



## OTIMIZAÇÃO DE PAVIMENTOS DE LAJES NERVURADAS ISOLADAS: EFEITOS DOS REQUISITOS DE DESEMPENHO

João Pedro Alexandre Silva Mota<sup>a</sup>

Antônio Macário Cartaxo de Melo<sup>a</sup>

jpsm07091995@gmail.com

macario@ufc.br

<sup>a</sup> Laboratório de Mecânica Computacional e Visualização (LMCV), Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Bloco 728, 60440-900, Ceará, Fortaleza, Brasil.

**Abstract.** *Este estudo contempla o desenvolvimento de um modelo de otimização de custo para pavimentos de lajes nervuradas simplesmente apoiadas, partindo-se de uma análise de lajes isoladas. A maior atenção sobre a norma de incêndio, motivada pela obediência à norma de desempenho (NBR 15575), em conjunto com a revisão da NBR 6118, originou novos cenários de projeto, nos quais diversos padrões de formas plásticas se tornaram questionáveis. O modelo de otimização tem como função objetivo o custo de concreto, aço e mão de obra de lajes e vigas, onde vigas são apenas pré-dimensionadas, adotando-se uma taxa fixa de armadura. As variáveis de projeto globais são: altura da laje, distância entre faces da nervura, largura de nervura, altura da mesa, resistência do concreto, número de lajes na direção x e número de lajes na direção y; e as variáveis locais são: as bitolas de armadura longitudinais e distribuição nas direções x e y. Exigências de resistência (ELU) e rigidez (ELS) foram postas como restrições, além de exigências de desempenho e dimensões mínimas para edificações em situação de incêndio. As lajes foram tratadas isoladamente para objeto de análise de esforços. Adotaram-se dois algoritmos evolutivos, i.e., Algoritmo Genético e Enxame de Partículas, este mostrando maior eficiência.*

**Palavras-Chave:** *Otimização, Pavimento, Lajes nervuradas, Enxame de Partículas.*

## 1 INTRODUÇÃO

A padronização de formas plásticas de diversas dimensões é a maneira mais comum de se produzir lajes nervuradas, de modo que se escolhem formas que melhor se adequem ao projeto a ser desenvolvido. Contudo, projetos de pavimentos de lajes nervuradas têm passado por significativas mudanças, inviabilizando técnica e economicamente diversas dimensões de forma. Tais mudanças são consequência de exigências normativas pertinentes em normas relativas a estruturas de concreto armado e desempenho estrutural, respectivamente, NBR 6118:2014 e NBR 15575:2013. A otimização tem sido um meio alternativo de buscar soluções de projeto revertendo o quadro de incompatibilidades, com foco na eficiência e economia do sistema construtivo.

Neste estudo, propõe-se o desenvolvimento de um modelo computacional de otimização de custo que possa ser aplicada a pavimentos de lajes nervuradas, unindo ferramentas de otimização já existentes a processos de análise estrutural. O principal objetivo da otimização, é encontrar padrões de formas viáveis frente às alterações proposta pela NBR 15575, uma vez que os requisitos de desempenho impactam diretamente nas dimensões dos caixotes e a concepção das lajes no pavimento.

O pavimento genérico estudado é apresentado na Figura 1, sendo composto por lajes e vigas. As lajes e vigas serão os elementos estruturais estudados. Às vigas, será aplicado um pré-dimensionamento e adoção de taxa fixa de armadura. Às lajes, será aplicado estudo mais acurado, onde todas as dimensões da seção transversal, armaduras nas nervuras e a quantidade de lajes nas duas direções são considerados.



Figura 1 – Tipologia de pavimento estudado. (Fonte: autor)

Sahab (2004) propôs a otimização de custo de lajes lisas sem vigas apoiadas em pilares. Sua pesquisa incluía encontrar a melhor distribuição de pilares no pavimento, as dimensões da seção transversal e armadura para diferentes elementos estruturais (lajes e pilares). Sua função objetivo contemplava custos de material, moldagem e mão de obra. A principal diferença entre os estudos está no sistema estrutural escolhido, sendo o deste trabalho lajes nervuradas apoiadas em vigas. Nessa perspectiva, a função objetivo deste trabalho contempla outras características que não foram abordadas por Sahab (2004), sendo a presença de vigas a principal diferença.

## 2 ANÁLISE ESTRUTURAL

As lajes do pavimento serão analisadas como isoladas, sendo desconsideradas as continuidades entre lajes, eliminando-se armaduras negativas sobre os apoios. Desse modo, o pavimento pode ser analisado como um conjunto de lajes nervuradas isoladas, sendo cada uma calculada independentemente, mas com os mesmos padrões de forma.

Os esforços internos das lajes são obtidos utilizando a solução analítica de Navier para placa, aplicado um carregamento uniformemente distribuído. A partir dessa solução é possível obter os esforços de momento fletor e cisalhante para ambas as direções, assim como o valor da flecha imediata máxima. As cargas atuantes no pavimento compreendem ações do revestimento, paredes, peso próprio e carga acidental. Utilizou-se combinação quase-permanente para cálculo de flecha imediata e combinação permanente para cálculo de esforços.

## 3 MODELO DE OTIMIZAÇÃO

### 3.1 Variáveis de projeto

As incógnitas do problema podem ser classificadas em dois grupos, globais e locais. Globais são variáveis que se aplicam a todo o pavimento, como: *número de lajes isoladas nas duas direções* ( $n_x$  e  $n_y$ ), *distância entre faces de nervura* ( $l_0$ ), *largura de nervura* ( $b_w$ ), *espessura de capa* ( $h_c$ ), *altura da laje* ( $h_l$ ) e *resistência característica do concreto* ( $f_{ck}$ ). Locais são variáveis relativas a cada laje do pavimento, sendo: *bitolas das armaduras longitudinais* ( $\phi_x^l$  e  $\phi_y^l$ ) e *das armaduras de distribuição* ( $\phi_x^d$  e  $\phi_y^d$ ). Em suma, as variáveis globais são relativas ao padrão de forma e à concepção das lajes, e as locais referentes ao detalhamento da armadura. O número de lajes é definido por  $n_x \times n_y$ .

### 3.2 Restrições

Aplicou-se restrições relativas a *dimensões mínimas e máximas*, à verificação de resistência no *Estado Limite Último (ELU)* e à verificação de deformação excessiva no *Estado Limite de Serviço (ELS-DEF)* apenas das lajes.

### 3.3 Função objetivo

A função objetivo visa a minimização de custo do pavimento, contemplando custos de materiais e mão de obra das lajes e vigas, sem a participação do custo de pilares. A Eq. (1) expressa a função objetivo:

$$f_{\text{objetivo}} = \begin{cases} C_{\text{concreto}}^{\text{laje}} + C_{\text{aço}}^{\text{laje}} + C_{\text{mão\_de\_obra}}^{\text{laje}} \\ C_{\text{concreto}}^{\text{viga}} + C_{\text{aço}}^{\text{viga}} + C_{\text{mão\_de\_obra}}^{\text{viga}} \end{cases} \quad (1)$$

onde,  $C_j^i$  representa o custo do insumo “j” no elemento “i”. No custo de mão de obra de viga existe um multiplicador de tempo, sendo essa a maneira de penalização incidente sobre o custo das vigas. Como as vigas demandam maior tempo para produção frente as lajes, há necessidade de contabilizar seu custo adicional. Na forma:

$$C_{m\tilde{a}o\_de\_obra}^{viga} = f_{tempo} \cdot c_{m\tilde{a}o\_de\_obra} \cdot L_{viga} \quad (2)$$

onde,  $L_{viga}$  é o comprimento total de vigas, em metros, e  $c_{m\tilde{a}o\_de\_obra}$  o custo unitário de mão de obra, em R\$/m.

## 4 ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO

Dois métodos evolucionários, Algoritmos Genéticos (AG) e Enxame de Partículas (PSO), foram aplicados ao problema e comparados quanto à eficiência. Por ambos os métodos serem heurísticos, não há certeza de que a solução encontrada por cada otimização corresponda à solução ótima do problema, de modo que devem ser calibrados os parâmetros específicos de cada método de otimização, para posterior avaliação de performance.

Após calibração dos algoritmos, observou-se que respostas apresentadas pelo PSO retornaram maiores taxas de sucesso e menor tempo de execução computacional quando comparado com o AG. Assim, o PSO foi escolhido como algoritmo de otimização padrão, do qual se obtiveram os resultados a serem comentados na sequência.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Metodologia

Foram escolhidos três pavimentos de dimensões diferentes, sendo um de 18 por 18 m, outro de 18 por 36 m e, ainda outro, 18 por 90 m.

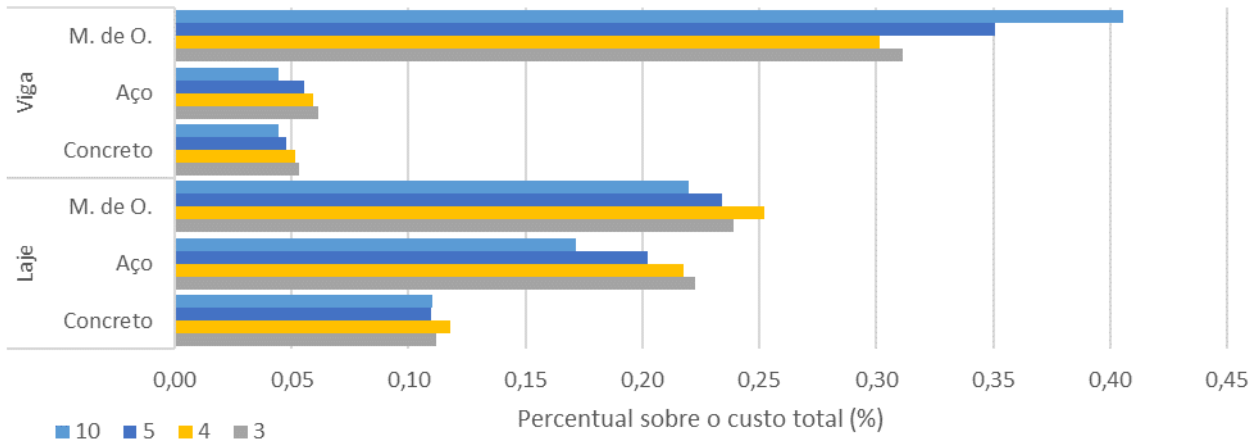
O modelo possui alguns parâmetros fixos durante todas as otimizações e que são comuns às três dimensões de pavimento. O custo unitário de concreto depende de sua resistência característica, sendo, portanto, variável. O custo unitário de aço é de R\$ 2,74/kg. O custo unitário de mão de obra para laje é de R\$ 610,00/m<sup>3</sup>. O custo de mão de obra para vigas é de R\$ 50,00/m. A carga acidental adotada foi de 5 kN/m<sup>2</sup>. Carga de parede e revestimento tem ambas 1,25 kN/m<sup>2</sup>. A carga de peso próprio depende da seção transversal da laje, variando ao longo das otimizações.

A cada um dos três pavimentos foi feito um estudo de sensibilidade em relação ao fator tempo presente no custo de vigas, com os valores 3, 4, 5 e 10.

### 5.2 Otimizações

As otimizações dos três pavimentos demonstraram comportamentos bastante semelhantes, principalmente, na distribuição de custos. Observou-se que o custo de mão de obra da viga preponderava sobre os demais, representando cerca de 35% do total do custo do pavimento, contrapondo com o custo de mão de obra da laje, que foi de 25%. Em contrapartida, o custo de material (concreto e aço) em vigas soma apenas 10%, comparados com 30% de lajes. Esse pequeno consumo das vigas é devido a sua melhor eficiência para resistir à flexão.

Os resultados expressam a realidade de projeto enfrentada, onde a aplicação de pavimentos de lajes com vigas torna-se cada vez menos viável economicamente, haja vista o grande custo causado pela mão de obra. Desse modo, sistemas alternativos de pavimentos de lajes sem vigas tornam-se mais atrativas. A Figura 2 expressa essa realidade:



**Figura 2 – Distribuição de custos no pavimento de 18 por 18 m por fator de tempo. (Fonte: autor)**

À medida que  $f_{tempo}$  das vigas cresce, percebe-se uma tendência de redução da quantidade de vigas, com aumento das dimensões dos vãos das lajes internas dos pavimentos. Isso mostra coerência do modelo, uma vez que o algoritmo prioriza lajes maiores, diminuindo a participação do custo das vigas no preço final. A Tabela 1 apresenta os resultados para o pavimento de 18 por 18 m. Observa-se resultado semelhante para os pavimentos de 18×36 e 18×90.

**Tabela 1 – Resultado de otimização para pavimento de 18 por 18 m.**

$f_{tempo}$	$n_x$	$n_y$	$l_0 (cm)$	$b_w (cm)$	$h_c (cm)$	$h_l (cm)$	$f_{ck} (MPa)$	$\phi_x^l$	$\phi_y^l$	$\phi_x^d$	$\phi_y^d$
3	4	4	58,0	12,5	10	15	30	16,0	16,0	3,8	3,8
4	3	3	43,0	12,0	10	18	30	16,0	16,0	3,8	3,8
5	3	3	43,0	12,0	10	18	30	16,0	16,0	3,8	3,8
10	2	2	73,0	12,5	10	27	35	25,0	25,0	3,8	3,8

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro dado pela FUNCAP na forma de iniciação científica e à empresa IMPACTO PROTENSÃO, a qual demonstrou interesse na pesquisa.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho/Parte 2: para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Cargas para o Cálculo de Estruturas de Edificações. Rio de Janeiro, 1980.

SAHAB, M.G.; ASHOUR, A.F.; TOROPOV, V.V. Cost Optimisation of Reinforced concrete flat slab buildings. Tehran, 2004.