sistema original a partir de tais componentes para estudar seu comportamento é uma maneira natural pela qual o engenheiro, ou cientista ou mesmo o economista o utiliza (Zienkiewicz; Taylor; Zhu, 2013).

O uso do Método dos Elementos Finitos, com seu alto nível de complexidade e necessidade de poder computacional, tornou-se essencial para a resolução de problemas diversos na engenharia. No entanto, para que esse método funcione de maneira eficaz, é necessário um processo que simplifique a análise de sistemas complexos. Este método requer uso intensivo de um computador e pode ser aplicado para resolver quase todos os problemas encontrados na prática: problemas estáveis ou transientes em regiões lineares e não lineares para domínios uni, bi e tridimensionais (Dhatt; Touzout; Lefrançois, 2012).

A análise de elementos finitos é uma técnica numérica. Neste método todas as complexidades dos problemas como forma variável, as condições de contorno e as cargas são mantidas como estão, mas as soluções obtidas são aproximadas. Devido à sua diversidade e flexibilidade como ferramenta de análise, está recebendo muita atenção em engenharia. As rápidas melhorias na tecnologia de hardware de computador e a redução do custo dos computadores impulsionaram este método, uma vez que o computador é a necessidade básica para a aplicação deste método. Um número de marcas populares de pacotes de análise de elementos finitos está agora disponível comercialmente. Alguns dos populares pacotes são STAAD-PRO®, GT-STRUDEL®, NASTRAN®, NISA® e ANSYS®. Usando esses pacotes pode-se analisar diversas estruturas complexas (Bhavikatti, 2005).

Esses softwares desenvolvidos são valiosos por fornecerem dados precisos no cálculo e dimensionamento dos projetos de Geotecnia e solo. Atualmente, houve um grande avanço no desenvolvimento e na pesquisa relacionados ao solo. Escolheu-se o software que atenderia às necessidades deste estudo.

O ANSYS é um software de elementos finitos que pode ser utilizado nas mais diversas classes de problemas de engenharia (Ansys, 1998). A capacidade do ANSYS inclui habilidades para resolver sete tipos de análises estruturais disponíveis. Os primeiros parâmetros desconhecidos (graus de liberdade nodais) calculados em uma análise de estruturas são deslocamentos e rotações. Outras quantidades, como deformações, tensões e força de reação, são derivadas então dos deslocamentos nodais. Análises estruturais estão disponíveis apenas nos programas ANSYS/Multiphysics®, ANSYS/Mechanical®, ANSYS/Structural® e ANSYS/Professional® (Maxwell, 2017). Dado o amplo espectro de capacidades do ANSYS para resolver problemas estruturais, é fundamental entender como o software organiza o processo de análise, dividindo-o em etapas distintas. Para a análise de uma estrutura, o ANSYS divide o procedimento em três etapas: “Preprocessor”, “Solution” e “Postprocessor”. Na primeira etapa, “Preprocessor”, é feita a modelagem da estrutura, a definição do tipo de elemento estrutural (viga, barras, placas, etc.), das constantes características do elemento e do tipo de material relacionado ao mesmo. Ainda nessa etapa, são numerados os nós e as barras. Na segunda etapa, “Solution”, é feita a definição dos tipos de forças atuantes na estrutura e suas condições de apoio e do tipo de análise escolhido. Feita a análise da estrutura, inicia-se a terceira etapa, “Postprocessor”, em que é feita a apresentação dos resultados da análise da etapa anterior. Só após as análises estáticas e/ou dinâmicas é que se pode utilizar o módulo de otimização e seus métodos e ferramentas (Maxwell, 2017).

Este artigo tem como objetivo apresentar o método dos elementos finitos através do uso de um software e o benefício de sua utilização em projetos de engenharia Civil

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. INTERAÇÃO SOLO ESTRUTURA

A interação solo-estrutura desempenha um papel fundamental no comportamento e desempenho das fundações, especialmente nas fundações superficiais, como as sapatas. A correta consideração dessa relação é crucial para a segurança e a durabilidade das edificações, uma vez que o solo serve como meio de suporte para as cargas estruturais. De acordo com Silva (2015), o solo é um meio complexo cujas propriedades variam em profundidade e área, o que torna essencial a avaliação precisa dessas características para garantir que as sapatas transferem as cargas adequadamente para o terreno.

Ao projetar fundações com sapatas, o fator de segurança (FS) é uma das principais métricas utilizadas para assegurar que o solo suporte as cargas sem falhas. Segundo Oliveira e Souza (2018), o FS reflete a relação entre a capacidade de carga última do solo e a carga aplicada pela estrutura. Valores inadequados para o FS podem resultar em falhas estruturais graves, como recalques excessivos ou a ruptura do solo sob a fundação.

Vários estudos ressaltam a importância de métodos precisos para avaliar a interação solo-estrutura. Mendonça (2020) e Santos *et al.* (2019) destacam que o uso de modelos numéricos, como o método dos elementos finitos (MEF), oferece uma abordagem mais acurada para prever o comportamento do solo e da fundação em diferentes cenários, superando as limitações dos métodos analíticos tradicionais.

A heterogeneidade dos solos e as variações sazonais, como a presença de lençóis freáticos e a compactação natural do solo, afetam diretamente o desempenho das sapatas.

De acordo com um estudo publicado na SciELO, a variabilidade dos atributos químicos e físicos do solo, decorrente de sua formação natural e do manejo humano, desempenha um papel crucial na capacidade de carga do solo. Solos argilosos ou outros tipos de solo sensíveis à umidade podem ter sua capacidade de carga alterada, impactando o fator de segurança e o desempenho geral da fundação ao longo do tempo.

Portanto, a avaliação correta da interação solo-estrutura é vital não apenas para a segurança imediata da fundação, mas também para a longevidade da edificação. A análise integrada, utilizando métodos numéricos e dados empíricos, constitui a base para o cálculo eficaz do fator de segurança em sapatas, garantindo que as cargas estruturais sejam transmitidas corretamente e que o solo suporte a estrutura de forma durável.

O estudo da interação solo-estrutura é essencial para garantir a segurança e a confiabilidade nos projetos de fundações, contribuindo significativamente para a estabilidade das edificações. Segundo Silva (2017), a compreensão dessa relação permite aos engenheiros calcular com maior precisão as tensões, deformações e recalques que ocorrem no solo devido às cargas aplicadas pela estrutura, o que possibilita um projeto mais seguro e eficiente.

A relação solo-estrutura deve ser vista como um sistema integrado, onde as características do solo influenciam diretamente o comportamento da fundação e, por consequência, de toda a estrutura. Oliveira e Santos (2019) afirmam que a falta de uma análise adequada dessa interação pode resultar em problemas estruturais sérios, como recalques diferenciais excessivos ou até colapso da estrutura.

A confiança nos projetos de fundações também está associada ao uso de métodos de análise que considerem a complexidade do comportamento do solo. Mendonça et al. (2020) argumentam que métodos numéricos, como o MEF, proporcionam uma análise mais precisa, especialmente em solos heterogêneos ou em condições geotécnicas adversas.

Além disso, o estudo da interação solo-estrutura contribui para uma abordagem mais sustentável e econômica nos projetos de engenharia. De acordo com Pereira e Costa (2021), a análise detalhada do comportamento do solo permite otimizar o dimensionamento das fundações, evitando super dimensionamentos desnecessários que aumentam os custos e o consumo de materiais.

O estudo aprofundado da interação solo-estrutura também leva a uma melhor previsão de possíveis problemas ao longo da vida útil da edificação. Solos expansivos, como as argilas, ou a presença de lençol freático elevado podem afetar significativamente o desempenho da fundação ao longo do tempo. Conforme observado por Santos (2020), a análise apurada dessas condições antes da execução do projeto permite prever e mitigar eventuais problemas futuros, promovendo maior segurança e confiabilidade no projeto a longo prazo.

A escolha de trazer o Método dos Elementos Finitos para as situações da engenharia civil reforçando sua importância acadêmica e não só apresentando como também demonstrando sua praticidade de uso tem como objetivo a melhoria, da confiabilidade e a evolução nas práticas e métodos utilizados para se calcular e dimensionar estruturas. O MEF é uma arma poderosa e um elemento facilitador que pode gerar um encurtamento dos prazos de criação de projetos, também cria uma ferramenta para resolver situações problema geradas no dia a dia do convívio em obra e não menos importante, se usado de maneira eficiente, pode significar uma redução efetiva de custos sem perda de segurança.

2.2. CARACTERÍSTICAS DO SOLO

A descrição do solo e o desenvolvimento de suas equações para o uso em elementos finitos envolvem a caracterização das propriedades do solo e a formulação de

um modelo matemático que represente o comportamento mecânico do material em condições de carregamento. No contexto dos elementos finitos, o solo pode ser descrito por meio de modelos constitutivos que refletem o comportamento elástico, plástico e viscoelástico, dependendo do tipo de análise que se deseja realizar.

Para isso é necessário caracterizar o solo em termos de suas propriedades físicas e mecânicas. Estas propriedades incluem:

- Densidade (ρ): Representa a massa por unidade de volume do solo.
- Módulo de Elasticidade (E) e Coeficiente de Poisson (ν): Definem o comportamento elástico linear do solo, indicando sua resistência à deformação.
- Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento: Como coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ), são importantes para o comportamento plástico.
- Coeficiente de Permeabilidade (k): Usado em problemas de fluxo de água em solos.
- Outros Parâmetros de Deformação e Rigidez: Para solos não lineares, como solos saturados ou não saturados, podem ser necessários outros parâmetros, como módulo de bulk (K) e módulo de cisalhamento (G).

Após caracterizado, é possível então formar o modelo constitutivo, ou seja, uma formulação matemática capaz de englobar os elementos característicos do solo e sua forma. Os modelos constitutivos definem como o solo responde a tensões aplicadas. Alguns modelos comuns para análise por elementos finitos incluem:

- Modelo Elástico Linear: Baseado na Lei de Hooke, onde a tensão (σ) é proporcional à deformação (ϵ), com $\sigma = E \cdot \epsilon$.
- Modelo Elástico-Plástico (Mohr-Coulomb): Este modelo é amplamente utilizado para solos devido ao seu comportamento não linear e incorpora tanto resistência ao cisalhamento quanto parâmetros de plasticidade.
- Modelo Cam-Clay: Utilizado para solos argilosos, especialmente para modelar solos em condições de carregamento drenado e não drenado, representando o comportamento dependente do estado de tensão e deformação.

Tem-se então as equações governantes, cujas principais para o problema de análise do solo em elementos finitos incluem:

a. Equilíbrio de Forças

A equação do equilíbrio de forças em uma abordagem quasi-estática é:

$$K u = F \quad (01)$$

onde:

- K é a matriz de rigidez do solo, que depende do modelo constitutivo e das propriedades do material,
- u é o vetor de deslocamentos nodais,
- F é o vetor de forças aplicadas.

b. Relação Tensão-Deformação

Para um comportamento elástico linear, a relação tensão-deformação pode ser escrita como:

$$\{\sigma\} = [D] \{\epsilon\} \quad (02)$$

onde:

- $\{\sigma\}$ é o vetor de tensões,

- $\{\boldsymbol{\varepsilon}\}$ é o vetor de deformações,
- $[\mathbf{D}]$ é a matriz constitutiva que relaciona tensões e deformações, dependendo das propriedades E e V do solo.

c. Continuidade e Equações de Compatibilidade

Para garantir a compatibilidade das deformações, as equações de compatibilidade devem ser satisfeitas:

$$\nabla \cdot \{\boldsymbol{\varepsilon}\} = 0 \quad (03)$$

d. Condições de Contorno

As condições de contorno devem ser aplicadas para definir o comportamento nas bordas do modelo. Para problemas de solo, geralmente há condições de contorno de deslocamento (impostas nos limites inferiores e laterais) e condições de força (na superfície superior ou na aplicação de cargas concentradas).

Chegou-se à etapa de Discretização pelo Método dos Elementos Finitos, que envolve dividir a região do solo em pequenos elementos finitos, nos quais as equações acima são resolvidas. Para cada elemento, as equações são formuladas e, posteriormente, montadas para a estrutura completa do solo. O resultado é um sistema de equações lineares ou não lineares, dependendo do modelo constitutivo, que deve ser resolvido numericamente. Permitindo então que possa ser obtida a Solução numérica em que após a formulação e discretização, o sistema de equações é resolvido, obtendo-se o vetor de deslocamentos $\mathbf{u}$. Com os deslocamentos conhecidos, é possível calcular as tensões e deformações dentro de cada elemento, fornecendo uma descrição detalhada do comportamento do solo sob as condições de carregamento aplicadas.

2.3. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem se destacado como uma ferramenta fundamental para a análise da interação solo-estrutura, oferecendo uma abordagem mais precisa em comparação aos métodos analíticos tradicionais. Segundo Mendonça (2020) e Santos et al. (2019), o MEF permite a simulação de cenários complexos, levando em consideração a heterogeneidade do solo e as variações nas condições de carregamento, o que o torna ideal para a modelagem de fundações como as sapatas.

O grande diferencial do MEF é a capacidade de dividir a estrutura e o solo em partes menores (elementos finitos). Cada parte é analisada individualmente, mas dentro de um sistema integrado. Isso permite considerar com detalhes as tensões, deformações e recalques que ocorrem no solo sob a fundação, mesmo em situações de comportamento não linear ou com variações significativas nas propriedades do solo. Segundo Pereira e Costa (2021), essa abordagem ajuda os engenheiros a avaliar com mais precisão como o solo reage às cargas da estrutura, resultando em projetos mais seguros e eficientes.

Além disso, o MEF supera as limitações dos métodos analíticos ao permitir a análise tridimensional da interação solo-estrutura, o que é especialmente importante em solos heterogêneos ou em terrenos irregulares. Enquanto os métodos tradicionais frequentemente assumem simplificações que podem levar a resultados imprecisos, o MEF oferece uma representação mais fiel das condições reais de campo, reduzindo a margem de erro e aumentando a confiança nos resultados obtidos.

De acordo com Oliveira e Souza (2019), o uso do MEF em projetos de fundações não apenas melhora a precisão das análises, mas também possibilita a otimização das

dimensões das sapatas, evitando super dimensionamentos ou sub dimensionamentos, que podem impactar negativamente a segurança ou os custos do projeto. Assim, a aplicação do MEF proporciona maior controle sobre os fatores de segurança, garantindo que as fundações projetadas suportem adequadamente as cargas estruturais, mesmo em solos com propriedades complexas.

O método dos elementos finitos analisa as estruturas a partir de uma subdivisão dessa estrutura em vários elementos menores e fazendo a análise desses elementos individualmente para se obter um resultado final ao unir as análises por uma matriz global.

Os elementos que serão criados a partir da divisão da estrutura podem ser lineares, bidimensionais ou tridimensionais, os bidimensionais e tridimensionais podem ser tanto triangulares quanto quadrangulares e podem ser elementos sólidos, de superfície e lineares (Figura 1).

Figura 1 – Tipos de Elementos



Fonte: Acervo Próprio (2024).

Para cada elemento podemos determinar um vetor u que contém todos os deslocamentos possíveis para cada nó do elemento incluindo rotações, cada um desses deslocamentos pode ser chamado de graus de liberdade. Em um elemento linear existem 3 graus de liberdade para cada nó, em um elemento em três dimensões seriam 6 graus de liberdade para cada nó. (Figura 2).

Figura 2 – Graus de liberdade do elemento



Fonte: Acervo Próprio (2024).

Por exemplo para se calcular o deslocamento de cada nó em um elemento usa-se a equação citada anteriormente:

$$\{f\} = [k] \cdot \{u\}$$

Em que $\{f\}$ é o vetor das forças resultantes, $\{u\}$ é o vetor dos graus de liberdade do elemento e $[k]$ é a matriz de rigidez do elemento, essa matriz é uma matriz quadrada em que o número de colunas e linhas é o mesmo que a quantidade de graus de liberdade do elemento, nesse caso uma matriz 6x6 (Figura 3).

A partir da matriz de rigidez de um único elemento podemos unir vários elementos, e unir suas matrizes criando uma matriz de rigidez global que consegue calcular os esforços no elemento. A matriz global é gerada da união das matrizes de rigidez dos elementos a partir dos nós que os elementos compartilham, por exemplo na figura 4 temos a matriz de

rigidez do elemento azul é a matriz de rigidez do elemento vermelho constituindo uma matriz global de rigidez, os 9 elementos da matriz que são compartilhados pelas duas matrizes são em relação ao nó 2 que é compartilhado pelos 2 elementos.

**Figura 3 –
Representação facilitada
da matriz de rigidez de
um elemento**

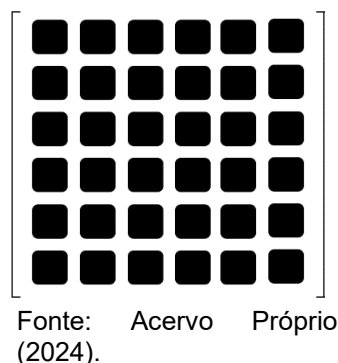
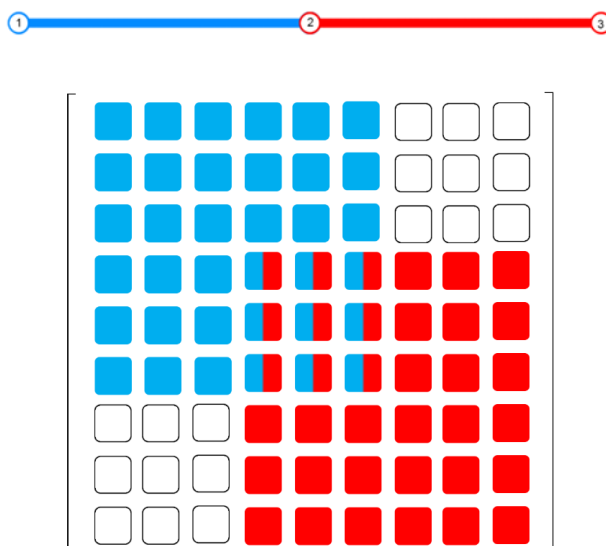


Figura 4 – Dois elementos unidos e a matriz global dos dois elementos



Fonte: Acervo Próprio (2024).

2.4. ANÁLISE COMPUTACIONAL

A evolução da engenharia geotécnica e estrutural está intimamente ligada ao avanço das ferramentas de análise computacional, que proporcionam maior precisão e eficiência no estudo da interação solo-estrutura. Softwares de elementos finitos, como o ANSYS, têm se tornado essenciais para a análise dessa relação, permitindo aos engenheiros simular e prever o comportamento do solo e da fundação sob diferentes condições de carga. De acordo com Silva (2018), a utilização desses softwares oferece simulações tridimensionais que representam com precisão a interação entre solo e estrutura, algo que métodos analíticos tradicionais têm dificuldade em capturar.

Oliveira e Souza (2019) apontam que o uso de ANSYS e outros softwares de análise numérica contribui significativamente para a segurança e confiabilidade dos projetos, pois permite a realização de análises complexas, que simulam diferentes

condições de carregamento e variações geotécnicas. Mendonça (2020) ressalta que a possibilidade de testar múltiplos cenários garante que as fundações projetadas sejam otimizadas em termos de segurança e custo-benefício.

Outro ponto importante é a integração dos softwares de simulação com métodos tradicionais de cálculo, criando um ambiente de análise mais robusto. Pereira e Costa (2021) destacam que essa combinação permite validar e ajustar os modelos, oferecendo maior confiança nos resultados.

Além disso, ferramentas como o ANSYS são eficazes na análise de solos heterogêneos ou em terrenos inclinados, onde a distribuição de tensões e recalques pode variar significativamente. Segundo Santos (2020), essas ferramentas permitem estudar o comportamento de diferentes tipos de solo simultaneamente, o que seria difícil de realizar com abordagens analíticas simplificadas.

Portanto, o uso de softwares de análise computacional, como o ANSYS, se tornou indispensável na engenharia moderna, proporcionando confiança nos resultados e garantindo que as fundações projetadas sejam seguras, eficazes e otimizadas para as condições específicas do solo. A capacidade de realizar simulações precisas permite que os engenheiros tomem decisões informadas, minimizando riscos e garantindo o desempenho adequado da estrutura ao longo de sua vida útil.

2.5. EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS DO SOLO

As equações constitutivas do solo definem a relação entre tensões e deformações, modelando o comportamento do solo sob diferentes condições de carregamento. - Modelo Elástico Linear (Lei de Hooke): Supõe que o solo se deforma elasticamente até um ponto e que a relação entre tensão e deformação é linear e reversível. Esse modelo é descrito pela equação:

$$\sigma = D \cdot \varepsilon \quad (04)$$

Onde:

- σ é o vetor de tensões,
- ε é o vetor de deformações,
- D é a matriz constitutiva elástica, que depende do módulo de elasticidade E e do coeficiente de Poisson ν . Para um material isotrópico em três dimensões, a matriz constitutiva D é:

$$[D] = \frac{E}{((1 + \nu)(1 - 2\nu))} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 - \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1 - \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (05)$$

Modelo Elástico-Plástico de Mohr-Coulomb: Define a falha do solo ao atingir uma combinação crítica de tensões normais e cisalhantes:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\varphi) \quad (06)$$

Onde:

- τ é a tensão de cisalhamento,

- c é a coesão do solo,
- φ é o ângulo de atrito interno,
- σ é a tensão normal.

I. MODELO DE MOHR-COULOMB

Este modelo é amplamente usado para descrever o comportamento de solos e rochas. Ele utiliza o conceito de resistência ao cisalhamento, definindo uma superfície de falha no espaço de tensões. Critério de Falha de Mohr-Coulomb: No espaço das tensões principais, a falha ocorre quando uma combinação crítica de tensões principais σ_1 e σ_3 é alcançada:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \cdot \frac{((1 + \sin(\varphi))}{(1 - \sin(\varphi)))} + 2c \cdot \frac{(\cos(\varphi))}{(1 - \sin(\varphi)))} \quad (07)$$

A Implementação em Elementos Finitos, para utilizar o modelo de Mohr-Coulomb em elementos finitos, o domínio do solo é discretizado em pequenos elementos onde as equações são resolvidas.

a. Matriz de Rigidez:

$$K = \int (B^T \cdot D \cdot B \, dV) \quad (08)$$

onde:

- B é a matriz de deformação;
- D a matriz constitutiva.

b. Equilíbrio de Forças:

$$K_{global} \cdot u = F_{global} \quad (09)$$

Em análises não lineares, como no modelo Mohr-Coulomb, o sistema é resolvido iterativamente para alcançar a convergência.

Em caso de não linearidade do Solo, a equação considera o Modelo de Mohr-Coulomb que pode ser utilizado da seguinte forma:

$$\sigma = \frac{(c + \sigma' \tan(\varphi))}{(1 + \sin(\varphi))} \quad (10)$$

onde:

- σ = tensão (MPa)
- c = coesão (MPa)
- σ' = tensão efetiva (MPa)
- φ = ângulo de atrito interno

II. MODELO DE ELASTICIDADE NÃO LINEAR

Para solos que se comportam de forma não linear, o modelo de elasticidade não linear pode ser utilizado:

$$\sigma = f(\varepsilon) \quad (11)$$

onde:

- $f(\varepsilon)$ = função não linear que relaciona tensão e deformação

3 METODOLOGIA

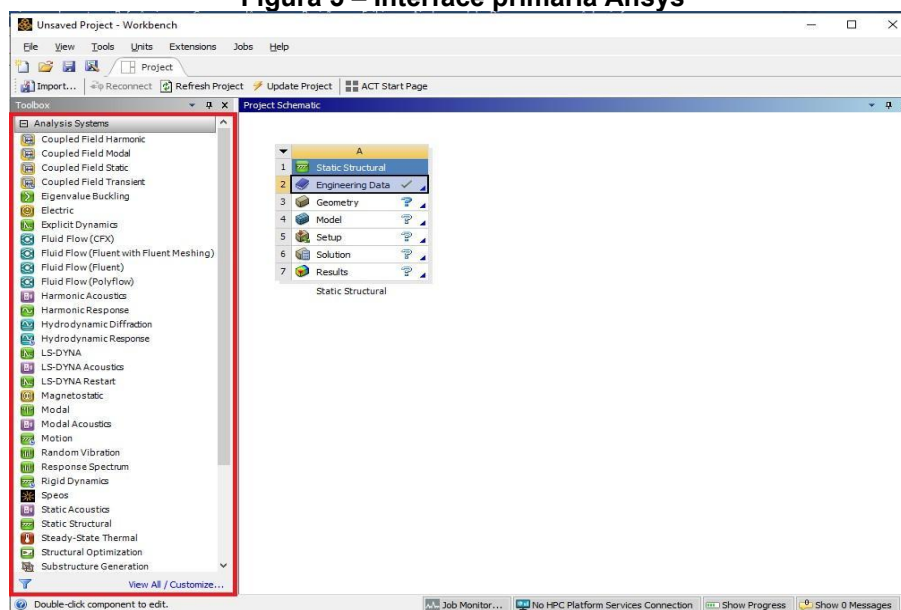
No contexto da Engenharia Civil, o ANSYS permite simular interações solo-estrutura com alta precisão, otimizando projetos e garantindo análises de segurança confiáveis.

O Software oferece uma variedade de módulos e ferramentas, sendo elas o Ansys Mechanical, Fluent, CFX, Maxwell, HFSS, além de fornecer recursos de integração com outros softwares, como CAD e PLM. Pode-se explicar as etapas do Ansys separando os itens de sua interface, é importante ressaltar que, após a instalação e o acesso ao Workbench (Interface do Ansys Mechanical), a primeira e importante escolha para o avanço na ferramenta deve ser feita, que é referente ao tipo de estudo que será avaliado, veja que existe uma gama de opções, então é importante conhecer o tipo de objeto de estudo e quais as análises a serem observadas.

A primeira importante escolha é o tipo de estudo escolhido, sendo o *Static Structural* para serem feitas análises de três estudos de caso, os quais foram análise estrutural de pisos industriais, fundações superficiais ambos considerando a interação solo-estrutura pelo método dos elementos finitos e um bloco com quatro estacas cuja carga é transmitida por um pilar.

Na figura 1, o local destacado de vermelho contém as opções de análise que o software disponibiliza, fornecendo um acervo de opções que trazem formatos diferentes de análise, cada um buscando apurar os resultados de acordo com tipo de verificação.

Figura 5 – Interface primária Ansys

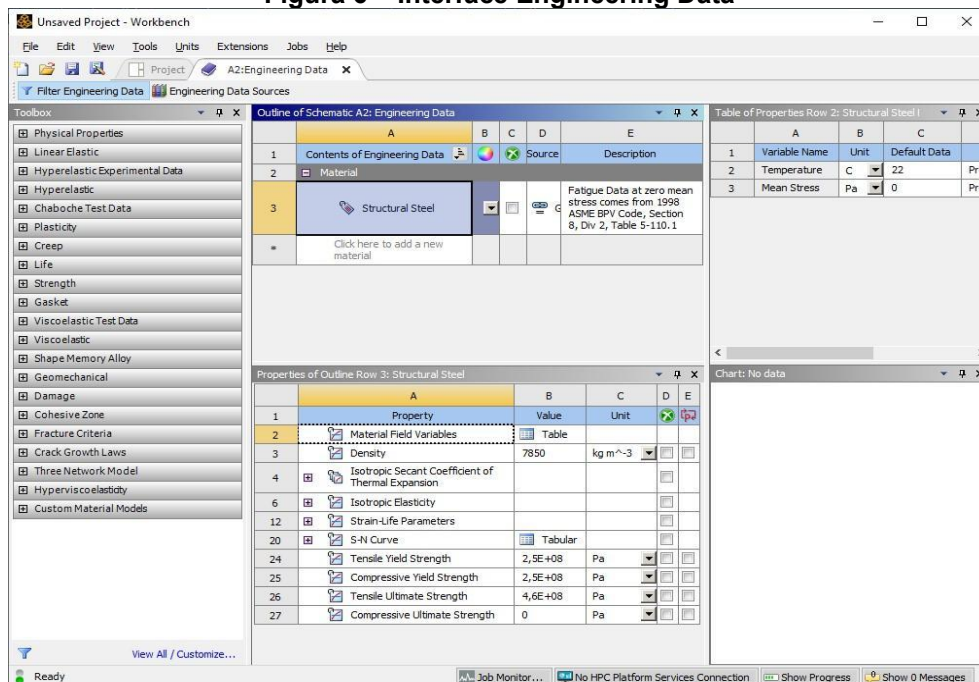


Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

O primeiro item é o *Engineering Data* onde o trabalho é determinar quais serão os materiais aplicados no objeto de estudo, por ter uma interface dinâmica, basta clicar duas vezes na escrita e então será direcionado para o local que detém das ferramentas que

auxiliam no processo. Deve-se então escolher todos os materiais que farão a composição do objeto analisado, selecionando com um clique no indicativo de + o material desejado.

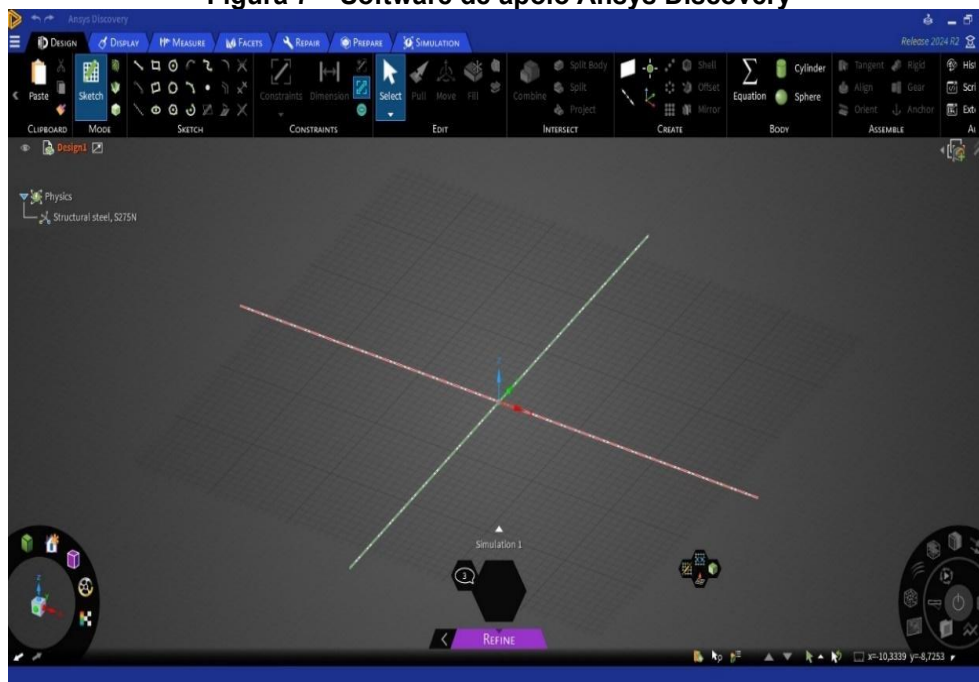
Figura 6 – Interface Engineering Data



Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

A Segunda etapa é a Geometry onde é feita a geometria, a forma do objeto de estudo. Quando selecionada a opção de geometria na interface, o Ansys redireciona para um software auxiliar com formato semelhante aos softwares da Autodesk (Autocad e Revit), permitindo então a criação de uma forma 3D dos elementos. Nessa etapa deve-se também acrescentar os pontos onde as cargas pontuais serão aplicadas (Isso cria um vértice onde você irá direcionar o ponto).

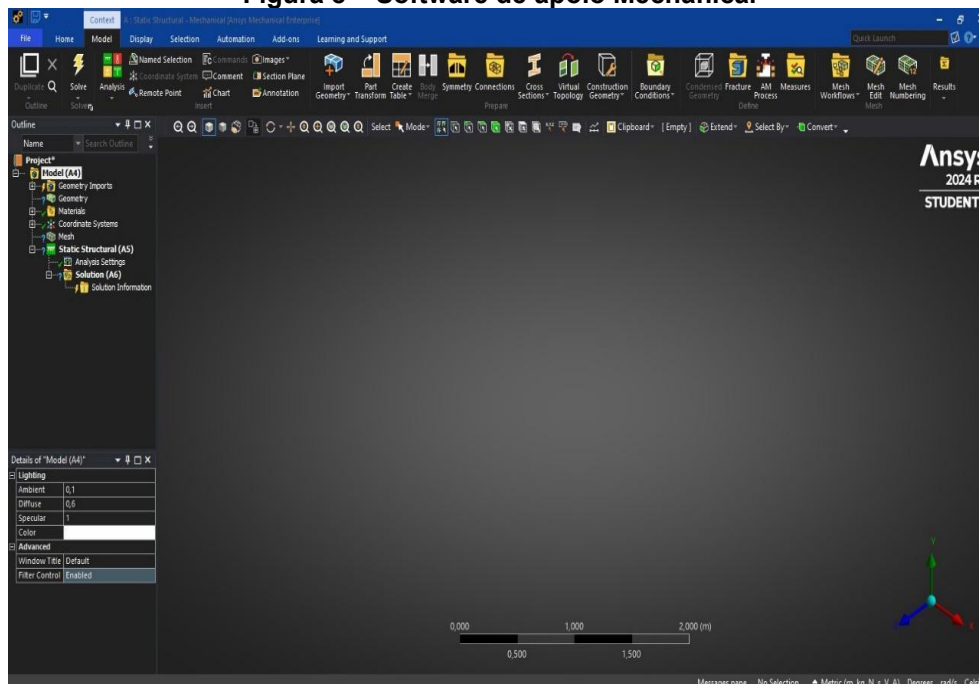
Figura 7 – Software de apoio Ansys Discovery



Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

Para as próximas etapas (Model, Setup, Solution, Results) a interface primária redireciona para este outro software auxiliar onde serão feitas as análises; determina-se aqui os pontos de esforço, os tipos de esforço, a(s) superfície(s) de contato, todos os elementos que devem ser analisados; é aqui onde determina-se todos os parâmetros de estudo, e é também onde obtém-se os resultados.

Figura 8 – Software de apoio Mechanical



Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

O software fornece representações gráficas, uma visualização “animada” que mostra os efeitos das forças do início até seu estágio final. É possível então analisar e comparar os dados de maneira prática, e visual.

3.1. SIMULAÇÃO COM ARTIGOS PARA EXEMPLO

É importante ressaltar que esses exemplos são apenas para demonstrar a possibilidade de se aplicar problemas diversos no software, então apenas foram incorporados os dados presentes nos artigos ao software.

Os materiais utilizados nos três exemplos foram fornecidos pelo software sem alteração em suas propriedades, sendo que foram utilizados: Concrete, Soil, Structural Steel e Sandstones.

As malhas foram padronizadas pelo software, sendo que nos exemplos foram refinadas de acordo com a necessidade. O refinamento da malha (Aumento da quantidade de nós) influencia nos resultados obedecendo um limite onde o aumento da malha gera o mesmo resultado.

a. Análise estrutural de pisos industriais utilizando o método dos elementos finitos

O primeiro exemplo simulado é dos autores Alberto Cardona, Paul H. Kohan, Ricardo D. Quinteros e Mario A. Storti que buscaram avaliar a capacidade do método dos elementos finitos em analisar e demonstrar os esforços sofridos por um piso industrial.

Seguindo as etapas de acordo com as etapas do software, o primeiro passo é definir o tipo de análise, sendo a escolha a “Static Structural” e os materiais foram o concreto, o solo (Material pré definido pelo software para agregar elementos de solo) e aço estrutural.

Figura 9 – Materiais simulação 1

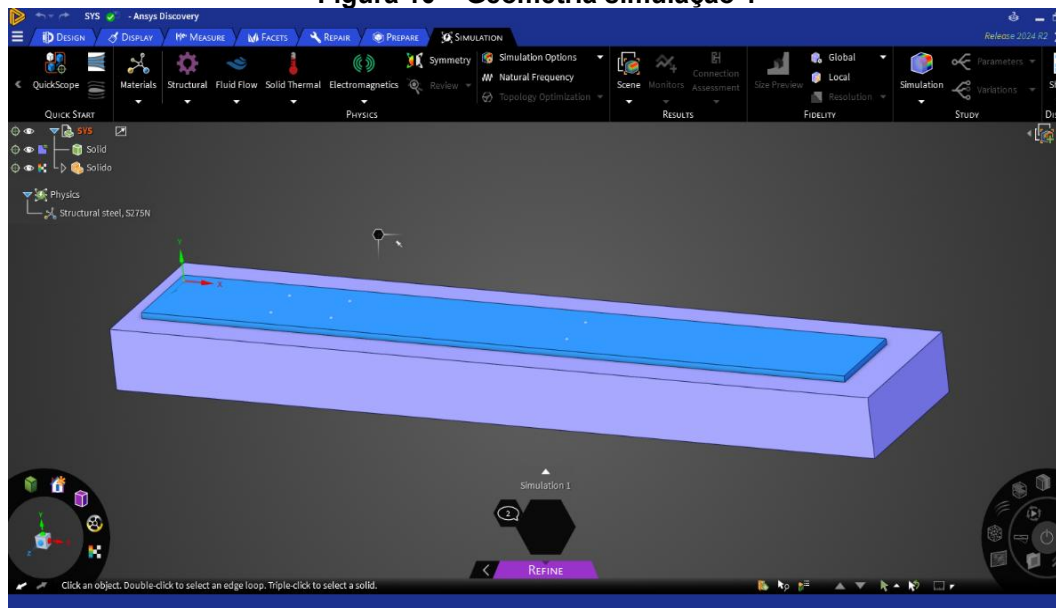
Outline of Schematic A2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	Concrete			
4	Soil			"Critical State Soil Mechanics", Schofield, A. N., Wroth, C. P., 1968, McGraw-Hill
5	Structural Steel			Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5 -110.1
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 5: Structural Steel				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
12	Strain-Life Parameters			
20	S-N Curve	Tabular		
24	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa	
25	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa	
26	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa	
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	

Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

A geometria seguiu os detalhes do artigo, como demonstrado na imagem 6.

Figura 10 – Geometria simulação 1



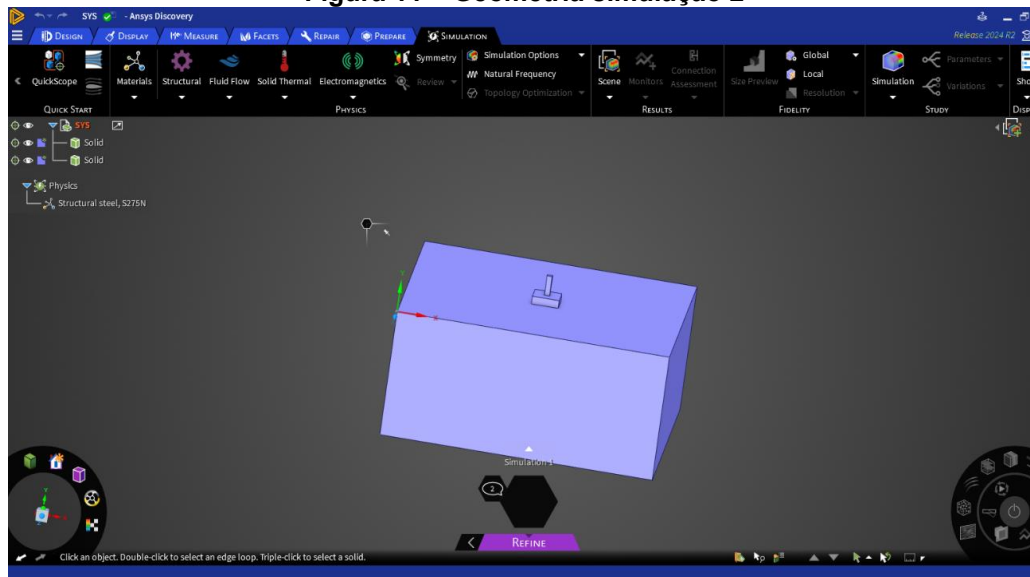
Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

A equação constitutiva utilizada para esse tipo de estudo é a (4) onde se considera a Elasticidade linear. Os resultados a serem apresentados buscam compreender o efeito da deformação causado pela carga que se encontra sobre o piso.

b. Análise estrutural em fundações superficiais considerando a interação solo-estrutura pelo método dos elementos finitos

O segundo exemplo trata-se da análise estrutural e de uma fundação superficial, utilizando o Ansys. Reproduziu-se o objeto do artigo no Ansys. Em resumo, o artigo é uma fundação superficial rasa e direta do tipo sapata, os materiais empregados para o objeto são, o concreto armado com agregado graúdo (Granito) fck 25MPa e módulo de elasticidade de 24 GPa, a densidade do concreto é de 2500 kg/m³.

Figura 11 – Geometria simulação 2



Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

A equação constitutiva utilizada para esse tipo de estudo é a (4) onde se considera a Elasticidade linear. Os resultados a serem apresentados buscam compreender o efeito da deformação causado pela carga que se encontra aplicada na fundação (Sapata) sobre o solo. O modelo elástico linear utilizado no estudo da fundação superficial reflete os conceitos abordados na fundamentação teórica, onde a relação tensão-deformação é regida pela matriz constitutiva. A escolha deste modelo se justifica pela simplicidade de aplicação em condições onde o solo apresenta comportamento predominantemente elástico. Os resultados confirmaram a validade desse modelo, com deformações críticas dentro dos limites esperados para um solo arenoso.

c. Análise do estudo de caso

No estudo de caso, analisou-se a interação solo estrutura entre uma fundação e o solo, cujas características foram fornecidas (é importante ressaltar que deve-se obter o maior número de informações para maximizar a precisão do software). O objeto de estudo é um bloco com quatro estacas, cuja carga é transmitida por um pilar.

Para o problema de um bloco com quatro estacas em um solo, é necessário considerar:

- A distribuição de tensões no solo devido ao peso do bloco às estacas
- A interação entre o bloco e o solo
- A deformação do solo em torno das estacas

Foram aplicadas cargas nesse pilar que se distribuíram pela fundação chegando assim às camadas de solo, sendo elas divididas em 2 camadas maciças, sendo essas camadas, um solo isotrópico, e arenito.

A estrutura, como já dito antes é formada por um bloco com quatro estacas, as dimensões do bloco são de 1,5m x 1,5m x 0,6m e as estacas têm um diâmetro de 0,6m e profundidade de 6,0m. Cada camada de solo tem 2,0m.

Temos então um solo com as seguintes características:

Quadro 01 – Parâmetros estruturais do solo

Parâmetro de inclinação plástica	0,014000
Inclinação da Linha do Estado Crítico	1,2400
Tamanho inicial da superfície de rendimento	2,4132e+05 Pa
Tamanho mínimo da superfície de rendimento	2413,2 Pa
Parte seca do modificador de superfície de rendimento	1,0000
Parte molhada do modificador de superfície de rendimento	1,0000
Parâmetro de superfície de rendimento anisotrópico	1,0000
Índice de inchaço	0,0024000
Limite elástico de resistência à tração	34474 Pa
Razão de Poisson	0,27900
Proporção de Vazios Inicial	0,30000

Fonte: Autores (2024).

Quadro 02 – Parâmetros estruturais do arenito

Derivada de	Módulo em massa e módulo de cisalhamento
Módulo de Young	3,4007e+10 Pa
Razão de Poisson	0,23391
Módulo em massa	2,13e+10 Pa
Módulo de cisalhamento	1,378e+10 Pa
Mohr Coulomb	-
Ângulo de Fricção Interna Inicial	0,60000 graus
Coesão Inicial	4,2e+07 Pa
Ângulo de Dilatância	0,60000 graus
Ângulo de Fricção Interna Residual	0,30000 graus
Coesão Residual	2e+07 Pa

Fonte: Autores (2024).

E uma estrutura de concreto que apresenta os seguintes parâmetros:

Quadro 03 – Parâmetros estruturais do Concreto

Derivada de	Módulo de Young e Razão de Poisson
Módulo de Young	1,936e+10 Pa
Razão de Poisson	0,14140
Módulo em massa	8,998e+09 Pa
Módulo de cisalhamento	8,4808e+09 Pa
Coefficiente Secante Isotrópico de Expansão Térmica	1,015e-05 1/°C
Resistência final à tração	1,196e+06 Pa
Resistência à tração	1,095e+06 Pa

Fonte: Autores (2024).

Foram feitos ensaios considerando cargas diferentes a fim de entender quais são as influências da variação da carga e como ela impacta diretamente o solo.

Para a equação constitutiva deve ser considerado que para calcular a deformação elástica de um solo que recebe um bloco com quatro estacas, o modelo de comportamento do solo e das condições de carga influenciam diretamente no cálculo.

O estudo de caso foi realizado considerando um Modelo de Elasticidade Linear. Para solos que se comportam de forma elástica linear a equação constitutiva pode ser expressa na equação (4) onde:

σ = tensão (MPa)

D = matriz de rigidez elástica (MPa)

ε = deformação (unitária)

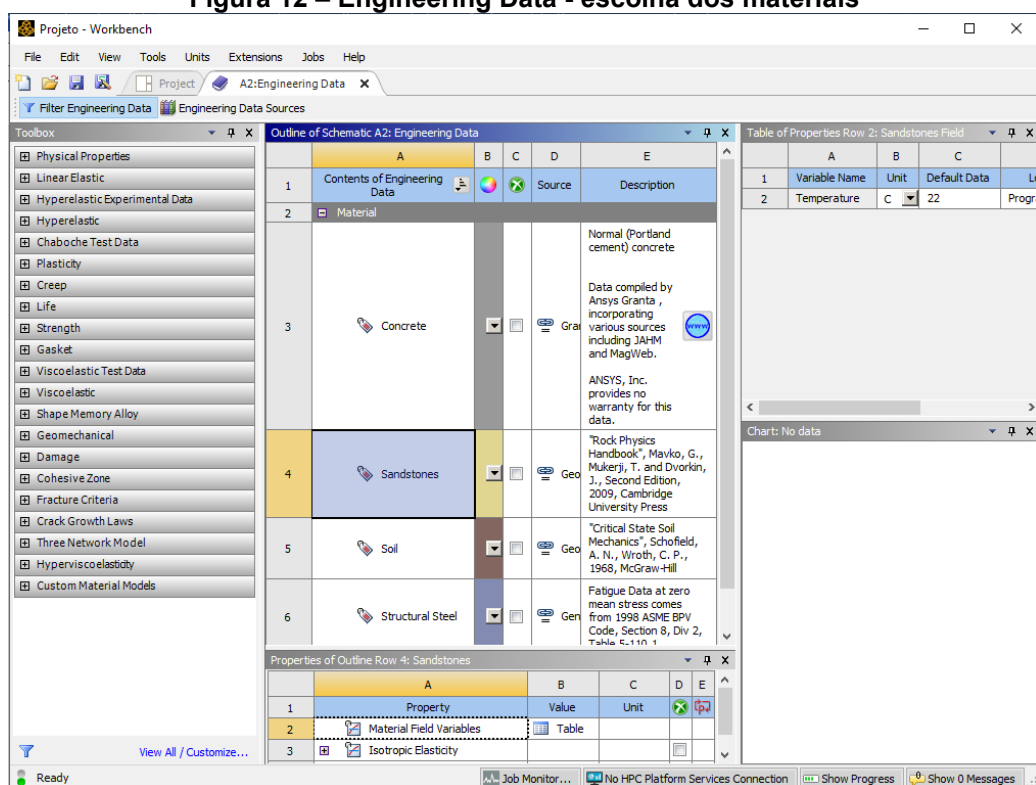
E a matriz acompanha o modelo apresentado na expressão (05) onde:

E = módulo de elasticidade Young (MPa)

ν = coeficiente de Poisson

G = módulo de cisalhamento (MPa)

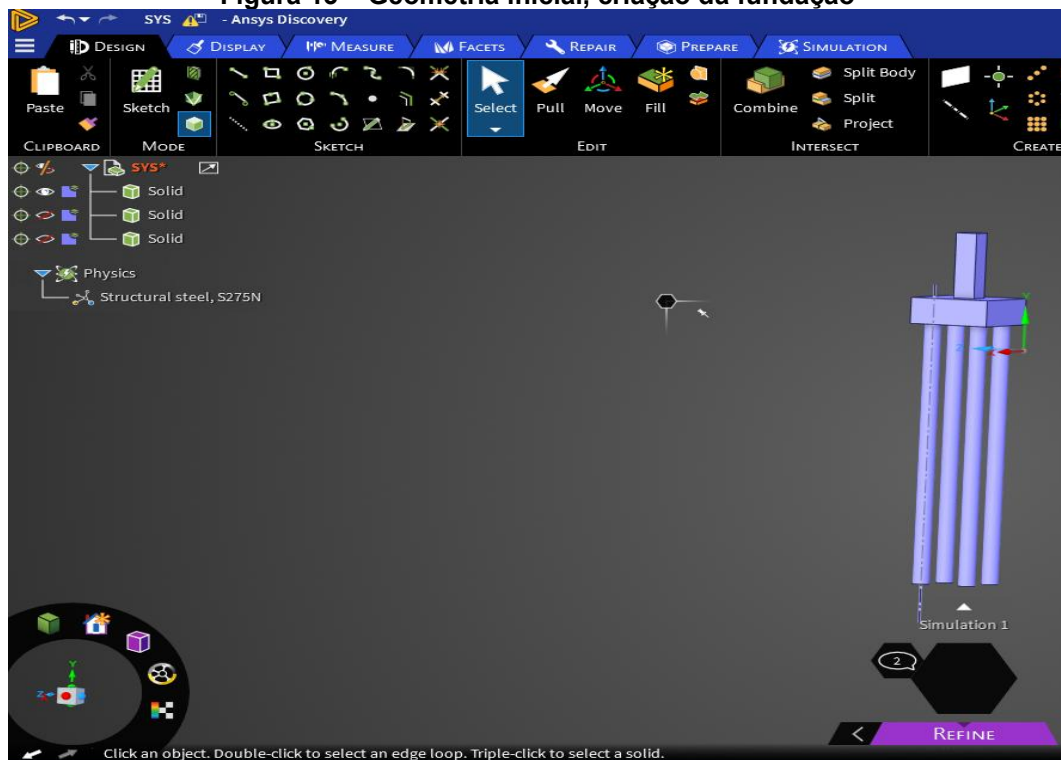
Figura 12 – Engineering Data - escolha dos materiais



Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

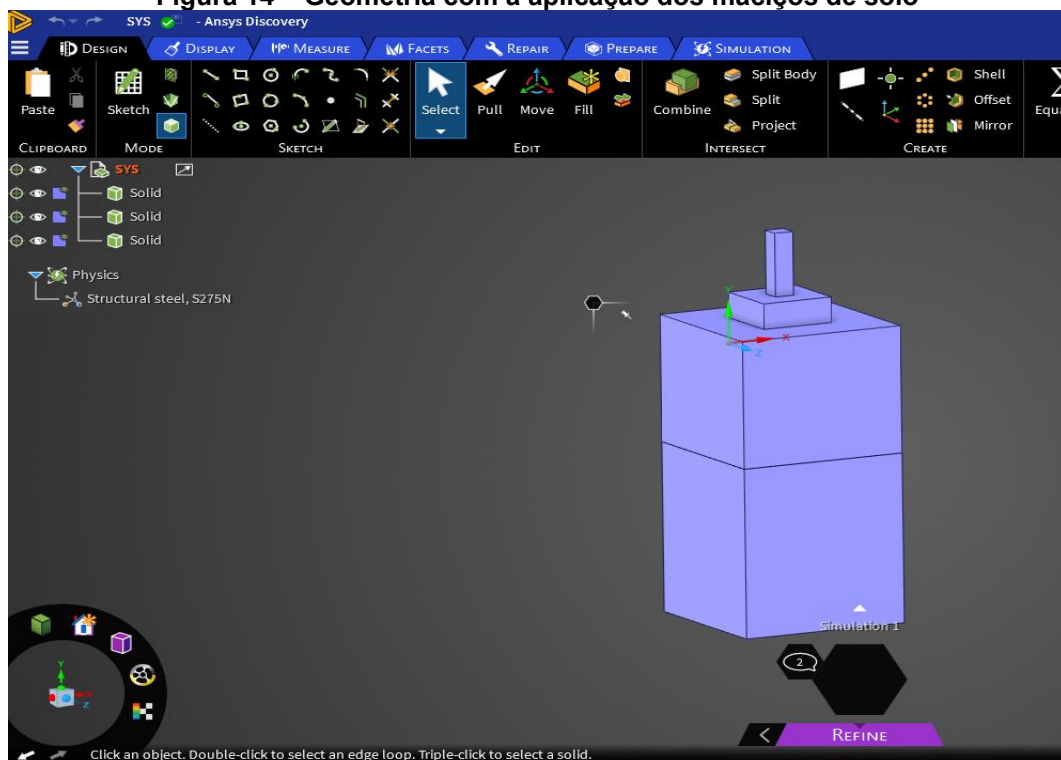
Após a escolha dos materiais, na seção de Geometria, será formado o objeto de estudo.

Figura 13 – Geometria inicial, criação da fundação



Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

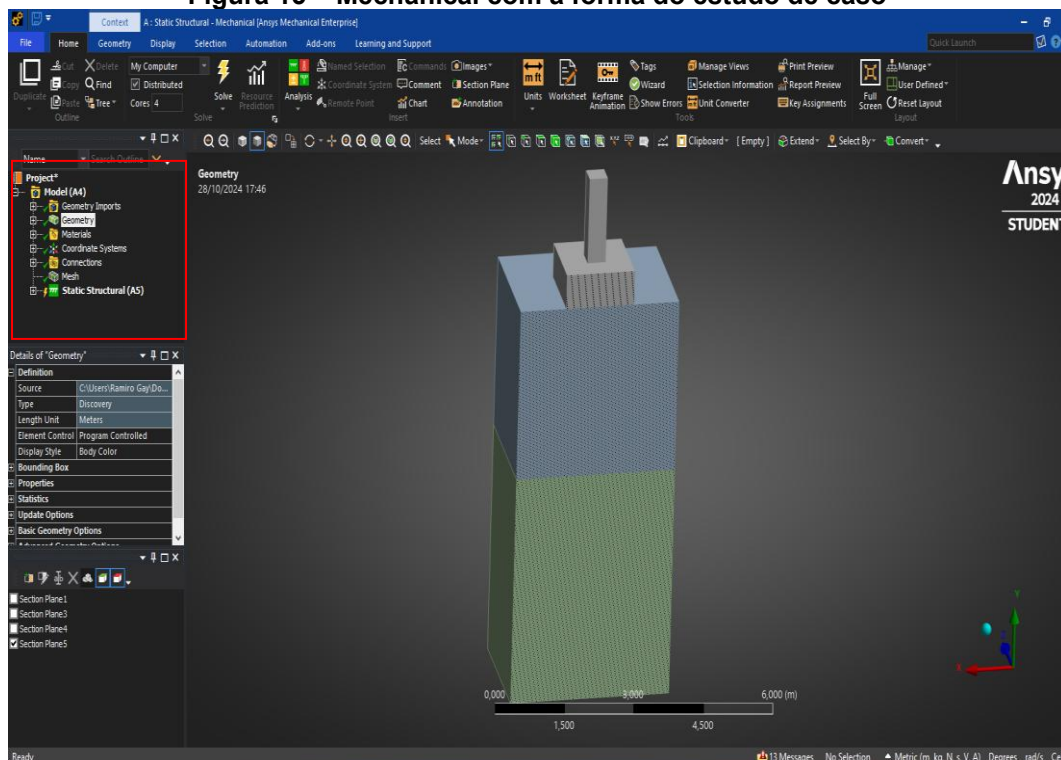
Figura 14 – Geometria com a aplicação dos maciços de solo



Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

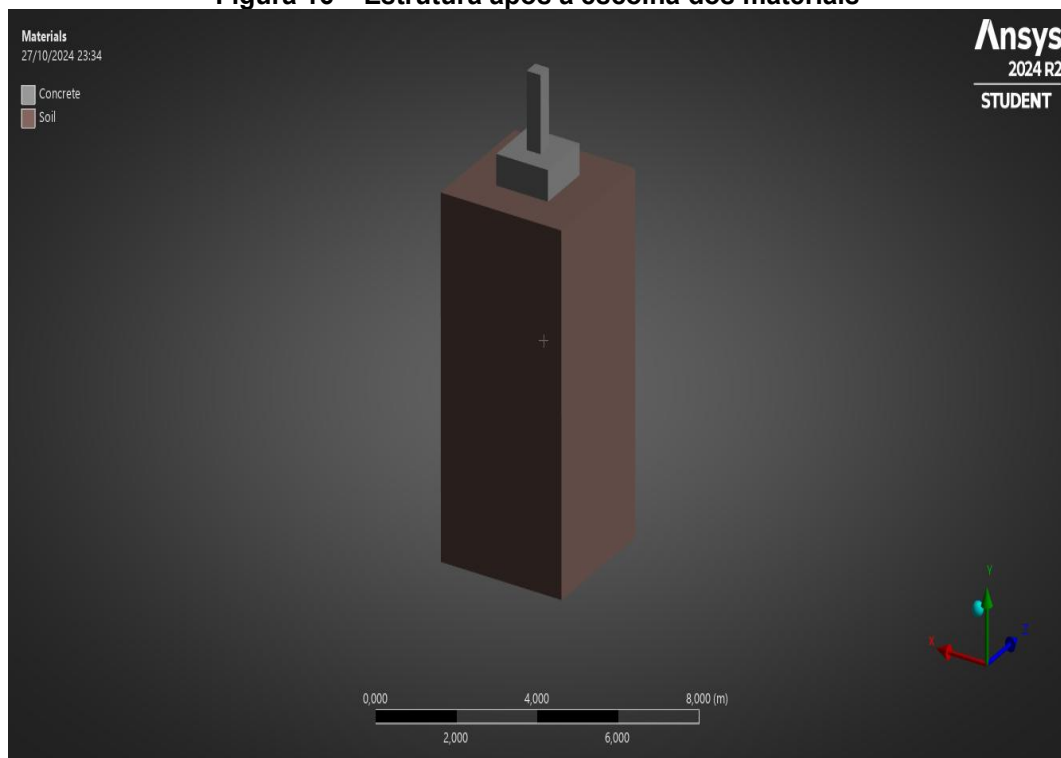
Após criada a geometria a próxima etapa é a inserção de todos os elementos dentro dessa forma que foi criada, para isso, é necessário fechar o software de modelagem e adentrar no software Mechanical, basta clicar em “model” na interface principal.

Figura 15 – Mechanical com a forma do estudo de caso



Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

Figura 16 – Estrutura após a escolha dos materiais



Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

Após carregada a geometria que foi feita na etapa anterior, é preciso avaliar cada item do espaço destacado em vermelho, varia de acordo com cada tipo de análise.

Os dois primeiros itens são atalhos diretos para a forma geométrica, selecionando “Geometry” (destacado em branco) é possível acessar os sólidos e atribuir-lhes

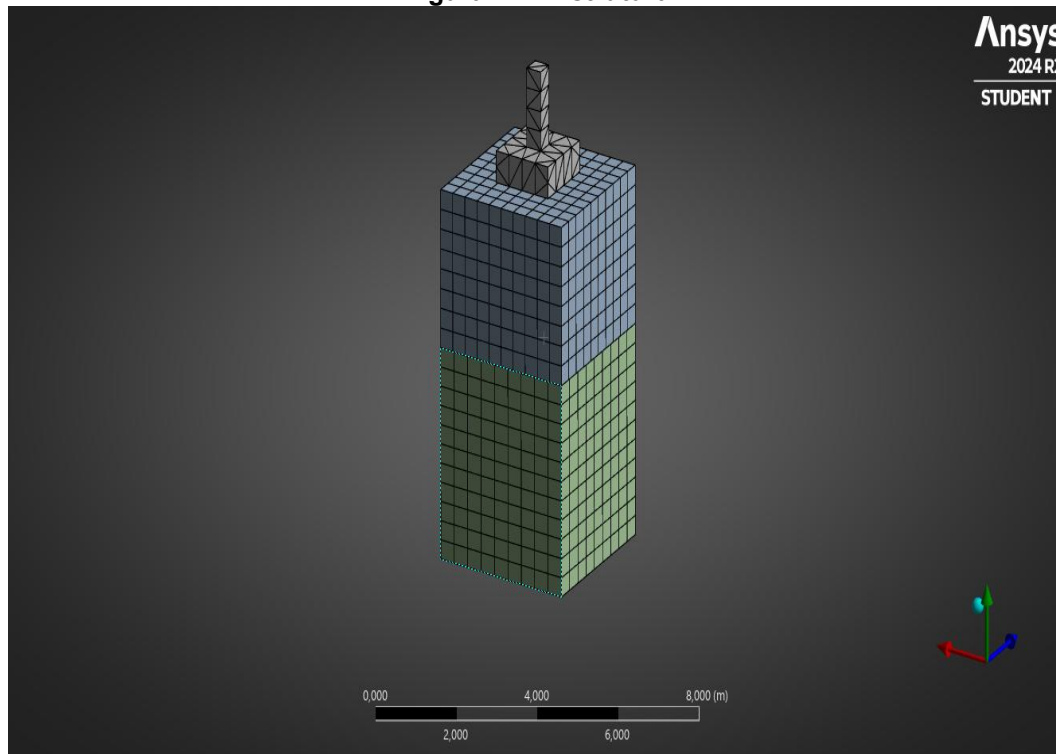
características, inclusive o tipo de material de cada elemento de forma separada, definindo a fundação como um elemento de concreto e os maciços como sendo o solo.

A opção seguinte, “Materials”, apresenta cada tipo de material e suas características pré definidas.

A Figura 16 demonstra o objeto de estudo após a aplicação dos materiais, as cores caracterizam o elemento de solo e o concreto da fundação.

Após a caracterização quanto a geometria, conexões e definição de materiais, dá-se início a criação da malha.

Figura 17 – Estrutura



Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

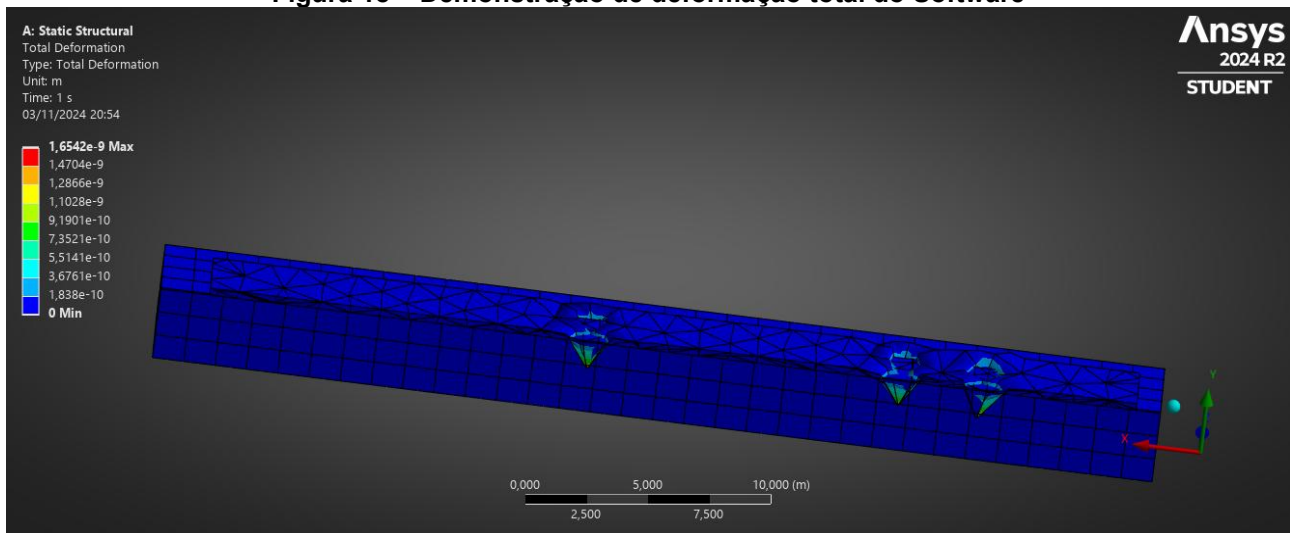
A malha é responsável pela segmentação dos sólidos em uma grande quantidade de elementos que serão a base para os cálculos feitos pelo software. Após criar-se uma malha, é dada a opção de “Refinamento” que tem a finalidade de aumentar a quantidade de elemento, é importante se atentar que os valores obtidos nos resultados costumam tender para um valor exato, então o aumento dos elementos e nós, começa a apresentar diferenças insignificantes, o que faz-se perceber que não se faz necessário buscar sempre o maior número de nós, e sim uma diferença mínima do número anterior ao último refinamento. Dito isso, o software cria uma malha para cada sólido, essa malha irá direcionar os resultados.

Com a malha pronta, a próxima etapa é a aplicação das forças e carregamentos, nessa etapa, diversas análises podem ser feitas, o software oferece uma gama de possibilidades que vão desde aceleração, força, momento à forças nodais e suportes elásticos e fixos.

4 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

- a. Resultado da análise da deformação referente ao artigo de pisos industriais utilizando o método dos elementos finitos.

Figura 18 – Demonstração de deformação total do Software



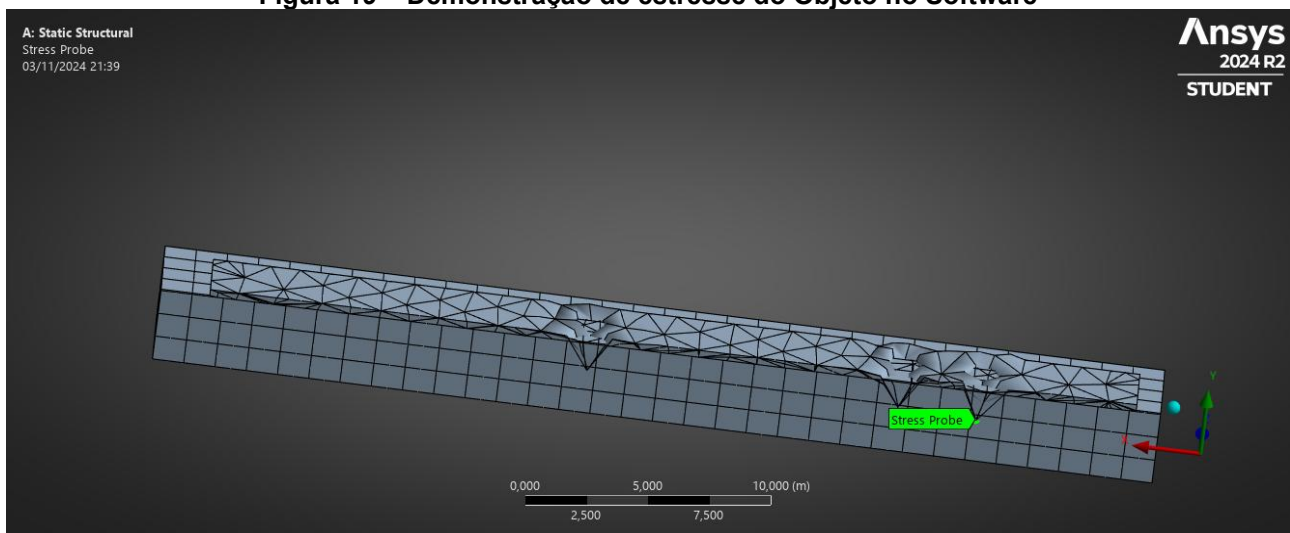
Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

Quadro 04 – Deformações Máxima e Mínima caso 1

Deformação Máx.	$1,6542 \times 10^{-9}$
Deformação Mín. Diferente de 0 (zero)	$1,838 \times 10^{-10}$

É possível então observar as deformações causadas pelas cargas que foram aplicadas, no estudo que foi avaliado, tem-se a deformação crítica, a deformação mínima e todas as deformações que acompanham o crescimento da força. Podem ser obtidos outros resultados de acordo com a necessidade do projetista, o software disponibiliza uma lista de forças, deformações e análises a serem feitas.

Figura 19 – Demonstração de estresse do Objeto no Software

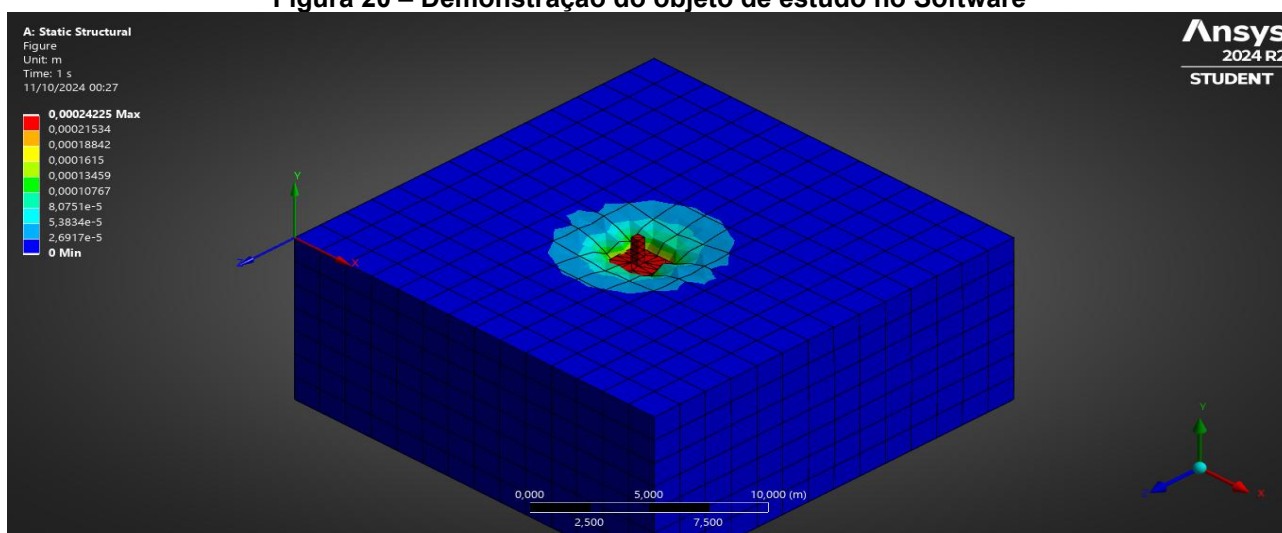


Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

O estresse sofrido pelo piso/solo são demonstrados na imagem 19 e demonstram como é a ação da carga.

- b. Resultado da análise da deformação referente ao trabalho sobre a fundação superficial considerando a interação solo estrutura pelo método dos elementos finitos.

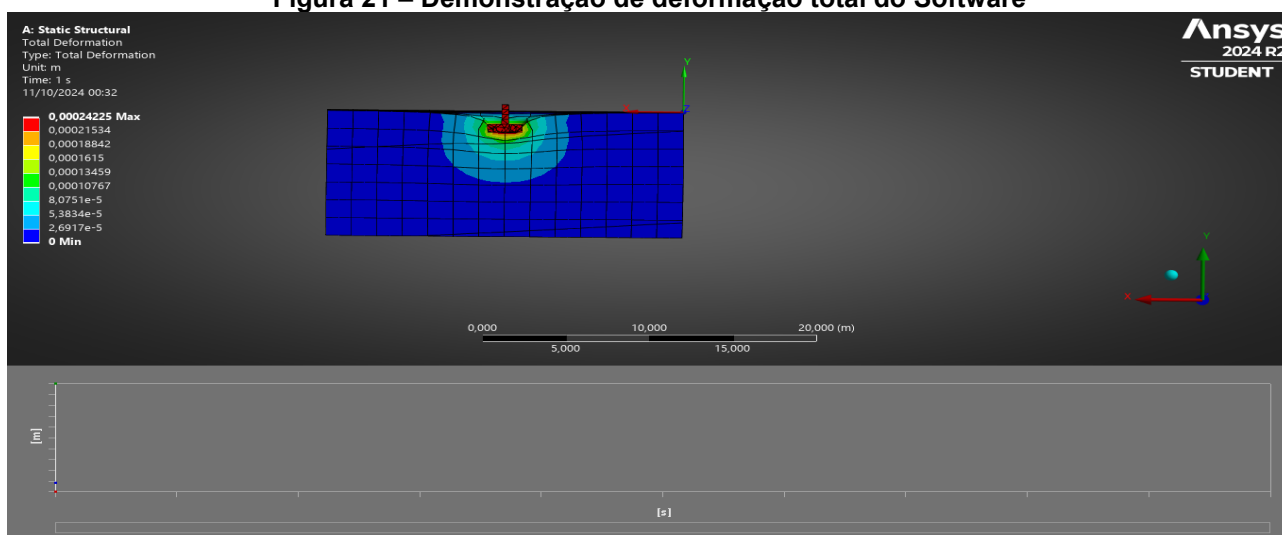
Figura 20 – Demonstração do objeto de estudo no Software



Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

A figura 20 mostra a vista superior do segundo estudo de caso.

Figura 21 – Demonstração de deformação total do Software



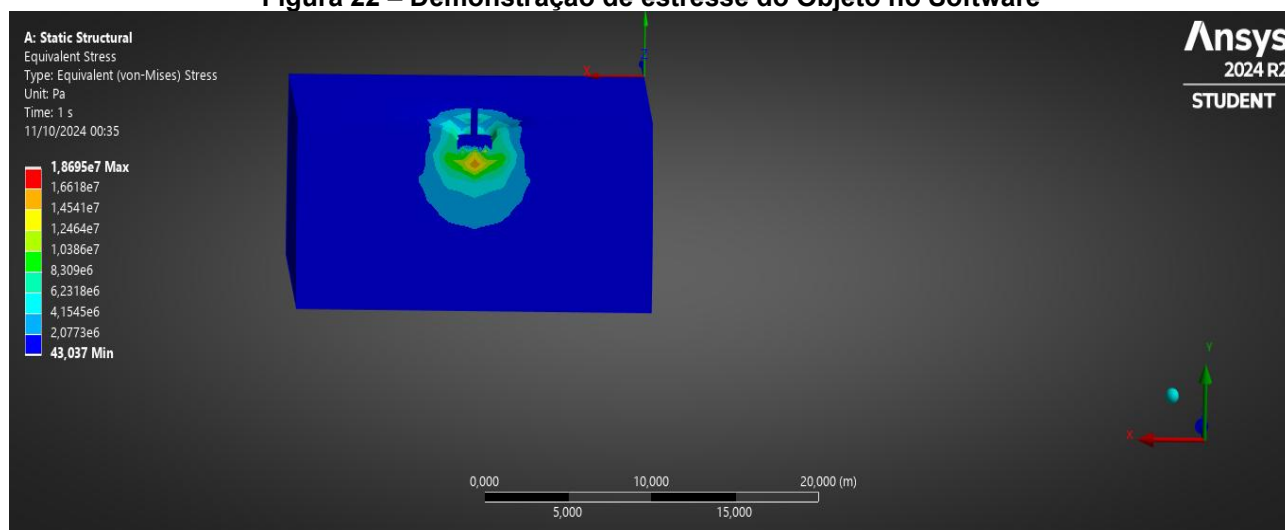
Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

Quadro 05 – Deformações Máxima e Mínima caso 2

Deformação Máx.	$2,4425 \times 10^{-4}$
Deformação Mín. Diferente de 0 (zero)	$2,8912 \times 10^{-5}$

Da mesma forma que o exemplo anterior, nas deformações causadas pelas cargas que foram aplicadas, tem-se a deformação crítica, a deformação mínima e todas as deformações que acompanham o crescimento da força.

Figura 22 – Demonstração de estresse do Objeto no Software



Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

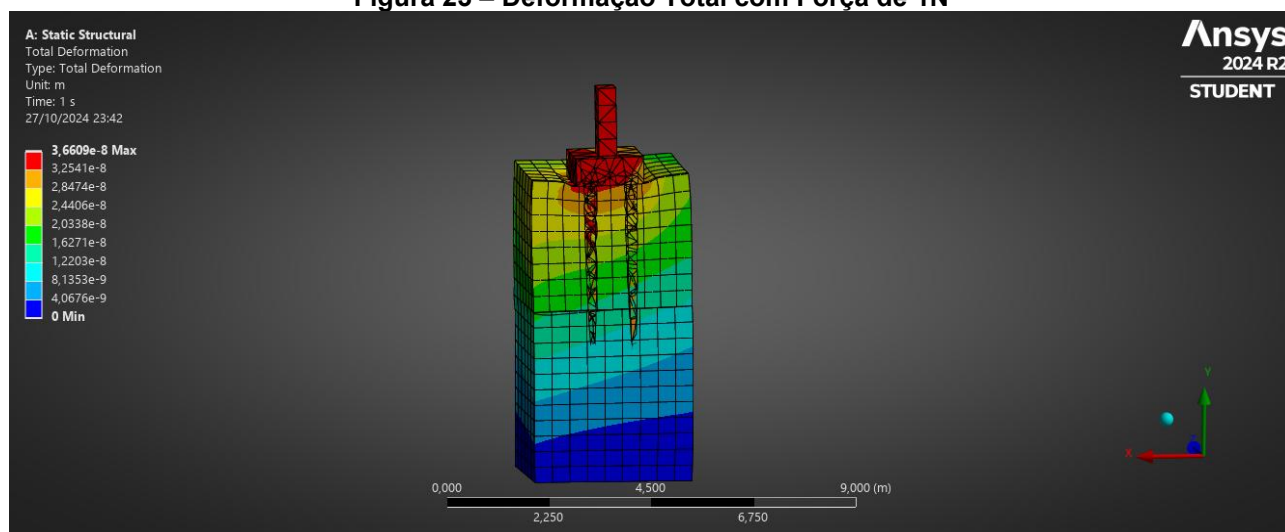
Na imagem 22 é feita a demonstração do efeito de estresse sofrido pelo solo após a carga agir sobre a sapata.

c. Resultado da simulação do estudo de caso

I. Teste com 1N

Aplicou-se então uma força de 1N e, acompanhando as imagens, temos as deformações ilustradas

Figura 23 – Deformação Total com Força de 1N



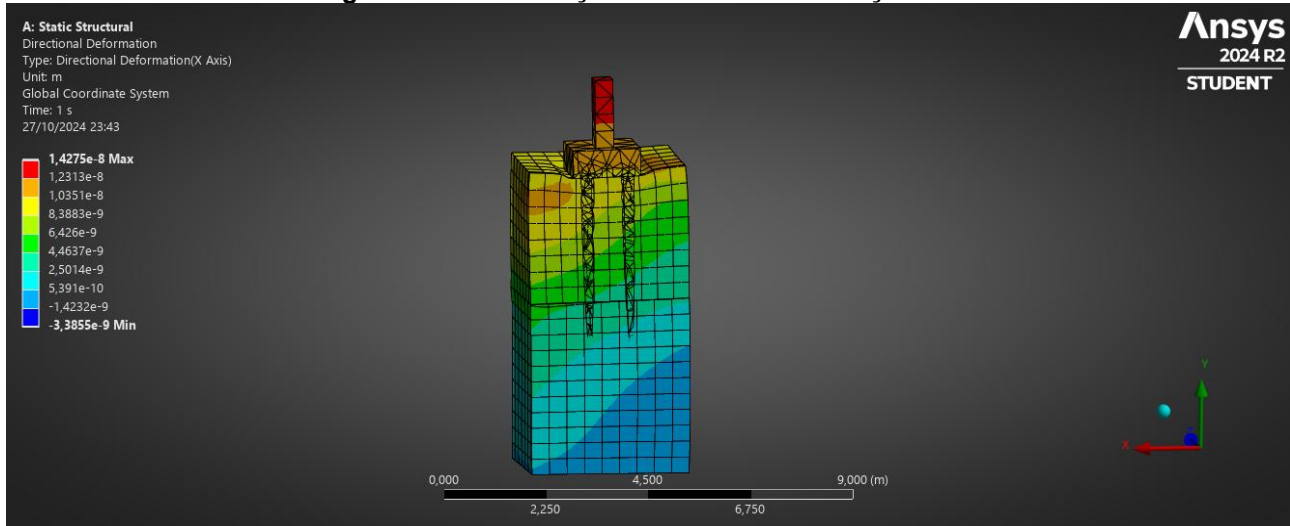
Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

Quadro 06 – Deformações Máxima e Mínima caso 3

Deformação Máx.	$3,6609 \times 10^{-8}$
Deformação Mín. Diferente de 0(zero)	$4,0676 \times 10^{-9}$

Para a carga de 1N tem-se uma deformação muito menor se comparada aos outros 2 testes.

Figura 24 – Deformação Direcional com Força de 1N



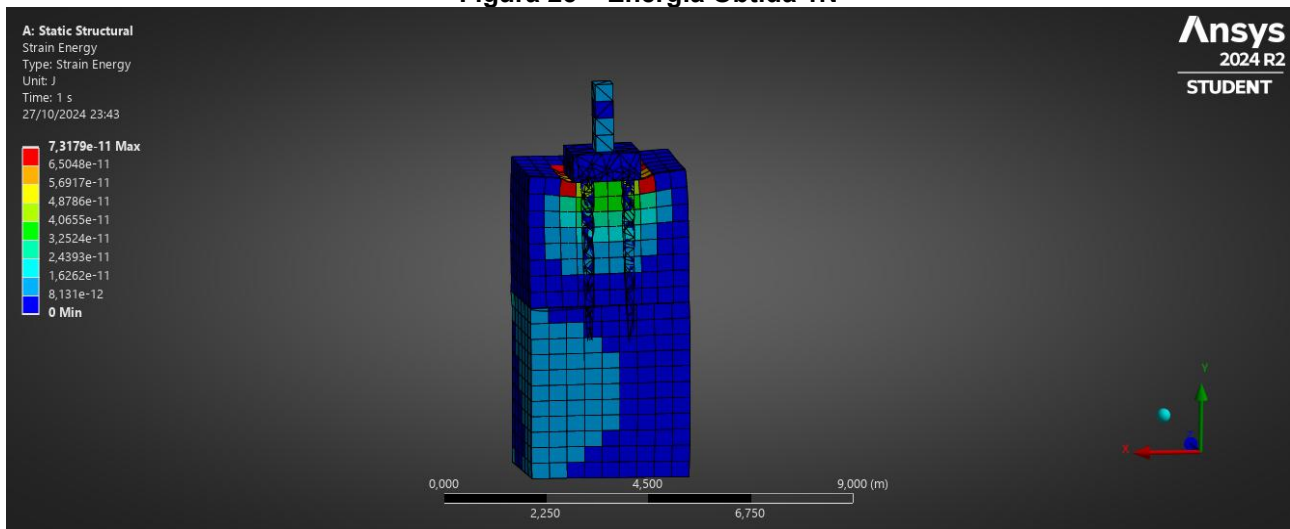
Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

Quadro 07 – Deformações Máxima e Mínima caso 3

Deformação Máx.	$1,4275 \times 10^{-8}$
Deformação Mín. Diferente de 0(zero)	$-3,855 \times 10^{-9}$

A mesma proporção se dá para a deformação direcional, como Figura 20 pode ser observado.

Figura 25 – Energia Obtida 1N



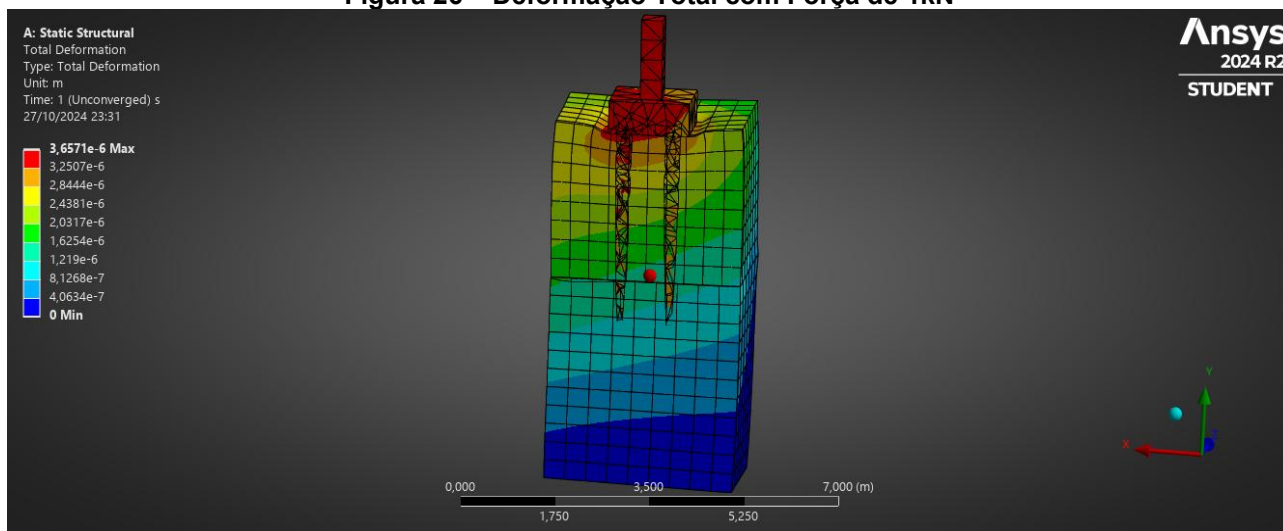
Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

Pode-se verificar de acordo com a imagem 25 qual a energia obtida com a aplicação da força de 1N na estrutura.

II. Teste com 1kN

Em seguida, com o mesmo exemplo, aplicou-se uma força de 1kN e, acompanhando as imagens, temos as deformações ilustradas.

Figura 26 – Deformação Total com Força de 1kN



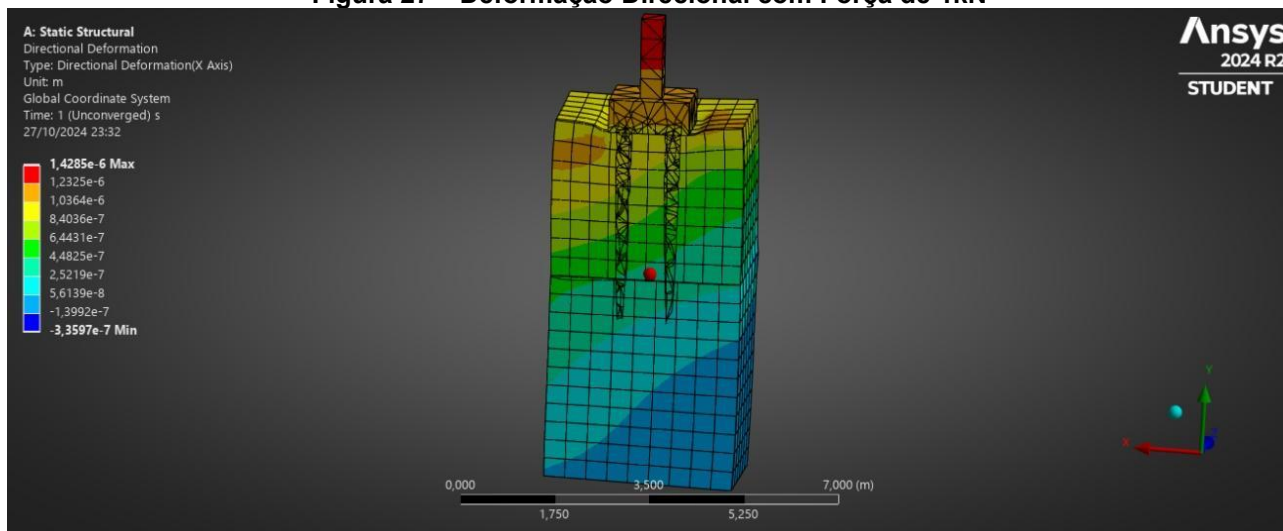
Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

Quadro 08 – Deformações Máxima e Mínima caso 3

Deformação Máx.	$3,6571 \times 10^{-6}$
Deformação Mín. Diferente de 0 (zero)	$4,0634 \times 10^{-7}$

Pode-se observar na figura 26 a variação com relação às deformações apresentadas no primeiro exemplo.

Figura 27 – Deformação Direcional com Força de 1kN



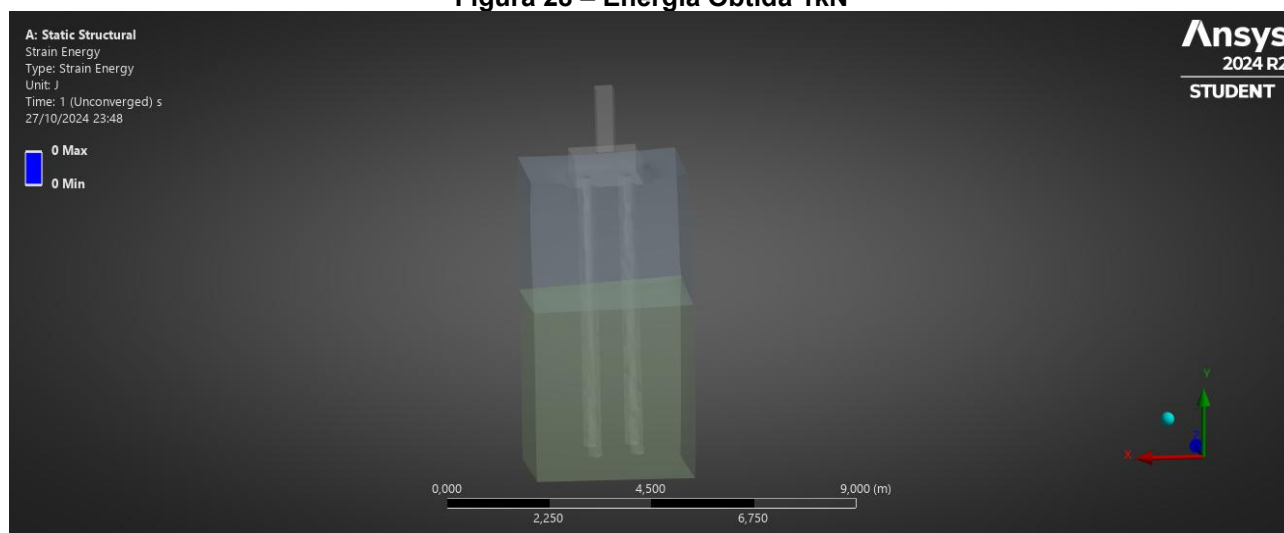
Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

Quadro 09 – Deformações Máxima e Mínima caso 3

Deformação Máx.	$1,4285 \times 10^{-6}$
Deformação Mín. Diferente de 0 (zero)	$-3,3597 \times 10^{-7}$

Da mesma forma, obteve-se o resultado a deformação direcional para a força de 1kN.

Figura 28 – Energia Obtida 1kN



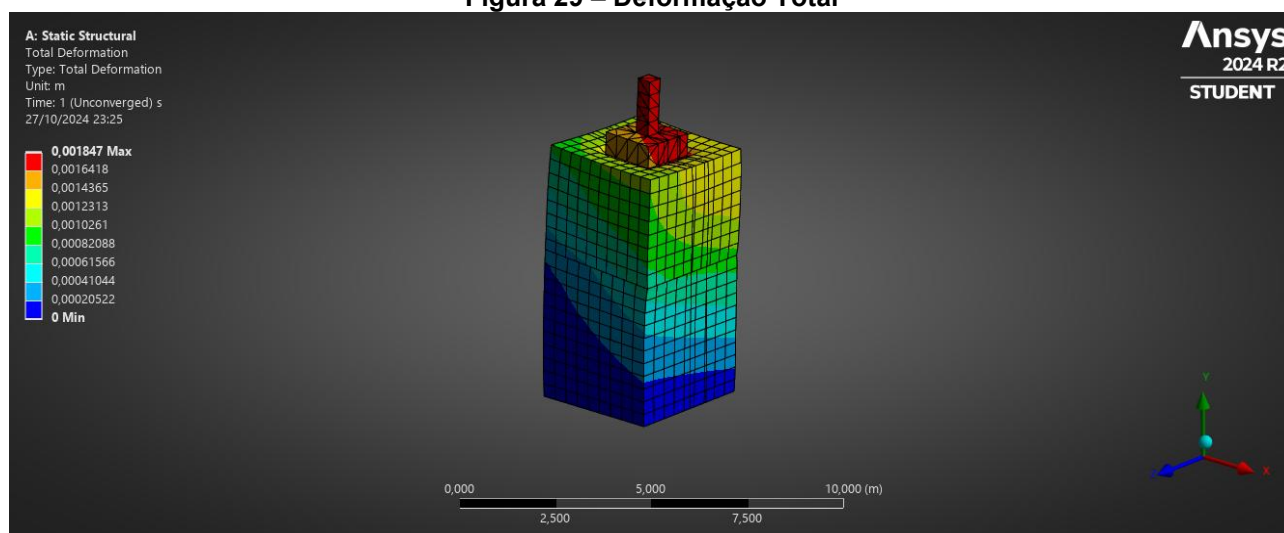
Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

Vale ressaltar como demonstrado na figura 28 que pelas propriedades dos materiais escolhidos, a energia extraída acaba não apresentando resultados em forças de 1kN ou superiores.

III. Teste com 100 kN

Para o estudo de caso, foram feitos testes com diferentes forças aplicadas no mesmo ponto, a fim de verificar as deformações e a energia gerada através da mesma, sendo assim, para o primeiro e principal exemplo, foi-se aplicada uma força de 100kN e, acompanhando as imagens 22 e 23, tem-se as deformações ilustradas.

Figura 29 – Deformação Total

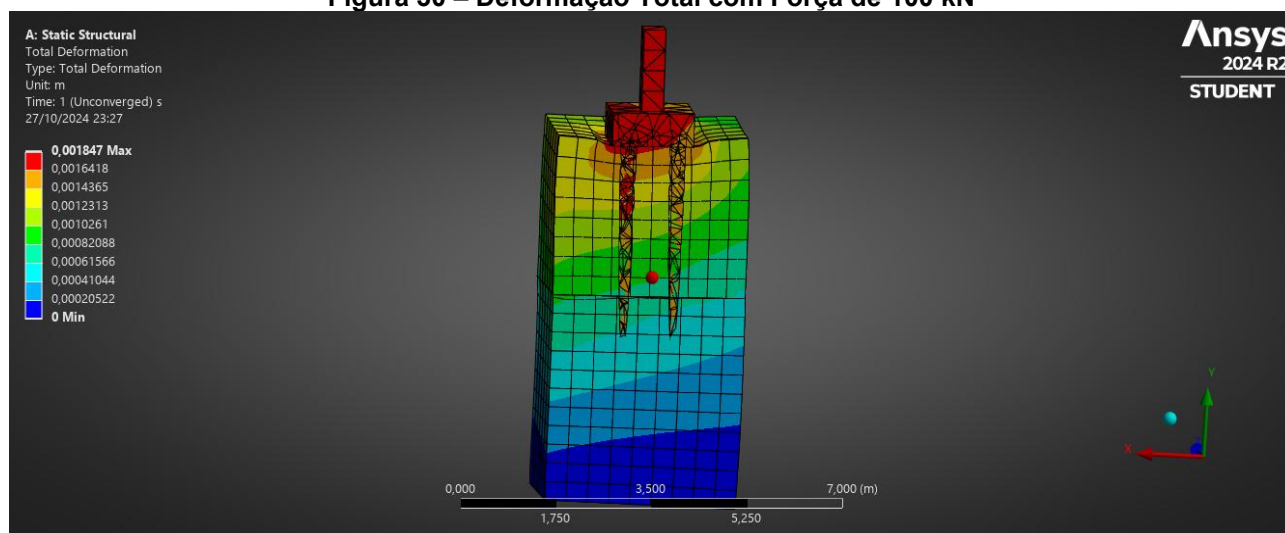


Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

Quadro 10 – Deformações Máxima e Mínima caso 3

Deformação Máx.	$1,847 \times 10^{-3}$
Deformação Mín. Diferente de 0(zero)	$2,0522 \times 10^{-4}$

Figura 30 – Deformação Total com Força de 100 kN



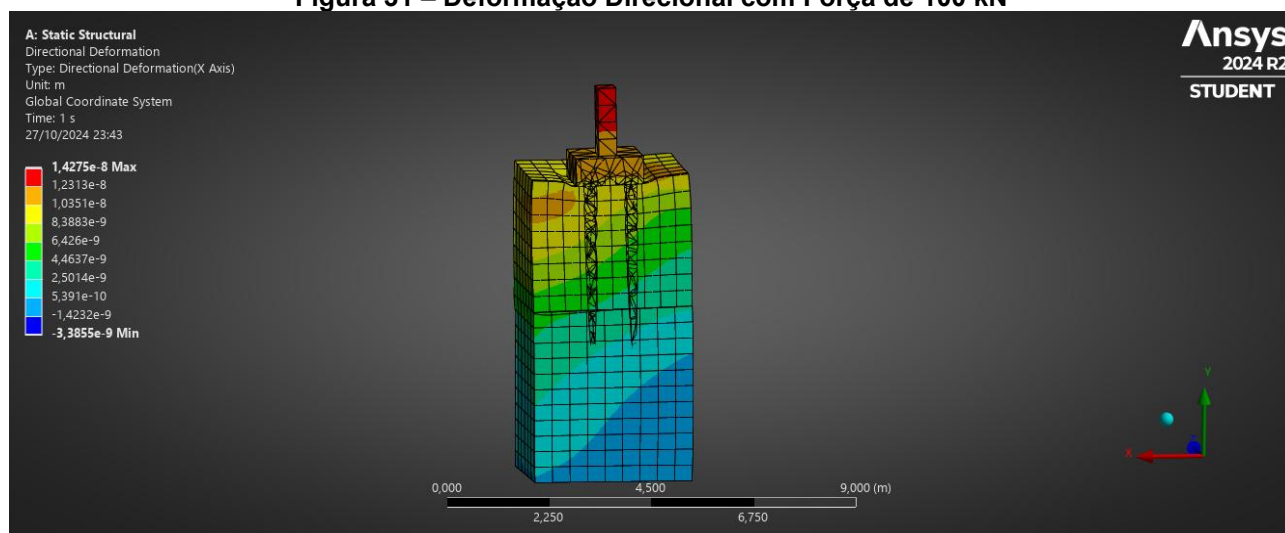
Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

Quadro 11 – Deformações Máxima e Mínima caso 3

Deformação Máx.	$1,847 \times 10^{-3}$
Deformação Mín. Diferente de 0(zero)	$2,0522 \times 10^{-4}$

As imagens 29 e 30 demonstram as deformações críticas e mínimas observadas com o aumento da força aplicada, destacando a capacidade do ANSYS em oferecer análises detalhadas.

Figura 31 – Deformação Direcional com Força de 100 kN



Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

Quadro 12 – Deformações Máxima e Mínima caso 3

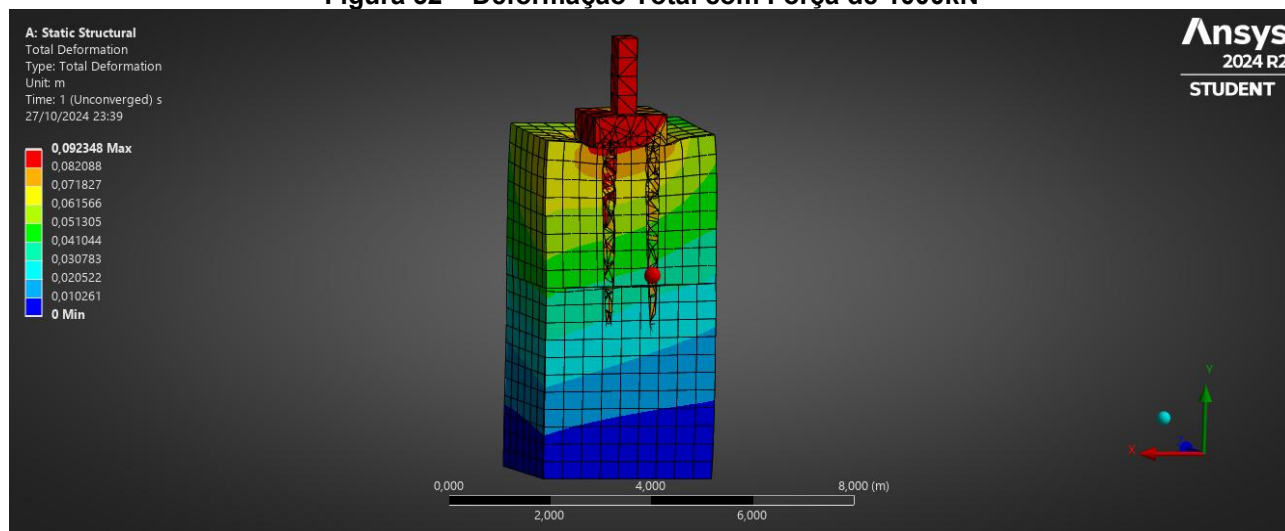
Deformação Máx.	$1,4275 \times 10^{-8}$
Deformação Mín. Diferente de 0(zero)	$-3,3855 \times 10^{-9}$

O mesmo serve para a deformação Direcional causada pela força aplicada, de acordo com a imagem 31.

IV. Teste com 1000kN

Em seguida, com o mesmo exemplo, aplicou-se uma força de 1000kN e, acompanhando as imagens, temos as deformações ilustradas.

Figura 32 – Deformação Total com Força de 1000kN



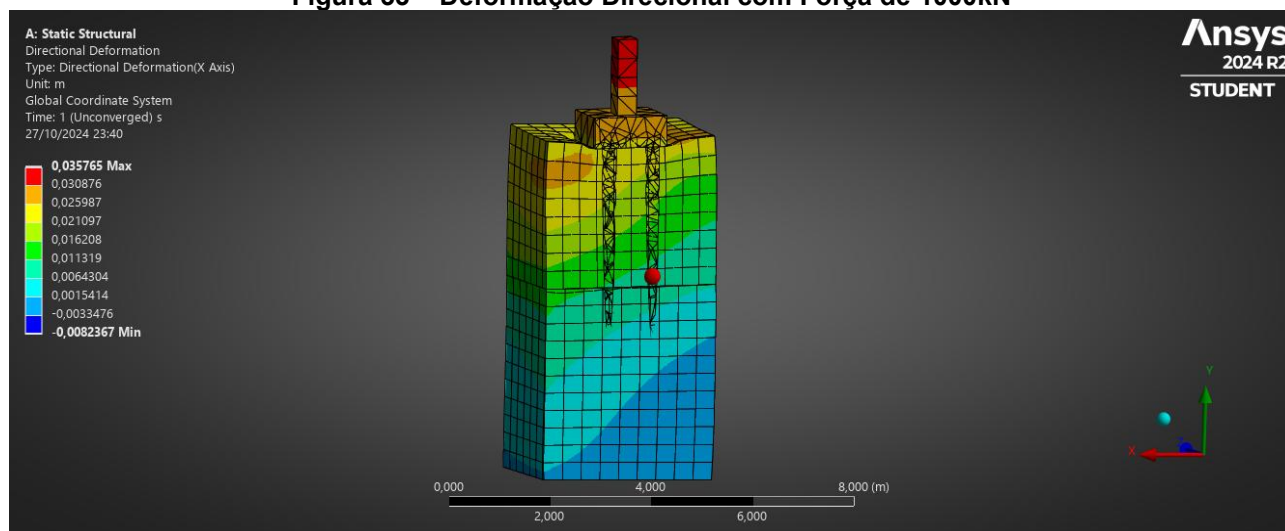
Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

Quadro 13 – Deformações Máxima e Mínima caso 3

Deformação Máx.	$9,2348 \times 10^{-2}$
Deformação Mín. Diferente de 0(zero)	$1,0261 \times 10^{-2}$

Tem-se uma deformação apresentada na figura 32 indiscutivelmente superior se comparada às outras que foram apresentadas com cargas diferentes e menores.

Figura 33 – Deformação Direcional com Força de 1000kN



Fonte: Imagens retiradas do software pelos autores do artigo (2024).

Quadro 14 – Deformações Máxima e Mínima caso 3

Deformação Máx.	$3,5765 \times 10^{-2}$
Deformação Mín. Diferente de 0(zero)	$8,2367 \times 10^{-3}$

O que implica também em uma deformação direcional superior no quesito de proporção numérica

d. Análise do estudo de caso

Quadro 15 – Resumo dos deslocamentos máximos caso 3

Estudo de Caso 3	Modelo Teórico	Método Utilizado	Deformação máx (mm)	Limite Admissível (mm)
1 N	Elástico Linear	Simulação no Ansys	$3,6609 \times 10^{-8}$	10^{-1}
1 kN			$3,6571 \times 10^{-6}$	
100 kN			$1,8470 \times 10^{-3}$	
1.000 kN			$9,2348 \times 10^{-2}$	

Fonte: Autores (2024).

Após feitos os ensaios com aplicações diferentes de forças, pode-se concluir que a deformação máxima obtida de $9,23 \times 10^{-2}$ mm para uma carga de 1000 kN está dentro dos limites admissíveis para fundações superficiais em solos arenosos. Esse resultado demonstra que o dimensionamento da fundação é adequado, garantindo segurança estrutural sem necessidade de superdimensionamento, o que otimiza custos de materiais e execução.

Embora o modelo elástico linear tenha sido aplicado nas simulações, um modelo elasto-plástico, como o de Mohr-Coulomb, pode oferecer uma análise mais realista das condições de carga próximas ao limite de ruptura do solo. A comparação entre esses modelos pode evidenciar limitações da abordagem elástica e indicar margens de segurança adicionais para o projeto.

E mesmo que os resultados apresentados sejam satisfatórios para os cenários simulados, a simplificação do solo como isotrópico e homogêneo representa uma limitação. Em condições reais, solos apresentam heterogeneidade significativa, o que poderia impactar os recalques diferenciais e a distribuição de tensões. Para mitigar esse efeito, estudos futuros poderiam incorporar modelos avançados, como o Cam-Clay, que representam melhor o comportamento de solos argilosos saturados.

A aplicação do MEF no estudo da interação solo-estrutura permitiu validar modelos teóricos amplamente aceitos na engenharia civil. No entanto, a inclusão de análises mais complexas, como plasticidade e heterogeneidade do solo, poderia trazer maior realismo às simulações, aproximando os resultados das condições reais de campo.

É importante ressaltar que o uso do Método dos elementos infinitos para o dimensionamento de estruturas visando a interação solo-estrutura é algo relativamente novo e não foram encontrados trabalhos que façam comparativos diretamente relacionados a essa interação em específico, porém, é possível citar um artigo de “Análise de Pilares de Concreto Armado de Ultra-Alto Desempenho Utilizando o Software ANSYS” onde os autores Felipe Pereira Vergara, José Guilherme Oliveira Salati, Paula Manica Lazzari e Adriano Rodrigues da Silva buscam avaliar o comportamento de pilares de concreto armado de ultra-alto desempenho, submetidos à compressão axial, utilizando o Método dos Elementos Finitos, foi feita a análise dos resultados comparando os dados obtidos de forma experimental com as curvas numéricas: carga x deformação do concreto, carga x deformação da armadura longitudinal e carga x deformação da armadura transversal.

Ao analisar os resultados obtidos do artigo com o modelo de armadura discreta, verificou-se uma maior capacidade de carga no modelo numérico em comparação com o experimental, com diferença de 8% na carga máxima. Contudo, a presença ou ausência de

camisas de aço nas extremidades do pilar não afetou significativamente a carga de ruptura. Por outro lado, o modelo de armadura incorporada mostrou-se mais alinhado aos resultados experimentais ao incluir camisas metálicas, resultando em uma carga de ruptura bastante próxima ao observado experimentalmente. Esse modelo foi considerado mais representativo da realidade, devido ao efeito das camisas de aço em aumentar a seção transversal, reduzir o comprimento de flambagem e fornecer confinamento nas áreas críticas. Assim, para os pilares analisados (P00A, P00B e P00C), o uso de camisas de aço melhorou a aderência aos resultados experimentais, principalmente no comportamento pós-pico das curvas carga-deformação.

A modelagem de pilares de UHPC submetidos à compressão axial apresentou resultados semelhantes aos pilares ensaiados experimentalmente, quando a modelagem é feita pelo modelo de armadura incorporada. Além de facilitar consideravelmente o lançamento da geometria, reduzindo o tempo da modelagem, apresenta resultados semelhantes ao experimental mesmo após o pico de carga.

5 CONCLUSÃO

O método dos elementos finitos tem se tornado cada vez mais relevante a nível acadêmico, o artigo tem como objetivo apresentar o método aplicado no software Ansys e sua importância para os profissionais na área de engenharia civil.

O uso do MEF no ANSYS permitiu modelar, com elevado grau de precisão, propriedades fundamentais dos materiais, como elasticidade, plasticidade e resistência ao cisalhamento. A capacidade do software em integrar parâmetros geotécnicos, como módulo de elasticidade, ângulo de atrito, coesão e tensões residuais, resultou em análises detalhadas e representações fiéis das condições reais de carregamento e resposta estrutural contribuindo significativamente para prever deformações, recalques e tensões críticas, elementos essenciais para garantir a segurança e a durabilidade das estruturas.

O trabalho evidenciou a eficácia do MEF no dimensionamento de fundações e no estudo da interação solo-estrutura, destacando sua relevância para projetos mais seguros e econômicos. Destaca-se a importância de combinar a precisão numérica do MEF com o conhecimento geotécnico detalhado do solo e dos materiais estruturais. Essa abordagem integrada não apenas melhora a compreensão do comportamento estrutural, mas também permite otimizar o dimensionamento de fundações, evitando super dimensionamentos desnecessários que aumentam os custos ou sub dimensionamentos que comprometem a segurança.

É importante entender também as limitações desse estudo, o MEF aplicado a solo é um conceito relativamente novo, apesar de ser usado no setor acadêmico de certo modo, ainda não existe uma gama de estudos experimentais que deem base para aplicações diretas em casos reais, por isso existe todo um processo que precisa ser feito de análise comparativa entre o Método aplicado no software e casos experimentais para que a partir disso se possa ter embasamento e uma parametrização comprovada. Em questões de parametrização relacionadas ao software, o mesmo apresenta opções de definição em quase todos os quesitos, é possível escolher as características dos materiais, as formas geométricas, os elementos de análise e também é possível refinar e modificar a malha. O software apresenta dificuldades em identificar alguns esforços dependendo da composição dos materiais, alguns tipos de materiais, caso aplicada uma força mais robusta, podem não apresentar resultados de algumas análises, como no nosso caso onde a “energia gerada” pela carga aplicada acima de 1 Newton não apresentou nenhum resultado.

REFERÊNCIAS

- A. N SCHOFIELD - Critical State Soil Mechanics-McGraw-Hill - **European civil engineering series** (1968)
- ANSYS. **Manual do Ansys**, 2018.
- ARUL M. B, MICHAL J. G. - Critical state soil mechanics via finite elements - **Ellis Horwood**. 1987
- BRAJA M. D. - Advanced Soil Mechanics-Spon Press. 2008
- CAPUTO H. P. - Mecânica dos Solos e suas Aplicações. **6ed vol1**
- DAVID M. P. and LIDIJA Z. - Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering Vol.1 - **Theory-Thomas Telford Publishing**. 1999
- GAMA, S. C.; LIMA, J. M.; ALVARENGA, R. C.; SOUSA, D. M.; SOUZA, S. L.; MELO, S. B.; SCHAEFER, C. E. Variabilidade de atributos do solo sob pastagens e mata atlântica na escala de microbacia hidrográfica. SciELO, 2003. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rcd/a/6fVB8kjZqmgJwjT6fVrfljp/?lang=pt>>. Acesso em: 14 out. 2024
- MENDONÇA, J. A. Análise da interação solo-estrutura. 2020. Dissertação, **Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro**, 2020.
- NBR 6122. Projeto e execução de fundações. ABNT, 2010.
- OLIVEIRA, F. A.; SANTOS, M. H. A importância da análise da interação solo-estrutura em projetos de fundações. **Revista de Engenharia Civil**, v. 30, n. 3, p. 215-225, 2019.
- OLIVEIRA, F. A.; SOUZA, R. B. Estudo da capacidade de carga de fundações em solos argilosos. **Revista Brasileira de Geotecnia**, v. 15, n. 2, p. 123-136, 2019.
- PEREIRA, L. M.; COSTA, T. R. Modelagem numérica na avaliação de fundações. **Revista de Construção Civil**, v. 12, n. 1, p. 45-59, 2021.
- RUDNEY C. Q. Geologia e Geotecnia básica para Engenharia Civil, **ed. São Paulo: Edgar Blucher Ltda**, 2016.
- SANTOS, E. F.; MENDONÇA, J. A.; OLIVEIRA, F. A. Aplicações do Método dos Elementos Finitos em fundações. **Jornal de Engenharia Civil**, v. 8, n. 2, p. 87-100, 2019.
- SANTOS, M. H. Análise de solos expandidos e suas implicações em fundações. **Revista de Engenharia Geotécnica**, v. 10, n. 3, p. 205-218, 2020.
- SILVA, R. P. Importância da modelagem numérica na engenharia de fundações. **Revista Brasileira de Geotecnia**, v. 17, n. 4, p. 301-312, 2018.
- SILVA, R. P. Métodos numéricos em geotecnia. 2015. Tese, **Universidade de São Paulo, São Paulo**, 2015.
- VELLOSO, D. A. Processos de fabricação mecânica. **Curitiba: Livro Técnico**, 2011.