

6. Conclusões e Sugestões

6.1. Conclusões

Este trabalho analisou modelos numéricos representativos de lajes nervuradas a fim de permitir ao engenheiro civil o cálculo dos deslocamentos e esforços internos deste tipo de elemento.

As lajes nervuradas apresentam vantagens quando comparada às maciças pela diminuição de volume de concreto sem afetar sua eficiência estrutural, permitindo aos construtores maiores vãos e economia. Este conceito implica na necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias da construção, como as lajes nervuradas rotacionadas e as lajes nervuradas tridirecionais, assim como o conceito de faixas nervuradas quando utilizada a rotação de 45° das nervuras.

O objetivo deste trabalho foi, portanto, a busca da eficiência deste novo sistema estrutural através do método numérico dos elementos finitos. Sendo assim, pretende-se fornecer aos construtores parâmetros matemáticos para a escolha do tipo ideal de laje para cada situação.

Na primeira parte deste trabalho, foi apresentado um estudo a fim de verificar qual o melhor modelo para lajes nervuradas, ou seja, qual o melhor elemento, melhor malha, e as hipóteses de cálculo que imprimem melhor validade e precisão ao modelo. Este estudo consistiu na comparação dos deslocamentos entre uma laje analisada através do processo analítico e do processo numérico.

No processo numérico, foi utilizado o método dos elementos finitos, e foram testados três modelos. No primeiro, o elemento de casca representou a capa da laje e elementos de viga simularam as nervuras, faixas e pilares. Todos os elementos, com exceção dos pilares, encontrando-se no mesmo plano. O segundo modelo é

semelhante ao primeiro, diferindo somente que as linhas neutras não mais se encontram no mesmo plano, sendo ligadas por elementos rígidos (*offset*). O terceiro é baseado em elementos sólidos, ou seja, todos consistindo em três dimensões com apenas 3 graus de liberdade por nó, que foi usado como o modelo de referência para comparação dos resultados. Os resultados de um quarto modelo baseado no método das grelhas, que é normalmente utilizado no dimensionamento dessas lajes, são também comparados com os resultados obtidos pelos outros três modelos.

Concluiu-se, através de vários estudos, que, ao medir os deslocamentos máximos nos cinco pontos distintos da laje, aquele que apresentou maior proximidade com o modelo sólido foi o modelo com ligações rígidas. Já a pior aproximação se deu no modelo analisado através do *software* TQS, que utiliza o método das grelhas para encontrar a solução.

Para o processo rotineiro de dimensionamento de lajes, assim como para viabilização da simulação dos diversos modelos deste trabalho, é necessário combinar a precisão do modelo com o tempo de processamento, armazenamento de dados, tempo e dificuldade na modelagem e análise de resultados. Quando se combina todos os fatores, é possível demonstrar que o modelo de casca e vigas com ligações rígidas entre planos apresentou notável vantagem.

Na análise do estudo de convergência da dimensão da malha adotada em cada modelo, foram analisadas malhas com dimensões de 1000x1000 mm², 800x800 mm², 500x500 mm², 250x250 mm², 125x125 mm² e 83,3x83,3 mm². Utilizando o mesmo método comparativo dos modelos, a melhor relação deslocamentos e tempo de processamento foi obtida com a malha de 250x250 mm².

Por fim, pode-se afirmar que, para o presente estudo, o melhor modelo para simular uma laje nervurada é o modelo que utiliza elementos 1D (vigas), e elementos 2D (cascas) representados em planos diferentes utilizando ligações rígidas. A malha adotada foi a que utilizou elementos 250x250 mm².

A segunda parte do trabalho consistiu em, a partir do melhor modelo encontrado, simular para as diversas condições de apoio, as lajes nervuradas ortogonais aos eixos x e y, as lajes rotacionadas em 45° a esses eixos, e as lajes

tridirecionais. Além disso, foi realizado um estudo onde foram substituídas as faixas maciças por um conjunto de nervuras com o intuito de simular uma faixa.

Neste estudo, foram parametrizados os dados do modelo, tornando as propriedades mecânicas do material, as condições de carregamento e a geometria das seções transversais padrão, variando apenas a dimensão total da laje e as condições de contorno.

Conclui-se que, para o caso 1 de Marcus, ou seja, com as lajes simplesmente apoiadas em seu bordo, a rotação das nervuras, assim como a utilização de três nervuras, não apresentaram vantagem em nenhum dos três aspectos, sendo eles a deformação, a quantidade de aço medida em quilogramas e o volume de concreto. Nesta etapa, foram testadas lajes com a relação entre as dimensões x e y de 1, 1,5 e 2.

Posteriormente, foram adotadas as outras condições de contorno, sendo elas a variação de continuidade entre lajes. Para esta simulação, foi adotada a laje que apresentou melhor resultado na comparação no caso um, pois mesmo com resultados inviabilizando a adoção dos novos sistemas estruturais, a variação da continuidade entre lajes poderia apresentar resultados satisfatórios. Com isso foi adotado a laje quadrada de dimensões $6 \times 6 \text{ m}^2$.

Nesta nova etapa, o resultado negativo persistiu, provando que os deslocamentos no modelo clássico de lajes nervuras, assim como o peso de aço e volume de concreto são consideravelmente menores.

Por fim, foi estudada a influência que as faixas têm sobre as lajes e os efeitos no sistema, que são impostos a partir da substituição da faixa maciça por nervurada.

Pode-se constatar que a diminuição de inércia das faixas nervuradas implicou em uma maior flexibilidade no sistema, aumentando os deslocamentos obtidos no Estado Limite de Serviço, e a área de aço dimensionada através do Estado Limite Último. Devido ao efeito de esmagamento da biela de compressão nas proximidades dos pilares, a pequena diminuição de concreto para o caso de lajes rotacionadas com faixas nervuradas não implicou em vantagem, pois é necessário um acréscimo da área transversal das vigas faixas para combater o esmagamento da biela.

Esses resultados são contrários ao que afirmam alguns trabalhos encontrados na literatura, como a de Rocha [11], que afirma ser favorável o caminhamento do fluxo de tensões diretamente aos pilares. No entanto, estes dados foram obtidos a partir de estudos analíticos simplificados, que utilizam grelhas coplanares, desprezando, portanto, o efeito da excentricidade, que, por sua vez, provoca efeitos como torção nas nervuras e um aumento dos momentos fletores.

Outro fator desprezado foi o aumento do peso próprio da estrutura ao rotacionar as nervuras ou adotar a laje tridirecional, aumentando, portanto, os momentos no vão central, que passa a ter maior vão teórico, e nas proximidades dos apoios, devido ao engaste destas nervuras.

Fica claro, portanto, que nestas lajes adotadas para estudo, o método clássico apresentou melhor comportamento estrutural, com lajes mais rígidas e econômicas no ponto de vista de materiais.

Torna-se mais oneroso a adoção dos novos sistemas estruturais também pela nova adequação da mão de obra, pois esta teria que apresentar treinamentos específicos para a montagem das formas *in loco*.

6.2.

Sugestões para Trabalhos Futuros

Este estudo consistiu na análise de lajes nervuradas no regime linear, com algumas hipóteses simplificadoras usualmente adotadas para dimensionamento de lajes, não elucidando completamente o comportamento dos novos sistemas estruturais. Com o intuito de dar continuidade à pesquisa, propõem-se as seguintes abordagens:

- Estudo experimental das lajes rotacionadas e tridirecionais expostas neste trabalho, a fim de comprovar os resultados numéricos encontrados;
- Estudo numérico e experimental das lajes rotacionadas e tridirecionais com faixas e/ou nervuras sob o efeito de Protensão;

- Análise dos novos sistemas estruturas no regime plástico, já que o presente estudo foi realizado para a estrutura com comportamento elástico linear;
- Avaliação dinâmica das lajes sob efeitos de carregamentos cíclicos;
- Estudo da influência da laje para utilização como laje diafragma, contribuindo assim para a rigidez global da estrutura de edifícios;
- Estudo do efeito de torção nas nervuras causado pela excentricidade dos planos neutros dos elementos de casca e de viga;
- Estudo do efeito de cisalhamento nas nervuras quando exigido por norma.