

ESTUDO NUMÉRICO ATRAVÉS DO MEF SOBRE A INFLUÊNCIA DE FUROS HORIZONTAIS PARA PASSAGEM DE TUBULAÇÕES EM VIGAS DE CONCRETO

Numerical study through fem on the influence of horizontal holes for passing pipes in concrete beams

Elisandra Riquetti¹; Gilson Francisco Paz Soares²; Diniane Baruffi³

¹ Diplomada em Engenharia Civil pela Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai, Erechim, Brasil. *E-mail*: eliriquetti@gmail.com

² Doutor em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Professor do curso de Engenharia Civil da Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões – URI – Câmpus de Erechim. *E-mail*: gilsonfps@uricer.edu.br

³ Doutora em Engenharia pela Universidade de Passo Fundo – UPF. Professora do Curso de Engenharia Civil da Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões – URI – Câmpus de Erechim. *E-mail*: dinianebaruffi@uricer.edu.br

Data do recebimento: 14/02/2022 - Data do aceite: 11/05/2022

RESUMO: O setor da construção civil busca atender a uma demanda crescente de trabalhos que exigem cada vez mais competência e agilidade nos processos de produção e execução de projetos. Porém, o ritmo acelerado pode ocasionar mau planejamento, comprometendo, significativamente, a qualidade final dos serviços. Para melhorar o desempenho de uma edificação, é imprescindível a realização de compatibilização entre projetos, a fim de otimizar a execução, evitando defeitos de ordem estrutural e estética. Uma das consequências mais comuns causadas pela falta de compatibilização de projetos é a abertura de furos em elementos estruturais, para a passagem de tubulações. Neste contexto, o presente estudo buscou avaliar, por meio de simulação numérica, a partir do método dos elementos finitos (MEF), utilizando o *software* ANSYS *Workbench*, quais as consequências de realizar furos horizontais em vigas, sem avaliação prévia da influência dos mesmos na estrutura. Realizou-se a modelagem de uma viga de concreto para validar a simulação computacional e estudar o comportamento da estrutura ao acrescentar em sua geometria furos

similares aos encontrados *in loco*. Os resultados obtidos apontam que os furos alteram o fluxo das tensões normais no local em que se encontram, em função de causar uma retirada brusca do material.

Palavras-chave: Abertura de furos. Simulação numérica. ANSYS Workbench.

ABSTRACT: The civil construction industry seeks to meet a growing demand for work that increasingly requires more competence and agility in the processes of production and project execution. However, the accelerated pace can cause poor planning, significantly compromising the final quality of the services. In order to improve the performance of a building, it is essential to make the projects compatible, in order to optimize the execution, avoiding structural and aesthetic defects. One of the most common consequences caused by the lack of project compatibility is the opening of holes in structural elements for the passage of pipes. In this context, the present study sought to evaluate by means of numerical simulation, based on the Finite Element Method (FEM), using ANSYS Workbench software, the consequences of drilling horizontal holes in beams without prior evaluation of their influence on the structure. A concrete beam was modeled to validate the computational simulation and to study the behavior of the structure when holes, similar to those found in situ, were added to its geometry. The results obtained indicate that the holes alter the flow of normal stresses in the place where they are, due to a sudden withdrawal of the material.

Keywords: Drilling holes. Numerical simulation. ANSYS workbench.

Introdução

As empresas de construção civil, segundo Oliveira e Melhado (2006), enfrentam cenários cada vez mais competitivos, pressionando o desenvolvimento de novas técnicas que tornem o trabalho competente e ágil. Na busca por maior produtividade, torna-se necessário a segregação das atividades, na qual profissionais distintos realizam diferentes segmentos de uma obra, a partir de seus conhecimentos e com informações restritas, havendo a união dos projetos somente no momento da execução, sem prévia análise das interferências físicas que podem haver. De acordo com Nóbrega (2017), as incompatibilidades de projetos nas obras brasileiras

são muito comuns, sendo resolvidas por meio de improvisos, alterando muitas vezes a estrutura sem um devido estudo da situação, podendo, desta forma, comprometer a segurança da edificação. Segundo Farias (2019), um exemplo comum da falta de compatibilização é a abertura de furos horizontais em elementos estruturais para passagem de tubulações. Em vista disso, a NBR 6118 (ABNT, 2014) orienta que furos e aberturas em vigas de concreto armado, quando necessários, devem ser previstos na fase de projeto para que se faça o dimensionamento das armaduras complementares no contorno e nos cantos das aberturas, exceto nos casos em que a modificação siga as recomendações do item 13.2.5.1 da normativa, em situações

em que o furo atravessa a viga na direção de sua largura. Furos não planejados são comumente executados em vigas sem as devidas precauções no momento de sua execução. Para se realizar um furo sobre um elemento estrutural, deve-se realizar, primeiro, um planejamento, para então definir os critérios de efetivação e dimensionamento estrutural conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), já que tais furos podem acabar interferindo no comportamento estrutural da viga (SILVA et al., 2019).

Neste contexto, este trabalho visou a averiguar, numericamente, através do Método dos Elementos Finitos (MEF), por meio de modelagem computacional no *software* ANSYS *Workbench*, a influência que furos horizontais exercem nas tensões normais e deflexões em vigas de concreto, através da modelagem e simulação de vigas representativas de situações reais identificadas em obras de Erechim/RS, comparando, posteriormente, os resultados das simulações numéricas com as normas vigentes, aliando à teoria de concentração de tensão.

Furos e aberturas em vigas

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), furos apresentam dimensões pequenas em relação ao tamanho da viga, enquanto que as aberturas possuem dimensões maiores, podendo ser um conjunto de furos muito próximos. Segundo Souza (2004), a presença de furos na alma das vigas forma uma zona de descontinuidade no elemento, modificando, consideravelmente, o comportamento da peça estrutural, havendo a necessidade de estudar a posição adequada do furo para que o mesmo não se torne um concentrador de tensões, ocasionando fissuras, reduzindo a vida útil da estrutura.

Estudos realizados por Mansur e Tan (1999) revelam que aberturas realizadas na

zona de tração do concreto, não alteram a distribuição de carga, porém, quando presentes na zona de compressão, causam redução da área de concreto resistente e seus efeitos precisam ser considerados no dimensionamento da estrutura.

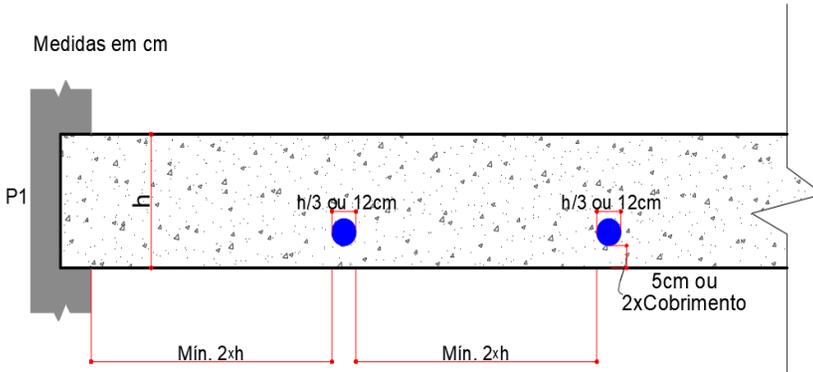
Simões (1997) afirma que caso a abertura seja inserida em locais que apresentam esforço cortante maior, a diminuição da seção do concreto altera o fluxo de tensões na região, originando concentradores de tensões nas extremidades da abertura, modificando o mecanismo resistente ao cisalhamento, podendo surgir fissuras diagonais.

Recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014) para furos atravessando a viga na direção de sua largura

Segundo as recomendações do item 13.2.5.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014), o furo em uma viga de concreto armado deve estar no mínimo a 5,0 cm da face mais próxima da viga e ter, sempre, duas vezes o cobrimento previsto. A fim de realizar a dispensa de verificação, devem ser respeitadas as recomendações dispostas a seguir e exemplificadas na Figura 1:

- a) furo na zona de tração, distante, no mínimo, duas vezes a altura da viga da face do apoio;
 - b) dimensão do furo de, no máximo, 12,0 cm ou um terço da altura da viga;
- distância entre as faces dos furos deve ser de, no mínimo, duas vezes a altura da viga;
- c) cobrimentos suficientes, seguindo o recomendado pela NBR 6118 (ABNT, 2014) conforme classe de agressividade ambiental;
 - d) não deve ser realizado o seccionamento das armaduras.

Figura 1: Critérios de dispensa de verificação da NBR 6118 (ABNT, 2014)



h: altura da seção transversal da viga; P1: Apoio.

Concentradores de tensões

Uma vez que os resultados serão também representados em forma de concentração de tensão, cabe, neste momento, uma revisão da definição deste parâmetro. Concentradores de tensões são causados por descontinuidade ou mudança de seção em um elemento estrutural, causado por furos, entalhes, ranhuras, cantos vivos, que provocam uma redistribuição no campo de tensões, havendo a concentração de tensões próxima a esses elementos (PILKEY, 1997).

De acordo com Norton (2013), um fator de concentração de tensão pode ser expresso por:

$$K_t = \frac{\sigma_{\text{máx}}}{\sigma_{\text{nom}}} \quad (1)$$

onde:

$\sigma_{\text{máx}}$ é a tensão máxima no ponto de concentração de tensão;

σ_{nom} é a tensão nominal de referência;

K_t é o fator de concentração de tensões.

Metodologia

Inicialmente foram realizadas visitas técnicas em obras que estavam realizando furos em vigas, na região de Erechim/RS. Na sequência, foram modeladas e simuladas, no *software ANSYS Workbench*, vigas em concreto (sem armadura), com as seguintes características:

- forma padrão, sem furos;
- com furos similares aos encontrados *in loco*;
- com furos que atendem as recomendações do item 13.2.5.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014) nas condições de distância até a face do elemento e dos apoios, diâmetro e, quando houvesse mais de um furo, com espaçamento adequado.

Em vigas de concreto armado a normativa estabelece que o furo seja realizado na zona tracionada, sem seccionar a armadura, em função de ser o local onde o aço resiste à maioria dos esforços, não sendo tão significativo o trabalho do concreto. Mas, como neste estudo foram simuladas apenas vigas em concreto, optou-se por realizar os furos

na zona de compressão, onde o material (concreto) tem maior capacidade de resistência, buscando verificar como a peça se comporta ao retirar o material nessa área.

Por fim, foram comparados os resultados da simulação numérica, avaliando de que forma o não cumprimento dos parâmetros estabelecidos na NBR 6118 (ABNT, 2014) interfere na estrutura. Os dados encontrados foram também aliados à teoria de concentração de tensão, onde, a partir da Eq. (1), buscou-se determinar o fator de concentração de tensão (Kt) de cada viga com furo, tomando como tensão máxima descrita na equação, a maior tensão normal encontrada na posição em que há o furo na viga e a tensão nominal expressa na equação, equivalendo-se à grandeza encontrada no elemento padrão (sem furo) na mesma posição, com base nos dados obtidos no programa, como exemplifica a equação:

$$K = \frac{\sigma_{\text{máx viga com furo}}}{\sigma_{\text{viga de referência}}} \quad (2)$$

Modelagem computacional

No ANSYS *Workbench*, como mostra a Figura 2, foram definidas as propriedades do material como homogêneo, isotrópico e de comportamento linear-elástico. Os valores utilizados para a densidade, módulo de Young, coeficiente de Poisson, seguiram os parâmetros e formulações prescritos na NBR 6118 (ABNT, 2014).

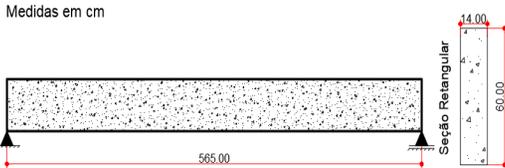
Para definir a geometria no *software* utilizou-se um elemento finito sólido tridimensional com oito nós, no qual cada um possui três graus de liberdade de translação. Para aferir a malha de elementos finitos foi realizada a convergência com diferentes números de nós e elementos, objetivando avaliar a influência que a quantidade de elementos exerce na tensão normal máxima e deformação máxima da peça de referência. O refinamento ideal apresentou 18581 nós e 66814 elementos. Na sequência, modelou-se uma viga referência de concreto, em um modelo isostático, com 5,65m de vão entre os apoios, com seção retangular de 0,14 m x

Figura 2: Propriedades mecânicas das vigas de concreto – *Software ANSYS Workbench*

Properties of Outline Row 3: Concreto				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	 
2	 Material Field Variables	 Table		
3	 Density	2500	kg m ⁻³	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
4	 Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
5	Derive from	Young's Mo...		
6	Young's Modulus	32206	MPa	<input type="checkbox"/>
7	Poisson's Ratio	0,2		<input type="checkbox"/>
8	Bulk Modulus	1,7892E+10	Pa	<input type="checkbox"/>
9	Shear Modulus	1,3419E+10	Pa	<input type="checkbox"/>
10	 Tensile Yield Strength	2,9	MPa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
11	 Compressive Yield Strength	30	MPa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

0,60 m (Figura 3) e, após, utilizando-se das características geométricas da mesma, foram modeladas vigas com furos (Tabelas I e II), de acordo com as vigas reais observadas nas obras vistoriadas.

Figura 3: Viga de concreto – Viga referência



Os apoios foram aplicados nas faces laterais da viga, restringindo no lado direito apenas translação no eixo y e no lado esquerdo bloqueando as movimentações nas direções x e y . As vigas receberam uma carga distribuída uniforme de 17,80 kN/m, conforme projeto real.

A última fase da simulação numérica compreendeu a resolução do sistema de equações algébricas simultâneas e a exibição dos resultados. Durante as análises, para realizar a comparação entre as tensões nor-

abela I: Resumo das características das vigas modeladas no estudo

Nomenclatura	Característica	Origem
Viga 1	Furo central	<i>In loco</i>
Viga 2	Furo central	Viga 1 enquadrada na norma
Viga 3	Furo próximo ao apoio esquerdo	<i>In loco</i>
Viga 4	Furo afastado do apoio esquerdo	Viga 3 enquadrada parcialmente na norma (diâmetro maior)
Viga 5	Furo afastado do apoio esquerdo	Viga 3 enquadrada na norma
Viga 6	Vários furos no lado esquerdo	<i>In loco</i>
Viga 7	Vários furos distribuídos ao longo da viga	Viga 6 enquadrada na norma

Tabela II: Resumo da posição e diâmetro dos furos nas vigas modeladas no estudo

Nomenclatura	Diâmetro dos furos (mm)	Zona de localização do furo	Distância do furo até a face superior da viga (cm)	Distância do furo até a face do apoio (cm)
Viga 1	1 x 100	Comprimida	2,00	282,50
Viga 2	1 x 100	Comprimida	5,00	282,50
Viga 3	1 x 150	Comprimida	8,00	14,00
Viga 4	1 x 150	Comprimida	8,00	120,00
Viga 5	1 x 100	Comprimida	8,00	120,00
Viga 6	3 x 50 e 1x 100	Comprimida	6,00	37,00
Viga 7	3 x 50	Comprimida	6,00	155,00

mais das vigas com furo e com seção plena, foram adotadas linhas de tensão normal que se localizam acima da borda superior dos furos – região de interesse mais distante da superfície neutra da viga – como exemplificado na Figura 4.

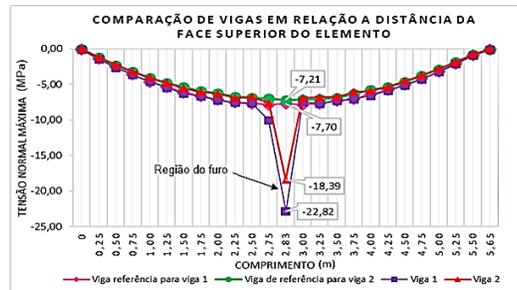
Resultados e Discussão

A obtenção e a análise dos resultados englobaram a realização de cálculos analíticos de tensão e deflexão na viga referência, além de testes de convergência de malha para validar a análise computacional. Além disso, analisou-se o comportamento que a peça pode assumir, quando há furos na geometria. Os resultados foram também associados à teoria de concentração de tensões, onde o valor encontrado para o fator de concentração de tensão representou o aumento na tensão normal provocado pelo furo nas vigas. Durante as análises o fator de concentração de tensão foi denominado por “K”, seguido do respectivo número da viga analisada. Ressalta-se que a região objeto de análise foi a comprimida, e não a tracionada.

- a) Comparativo em relação à distância do furo à face do elemento – Vigas 1 e 2:

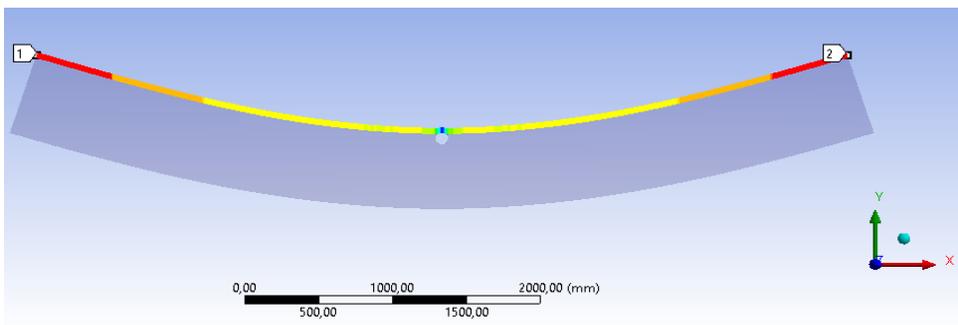
Durante as análises, para realizar a comparação entre as tensões normais das vigas com furo e com seção plena, foram adotadas linhas de tensão normal que se localizam acima da borda superior dos furos (local onde ocorre a maior tensão normal de compressão). As análises realizadas compararam as linhas de tensão normal geradas para as vigas 1 e 2 com a de referência, como mostra a Figura 5.

Figura 5: Variações de tensões normais entre as vigas 1, 2 e de referência



Ressalta-se que na Figura 5, o termo viga de referência foi mencionado duas vezes, em função de haver o deslocamento do furo de 2 cm (viga 1) para 5 cm da face superior (viga 2), sendo necessário criar duas linhas de tensão normal na viga de referência.

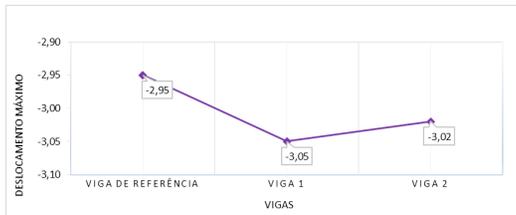
Figura 4: Exemplificação da linha de tensão normal gerada no software ANSYS Workbench



A partir da Figura 5, observa-se que o furo afetou o comportamento das tensões normais na posição onde se encontrava, não perturbando o fluxo de tensão nas demais regiões. Para a viga 1, encontrou-se um fator de concentração de tensão (K1) de 2,96, representando que o furo quase triplicou a tensão normal no ponto onde estava posicionado. Ao comparar a viga 2 com o elemento de referência, nota-se que, apesar do furo localizar-se distante 5 cm da borda, ainda causa um aumento significativo na tensão normal, já que o “K2” foi de 2,55. Observa-se ainda que o aumento no nível de tensão na viga 2 (-18,39 MPa), que está de acordo com a norma, foi inferior ao aumento da tensão ocorrido na viga 1 (-22,82 MPa), que representa a situação observada *in loco* (nas obras vistoriadas).

Avaliou-se, ainda, o quanto o furo interfere no deslocamento da peça. Os resultados são exibidos na Figura 6.

Figura 6: Deslocamento máximo – vigas 1, 2 e de referência



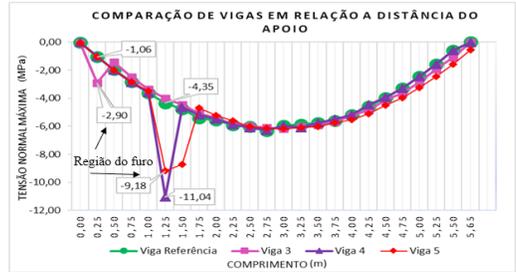
Observa-se que na viga 1 ocorreu o maior aumento no deslocamento, caracterizando uma diferença de 3,39%, devido o furo estar muito próximo à face do elemento.

b) Comparativo em relação à distância do furo ao apoio – Vigas 3, 4 e 5:

Foram modeladas as vigas 3, 4 e 5, objetivando comparar as diferentes tensões normais (Figura 7) obtidas à medida em que

se modelavam os furos nas peças, de acordo com as recomendações da normativa (diâmetro e afastamento do apoio).

Figura 7: Variações de tensões normais entre as vigas 3, 4, 5 e de referência



Os resultados evidenciam que ao ir adequando a viga encontrada *in loco* às exigências do item 13.2.5.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014), há a diminuição significativa dos fatores de concentração de tensão, reduzindo de 2,74 para 2,11. Ao avaliar todos os dados, constata-se também que os picos de tensão ocorrem apenas nos locais onde há furos.

Os deslocamentos máximos das peças analisadas foram apresentados na Figura 8.

Figura 8: Deslocamento máximo – vigas 3, 4, 5 e de referência

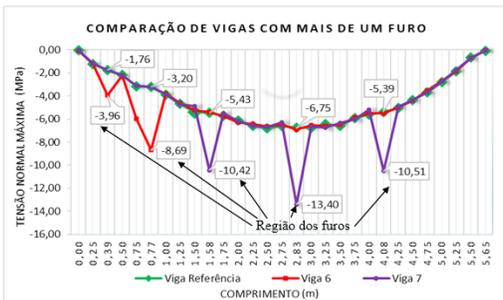


Avaliando os dados, observa-se que a viga 4 apresentou a maior deslocamento, em função de possuir um furo com diâmetro maior que o exigido pela normativa e se localizar próximo a região de maior momento fletor.

c) Comparativo entre vigas com mais de um furo – Vigas 6 e 7:

As vigas 6 e 7 foram modeladas, buscando avaliar qual a interferência na resistência da peça a realização furos próximos (Figura 9).

Figura 9: Variações de tensões normais entre as vigas 6, 7 e de referência



Analisando os resultados da viga 6, constata-se que os três furos 50 mm elevaram as tensões normais no local onde se encontravam, gerando um fator “K6” de 2,25. Já o furo de 100 mm ocasionou um fator de concentração de tensão de 2,72. Na viga 7, o furo localizado no meio da peça apresentou maior fator “K7” (1,99), em função de ser o local onde o momento fletor é máximo.

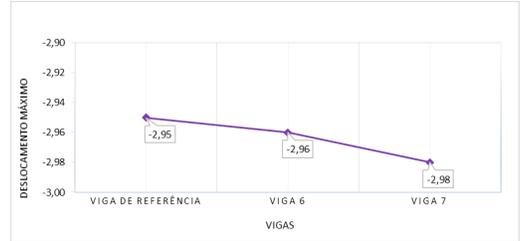
Ao comparar os fatores de concentração de tensão gerados entre as vigas 6 e 7, nota-se que os fatores “K6” atingiram valores maiores que os “K7”, comprovando a importância de seguir as recomendações da normativa. Observa-se, ainda, que onde não há furos, as tensões se mantiveram semelhantes. A Figura 10 apresenta os deslocamentos máximos de cada viga.

Nota-se, a partir da figura 10, que a maior variação ocorrida entre os elementos foi de 0,03 mm, não sendo significativa.

Ressalta-se que, nas análises aqui realizadas, não se considerou a verificação dos limites de deslocamentos para fins de

dimensionamento, mas apenas o comparativo desses valores entre as vigas.

Figura 10: Deslocamento máximo – viga 6, 7 e de referência



Conclusões

Com a compatibilização de projeto, a passagem de tubulações por elementos estruturais poderia ser evitada, mas ao visitar obras, nota-se que essa prática é frequente e que os furos são realizados em qualquer local da viga, sem prévia verificação das alterações, não seguindo o recomendado na NBR 6118 (ABNT, 2014).

Em todas as situações analisadas os furos foram realizados na zona comprimida, gerando picos de tensão normal na posição em que se encontravam, devido à retirada brusca do material resistente. Por isso, em vigas de concreto armado, posicionar furos na zona comprimida, tornando-se a pior situação, já que na região de tração, o aço irá resistir mais aos esforços, desde que não seja seccionado.

Com base nos resultados, notou-se que o maior fator de concentração de tensão ocorreu na situação onde o furo fica muito próximo a borda superior da peça (K1 = 2,96), em função de restar uma área pequena de material resistente, constatando que a prática de passar as tubulações próximas à laje pode ser prejudicial à estrutura. Avaliando os resultados de todas as vigas, observa-se que é possível utilizar um valor de fator de concentração de tensão K = 3 quando há furos

em vigas, já que, mesmo nas situações onde o orifício enquadra-se na norma, o valor encontrado durante as análises chegou a $K = 2,55$.

Com relação à deformação máxima, não se notou grande variação, conforme foi modificada a posição do furo.

Por fim, confirma-se, por meio da simulação utilizando o método dos elementos finitos, através da plataforma ANSYS Workbench que, à medida que se modelava os furos nas peças de acordo com as recomendações da normativa, ocorria a diminuição do fator de concentração de tensão, comprovando que as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014) são satisfatórias.

Sendo este um primeiro estudo realizado neste tema, no âmbito local, sugere-se a continuidade da investigação sobre os efeitos

dos furos em vigas, bem como recomenda-se avaliar uma viga em concreto armado, buscando as diferentes magnitudes de tensão normal e deformação máxima, que ocorrem no concreto e na armadura, ao variar a posição dos furos, nos seguintes critérios:

- a) zona tracionada e comprimida;
- b) distância da borda das faces;
- c) afastamento dos apoios;
- d) diâmetro do furo;
- e) espaçamento entre furos.

Ainda, pode-se complementar futuramente o estudo comparando a simulação numérica com dados obtidos em um ensaio experimental, avaliando também as fissuras diagonais que podem surgir.

REFERÊNCIAS

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

FARIAS, L. K. M. G. **Influência de furos e aberturas em estruturas de concreto armado - Análise de furos horizontais para passagem de tubulações em vigas convencionais**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Maranhão, São Luíz, 2019.

MANSUR, M. A.; TAN, K. H. **Beams concrete with openings**: analysis and design. Estados Unidos: CRC Press LLC, 1999.

NÓBREGA, U. R. G. **A importância da compatibilização de projetos das edificações para minimizar as falhas na execução, reduzir custos e garantir um maior controle de qualidade**. 2017. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 4. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2013.

OLIVEIRA, O. J.; MELHADO, S. B. **Como administrar empresas de projeto de arquitetura e engenharia civil**. 2. ed. São Paulo: Pini, 66 f. 2006.

PILKEY, W. D. **Peterson's stress concentration factors**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997.

SILVA, G. B. da; KUO, E. E.; CHOUKRI, M. C.; TAVARES, M. M.; MORAES, W. A. **Influência de furos não premeditados em vigas de concreto armado**. 19º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, São Paulo, SP, Brasil, 2019.

SIMÕES, R. **Vigas de concreto de alta resistência com abertura na alma**. 1997 129 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

SOUZA, R. A. **Concreto estrutural: análise e dimensionamento de elementos com descontinuidades**. 2004. 379 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

