CBPAT 2020 ANAIS
CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES
DE 15 A 17 DE ABRIL | FORTALEZA - CE
http://dx.doi.org/10.4322/CBPAT.2020.213
ISBN 978-65-86819-05-2

ANÁLISE DE DANOS DECORRENTES DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA EM ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO

FILHO, LUIS CARLOS DO N.
Estudante
Universidade Federal do Ceará
Ceará, Brasil
filho.lcf@gmail.com

PAULO, RENAN NOGUEIRA
Estudante
Universidade Federal do Ceará
Ceará; Brasil
renanpaulo@alu.ufc.br

PINTO, MARCELO FREIRES
Estudante
Universidade Federal do Ceará
Ceará; Brasil
marcelofreires18@gmail.com

MAIA, CAMILA LIMA
Professor, Mestre
LAREB, Universidade Federal do Ceará
Ceará; Brasil
camilalima@det.ufc.br

MESQUITA, ESEQUIEL F. T.
Professor, PhD
LAREB, Universidade Federal do Ceará
Ceará; Brasil
emesquita@ufc.br

RESUMO

A estabilidade de estruturas é fator essencial para as atividades desenvolvidas pela engenharia civil e estão diretamente relacionadas ao comportamento do solo sobre o qual se encontra. Todavia, não se pode utilizar conceitos voltados a materiais homogêneos e bem definidos em análises do solo, uma vez que esses possuem estruturas heterogênea e descontínuas impedindo a aplicação de conceitos da mecânica do sólidos. Assim, percebe-se a importância da compatibilidade entre o esforço aplicado pela infraestrutura de uma edificação no solo com a resistência do terreno. Embora os estudos geotécnicos garantam uma certa segurança às obras, a ocorrência de acidentes não previstos durante o desenvolvimento do projeto podem vir a prejudicar o desempenho das construções com a presença de manifestações patológicas. Dessa forma, o presente artigo objetiva a investigar, apresentar e avaliar incidentes que interferem no desempenho da interação solo-estrutura e na sequência, caracterizar a distribuição das tensões. Para isso, realizou-se análises numéricas através do Métodos dos Elementos Finito (MEF) possibilitando a visualização de esforços provenientes de eventos como recalques diferenciais em uma construção advindos da redução do desempenho do solo em conjunto com as estruturas de fundação. Assim sendo, o trabalho encontrou resultados que demonstram comportamento característicos e de grande importância para o entendimento do surgimento de danos, especialmente fissuras, além de apresentar uma ferramenta eficiente de modelagem e análise facilitando a compreensão de eventos imprevistos.
Palavras-chave: Solo-Estrutura, Análise Estrutural, Modelagem Numérica.

ABSTRACT

The stability of structures is an essential factor for the activities developed by civil engineering and are directly related to soil behavior on which you are. However,concepts focused on homogeneous and well-defined materials cannot be used in soil analyses, since they have heterogeneous and discontinuous structures preventing the application of concepts of solid mechanics. Thus, it is perceived the importance of compatibility between the effort applied by the infrastructure of a building in the soil with the resistance of the terrain. Although geotechnical studies ensure a certain safety for the works, the occurrence of accidents not foreseen during the development of the project may impair the performance of buildings with the presence of pathological manifestations. Thus, this article aims to investigate,present and evaluate incidents that interfere in the performance of soil-structure interaction and subsequently characterize the distribution of tensions. For this, numerical analyses were performed using finite element methods (FEM) enabling the visualization of efforts from events such as differential repressions in a building resulting from the reduction of soil performance in conjunction with the foundation structures. Therefore, the study found results that demonstrate characteristic behavior and of great importance for understanding the emergence of damage, especially cracks, besides presenting a efficient modeling and analysis tool facilitating the understanding of unforeseen events.
Keywords: Soil-Structure, Structural Analyses, Numerical Analyses.

ISBN 978-65-86819-05-2

1. INTRODUÇÃO

O desempenho de construções está diretamente ligado à eficiência da interação solo-estrutura e a estabilidade dessas pode ser influenciada pelo comportamento do solo sobre o qual se encontra. Para garantir a funcionalidade e durabilidade das edificações, o estudo da atuação dos maciços de solo, juntamente com o sistema estrutural, possibilita a determinação da grandeza dos recalques e a influência na redistribuição dos esforços solicitantes. Mesmo assim, normalmente os projetistas consideram a superestrutura livre de qualquer movimentação vinda das fundações, e o projeto destas, muitas vezes não leva em consideração os parâmetros adotados no planejamento dos elementos estruturais externos ao solo, ou seja, existe uma incompatibilidade que faz com que o resultado não conduza a realidade o que implica a médio ou curto prazo a presença de manifestações patológicas (REIS, 2000).

De acordo com Antonniazzi (2011), geralmente os procedimentos adotados em escritórios voltados para o dimensionamento, adotam a hipótese de apoios indeslocáveis, por outro lado, engenheiros geotécnicos consideram as ações dos apoios nas fundações de modo que os deslocamentos sejam compatíveis com a superestrutura, não ocasionando danos que comprometam a estabilidade, porém, existem variáveis que implicam essas considerações, como a rigidez da estrutura, e o processo construtivo no qual existem cargas progressivas como, o peso próprio da obra, e até cargas desconhecidas como maquinários ou materiais estocados.

Uma edificação é composta por diversos sistemas, quer seja elétrico, quer seja hidráulico, quer seja estrutural. Ainda, observa-se que deve considerar a compatibilidade entre esses projetos no desenvolvimento da construção, partindo do princípios de que embora estejam na mesma obra, o objeto de estudo possui mecanismos diferentes. Nesse sentido, o conjunto solo-estrutura relaciona as propriedades da superestrutura com a infraestrutura e o comportamento do maciço de solo, assim, o desconhecimento das individualidades de cada um desses sistemas pode influenciar negativamente no desempenho, quando desconsiderados.

Os estudos desenvolvidos na mecânicas do solos apresentam fatores particulares dos elementos que o compõe. Como aponta Terzaghi (1993), não se pode utilizar conceitos voltados a materiais homogêneos e bem definidos em análises do solo, uma vez que esses possuem estruturas heterogênea e descontínuas impedindo a aplicação de conceitos da mecânica do sólidos.

Diversos fatores podem influenciar na atuação do solo quando está sujeito a esforços externos. As características variam desde o tipo de formação a classificações técnicas obtidas em ensaios como granulometria, resistência mecânica, dentre outras. Contudo, uma vez classificado o maciço de solo, existem fatores adversos que podem vir a modificar tais propriedades antes identificadas. Um evento comum e que pode vir a alterar as condições estáveis de uma fundação é a presença estática ou dinâmica de água no solo, ocasionando diversos fenômenos na construção civil, como erosão, piping ou problemas relacionados ao aumento de poropressão.

Segundo Cunha (2002), o qual foi citado por De Assis (2009), trabalho nos quais ambos autores realizam um estudo da resistência à penetração (RP) em solos com diferentes composições, observaram que em solos cujas propriedades mecânicas dependem essencialmente das forças de coesão, a resistência à penetração permanece praticamente constante ao longo da profundidade. Com o aumento do teor de água, decresce a atuação das forças de coesão entre as partículas do solo e o atrito interno, promovendo a diminuição da RP. Ademais, generalizaram para todos os solos uma relação inversamente proporcional da resistência à penetração e o teor de água.

Como citado, as edificações são compostas por diversos sistema, cujos projetos compatibilizados minimizam a possibilidade de interferência ou danos, e além disso acarretam significativa redução de custos, visto a existência de fatores adversos que podem danificar elementos estruturais. Além disso, a presença da água no solo é fator que modifica a atuação dos sistemas de fundações e consequentemente a estrutura como um todo. Sendo assim, este trabalho objetiva analisar um hipotético no qual a estrutura não estava preparada para uma abertura no solo abaixo dos elementos estruturais, além disso, o artigo visa uma modelagem numérica através do Método do Elementos Finitos, que

ISBN 978-65-86819-05-2

possibilite a visualização e análise do comportamento das tensões e consequentemente a ocorrência de danos na estrutura de um edifício de múltiplos pavimentos.

2. MODELO NUMÉRICO

Como o aumento dos processamentos nos computadores, a adoção de análises numéricas têm sido frequente utilizada para estudos de construções de engenharia, uma vez que esse fato implica no aumento das possibilidade de estudos, além de resultados precisos nas simulações realizadas (Mendes, 2007). Dessa forma, as análises numéricas realizadas neste trabalho desenvolveram-se através do Métodos dos Elementos Finitos (MEF) com a utilização do software ANSYS® versão 17.1.

O processo de modelagem no software consiste em etapas, sendo essas, a seleção dos materiais com respectivas propriedades, seguido da construção da geometria, isto é, a estrutura do edifício com o dimensionamento geométrico estabelecido no projeto. Logo após, constrói-se a malha que representa o modelo matemático discretizado da geometria definido na etapa anterior. Assim, pode-se estabelecer as condições de contorno do problema, como suportes fixos, cargas acidentais e permanentes, contatos, etc.. Finalmente, escolhe-se os resultados cabíveis ao problemas, tensões, deformações, deslocamento, dentre outros (Figura 1).

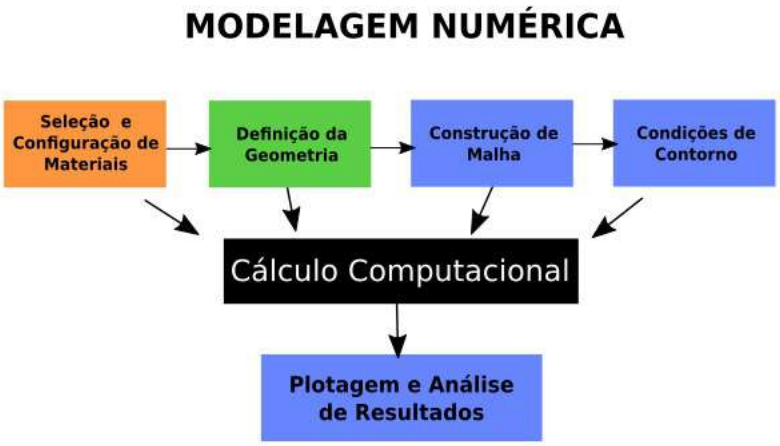


Figura 1: Fluxograma do Procedimento de Modelagem Numérica

A situação hipotética foi baseado numa ocorrência real que consistiu em fissuras no contrapiso do pavimento térreo de uma edificação de múltiplos pavimentos na qual o sistema hidráulico foi danificado e o fluxo de água causou a erosão das partículas no solo abaixo do contrapiso, ocasionando um aprofundamento no local.

Para o estudo de danos escolheu-se uma edificação de múltiplos pavimentos na qual pôde-se adicionar cargas comumentes entradas em construções desse porte que permitisse a visualização do comportamento danoso da estrutura. Adaptado de Cardoso (2013), o projeto estrutural constitui-se com 5 pavimentos em estrutura de concreto armado. Os pilares retangulares com dimensões 12 x 40 cm são ligados por vigas baldrames e por padrão adotou-se uma espessura média de 5 cm ao piso no pavimento térreo construído com concreto.

2.1 Configuração dos materiais

Conforme Brandão (2016), o qual cita Costa (2009) e Lourenço (2002), uma modelagem pode ser realizada de três formas, sendo essas, Micro-modelagem detalhada: onde são modeladas separadamente as unidades de alvenaria, argamassa e interfaces unidade-argamassa, sendo as unidades de alvenaria e argamassa representados por elementos contínuos e as interfaces unidade-argamassa por elementos descontínuos; Macro-modelagem: é efetuada a representação das unidades, da argamassa, e da interface unidade-argamassa como um único elemento contínuo equivalente, os macroelementos, estes que são modelos simplificados que reproduzem as características do

ISBN 978-65-86819-05-2

comportamento da estrutura como um todo. Micro-modelagem simplificada: Basicamente um meio termo entre as duas formas anteriores, a modelação das unidades é ampliada até aos eixos médios da argamassa, e são representadas por modelos contínuos, sendo o comportamento das juntas e das interfaces representados em conjunto como elementos descontínuos.

Em um modelo numérico de grande porte é necessários realizar algumas considerações que torne possível a análise. Haja vista que na construção civil os sistemas são instituídos com materiais diferentes trabalhando em conjunto é inviável a representação de todos os elementos uma vez que o comportamento desse pode ser visualizado semelhante a um material composto com propriedades equivalentes ao conjunto. Assim, para o material concreto armado utilizado no modelo foram adicionada as propriedades expressas no Quadro 1, de acordo com a NBR 6118:2014.

Quadro 1: Propriedades mecânicas do concreto armado utilizadas

PROPRIEDADE MECÂNICA	VALOR
E(GPa)	30,00
Fc(MPa)	30,00
ρ(Kg/m³)	2500
V	0,20

2.2 Desenvolvimento da Geometria e Criação da malha

Para a construção do modelo em 3D foi adaptado o edifício utilizado por Cardoso (2013) e concebida por meio de software CAD, interno ao programa de simulação, priorizando os elementos estruturais da construção, como vigas, pilares, lajes e piso. Logo após a geometria foi discretizada num modelo numérico em elementos finitos (Figura 2), fazendo uso do programa *Ansys®*, versão 17.1. Por fim, antes de adicionar as condições de contorno foi obtida uma malha configurada com um método de aplicação de malha Tetraédrica correspondendo a um elemento SOLID187, que apresenta 3 graus de liberdade para cada um de seus 10 nós, com um comprimento de 0,5 m nos lados obtendo um total de 68573 nós distribuídos em 31709 elementos.

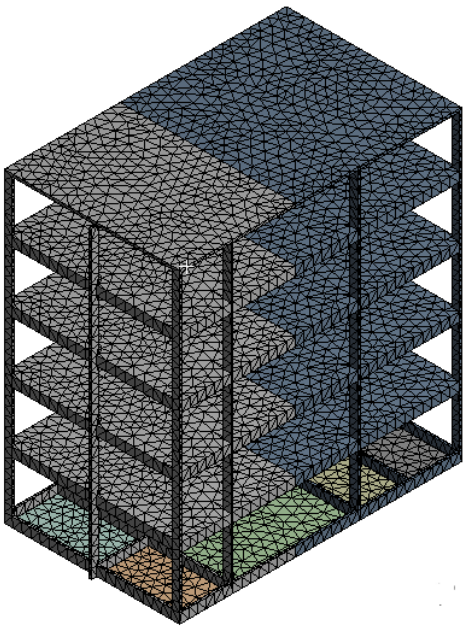


Figura 2: Distribuição dos elementos de Malha

ISBN 978-65-86819-05-2

2.3 Condições de contorno

A condições de contorno se dividem em apoios fixos, aplicações de forças e condições específicas aplicadas na geometria. No modelo, a geometria em contato com o solo foi fixada indicando que o solo é um elemento que não sofre deformações exceto na região do ponto escolhido em cada análise para simbolizar a degradação causada pelo fluxo de água reduzindo a eficiência da interação solo-estrutura.

Em sequência, aplicou-se a força gravitacional responsável pelo peso da estrutura, logo após foram adicionadas cargas de acordo com a ABNT 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Os pavimentos receberam cargas permanentes conforme sua finalidade estabelecida, além do mais, houve uma variação na carga acidental que recebe um fator de redução segundo o número de pavimentos acima do piso ao qual se aplica.

De acordo com o expresso na Figura 3, P1 simboliza o vetor da força gravitacional, ao passo que os pavimentos acima de P2, incluindo a cobertura, receberam uma carga permanente de 2 kN/m² por ter sido consideradas áreas residenciais, conforme a normatização, ainda acrescido de uma carga acidental de 3 kN/m² sem fator de redução. O pavimento indicado por P3, também considerado espaço residencial, recebeu uma carga permanente de 2 kN/m² adicionada a uma carga acidental de 3 kN/m², com uma redução de 20%. No térreo, P4, atribui-se carga permanente correspondente ao valor de 3 kN/m² refletindo a presença de automóveis ou maquinário de utilização industrial, acrescentando-se mais 3 kN/m² para as cargas acidentais com um fator de redução de 40%.

O indicador P5 representa a fixação do edifício, essa condição recebeu as faces que não seriam afetadas pela falta de suporte advindo do solo. Durante as simulações, realizou-se a retirada de contato em determinados pontos, simbolizando as regiões afetadas e fazendo com que solicitações fossem direcionada para os demais elementos compositivos, sendo necessário a análise estática para a verificação do comportamento das tensões.

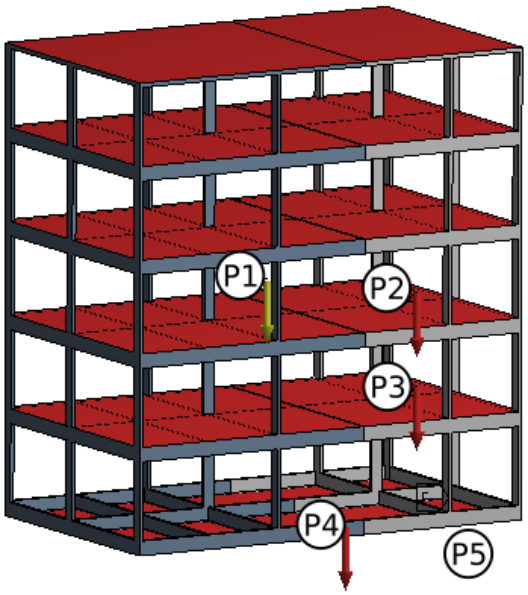


Figura 3: Condições de controle adotadas no programa de simulação.

ISBN 978-65-86819-05-2

2.4 Análise estática

A simulação desenvolveu-se em duas partes descritas como análises A e B. Primeiramente, buscou-se estudar o comportamento do pavimento térreo, partindo do princípio de que este não foi projetado para atuar como as lajes, logo após a ocorrência de erosão das partículas do solo abaixo do contrapiso, que antes era responsável por transmitir o esforços ao solo, passando a receber solicitações causadas pelas cargas no pavimento. Para isso, foi selecionado 3 pontos estratégicos que pudessem representar o exemplo abordado localizados nas áreas que não possuem pilares e consequentemente sem a presença de sapatas (Figura 4).

Em seguida, observou-se a necessidade de verificar o comportamento estrutural das fundações com a perda de material imediatamente abaixo da infraestrutura, sob a justificativa de possíveis deslocamentos nas sapatas. A análise tratou do comportamento das tensões nos pilares uma vez que esses estariam exposto a solicitações não previstas em projetos, novamente, foram escolhidos 3 pontos estratégicos (Figura 4). Foi atribuído ao modelo a ideia de que as sapatas correspondentes aos demais pilares estejam garantindo estabilidade exceto nos ponto selecionados.

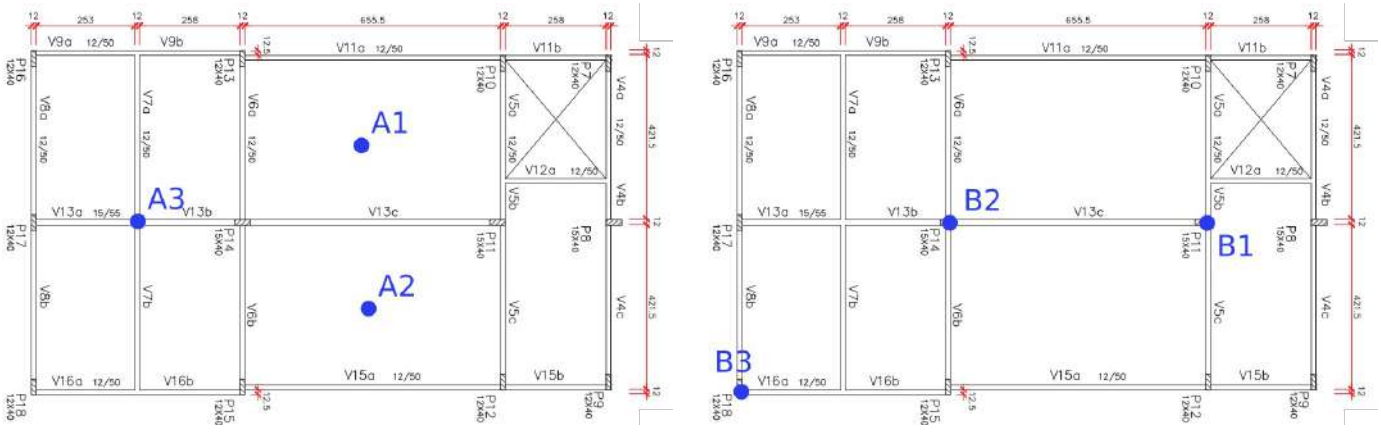


Figura 4: Representação em planta da distribuição dos pontos estratégicos escolhidos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o procedimento citado, pôde-se obter os resultados para as análises (A e B). Para a Análise A, cujos resultados apresentam-se na Figura 5, que mostra a Máxima Tensão Equivalente de *von Mises* para cada ponto escolhido. Para as configurações de contorno adotadas, os pontos A1 e A2 tiveram comportamentos semelhantes com um intensidade máxima de 10,2 MPa e 9,8 MPa, respectivamente.

No tocante, segundo NBR 6118 (ABNT 2004) que relaciona a resistência média à tração com a resistência à compressão, foi possível encontrar no contrapiso uma resistência à tração média de 2,89 MPa, no caso da perda da eficiência solo-estrutura do contrapiso, que seria solicitado ultrapassando a resistência de projeto.

Análogo a isso, pode ser explicado pela simetria geométrica, porém, a máxima tensão equivalente de *von Mises* convergiu ao mesmo ponto, concentrando-se em ambas simulações no centro do edifício, isso porque as tensões para estrutura no caso ideal concentraram-se no centro edifício. Na análise de A3, a tensão máxima teve uma menor intensidade de 8,3 MPa, um fato que pode ser associado à presença de vigas de fundação. Ainda, observou-se que o ponto de aplicação da tensão máxima não se encontra no contrapiso, contudo a tensão sobre este possuiu um valor de 3,47 MPa continuando acima da tensão de tração calculada. (Figura 6)

ISBN 978-65-86819-05-2

Quanto às deformações, em todas os pontos da Análise A, nota-se ausências de maiores deformações nas vigas de fundação, assim, observou-se uma distribuição de deformações equivalentes nos pontos de estudo contendos as maiores deformações se localizou-se nos elementos estruturais centrais da edificação.

PONTO A1

(a) (b)

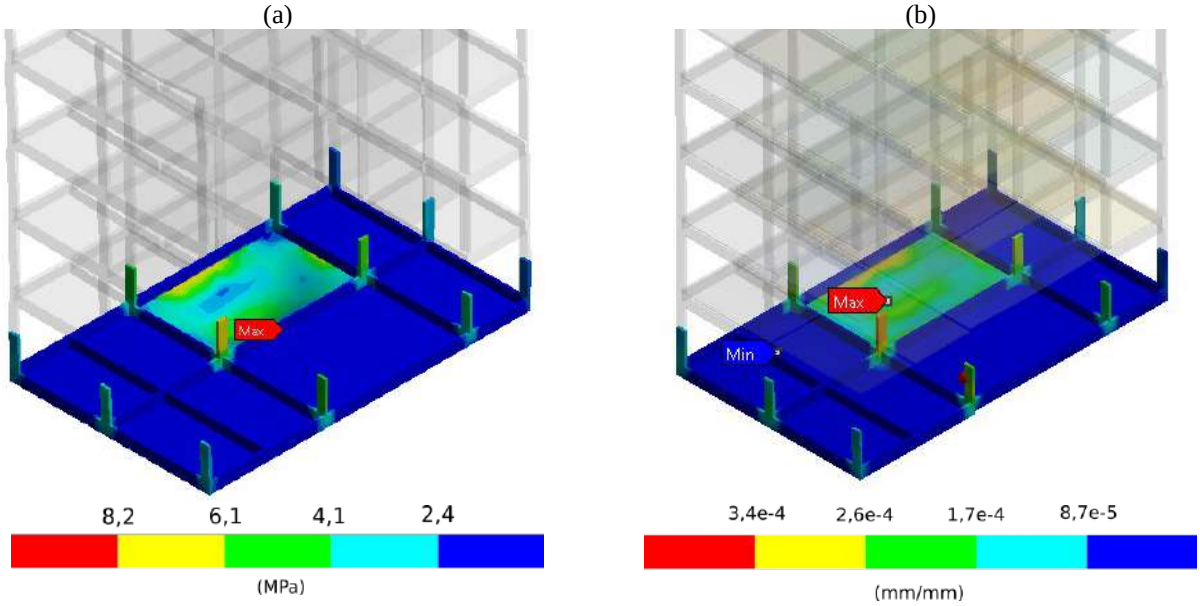


Figura 5: Resultados da Análise A, Tensões (a) e Deformações (b) equivalentes no ponto A1.

PONTO A2

(a) (b)

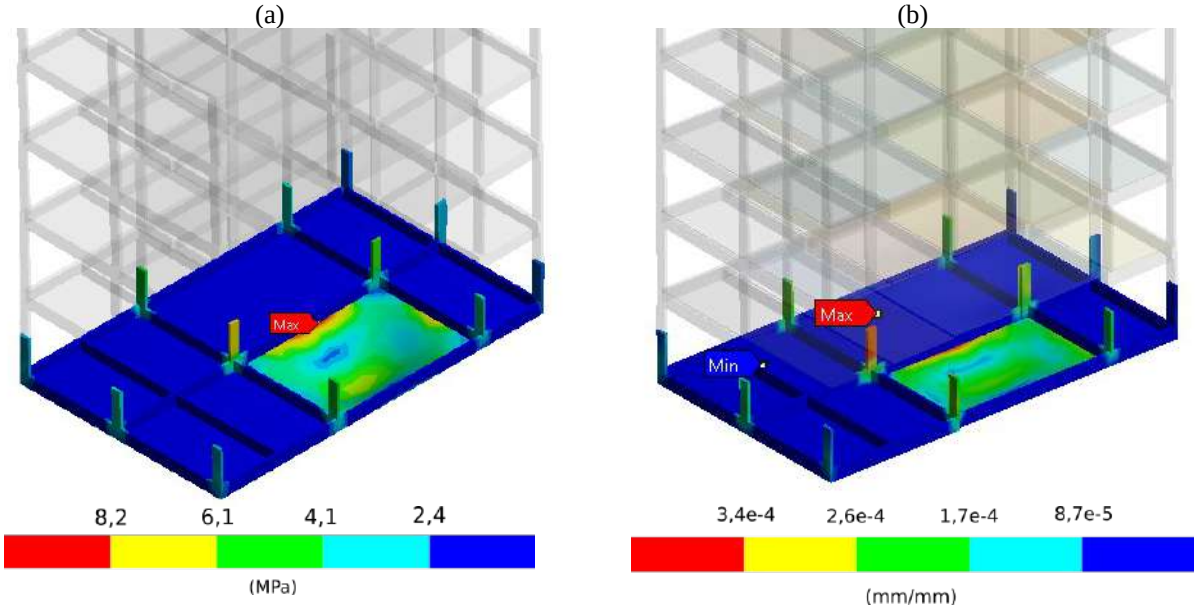


Figura 6: Resultados da Análise A, Tensões (a) e Deformações (b) equivalentes no ponto A2.

ISBN 978-65-86819-05-2

PONTO A3

(a) (b)

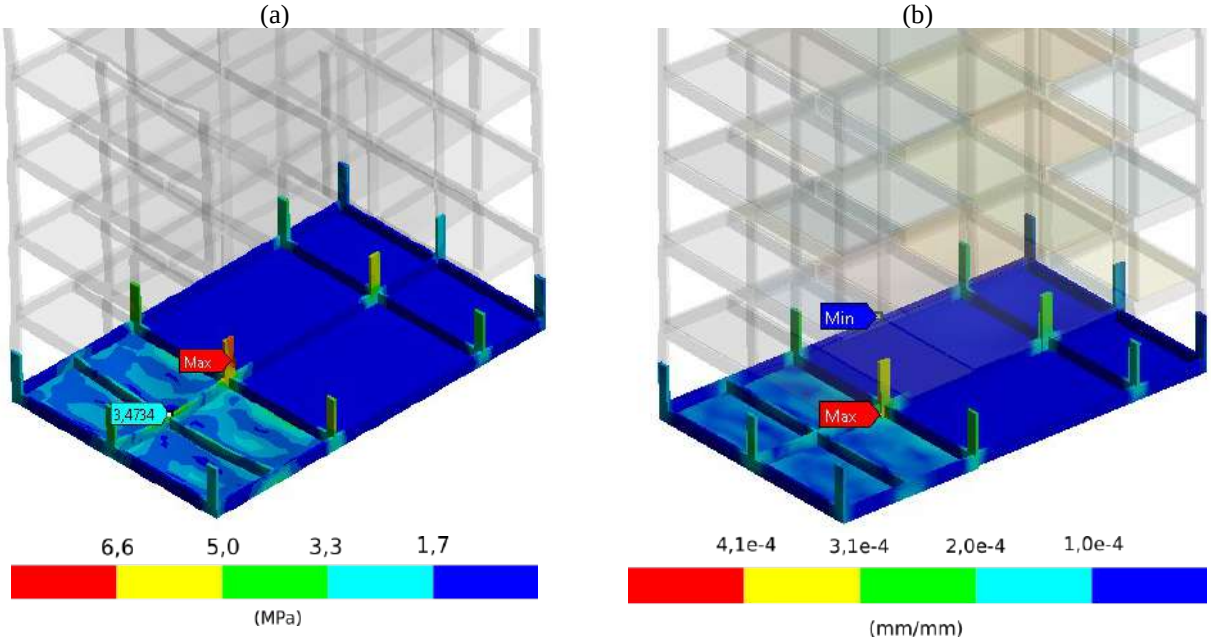


Figura 7: Resultados da Análise A, Tensões (a) e Deformações (b) equivalentes no ponto A3.

Nos resultados da Análise B, expressos na Figura 8, 9 e 10 destaca-se a situação encontrada nos pontos B1. Logo, detectou-se uma Máxima Tensão Equivalente de von Mises de 20,5 MPa, mas o ponto que recebeu essa solicitação contempla uma região considerada estável da estrutura. Em síntese, embora o acúmulo de esforços se concentre abaixo do pilar, à esquerda do edifício, movimentações maiores são apresentadas pelo segundo pilar central localizado à direita. Os pontos B2 e B3 tiveram comportamentos semelhantes porém tendo tensões máximas um pouco mais próximas do local do dano com 22,4 MPa e 18,3 MPa respectivamente.

No que diz respeito à deformações, percebe-se uma grande concentração no segundo pavimento podendo ser entendido pela acumulo de peso advindo dos demais pavimentos acima, além disso foge da análise da interação solo-estrutura. Nos pontos B1 e B2 observa-se máximas deformações nas vigas de fundação. O elemento se encontra num regime seguro porém por está ligado diretamente com o contrapiso tende a apresentar danos.

ISBN 978-65-86819-05-2

PONTO B1

(a) (b)

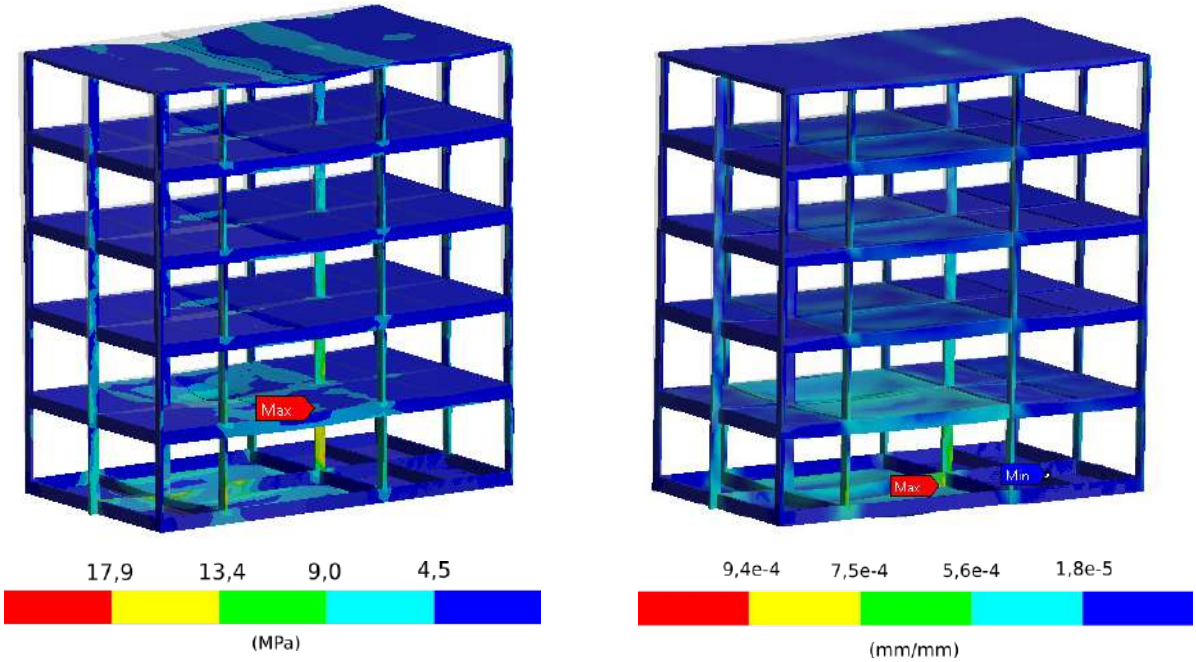


Figura 8: Resultados da Análise A, Tensões (a) e Deformações (b) no ponto B1.

PONTO B2

(a) (b)

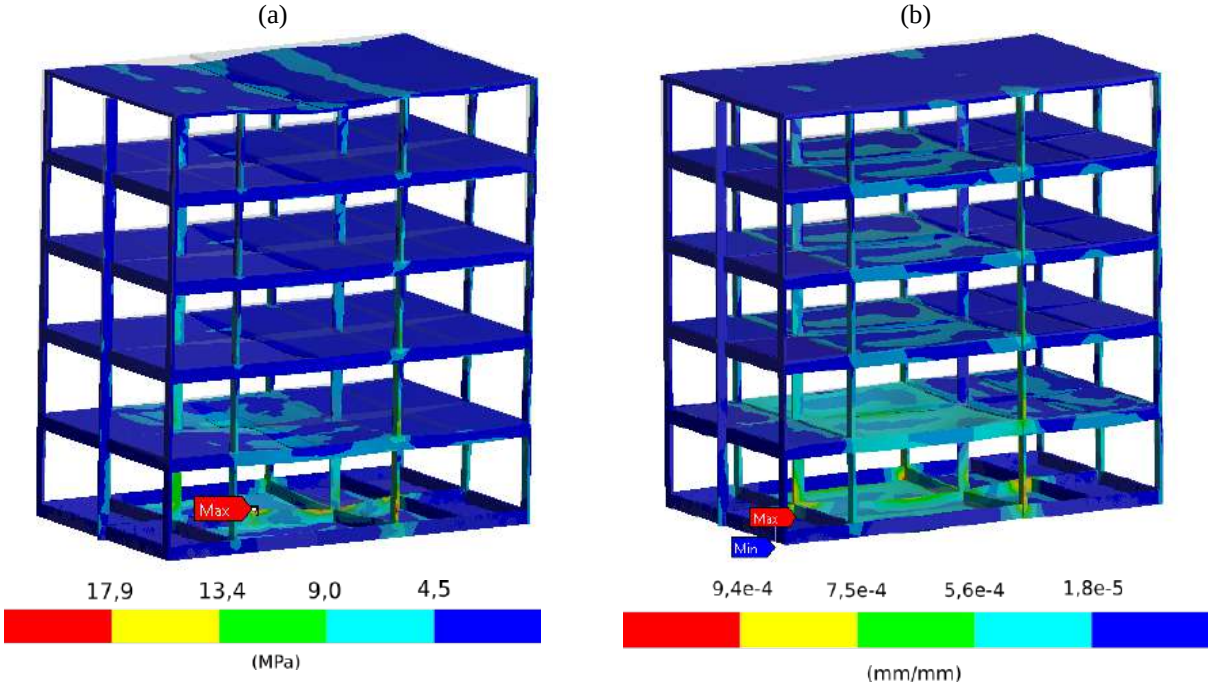


Figura 9: Resultados da Análise A, Tensões (a) e Deformações (b) equivalentes no ponto B2.

ISBN 978-65-86819-05-2

PONTO B3

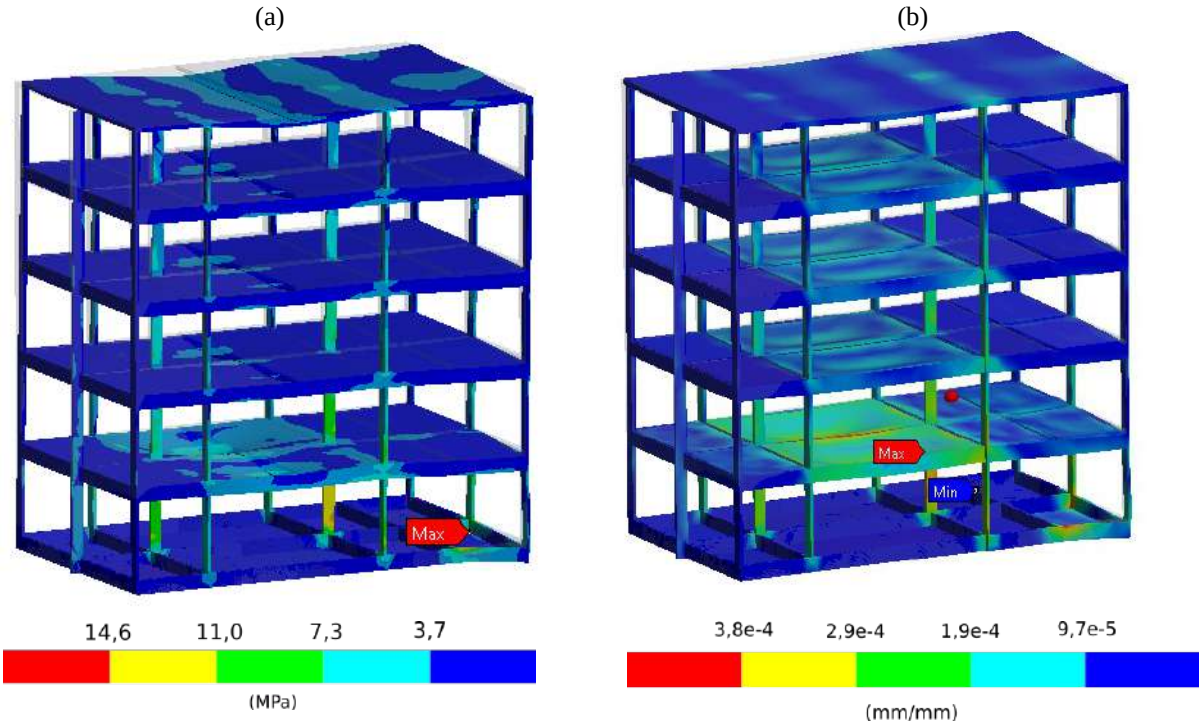


Figura 10**:** Resultados da Análise A, Tensões (a) e Deformações (b) equivalentes no ponto B3.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sendo as manifestações patológicas advindas muitas vezes de processos inevitáveis, o desenvolvimento de estudos coerentes nos resultados são de grande importância. Partindo disso, buscou-se métodos eficazes e precisos como modelo numérico com o Método dos Elementos Finitos, que possibilitou dados expressivos a respeito dos danos abordados a partir da representação de movimentações de solos causadas por rompimento de tubulações hidráulicas abaixo dos elementos que compõem o sistema solo-estrutura.

Através do método aplicado nas análises de tensões deste trabalho permitiram identificar pontos susceptíveis a manifestações de danos, constatadas solicitações não previstas na fase de planejamento e desenvolvimento de projetos. Com isso, pode-se constatar as localizações e magnitudes dos concentradores de tensão conforme as condições definidas. Dessa forma, identifica-se a presença de tensões que podem, a curto prazo, prejudicar o desempenho estrutural de edifícios de porte médio e geralmente construídos para fins residenciais ou industriais. Destacando-se concentrações de tensões em pontos distintos dos analisados, além de deformações advindas da estrutura de fundação que afetam o contrapiso e demais elementos conectados, como é possível identificar nos pontos da análise A uma máxima tensão equivalente de 10 MPa sendo uma intensidade suficiente para causar a presença de manifestações patológicas no contrapiso.

Conclui-se que o trabalho abordou manifestações patológicas que implicam diretamente no desempenho estrutural das edificações, apresentando um método de análise que permite a compreensão do comportamento estrutural por trás de acontecimentos atípicos e imprevistos ocorrentes em edificações independente da tipologia. Estudos deste modelo é relevante uma vez que minimiza a manifestação de danos em estruturas de concreto armado, contribuindo com a garantia do funcionamento das estruturas, além de apoiar a tomada decisão de projetos de reparação que agem em prol do desempenho estrutural.

ISBN 978-65-86819-05-2

5. REFERÊNCIAS

ANTONIAZZI, Juliana Pippi et al. **Interação solo-estrutura de edifícios com fundações superficiais**. Santa Maria, RS, Brasil. 2011.

ASSIS, Renato L. de et al. **Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água**. Engenharia Agrícola, p. 558-568, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto-procedimento**. ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 6120: **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 1980.

BRANDÃO, F. et al. **Caracterização dinâmica de um edifício histórico do século xix construído em alvenaria de tijolos maciços**. 2016.

CARDOSO, Rafael do Valle Pereira et al. **Projeto estrutural em concreto armado**. Florianópolis , SC. 2013.

HACHICH, Waldemar Coelho et al. **Fundações: teoria e prática.** 1996.

Mendes, P. T. de F. **Análise dinâmica de uma estrutura. Estudo numérico e experimental**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil/Estruturas, 2012, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2012. 102 p.

REIS, Jeselay Hemetério Cordeiro dos. **Interação solo-estrutura de grupo de edifícios com fundações superficiais em argila mole**. 2000. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.