



ESTUDO DA ALOCAÇÃO DE REFORÇO EM EDIFICAÇÃO DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

Bárbara Elisa Ferreira

Guilherme Celeghini Ferreira

Gláucia Nolasco de Almeida Mello

barbara.elisaf@gmail.com

guilherme.celeghini@gmail.com

gnamello@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Rua Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, 30535-901, Belo Horizonte/MG, Brasil

José Guilherme Santos da Silva

jgss@uerj.br

Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ.

Rua São Francisco Xavier, 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

Resumo. *Várias técnicas de reforço foram estudadas nas últimas décadas visando aumentar a capacidade de carga das estruturas de concreto armado, sendo a implantação de perfis de aço na estrutura uma das mais comumente utilizadas. Porém, a determinação de uma configuração eficiente da disposição dos perfis na estrutura é habitualmente atrelada a um processo de tentativa e erro, cujo resultado muitas vezes não garante que tenha sido estabelecido um projeto ótimo. Diante disso, o presente trabalho visou, através da otimização estrutural, estudar a melhor distribuição do reforço com vigas de aço em lajes de concreto armado de uma edificação de dois pavimentos, as quais apresentavam flechas excessivas. A simulação numérica foi realizada por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), através da plataforma Altair HyperWorks v14, utilizando a otimização topológica como ferramenta para a determinação da região de distribuição ótima do reforço. O principal objetivo da otimização foi minimizar o peso da estrutura de reforço evitando-se assim impactos na estrutura de fundação da edificação analisada. O resultado indicou as posições mais eficientes para disposição das vigas de aço na estrutura, atendendo ao objetivo proposto e satisfazendo as restrições impostas.*

Palavras-chave: *Otimização Estrutural, Otimização topológica, Reforço.*

CILAMCE 2017

Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering
P.O. Faria, R.H. Lopez, L.F.F. Miguel, W.J.S. Gomes, M. Noronha (Editores), ABMEC, Florianópolis, SC, Brazil,
November 5-8, 2017.

1 INTRODUÇÃO

A falta de manutenção ao longo da vida útil da estrutura, a mudança de carregamentos, a alteração do uso original das edificações, a insuficiência de armadura, as deficiências de projeto, de execução e muitas vezes a insuficiência de controle da qualidade das edificações são situações indesejadas, mas que podem ocorrer nas construções, acarretando na necessidade de execução de um reforço estrutural (PIVATTO, 2014).

Segundo Lima *et al* (2009) e Chaves (2010), existem diversos tipos de reforços de estruturas de concreto armado para solução de problemas gerados por carga estática, sendo as mais comumente utilizadas: reforço com fibra de carbono e reforço com vigas de aço. Destaca-se a utilização de perfis de aço por possuírem um tempo de execução reduzido, apresentarem boa relação custo benefício e por serem convenientemente fixados à estrutura através de conectores e resinas (LIMA et al, 2009).

Porém, segundo Sousa (2012), uma dificuldade para o projeto de reforço de uma estrutura utilizando perfis de aço consiste em definir a melhor forma de dispor os mesmos na estrutura, sendo esse habitualmente um processo atrelado a tentativa e erro, o que não garante com segurança que o projeto ótimo tenha sido encontrado. Assim, uma forma de chegar a soluções eficientes é através da otimização estrutural que busca o melhor resultado possível dentro de um conjunto de soluções que atendam ao objetivo especificado (Bendsoe e Sigmund, 2003).

Nesse contexto, de acordo com Bruggi (2009), uma técnica bem adaptada ao problema de distribuição do reforço é a otimização topológica, a qual determina a região de distribuição ótima do material na estrutura, gerando um projeto que atenda às condições de peso, resistência e rigidez, atrelado ao menor custo. Ferreira e Cunha (2013) explicam em seu trabalho que a distribuição ótima está relacionada com um objetivo que pode ser a minimização do peso da estrutura, atraente quanto ao aspecto econômico, ou a maximização da resistência ou da rigidez da estrutura.

Desta maneira, este trabalho de pesquisa objetiva identificar, através da otimização topológica, a região ótima para alocação do reforço utilizando perfis de aço em lajes de concreto armado de uma edificação de dois pavimentos, que funciona como uma escola pública de ensino fundamental, as quais apresentavam flecha excessiva. O principal objetivo da otimização é minimizar o peso da estrutura de reforço evitando-se assim impactos na estrutura de fundação da edificação analisada e gerando uma economia de aço a ser utilizado.

1.1 Modelo estrutural investigado

A edificação em estudo neste trabalho corresponde a um prédio de uma escola, situada na cidade de Belo Horizonte, cuja estrutura é constituída por pilares, vigas e lajes maciças em concreto armado. O edifício em questão possui dois pavimentos (Fig. 1), com altura de 7,27 metros, largura de 8,45 metros e comprimento de 47 metros. A escola possui 16 pilares designados por P1 a P16, 20 vigas designadas por V101 a V110 no primeiro pavimento, e V201 a V210 no segundo pavimento e 07 lajes em cada pavimento, designadas de LP1 a LP7 no primeiro pavimento e LS1 a LS7 no segundo pavimento, e suas dimensões encontram-se descritas nas Tabelas 1 e 2. A estrutura foi construída utilizando um concreto com resistência à compressão (f_{ck}) igual a 25 MPa, módulo de elasticidade secante (E_{cs}) igual a 24,15 GPa, coeficiente de poisson igual a 0,3 e peso específico (γ_c) de 25 kN/m³, conforme projeto real.

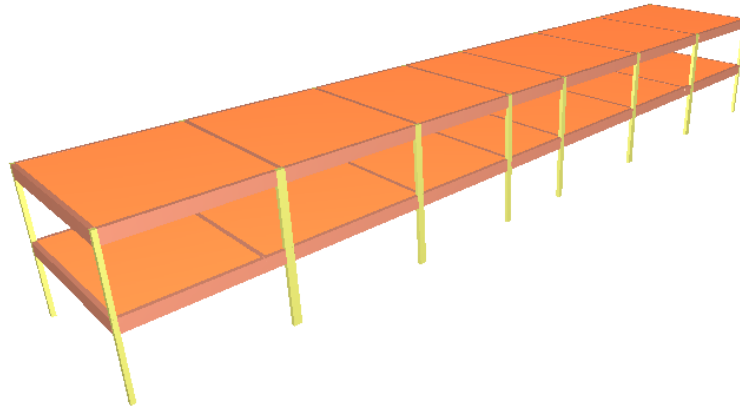


Figura 1. Vista em perspectiva da estrutura

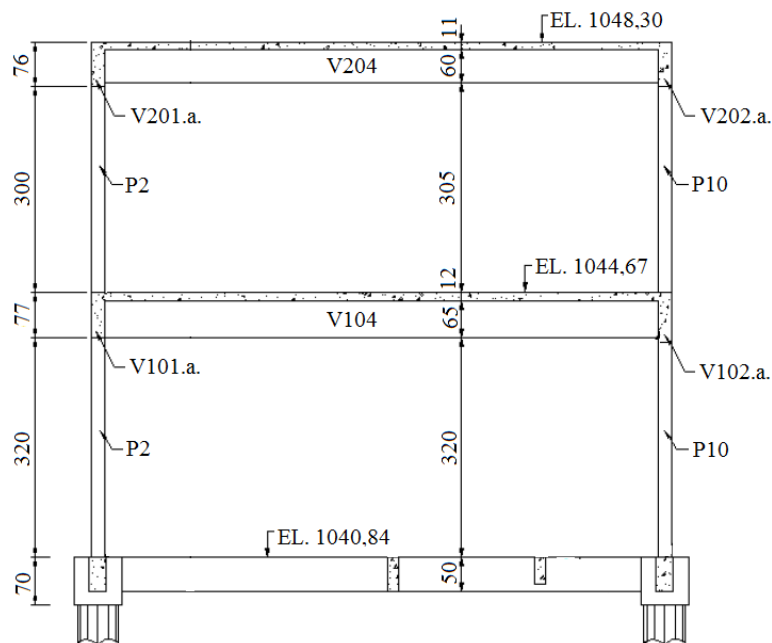


Figura 2. Seção transversal da estrutura

Tabela 1 – Dimensões dos pilares e vigas

Pilar	Dim. (cm)	Vigas	Dim. (cm)
P1, P8, P9 e P16	20 x 20	V101	20 x 63
P2, P7, P10 e P15	20 x 40	V102 a V110	20 x 65
P3, P6, P11 e P14	20 x 35	V201, V202, V203 e V210	20 x 65
P4, P5, P12 e P13	20 x 30	V204 a V209	20 x 60

Tabela 2 – Dimensões das lajes

Primeiro Pavimento			Segundo pavimento		
Laje	Dimensões (cm)	Altura (cm)	Laje	Dimensões (cm)	Altura (cm)
LP1	599 x 825	12	LS1	720 x 825	11
LP2	841 x 825	14	LS2	720 x 825	11
LP3	624 x 825	12	LS3	629 x 825	11
LP4	451 x 825	12	LS4	451 x 825	11
LP5	720 x 825	14	LS5	720 x 825	11
LP6	630 x 825	12	LS6	720 x 825	11
LP7	810 x 825	12	LS7	715 x 825	11

2 METODOLOGIA

Este item apresenta o desenvolvimento do modelo numérico da estrutura investigada, de tal forma que simula por meio de elementos finitos os componentes (lajes, pilares e vigas) da estrutura, apresentando os elementos utilizados na simulação e as características do modelo final gerado. Seguidamente são apresentados os carregamentos e as combinações que foram aplicados no modelo investigado e a formulação e os parâmetros da otimização topológica do reforço com vigas de aço.

2.1 Modelo numérico em elementos finitos

A modelagem numérica da edificação foi feita com base em técnicas usuais de discretização, utilizando o método dos elementos finitos (MEF), por meio do uso da plataforma Altair HyperWorks v14. As vigas e pilares foram representados pelo elemento de barra BAR2, que é um elemento unidimensional composto por dois nós e cada nó com 6 graus de liberdade: translação em X, Y e Z e rotação em X, Y e Z, e as lajes foram simuladas utilizando elemento de casca THINSHELL, bidimensional composto por quatro nós, possuindo 6 graus de liberdade por nó, sendo três de translação e três de rotação das direções X, Y e Z.

Realizou-se um estudo de convergência de malha que teve como objetivo identificar quais os melhores parâmetros de malha a se utilizar para garantir o melhor resultado em função do custo computacional. Foram testadas as malhas quadradas de 480 mm, 240 mm e 120 mm, chegando-se à conclusão que a dimensão satisfatória para os elementos seria de 120 mm. Assim, obteve-se um modelo numérico apresentando 56042 nós e 58603 elementos, representado na Fig. 3.

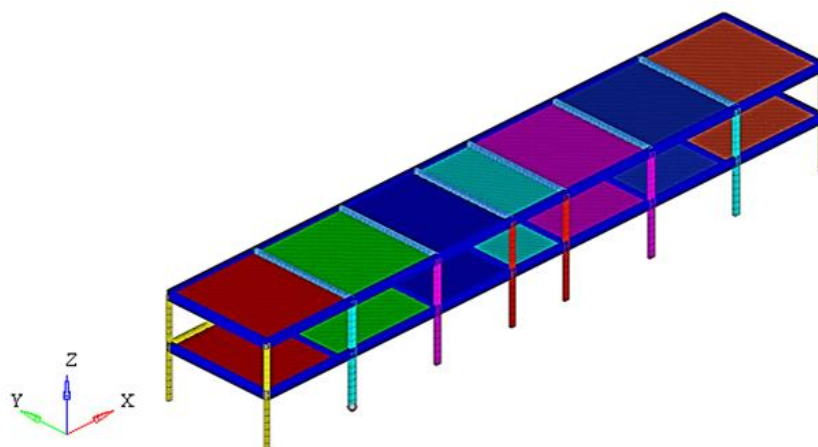


Figura 3. Modelo estrutural em elementos finitos

2.2 Carregamentos e combinações aplicados sobre o modelo investigado

A Tabela 3 apresenta as ações verticais usuais de projeto que foram adicionadas às lajes do primeiro e do segundo pavimento, seguindo as recomendações da ABNT NBR 6120:1980 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações, e a Tabela 4 apresenta os valores das cargas das alvenarias de 25 cm e de 15 cm existentes sobre as lajes e vigas do primeiro pavimento, as quais foram distribuídas linearmente sobre os elementos.

Tabela 3. Ações verticais consideradas na edificação

Pavimento	Carga acidental (kN/m²)	Carga permanente (kN/m²)
Primeiro pavimento	3,0	1,0
Segundo pavimento (Forro)	0,5	1,2

Tabela 4. Peso das alvenarias existentes sobre as lajes e vigas do primeiro pavimento

Elemento estrutural	Alvenaria de 25 cm (kN/m)	Alvenaria de 15 cm (kN/m)
LP1, LP3, LP5, LP6 e LP7	12,99	-
LP2 e LP4	12,99	7,40
V101	-	3,67
V102, V103, V110	-	11,01
V105, V107, V108	-	6,37
V104, V106 e V109	-	-

No projeto da escola foi verificada a segurança quanto ao ELS, realizada em função da combinação quase permanente de serviço (CQP), através da Eq. (1), onde as ações permanentes permanecem inalteradas e as ações variáveis são minoradas por um fator de redução ψ_2 .

$$F_{d,ser} = \sum F_{gik} + \sum \psi_{2j} F_{qjk} \quad (1)$$

Onde, $F_{d,ser}$ é o valor de cálculo das ações para combinações de serviço, F_{gik} representa o valor das ações permanentes, F_{qjk} representa o valor das ações variáveis e ψ_{2j} é o fator de redução de combinação quase permanente para ELS.

Por se tratar de uma edificação onde há elevada concentração de pessoas, adotou-se um ψ_{2j} igual a 0,4, conforme tabela 11.2 da ABNT NBR 6118:2014.

2.3 Análise estática

Foi realizada uma análise estática do modelo estrutural em estudo, descrito no item 1.1 deste trabalho, com o objetivo de verificar os deslocamentos das lajes do primeiro e do segundo pavimento para os carregamentos impostos.

As flechas admissíveis foram calculadas através da Eq. (2), conforme recomendação da tabela 13.3 da ABNT NBR 6118:2014, para o caso de efeito de aceitabilidade sensorial para deslocamentos visíveis em elementos estruturais, em que l é o comprimento do menor vão da laje. As flechas efetivas foram calculadas através da plataforma Altair HyperWorks v14.

$$f_{lim} = \frac{l}{250} \quad (2)$$

2.4 Otimização topológica

A otimização topológica, conforme o estudo de Bendsoe e Kikuchi (1988), parte do procedimento de distribuir o material no interior do domínio fixo de modo a atender uma função objetivo, que pode ser a minimização do peso final da estrutura ou a maximização da rigidez.

Neste trabalho a otimização topológica do reforço das lajes foi realizada por meio da plataforma Altair HyperWorks v14, tendo como função objetivo minimizar do peso da estrutura de reforço, evitando-se assim impactos na estrutura de fundação da edificação analisada e gerando uma economia de aço a ser utilizado. Cunha (2010) mostra que a função objetivo que considera a minimização do peso da estrutura pode ser escrita conforme a Eq. (3).

$$W = \sum_{i=1}^n \rho_i A_i L_i \quad (3)$$

Em que ρ_i é a massa específica do material, A_i é a área da seção transversal e L_i é o comprimento da i -ésima barra da estrutura.

O problema de otimização topológica foi sujeito a restrição de volume, dada pela Eq. (4) conforme Coutinho (2006), e a restrição de deslocamento máximo admissível de cada laje, dada pela Eq. (5) conforme Silva (1992).

$$\int \rho dV = \alpha V \quad (4)$$

Em que V é o volume do espaço de projeto, ρ é a densidade relativa, $0 \leq \rho \leq 1$, e α é a fração de volume prescrita, $\alpha \in (0,1)$.

$$|u_i(t)| \leq u_i^{adm} \quad (5)$$

Em que $u_i(t)$ é o deslocamento do i -ésimo grau de liberdade da estrutura no período de tempo t e u_i^{adm} é o deslocamento máximo admissível para cada laje.

A primeira fase da otimização topológica consiste em definir o domínio de projeto, as cargas que serão aplicadas e as condições de contorno e na segunda fase o domínio será discretizado por elementos finitos. Assim, insere-se as informações no algoritmo de otimização, que distribuirá o material no domínio fixado de maneira a atender a função objetivo, chegando-se então em uma estrutura com geometria ótima (Bendsoe e Kikuchi 1988).

Na etapa iterativa de distribuição do material no domínio, é preciso criar um modelo de material, que de acordo com Cunha (2010), pode ser através do Método da Homogeneização, que é mais robusto, tendo um custo computacional elevado e uma implementação numérica complexa, ou por meio do Método das Densidades, que é mais utilizado por ser de modelagem e implementação computacional relativamente simples.

No Método das Densidades o domínio de projeto é discretizado por elementos finitos, que são preenchidos homogeneamente pelo material, com o objetivo de realocar o material trocando sua densidade em cada elemento. Assim, ao final do processo de otimização topológica chega-se a elementos sólidos, onde há presença de material, de cor vermelha e densidade igual a 1, e a elementos vazios, sem material de cor azul e densidade igual a 0.

2.4.1 Parâmetros utilizados para otimização topológica do reforço

Para realização da otimização topológica, foi adicionado ao modelo estrutural em elementos finitos, apresentado no item 2.1 deste trabalho, uma malha de aço, utilizando elementos quadrados com dimensões de 120 mm, embaixo das lajes do primeiro e segundo pavimentos (Fig. 4 e Fig. 5), com a finalidade de transformá-la nas vigas que seriam responsáveis pelo reforço estrutural. Essa malha foi representada pelo elemento de casca THINSHELL, o mesmo usado na representação das lajes.

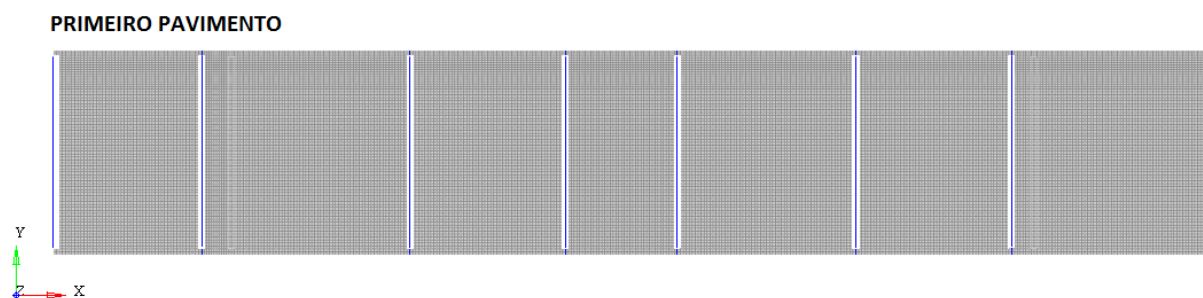


Figura 4. Malha de aço adicionada embaixo das lajes do primeiro pavimento

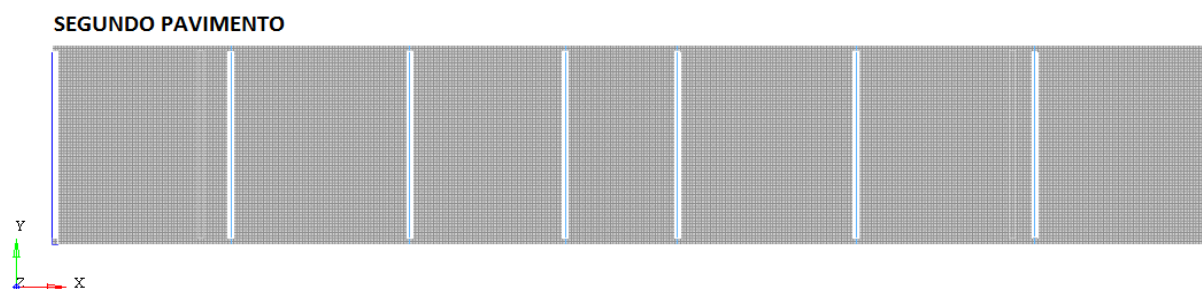


Figura 5. Malha de aço adicionada embaixo das lajes do segundo pavimento

Essa malha foi restringida quanto a variação do volume de cada um dos elementos, até um máximo de 30% acima do volume inicial e o quanto ao deslocamento máximo admissível de cada laje para efeito de aceitabilidade sensorial em razão da limitação visual, conforme ABNT NBR 6118:2014.

3 RESULTADOS

A Tabela 5 apresenta um comparativo entre as flechas limites e efetivas para as lajes da edificação, conforme dados extraídos da análise estática realizada, em que δ_{adm} é o deslocamento máximo admissível, calculado conforme recomendações da ABNT NBR 6118:2014, e δ_{ef} é o deslocamento efetivo, calculado através da plataforma Altair HyperWorks v14.

Tabela 5. Comparação entre os deslocamentos admissíveis e efetivos das lajes

Primeiro pavimento					Segundo pavimento				
Laje	Menor vão (cm)	δ_{adm} (cm)	δ_{ef} (cm)	$\frac{\delta_{ef}}{\delta_{adm}}$	Laje	Menor vão (cm)	δ_{adm} (cm)	δ_{ef} (cm)	$\frac{\delta_{ef}}{\delta_{adm}}$
LP1	599	2,40	6,34	2,64	LS1	720	2,88	5,20	1,81
LP2	825	3,30	7,12	2,16	LS2	720	2,88	5,21	1,81
LP3	624	2,50	5,26	2,10	LS3	629	2,52	4,44	1,76
LP4	451	1,80	3,95	2,19	LS4	451	1,80	3,30	1,83
LP5	720	2,88	6,04	2,10	LS5	720	2,88	5,36	1,86
LP6	630	2,52	5,45	2,16	LS6	720	2,88	5,18	1,80
LP7	810	3,24	9,70	2,99	LS7	715	2,86	5,19	1,81

Analisando a Tabela 5, nota-se que todas as lajes da edificação apresentam flecha efetiva acima do valor admissível, recomendado pela ABNT NBR 6118:2014, indicando a necessidade de execução de reforço estrutural em todas.

Com relação a otimização topológica, o modelo numérico permitiu a análise da influência da variação da disposição do reforço e das flechas admissíveis para cada laje facilitando a identificação das zonas mais solicitadas e associação com a posição do reforço.

O resultado do procedimento iterativo da otimização topológica (Fig. 6) indica que os elementos de cor azul são vazios (sem material, densidade igual a zero) e possuem alta flexibilidade e os elementos de cor vermelha representam material sólido (com material, densidade igual a um) possuindo baixa flexibilidade. Assim, as faixas em vermelho representam as regiões ótimas para alocação do reforço utilizando vigas de aço.

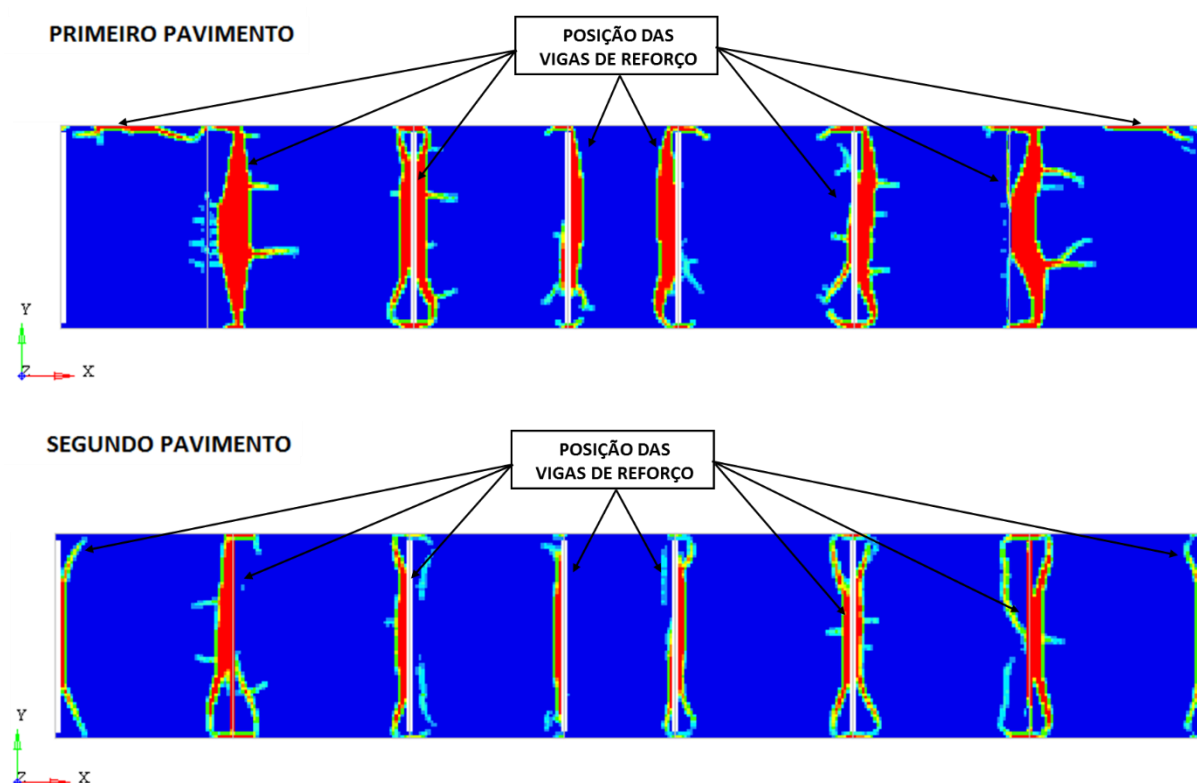


Figura 6. Resultado da otimização topológica para disposição das vigas de reforço

Analisando a Fig. 6 percebe-se que o resultado da otimização indicou a alocação das vigas de reforço nas regiões próximas as vigas transversais existentes, que são as mais solicitadas da edificação, sendo também as regiões onde há maior concentração de tensões.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho de pesquisa apresenta como objetivo principal o estudo para uma melhor região de distribuição dos reforços com vigas de aço em lajes de concreto armado de uma edificação de dois pavimentos, as quais apresentavam flechas excessivas. Não se procurou em

um primeiro momento um resultado da otimização estrutural do reforço que fosse preciso e definitivo para uso direto em projeto e dimensionamento.

A otimização da alocação da estrutura de reforço foi realizada no âmbito da otimização topológica, a qual visa determinar a região de distribuição ótima do material na estrutura. A função objetivo escolhida foi objetivando minimizar o peso da estrutura de reforço, garantindo um menor impacto na estrutura de fundação da edificação estudada e gerando uma economia de aço a ser utilizado.

A partir da simulação numérica realizada, pode-se concluir que, embora os resultados sejam preliminares, a otimização topológica mostrou-se uma ferramenta interessante para determinação da distribuição do reforço na estrutura. Diferente da solução convencionalmente adotada, onde se reforça o local onde acontece o maior deslocamento, ou seja, no meio do vão da laje, a otimização indicou que a região ótima de alocação das vigas de aço seria próxima as vigas transversais existentes da edificação, que são as mais solicitadas e é a região onde há maior concentração de tensões.

Conclui-se que a otimização topológica é uma técnica útil para o estudo da disposição de reforço na estrutura, como mostra Chaves (2010) em sua pesquisa, em particular para casos que apresentem geometrias complexas e condições de apoio e de carregamentos particulares, onde a escolha do posicionamento do reforço pode não ser evidente pelas abordagens tradicionais. A otimização topológica é uma ferramenta útil também para concepção estrutural de edifícios, como pode ser visto na pesquisa de Pinho (2015), pois seu uso pode servir como ponto de partida para o projeto de edifícios mesmo em situações complexas de combinações, carregamentos e geometria.

Por fim, sugere-se para trabalhos futuros o dimensionamento das vigas de aço e a implantação das mesmas nas regiões indicadas pela otimização topológica, verificando assim o desempenho do reforço, cabendo também a realização de uma análise comparativa com a solução convencional, reforço posicionado no meio do vão, de viabilidade econômica e construtiva.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Educação Tutorial (PET) da Secretaria de Educação Superior MEC/SESu pelo apoio recebido no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:2014: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 221 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120:1980: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980. 5 p.

Bendsoe, M. P.; Sigmund, O., 2003. Topology optimization: theory, methods and applications. Berlin: Springer-Verlag, 2003.

Bendsoe, M. P.; Kikuchi, N., 1988. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. v. 71, pp. 197-224. North-Holland.

Bruggi, M., 2009. Generating strut-and-tie patterns for reinforced concrete structures using topology optimization. *Computers & Structures*, v. 87, n. 23-24, pp. 1483-1495.

- Chaves, L. P., 2010. *Estudo da distribuição do reforço de lajes de concreto armado com fibras de carbono, usando otimização topológica*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, Brasil.
- Coutinho, K. D., 2006. *Método de otimização topológica em estruturas tridimensionais*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, Brasil.
- Ferreira, A. C. R. P.; Cunha, J., 2013. Análise da distribuição do reforço com fibras de carbono em vigas de concreto armado. *Ciência e Engenharia*, v. 22, n. 2, pp. 47-56.
- Lima, N. S. et al., 2009. *Uso de estruturas metálicas em reforço estrutural de vigas de madeira*. In: 18ª Semana e Iniciação Científica da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.
- Pinho, F. A. X. C., 2015. *Métodos de densidade em otimização de topologia aplicados a subsistemas de edifícios*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia/GO, Brasil.
- Pivatto, A. B., 2014. *Reforço Estrutural à flexão para viga biapoiada de concreto armado por chapas metálicas e compósito reforçado com fibras de carbono*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, Brasil.
- Silva, R. A., 1992. *Otimização estrutural sujeita a restrições dinâmicas*. Tese de Doutorado – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.
- Sousa, A. F. V. S., 2012. *Reparação, reabilitação e reforço de estruturas de betão armado*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, Portugal.