

ESTUDO DE UMA LAJE NERVURADA EM MODELO REDUZIDO SUBMETIDA A UM CARREGAMENTO LINEAR

Schwetz, P. F.¹, Gastal, F.P. S. L.¹, Silva F^o, L.C.P.¹

¹Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul



RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar a eficiência de um método de cálculo amplamente empregado na modelagem de lajes nervuradas, verificando se o mesmo representa satisfatoriamente seu comportamento. Um modelo reduzido foi confeccionado em microconcreto armado, representando uma laje nervurada real. O estudo mediu deslocamentos e deformações específicas em seções características do modelo, submetido a um carregamento linear e a um uniformemente distribuído. O modelo experimental teve um comportamento elástico-linear durante todas as etapas de carregamento, com a distribuição e orientação dos momentos fletores experimentais compatíveis com as previsões teóricas. Apesar disto, houve diferenças entre momentos fletores teóricos e experimentais, possivelmente pela desconsideração do momento torçor nas barras da grelha. Também, o modelo experimental mostrou-se mais rígido que o teórico. Este comportamento pode ser atribuído a não consideração da contribuição da capa de concreto na análise numérica. O ajuste de alguns parâmetros no modelo numérico, entretanto, reduziu estas diferenças.

1. INTRODUÇÃO

A concorrência no mercado da construção civil tem levado construtoras e projetistas a uma constante busca por soluções que, além de eficazes, tragam diminuição de custos, rapidez e versatilidade de aplicações. Soluções estruturais mais sofisticadas e racionais são exigências crescentes para projetistas de estruturas, em virtude da evolução dos projetos arquitetônicos e consolidação dos novos conceitos de gerenciamento de obras e promoção da qualidade das construções.

Seguindo esta tendência, as lajes nervuradas vêm se firmando gradativamente como uma solução atraente. Este sistema estrutural pode ser definido como

um conjunto de nervuras, distribuídas em uma ou mais direções, regularmente espaçadas entre si, integralizadas por uma capa de concreto (Pereira, 2003).

O sistema nervurado é uma evolução natural das lajes maciças, pois resulta da eliminação da maior parte do concreto abaixo da linha neutra, o que permite o aumento econômico da espessura total das lajes pela criação de vazios em um padrão rítmico de arranjo. Com isso tem-se um alívio do peso próprio da estrutura e um aproveitamento mais eficiente dos materiais, aço e concreto.

A análise estática das lajes nervuradas tem por objetivo determinar o valor e a distribuição das forças cortantes e dos momentos fletores e torçores atuantes na

estrutura, a fim de dispor, em cada seção da peça, a armadura necessária para resistir de forma satisfatória a estes esforços. Além disso, torna-se fundamental a avaliação, pelo projetista, das deformações que ocorrerão na estrutura submetida ao carregamento de serviço.

Com relação à força cortante, o maior risco provém do puncionamento da placa pelos pilares, que se caracteriza por ser um fenômeno combinado de tensões normais e tangenciais e por apresentar uma ruptura do tipo frágil. A região circundante aos pilares, que deve resistir aos esforços de punção, bem como a momentos fletores negativos geralmente elevados, deve ser reforçada por maciços, formados pela retirada dos blocos de enchimento (Montoya, 197_).

O conhecimento sobre a quantificação das solicitações e o comportamento de lajes nervuradas de concreto armado ainda é bastante escasso, apesar de existirem algumas pesquisas numéricas e experimentais sobre este sistema estrutural (Ajdukiewicz & Kliszczewicz, 1986; Selistre, 2000; Abdul-Wahab & Khalil, 2000; Soares, 2003).

Tradicionalmente, as lajes nervuradas sempre foram analisadas por meio de métodos simplificados, derivados dos procedimentos criados para lajes maciças, adaptados de tabelas baseadas na Teoria da Elasticidade. Todavia, as análises experimentais confirmam que isso não é adequado, pois essa geometria de laje não consegue desenvolver os mesmos momentos de torção de uma laje maciça e, conseqüentemente, apresenta momentos fletores e deslocamentos maiores.

Com o objetivo de compreender melhor o comportamento de lajes nervuradas de concreto armado e, quantificar as solicitações da estrutura de uma forma mais realista, foi realizado um programa experimental, onde foram medidas deformações específicas e deslocamentos verticais em uma laje nervurada em modelo reduzido. Os resultados experimentais foram comparados com os de uma análise computacional dessa estrutura.

2. ANÁLISE NUMÉRICA

Métodos numéricos e programas computacionais cada vez mais sofisticados estão sendo utilizados no cálculo de estruturas de concreto armado. Dentre os métodos disponíveis, os mais indicados para a resolução de estruturas complexas, como as lajes nervuradas, são aqueles que as consideram como grelhas, seguindo os procedimentos de análise matricial ou o método dos elementos finitos. No presente trabalho, a análise numérica da laje nervurada em estudo foi realizada empregando-se a análise matricial de grelhas. Para efetuar a análise utilizou-se o software CAD/TQS para Windows, versão 11.9.9, por ser um programa comercial amplamente utilizado para o cálculo de estruturas de concreto armado no Brasil.

2.1 Definição da geometria e carregamento

O modelo de laje nervurada utilizado nesta pesquisa foi gerado a partir da adaptação de um projeto arquitetônico real. Originalmente, o projeto estrutural havia sido concebido utilizando uma estrutura convencional de concreto armado (laje maciça-viga-pilar). Tomou-se o cuidado de selecionar um projeto não simétrico, com características que induzissem ao uso de uma laje nervurada armada em duas direções. A modelagem da estrutura como laje nervurada foi feita diretamente no modelador estrutural do software TQS. A forma final adotada, com as respectivas propriedades geométricas, pode ser vista na Figural.

A laje foi apoiada em vigas de borda com largura $b=35$ cm e altura $h=28$ cm, com o objetivo de causar enrijecimento para evitar deformações excessivas. A região circundante aos pilares, que apresenta momentos fletores negativos e puncionamento, foi reforçada, considerando-se uma região em laje maciça. O carregamento foi composto pelo peso próprio, pela carga permanente, pela carga acidental e pela carga das alvenarias, aplicadas diretamente sobre a laje.

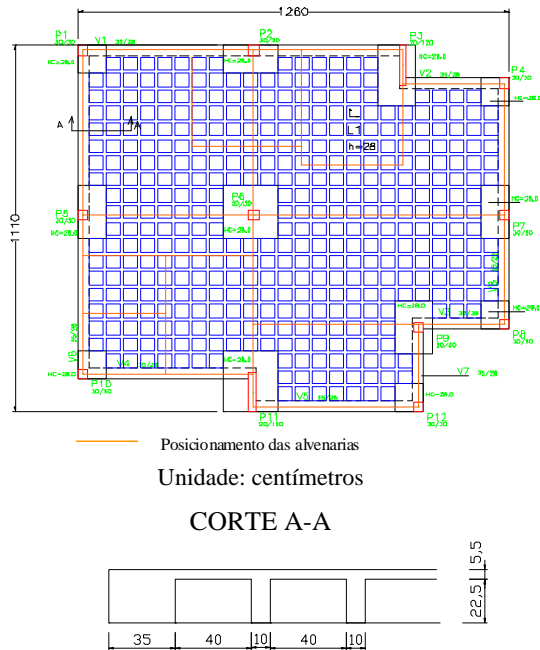


Fig 1 - Laje nervurada gerada pelo Modelador Estrutural TQS

A resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) adotada no projeto foi de 30 MPa. Os cobrimentos foram definidos segundo a norma brasileira NBR 6118:2003 (ABNT,2004), bem como o coeficiente de Poisson, cujo valor usado foi $\nu = 0,20$. Admitiu-se um peso específico do concreto armado equivalente a $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$. O módulo de deformação longitudinal do concreto foi determinado a partir de recomendações da norma brasileira, sendo que o valor utilizado foi $E = 26 \text{ GPa}$.

2.2 Resultados da análise numérica

Fornecidos os dados, o programa gerou automaticamente o modelo numérico da laje, formado por 938 nós e 1481 barras. As Figuras 2, 3 e 4 apresentam respectivamente a configuração deformada, a distribuição de momentos fletores e torçores na laje, a partir da análise linear da grelha.

Cabe salientar que o Sistema TQS não considera, na análise linear, as armaduras na determinação da rigidez das seções transversais.

Foi realizada, também, uma análise não-linear da grelha para verificação dos deslo-

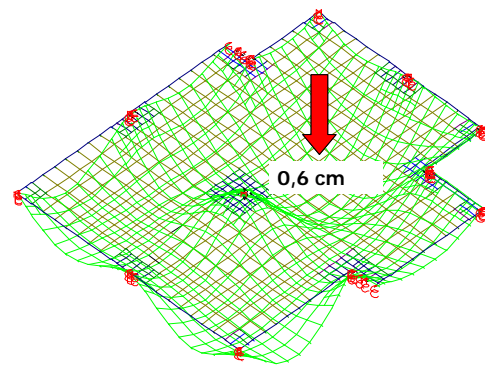


Fig 2 - Deformação da laje submetida ao carregamento descrito - Análise Linear

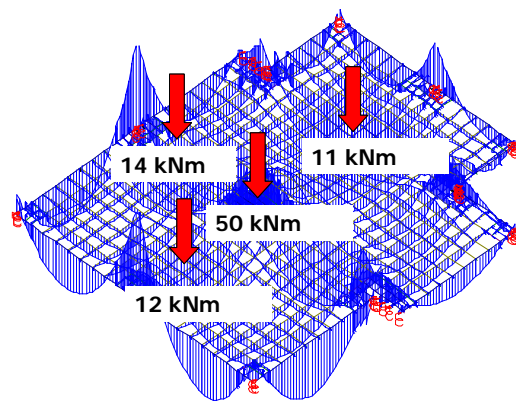


Fig 3 - Diagrama de momentos fletores da laje submetida ao carregamento descrito - Análise Linear

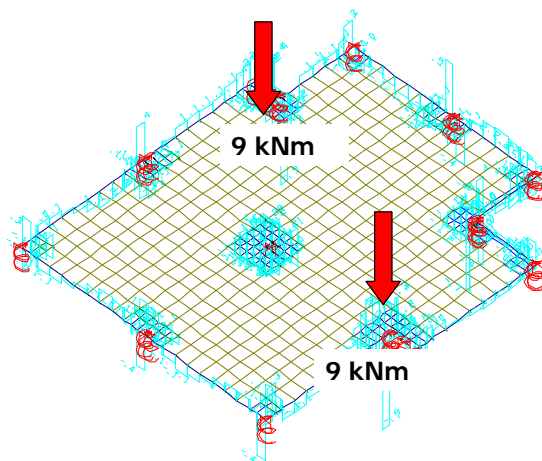


Fig 4 - Diagrama de momentos torçores da laje submetida ao carregamento descrito - Análise Linear

camentos verticais máximos. O resultado desta análise pode ser visualizado na Figura 5. As linhas em vermelho representam as posições onde a análise numérica, efetuada pelo programa, prevê a fissuração das barras.

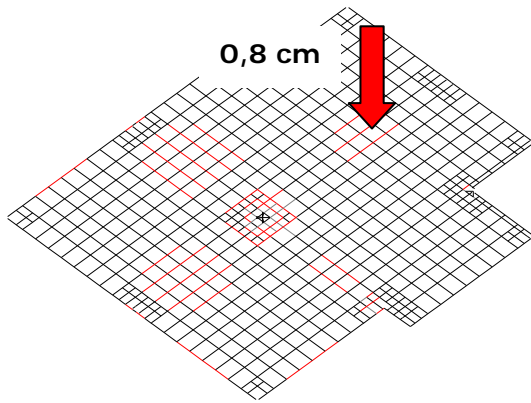


Fig 5 – Resultado da análise não-linear da grelha

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

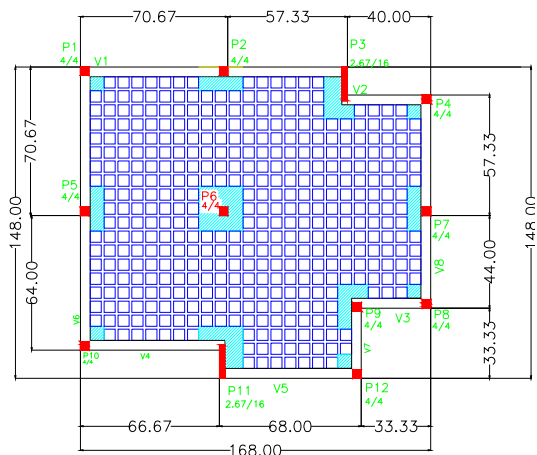
Para realizar a análise experimental da estrutura objeto deste estudo, foi construído um modelo reduzido, semelhante ao protótipo, respeitando as relações de pertinência estabelecidas pela Análise Dimensional (Klein, 1988, *apud* Burggrabe, 1978). O modelo reduzido foi confeccionado em microconcreto armado, na escala 1:7,5. A relação entre os módulos de elasticidade longitudinal do concreto e do microconcreto foi estabelecida como sendo $\lambda_1 = 1$. Os procedimentos de dosagem e ensaios de caracterização dos materiais podem ser vistos em Schwetz (2005). A Figura 6 mostra as dimensões da fôrma do modelo reduzido.

3.1 Preparação e concretagem do modelo

A fôrma para moldagem da laje em modelo reduzido foi montada com a utilização de placas de compensado plastificado, fixadas sobre uma estrutura rígida de tábuas e caibros. Sobre o compensado, foi fixada uma cópia em papel da planta da fôrma do modelo reduzido, para facilitar o posicionamento das armaduras e dos elementos estruturais (Figura 7).

Os vazios entre as nervuras foram preenchidos por 411 blocos de EPS (poliestireno expandido), produzidos em laboratório, com dimensões de 5,33 x 5,33 cm.

A armadura dos pilares, vigas e nervuras foi confeccionada em arame galvanizado



Unidade: centímetros

Fig 6 – Fôrma da laje nervurada em modelo reduzido



Fig 7 - Estrutura da fôrma do modelo reduzido

zado (Figuras 8). A Figura 9 mostra alguns detalhes da fôrma do modelo montado antes da concretagem.

Preparada a fôrma e as armaduras, procedeu-se à moldagem do modelo. O microconcreto foi lançado nos pilares e adensado com auxílio de vibradores, aplicados diretamente na fôrma. A Figura 10 mostra o modelo concretado. Após a concretagem, a laje passou por um processo de cura úmida que durou 28 dias. As fôrmas, bem como os blocos de enchimento, foram retiradas 54 dias após a moldagem.

3.2 Definição do sistema de carga do modelo

O sistema de carregamento do modelo era composto por duas cargas principais: a carga linear, representando as alvenarias apoiadas no pavimento, e a carga por unida-

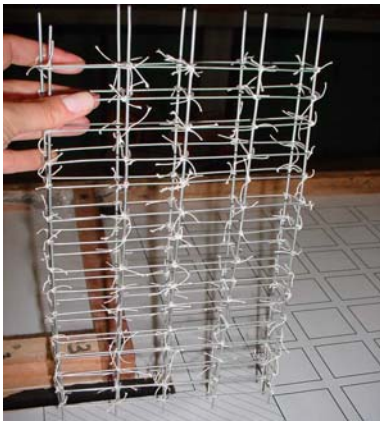


Fig 8 – Armadura do pilar em detalhe

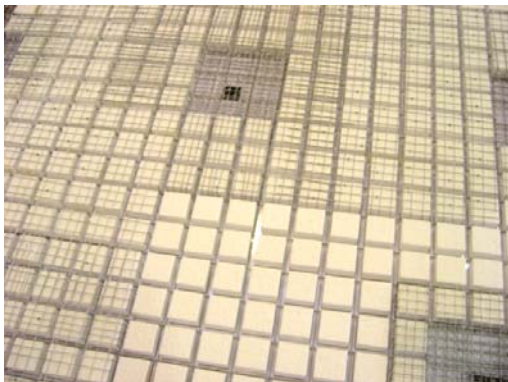


Fig 9 – Detalhes da armadura na fôrma



Fig 10 – Modelo concretado

de de área, representando o somatório das cargas permanentes e acidentais. A carga linear foi simulada utilizando-se painéis de acrílico sem fundo, preenchidos com pó de chumbo. O pó de chumbo foi escolhido por apresentar uma densidade aparente alta ($\gamma_{chumbo} = 6800 \text{ kg/m}^3$), resultando em alturas de carregamento reduzidas, além de ser de manuseio relativamente fácil e ser capaz de acompanhar a deformação da laje. A altura dos recipientes, que serviram para delimitar lateralmente a área de ação das cargas, foi

estabelecida a partir da definição da altura de chumbo necessária para provocar uma intensidade de carga compatível com a carga real. A carga distribuída foi simulada utilizando-se areia.

3.3 Instrumentação do modelo

O modelo foi instrumentado em 35 pontos da estrutura, cuja localização pode ser visualizada na Figura 11. Cada extensômetro colado na superfície inferior da laje, teve como correspondente um colado na parte superior da mesma.

A medição dos deslocamentos verticais foi feita por meio de defletores. Esses medidores foram fixados sobre uma estrutura independente do pórtico metálico de apoio da laje, para evitar que qualquer deformação interferisse na leitura. Os 22 relógios comparadores foram posicionados em seções características do modelo, tendo 4 deles sido fixados nos pilares para monitorar um possível deslocamento da estrutura de apoio da laje. A localização dos defletores pode ser visualizada na figura 12.

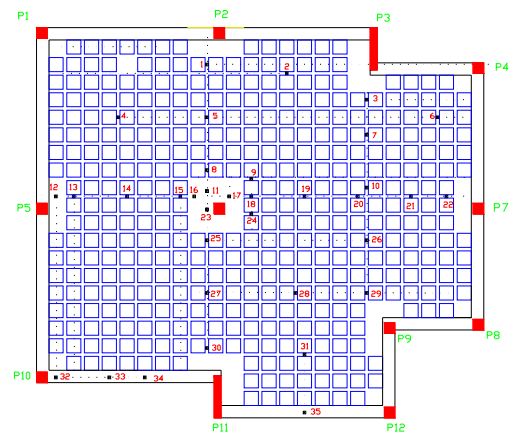


Fig 11 – Planta de localização dos extensômetros

3.4 Preparação e ensaio do modelo

O modelo foi posicionado sobre uma estrutura metálica de apoio, onde os pilares de microconcreto foram engastados, utilizando-se uma formulação adesiva à base de resina epóxi.

A etapa seguinte consistiu no transporte da estrutura de acrílico e sua colocação sobre a laje.

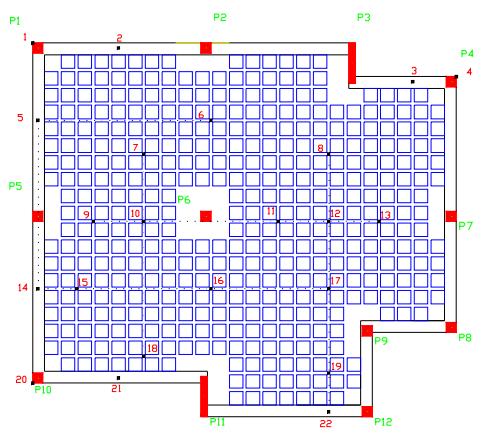


Fig 12 – Planta de localização dos deflectômetros

O ensaio do modelo foi realizado 160 dias após a concretagem. O carregamento foi realizado em quatro etapas, colocando-se primeiramente a areia e preenchendo-se, a seguir, as paredes de acrílico com o pó de chumbo (Figura 13). Ao final de cada etapa de carga, foram lidos os valores nos deflectômetros e arquivadas por meio eletrônico as deformações dos extensômetros. Após o ensaio, foram realizados ensaios complementares para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal do microconcreto (E) e da resistência característica (f_{ck}).

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após o ensaio, a grelha representativa da laje, que havia sido previamente analisada numericamente com o valor da resistência característica (f_{ck}) e do módulo de deformação longitudinal (E) adotados no projeto estrutural, foi reprocessada, com os valores obtidos experimentalmente para as mesmas.

As previsões numéricas foram, então, comparadas com os dados experimentais. Adotaram-se, como parâmetros de comparação, os valores das deformações específicas e dos deslocamentos verticais nos pontos de controle anteriormente enumerados.

4.1 Deslocamentos verticais

A partir dos valores dos deslocamentos verticais medidos no ensaio em cada etapa de carregamento, foram produzidos gráficos com o objetivo de ilustrar o comportamento das seções instrumentadas (Figura 14).

Analisando os gráficos, observa-se que a laje teve comportamento muito próximo ao linear, ao longo de todas as etapas de carregamento, sugerindo que não ocorreu fissuração.

As relações de pertinência entre o modelo reduzido e a estrutura real, a partir das premissas da Análise Dimensional, foram utilizadas para estabelecer a comparação entre os resultados dos deslocamentos verticais medidos experimentalmente e os resultados previstos pela análise numérica. O fator de escala foi utilizado para determinar os deslocamentos verticais experimentais equivalentes na estrutura real, a partir das medições feitas pelos deflectômetros no modelo reduzido. Os valores encontrados, bem como os deslocamentos verticais teóricos previstos pela análise numérica para cada seção, podem ser visualizados no Quadro 1.

Analisando os resultados, observa-se uma defasagem nos valores dos deslocamentos verticais experimentais e teóricos, podendo-se constatar que o modelo reduzido apresentou-se mais rígido que o numérico. Este fato pode ser uma consequência da forma como o Sistema TQS modela a estrutura, considerando-a como um conjunto de vigas “T” justapostas, desconsiderando a integridade da capa, resultando em uma estrutura mais flexível.



Fig 13 – Modelo carregado

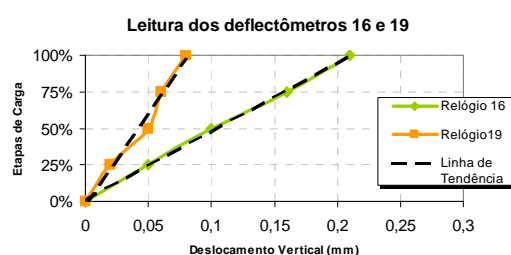


Fig 14 – Gráfico carregamento x deslocamento vertical dos deflectômetros 16 e 19

Quadro 1 – Valores dos deslocamentos verticais experimentais e teóricos⁽¹⁾

Relógio	Localização	Teórico (cm)	Experimental (cm)
15	grelha	0,238	0,060
18	grelha	0,259	0,075
9	grelha	0,216	0,067
13	grelha	0,394	0,165
12	grelha	0,465	0,210
17	grelha	0,257	0,135
11	grelha	0,332	0,195
19	grelha	0,085	0,060
16	grelha	0,221	0,165
6	grelha	0,278	0,218
7	grelha	0,225	0,188
10	grelha	0,182	0,247
8	grelha	0,401	0,728
20	pilar	0,048	0,053
1	pilar	0,045	0,060
4	pilar	0,020	0,068
14	viga	0,174	0,008
21	viga	0,265	0,053
22	viga	0,061	0,038
5	viga	0,156	0,098
2	viga	0,194	0,150
3	viga	0,048	0,128

Sob o ponto de vista prático, no caso específico do software utilizado, é possível ajustar a rigidez do modelo numérico, a partir da alteração de um coeficiente que modifica a inércia à flexão das barras da grelha. O modelo foi reprocessado, adotando-se um valor menor para este coeficiente e os valores experimentais aproximaram-se das previsões numéricas.

As Figuras 15a e 15b mostram duas linhas elásticas da laje, apresentando resultados experimentais, previsões numéricas e resultados numéricos após a alteração do coeficiente de inércia à flexão.

4.2 Deformações específicas

A Figura 16 apresenta os gráficos dos valores de deformações específicas experimentais e teóricas para cada etapa de carregamento, em duas seções instrumentadas. A análise dos gráficos indica que o modelo reduzido teve um comportamento elástico linear, sugerindo que não houve fissuração, confirmando a tendência mostrada pelos resultados dos deslocamentos verticais.

⁽¹⁾ Os deflectômetros 8, 10 e 14 mostraram-se defeituosos durante o ensaio, tendo sido desconsiderados seus resultados.

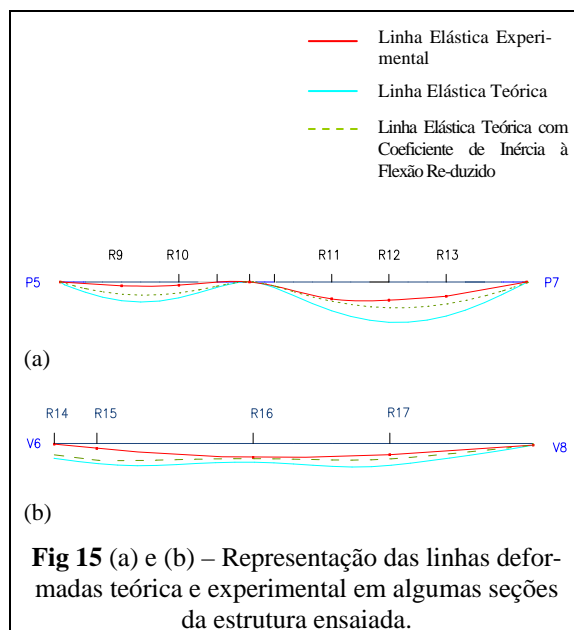


Fig 15 (a) e (b) – Representação das linhas deformadas teórica e experimental em algumas seções da estrutura ensaiada.

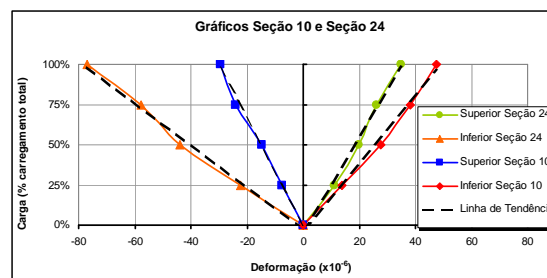


Fig 16 – Gráfico carregamento x deformação específica das seções 10 e 24

A partir dos valores de deformação específica obtidos experimentalmente, foi possível determinar o valor do momento fletor para cada seção estudada, com o objetivo de estabelecer a comparação com os dados obtidos numericamente.

Admitindo a premissa de que a deformação específica do modelo reduzido é a mesma do modelo teórico (Klein, 1988), foi possível obter o momento fletor experimental M_{exp} na estrutura real, aplicando-se a Teoria da Elasticidade, a partir da determinação do momento de inércia e da posição da linha neutra para cada seção instrumentada.

Em paralelo, foi calculado o valor do momento de fissuração teórico M_r , de acordo com a norma brasileira NBR 6118:2003 (ABNT,2004), para cada seção instrumentada, utilizando a resistência média do concreto à tração, as características da seção e a armadura real adotada. Os valores obtidos podem ser visualizados no Quadro 2.

Quadro 2 – Valores estimados, na estrutura real, do momento experimental, do momento de fissuração e do momento teórico em cada seção de análise

Seção	E (GPa)	y (m)	σ_{sup} (kN/m ²)	σ_{inf} (kN/m ²)	M_{exp} (kNm)	M_r (kNm)	M_{teor} (kNm)
1	33,23	0,2198	-3,59E+02	5,75E+01	6,16E-01	10,9	11,00
2	33,23	0,1256	-5,96E+02	6,14E+02	1,74E+00	10,5	4,00
3	33,23	0,0000	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	10,9	1,50
4	33,23	0,1109	-5,24E+02	6,81E+02	1,78E+00	10,9	1,00
5	33,23	0,1188	-1,16E+03	1,33E+03	3,69E+00	10,9	14,00
6	33,23	0,1229	-6,77E+02	7,28E+02	2,01E+00	10,4	4,00
7	33,23	0,1399	-8,93E+02	7,34E+02	2,39E+00	10,9	7,50
8	33,23	0,0130	6,41E+01	-1,20E+03	-1,03E+00	-7,9	0,00
9	33,23	0,0488	3,19E+02	-1,35E+03	-1,38E+00	-7,9	-5,00
10	33,23	0,0852	-7,91E+02	1,58E+03	3,48E+00	10,9	10,00
11	33,23	0,0579	2,08E+02	-7,08E+02	-1,90E+00	-20,5	-9,50
12	33,23	0,0000	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-19,7	-1,00
13	33,23	0,1054	-4,40E+02	6,24E+02	1,57E+00	10,9	8,00
14	33,23	0,0853	-7,08E+02	1,41E+03	3,13E+00	10,9	11,50
15	33,23	0,0000	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-7,9	-1,00
16	33,23	0,1614	7,80E+02	-4,52E+02	-2,56E+00	-20,5	-6,50
17	33,23	0,0838	5,44E+02	-1,11E+03	-3,43E+00	-20,5	-18,00
18	33,23	0,0400	4,79E+02	-2,57E+03	-2,49E+00	-7,9	-7,50
19	33,23	0,1017	-1,17E+03	1,77E+03	4,38E+00	10,9	8,50
20	33,23	0,1063	-1,08E+03	1,50E+03	3,79E+00	10,9	11,00
21	33,23	0,0907	-5,53E+02	1,00E+03	2,29E+00	10,9	9,50
22	33,23	0,1186	-3,41E+02	3,92E+02	1,08E+00	10,9	5,00
23	33,23	0,1186	1,61E+03	-1,86E+03	-7,20E+00	-20,5	-18,50
24	33,23	0,0794	1,16E+03	-2,56E+03	-5,54E+00	-21,8	-7,00
25	33,23	0,0356	3,72E+02	-2,29E+03	-3,96E+00	-21,8	-4,50
26	33,23	0,1140	-8,44E+02	1,04E+03	2,79E+00	10,9	7,00
27	33,23	0,1284	-1,02E+03	1,01E+03	3,00E+00	10,9	12,00
28	33,23	0,1316	-6,74E+02	6,32E+02	1,93E+00	10,9	1,00
29	33,23	0,0000	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-7,7	-1,50
30	33,23	0,0000	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	10,9	10,50
31	33,23	0,1195	-9,38E+02	1,06E+03	2,96E+00	10,9	7,00
32	33,23	0,0908	-7,78E+01	1,41E+02	5,85E-01	26,0	6,00
33	33,23	0,1187	-1,09E+03	1,25E+03	7,34E+00	29,1	26,00
34	33,23	0,1155	-6,55E+02	7,92E+02	4,56E+00	29,1	27,00
35	33,23	0,1468	-8,74E+02	6,44E+02	4,89E+00	29,7	11,00

Analisando-se os resultados apresentados no Quadro 2, é possível observar que os valores dos momentos fletores experimentais encontrados são inferiores aos momentos de fissuração. Estes resultados corroboram com a hipótese de que não houve fissuração do modelo reduzido.

Para melhor elucidar o comportamento de algumas seções da laje, foram traçados diagramas de momentos fletores, a partir dos valores dos momentos experimentais equivalentes na estrutura real e dos momentos previstos pela análise numérica (Figuras 17a e 17b).

Analisando os diagramas, observa-se que a distribuição geral e a orientação dos momentos fletores obtidos experimentalmente foram coincidentes com os previstos na análise teórica. Entretanto, verifica-se que os valores dos momentos fletores experimentais equivalentes tendem a ser bem inferiores aos teóricos.

Uma das possíveis explicações para esta diferença é que, na análise teórica, os momentos de torção nas barras da grelha são desconsiderados, concentrando-se toda a torção nas vigas de borda e nos maciços, aumentando os esforços de flexão nas barras da grelha. Este critério é adotado

para evitar a necessidade de utilização de armadura para resistir à torção nas nervuras. Acredita-se, porém, que estes momentos de torção devam ter ocorrido no modelo experimental e que a estrutura tenha sido capaz de absorvê-los, desta forma reduzindo o valor do momento fletor nas mesmas.

Sob o ponto de vista prático, no caso específico do software utilizado, é possível introduzir a torção nas barras do modelo numérico. Com o intuito de verificar o efeito da hipótese mencionada, decidiu-se efetuar um reprocessamento da grelha, utilizando um valor menor para o divisor de inércia à torção das barras da grelha e, conseqüentemente, introduzindo torção nas mesmas. Os valores dos esforços de flexão resultantes desta análise sofreram uma redução, aproximando-se mais dos valores experimentais. Para ilustrar este comportamento, um terceiro diagrama de momentos fletores foi incluído nas figuras, com os resultados deste reprocessamento.

Deve-se atentar, ainda, para o fato de que a presença da capa de concreto não é considerada no modelo teórico da laje. A capa pode funcionar como um importante elemento de ligação das barras da grelha, que aumenta consideravelmente a sua rigidez à torção e colabora para que surja um efeito de membrana. Considera-se que o efeito de membrana pode ter sido um dos fatores influentes na redução dos momentos fletores experimentais. Stramandinoli (2004), em suas análises, apontou a existência deste efeito até mesmo para lajes com pequenos deslocamentos.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados numéricos e experimentais obtidos neste estudo, podem ser feitas as seguintes considerações:

- A distribuição e orientação dos momentos fletores experimentais foram compatíveis com as previsões do modelo teórico. Isto evidencia que o uso de modelos reduzidos pode ser utilizado para representar lajes nervuradas reais que apresentem complexidade;

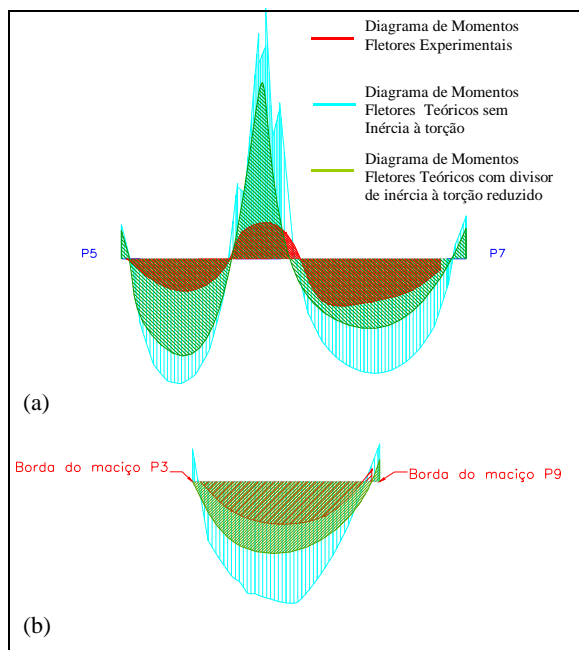


Fig17 – (a) Diagrama de momentos fletores entre P2 e P11 e (b) Diagrama de momentos fletores entre P3 e P9

- O modelo experimental teve um comportamento elástico-linear durante todas as etapas de carregamento, sugerindo que não houve fissuração para a carga aplicada;
- Os valores dos momentos fletores experimentais equivalentes na estrutura real tenderam a ser bem inferiores aos teóricos;
- A desconsideração, na análise numérica, dos momentos de torção nas barras da grelha, podem ter contribuído para aumentar os momentos fletores. Acredita-se, porém, que estes momentos de torção devam ter ocorrido no modelo experimental e que a estrutura tenha sido capaz de absorvê-los, desta forma reduzindo o valor do momento fletor nas mesmas;
- Os valores dos deslocamentos verticais teóricos e experimentais apresentaram-se defasados, sendo os últimos consistentemente menores, mostrando que o modelo experimental apresentou-se mais rígido que o teórico.
- A razão da diferença de rigidez pode estar na desconsideração da contribuição da capa na análise numérica, resultando

em um modelo teórico mais flexível e com deslocamentos maiores;

- O modelo de laje nervurada em estudo, escolhido a partir de um projeto arquitetônico real, com uma geometria irregular, regiões maciças excêntricas em relação ao eixo dos pilares e cargas lineares apoiadas diretamente sobre a laje, apresentou diagramas de momentos fletores e linhas elásticas muito semelhantes entre os modelos experimental e teórico. Pode-se concluir, portanto, que a análise matricial de grelhas, utilizada neste trabalho por meio do Sistema Computacional TQS, reproduziu adequadamente o comportamento da laje nervurada em estudo, apesar dos valores experimentais terem resultado inferiores aos previstos pela análise numérica;
- A redução de alguns coeficientes no programa computacional diminuíram as diferenças entre os valores numéricos e experimentais.

REFERÊNCIAS

- Abdul-Wahab, H. M. S.; Khalil, M. H. Rigidity and Strength of Orthotropic Reinforced Concrete Waffle Slabs. *Journal of Structural Engineering*, v. 126, n. 2, Feb., p. 219-227, 2000.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118:2003 : Projeto e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro, 2004.
- Ajdkiewicz, A.; Starolski, W. Reinforced-concrete slab-column structures. New York: Elsevier Science Publishers, 1990.
- Burggrabe, H. “Microconcreto para ensaios estáticos em modelos”. Tradução Ivo Wolff. Porto Alegre: Departamento de Engenharia Civil – UFRGS, 1978. 140 p. Tradução de: *Mikrobeton für modellstatische untersuchungen*.
- Montoya P.J., Meseguer A.G. and Cabre, F.M. “Hormigón Armado”. 10 ed. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S. A., [197-].
- Pereira, V. F. “Projeto de lajes treliçadas armadas em duas direções”. Artigo Técnico. Disponível em: <http://www.ufes.br/~ctjr/outeng/artigos/art4.pdf>. Acesso em 06/12/2003

Selistre, S. L.C. “Análise teórico-experimental de uma laje nervurada de microconcreto submetida a um carregamento uniformemente distribuído”. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

Soares, Y.V. Análise Experimental de Lajes Cogumelo Nervuradas de Concreto Armado com Pilares Metálicos. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2003.

Schwetz, P. F. “Análise teórico-experimental de uma laje nervurada em modelo reduzido sujeita a um carregamento linear”. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

Stramandinoli, J. S. B. and Loriggio, D. D. “Análise de lajes de concreto armado por analogia de grelha”. In: Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Anais...Mendoza: Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo, 2004.