

Considerações sobre a rigidez à torção das lajes nervuradas de concreto armado

Considerations about the torsional rigidity of reinforced concrete waffle slabs

José Milton de Araújo

Departamento de Materiais e Construção – FURG – Rio Grande, RS

e-mail: ed.dunas@mikrus.com.br

RESUMO: Neste trabalho é feita uma análise do comportamento das lajes nervuradas de concreto armado. Uma série de resultados experimentais descritos por outros autores é utilizada para verificar os modelos de cálculo usuais. A partir deste estudo, fica demonstrado que as lajes nervuradas de concreto armado possuem elevada rigidez à torção e se comportam de modo muito semelhante às lajes maciças. Assim, pode-se fazer o cálculo através do modelo de laje maciça equivalente, conforme é estabelecido nas principais normas de projeto.

ABSTRACT: An analysis of reinforced concrete waffle slabs is accomplished in this work. Experimental results presented by other authors are used to verify the usual calculation models. Through this study, it is demonstrated that reinforced concrete waffle slabs have great torsional rigidity and they behave in way similar to the solid slabs. Then, the calculation can be accomplished through the model of equivalent solid slab, as it is established in the main design codes.

1. INTRODUÇÃO

Usualmente, os pisos dos edifícios de concreto armado são projetados em lajes maciças. Entretanto, quando os vãos são grandes, essa solução pode ser antieconômica, em virtude da elevada espessura da laje. Nesses casos, a solução em laje maciça pode exigir espessuras tão grandes que a maior parte do carregamento passa a ser constituída por seu peso próprio.

Para reduzir o peso próprio da estrutura, pode-se adotar a solução em lajes nervuradas. Nessas lajes, a zona de tração é constituída por nervuras entre as quais podem ser colocados materiais inertes, de forma a tornar plana a superfície externa. Os materiais inertes devem ter peso específico reduzido em comparação com o peso específico do concreto, podendo ser empregados tijolos cerâmicos furados, blocos de concreto leve, isopor, etc. Alternativamente, os espaços entre as nervuras podem ser preenchidos com formas industrializadas que, após sua retirada, deixam à mostra as nervuras da laje.

As lajes nervuradas são de uso corriqueiro na construção de edifícios, desde longa data. Dependendo da relação entre os vãos da laje e do processo construtivo, as lajes nervuradas podem ser classificadas como lajes armadas em uma direção (lajes unidirecionais) ou lajes armadas em cruz (lajes bidirecionais).

Normalmente, as lajes com nervuras pré-moldadas funcionam como lajes armadas em uma direção. O cálculo pode ser feito como viga, na direção das nervuras principais. Nas lajes moldadas no local, quando a relação entre os vãos é maior do que 2, o cálculo também é feito como viga, segundo a direção do vão menor. Nesses dois casos, não há o que discutir a respeito da rigidez à torção da laje, já que o cálculo é feito como viga. A rigidez à torção não tem influência nos resultados.

Entretanto, quando a laje é armada em cruz, os resultados são muito dependentes da rigidez à torção da laje e, neste ponto, não há consenso quanto aos valores a serem adotados. Na verdade, o que há é uma grande confusão em torno do assunto.

O objetivo deste trabalho é discutir os procedimentos de cálculo das lajes nervuradas armadas em cruz, com ênfase nos aspectos relacionados com sua rigidez à torção.

2. BREVE REVISÃO SOBRE OS MÉTODOS DE CÁLCULO DAS LAJES NERVURADAS

Desde muito tempo, o cálculo das lajes nervuradas vem sendo feito como se a mesma fosse uma laje maciça de espessura equivalente. Esse procedimento é permitido por diversas normas de projeto, incluindo a norma brasileira NBR-6118 de 1980[1].

Uma vez atendidas algumas exigências das normas de projeto quanto às dimensões da laje nervurada, a mesma pode ser calculada empregando-se a teoria de placas finas de Kirchhoff[2]. Se as dimensões das nervuras e os seus espaçamentos são os mesmos nas duas direções, a placa é isotrópica. Em caso contrário, a placa é ortotrópica, com rigidez à flexão D_x e D_y nas direções x e y , respectivamente. Essa rigidez é determinada considerando-se os momentos de inércia centroidais das seções T de cada direção. A rigidez à torção da laje é estimada como $B = \sqrt{D_x D_y}$, conforme apresentado em [3].

Durante a última revisão da norma NBR-6118, esse procedimento, já consagrado, foi colocado em dúvida. Isto ocorreu quando o projeto de revisão da norma de Agosto de 2001[4] estabeleceu que "na falta de resultados mais precisos, a rigidez à torção deve ser considerada nula na determinação dos seus esforços solicitantes e deslocamentos".

Em artigo contendo sugestões ao projeto de revisão da norma, o Autor questionou essa observação e sugeriu que fosse permitido calcular os esforços e os deslocamentos das lajes nervuradas, empregando-se a teoria das placas elásticas, desde que fossem obedecidas certas restrições quanto à largura e ao espaçamento das nervuras e quanto à espessura da mesa [5].

Finalmente, essas sugestões foram contempladas na versão aprovada da NBR-6118/2003[6], a qual permite calcular as lajes nervuradas bidirecionais como lajes maciças. Ficou, assim, restabelecido o procedimento de cálculo consagrado, o qual encontra respaldo nas principais normas internacionais[7,8,9].

De todo modo, em alguns trabalhos publicados em congressos nacionais, tem havido certa

confusão a respeito do assunto, talvez motivada pela dúvida surgida durante a revisão da NBR-6118.

Em alguns desses trabalhos, conclui-se que o cálculo como laje maciça de espessura equivalente é inadequado, por comparação com resultados experimentais [10,11]. A análise teórica, como laje maciça equivalente, é realizada em regime elástico linear, enquanto os resultados experimentais refletem a não-linearidade decorrente da fissuração do concreto. É evidente que nunca haverá concordância de resultados.

Na tentativa de encontrar uma explicação para os resultados, os autores fazem uma análise empregando a teoria de grelhas (análise com elementos finitos de barra) e concluem que os deslocamentos ficaram maiores, o que é óbvio, já que houve uma redução na rigidez à torção da estrutura. Entretanto, mesmo com o modelo de grelhas, não é possível acompanhar as respostas obtidas experimentalmente.

Este tipo de trabalho fica prejudicado porque está sendo feita a comparação de soluções elásticas lineares com resultados experimentais, nitidamente não-lineares.

Em outros trabalhos, como na referência [12], conclui-se que a analogia de grelha é um modelo mais indicado do que a teoria de placas, simplesmente porque ele fornece valores maiores para a flecha e para os momentos fletores. Mas, mesmo assim, os autores se surpreendem com os resultados, pois constatarem que o modelo de grelha não é capaz de reproduzir o comportamento da laje maciça, à medida que o espaçamento entre nervuras é reduzido. Ou seja, o modelo que é tido como referência falha à medida que a laje nervurada se aproxima de uma laje maciça, com a redução do espaçamento entre as nervuras. Logo, esse modelo não pode servir como referência.

Para se analisar uma laje nervurada, assim como qualquer estrutura de concreto armado, deve-se distinguir as diversas fases do carregamento. A comparação de resultados experimentais com soluções elásticas somente deve ser feita enquanto a estrutura estiver no estágio I. Após a fissuração, a estrutura apresenta um comportamento intermediário entre o estágio I e o estágio II [2]. Neste caso, deve-se empregar modelos apropriados que levem em conta a não-linearidade física, decorrente da fissuração e do comportamento mecânico dos materiais. Um modelo não-linear adequado para a análise de lajes

maciças e de lajes nervuradas de concreto armado é apresentado na referência [13].

O objetivo deste trabalho é demonstrar a validade do cálculo de lajes nervuradas como laje maciça equivalente, conforme permitido na NBR-6118 e nas principais normas de projeto. Para isto, considera-se como referência, a série de resultados experimentais apresentados em [14].

Como o objetivo é mostrar a validade do método, analisam-se apenas os resultados das lajes no estágio I. Desse modo, excluem-se os erros decorrentes da modelagem da colaboração do concreto tracionado entre fissuras. Uma vez demonstrado que a transformação da laje nervurada em uma laje maciça equivalente é satisfatória no estágio I, basta fazer a análise não-linear de uma laje maciça com a espessura equivalente. O comportamento no estado fissurado pode ser modelado, nessa análise não-linear, empregando-se os modelos apresentados nas referências [2,13], por exemplo.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE LAJES NERVURADAS BIDIRECIONAIS

As lajes ensaiadas por Abdul-Wahab e Khalil[14] são utilizadas como referência para a verificação do modelo de laje maciça equivalente. No total, foram ensaiadas 8 lajes, sendo 2 lajes maciças e 6 lajes nervuradas armadas em cruz.

Todas as lajes são quadradas e simplesmente apoiadas no contorno. As lajes foram submetidas a uma carga concentrada P (kN) aplicada no centro. A carga foi distribuída em uma área de 15 x 15 cm, por meio de uma placa de aço colocada sob a carga.

Assim, na análise teórica apresentada a seguir, considera-se que as lajes são carregadas com uma carga distribuída $q = P/(15 \times 15)$ kN/cm², conforme indicado na fig. 1.

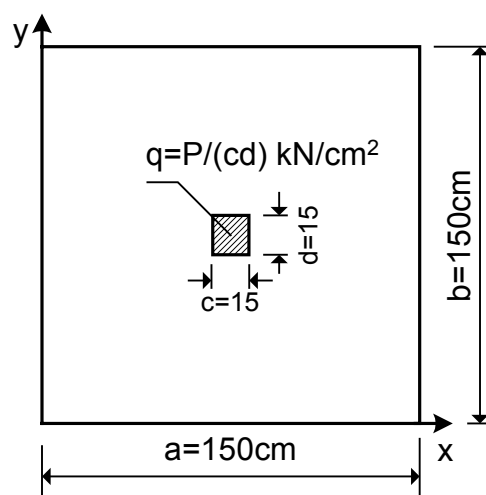


Fig. 1 – Carregamento das lajes

Para o cálculo da flecha das lajes, emprega-se o módulo secante do concreto E_{cs} , o qual é estimado por meio da relação

$$E_{cs} = 0,85 \times 21500 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{1/3}, \text{ MPa} \quad (1)$$

conforme sugerido pelo CEB/90[8].

Na equação (1), f_{cm} representa a resistência média à compressão do concreto aos 28 dias de idade. Os valores de f_{cm} foram determinados para cada uma das oito lajes ensaiadas.

Para o coeficiente de Poisson do concreto, adota-se $\nu = 0,2$.

Na tabela 1, apresentam-se os dados das duas lajes maciças que foram ensaiadas. Nessa tabela, h representa a espessura das lajes.

Tabela 1 – Lajes maciças

Laje	h (cm)	f_{cm} (MPa)	E_{cs} (MPa)
S7	7,5	36,0	28008
S8	9,5	28,5	25910

Os autores [14] apresentam os resultados dos ensaios na forma de gráficos do tipo carga total P (kN) x flecha no centro da laje (mm). Os pontos dos gráficos são plotados a cada 10kN de incremento da carga total.

Por esses gráficos, verifica-se que algumas lajes nervuradas já apresentam uma não-linearidade acentuada para uma carga de 20kN. Outras, ainda mantêm um comportamento linear até esse valor

da carga. Assim, para uniformizar a análise, considera-se que todas as lajes encontram-se no estágio I até a carga $P = 10$ kN.

Na tabela 2, apresentam-se os valores da flecha W_{exp} no centro das lajes, obtidas nos ensaios para as cargas $P = 10$ kN e $P = 20$ kN. Observa-se que, mesmo a laje maciça S7, já apresenta não-linearidade na carga $P = 20$ kN.

Na tabela 2 também são apresentados os valores da flecha W_{cal} , calculados no estágio I pela teoria de placas, sem incluir as armaduras [2].

Tabela 2 – Flechas das lajes maciças

Carga total $P = 10$ kN			
Laje	W_{exp} (mm)	W_{cal} (mm)	W_{cal}/W_{exp}
S7	0,20	0,25	1,25
S8	0,13	0,13	1,00
Carga total $P = 20$ kN			
Laje	W_{exp} (mm)	W_{cal} (mm)	W_{cal}/W_{exp}
S7	0,50	0,50	1,00
S8	0,26	0,26	1,00

Conforme se verifica pela tabela 2, o cálculo elástico é satisfatório para esse nível de carregamento (estádio I). Em três pontos houve coincidência dos resultados. Logo, fica comprovada a adequação da expressão (1) para a avaliação do módulo secante dos concretos empregados nesses ensaios.

Na fig. 2, representa-se a seção transversal das seis lajes nervuradas ensaiadas. As nervuras são iguais nas duas direções.

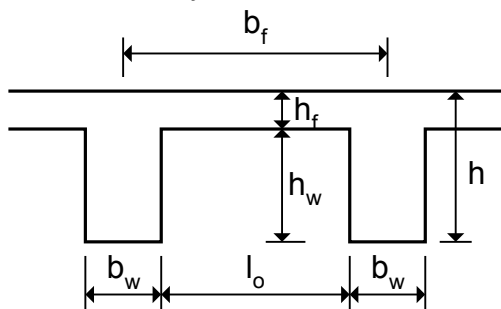


Fig. 2 – Seção transversal das lajes nervuradas

Na tabela 3, são fornecidas as dimensões das lajes nervuradas.

Na tabela 4, apresentam-se a resistência média à compressão do concreto, f_{cm} , o módulo secante E_{cs} , calculado com a equação (1), e a flecha no centro da laje W_{exp} , obtida nos ensaios das seis

lajes nervuradas. Os valores da flecha correspondem à carga total $P = 10$ kN, para a qual todas as lajes encontram-se no estágio I.

Tabela 3 – Dimensões das lajes nervuradas (cm)

Laje	h_f	h	b_w	l_o	b_f
S1	2,0	9,5	5,2	8,4	13,6
S2	2,0	9,5	5,2	11,5	16,7
S3	2,0	9,5	5,2	16,2	21,4
S4	2,0	9,5	5,2	24,8	30,0
S5	2,0	12,5	5,7	11,0	16,7
S6	2,0	6,5	4,7	12,0	16,7

Tabela 4 - Resultados para as lajes nervuradas

Laje	f_{cm} (MPa)	E_{cs} (MPa)	W_{exp} (mm)
S1	31,3	26732	0,13
S2	32,0	26930	0,29
S3	31,4	26760	0,29
S4	28,9	26030	0,45
S5	29,9	26327	0,10
S6	29,1	26090	0,77

4. DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA EQUIVALENTE DAS LAJES NERVURADAS

Os resultados experimentais apresentados na tabela 4 serão utilizados para determinar a rigidez equivalente das lajes nervuradas. Essa rigidez equivalente é igual à rigidez de uma laje maciça de espessura h_e que apresenta a mesma flecha das lajes nervuradas.

Logo, se W_{exp} é a flecha da laje nervurada obtida no ensaio, é possível escrever

$$W_{exp} = \frac{\alpha}{D_e} \quad (2)$$

onde α é um coeficiente que depende do carregamento e dos vãos da laje e D_e é a rigidez equivalente.

A rigidez equivalente pode ser escrita na forma

$$D_e = \frac{E_{cs} h_e^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3)$$

onde $\nu = 0,2$ é o coeficiente de Poisson do concreto e E_{cs} é o módulo secante dado na equação (1).

Substituindo (3) em (2), resulta

$$W_{\text{exp}} = \frac{\beta}{h_e^3} \quad (4)$$

$$\text{onde } \beta = \frac{12(1-\nu^2)\alpha}{E_{cs}}$$

Fazendo uma análise elástica linear de uma laje maciça de espessura $h=1\text{cm}$, submetida ao mesmo carregamento das lajes nervuradas, obtém-se a flecha W_1 , tal que

$$W_1 = \frac{\beta}{h^3} \Rightarrow W_1 = \beta \quad (5)$$

Assim, substituindo $\beta = W_1$ na equação (4), chega-se à expressão da espessura equivalente

$$h_e = \left(\frac{W_1}{W_{\text{exp}}} \right)^{1/3} \quad (6)$$

A equação (6) permite determinar a espessura equivalente das lajes nervuradas, com base nos resultados experimentais. Os valores envolvidos no cálculo são apresentados na tabela 5.

Os resultados correspondentes à laje S1 devem ser desconsiderados, pois essa laje apresentou a mesma flecha da laje maciça S8. Como essas duas lajes possuem a mesma espessura total ($h=9,5\text{cm}$) e os módulos E_{cs} são quase iguais, era de se esperar que a laje nervurada S1 apresentasse uma flecha maior que a laje maciça S8.

Tabela 5 – Espessura equivalente das lajes nervuradas, com base nos resultados experimentais

Laje	W_{exp} (mm)	W_1 (mm)	h_e (cm)
S1	0,13	110,25	9,47
S2	0,29	109,44	7,23
S3	0,29	110,14	7,24
S4	0,45	113,22	6,31
S5	0,10	111,95	10,38
S6	0,77	112,96	5,27

No procedimento usual de projeto [3], a laje nervurada é calculada como se fosse uma laje maciça com espessura equivalente $h_{e,cal}$ dada por

$$h_{e,cal} = \left(\frac{12I}{b_f} \right)^{1/3} \quad (7)$$

onde I é o momento de inércia em relação ao centróide da seção T indicada na fig. 3.

O cálculo é feito conforme apresentado na referência [3].

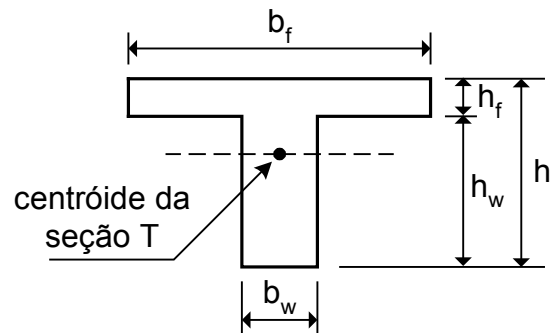


Fig. 3 – Seção T empregada no cálculo usual

Na tabela 6, apresentam-se os valores da espessura equivalente h_e , determinados com base nos resultados experimentais, e as espessuras equivalentes teóricas $h_{e,cal}$, obtidas com o emprego da equação (7).

Tabela 6 – Espessuras equivalentes experimental (h_e) e teórica ($h_{e,cal}$)

Laje	h_e (cm)	$h_{e,cal}$ (cm)	$h_{e,cal}/h_e$
S1	9,47	7,87	0,83
S2	7,23	7,55	1,04
S3	7,24	7,17	0,99
S4	6,31	6,65	1,05
S5	10,38	10,02	0,96
S6	5,27	5,09	0,96
		Média	0,97

Conforme se observa na tabela 6, há uma excelente concordância entre a espessura equivalente calculada através da equação (7) e o valor determinado experimentalmente. Isto mostra que as lajes nervuradas podem ser analisadas como lajes maciças com uma espessura equivalente. Em outras palavras, as nervuras contribuem tanto para a rigidez à flexão, quanto para a rigidez à torção das lajes nervuradas.

5. CÁLCULO DE LAJES NERVURADAS COMO PLACAS ORTOTRÓPICAS

Conforme foi apresentado na referência [3], as lajes nervuradas podem ser calculadas como placas ortotrópicas. Os valores de rigidez à flexão, D_x e D_y , são obtidos com o emprego da equação (3), considerando-se as espessuras equivalentes determinadas com a equação (7) para cada direção. A rigidez à torção pode ser estimada como $B = \sqrt{D_x D_y}$.

Desse modo, a equação diferencial de equilíbrio da placa ortotrópica submetida a uma carga $p(x, y)$ é dada por

$$D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2B \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = p(x, y) \quad (8)$$

onde $w = w(x, y)$ representa os deslocamentos transversais do plano médio da placa.

A solução da equação diferencial, juntamente com as condições de contorno, pode ser obtida através de métodos numéricos ou através de soluções em série de Fourier [2].

Empregando, por exemplo, a solução de Navier para a placa retangular de vãos a e b , simplesmente apoiada nos quatro lados, tem-se

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} W_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (9)$$

Os coeficientes W_{mn} são dados por

$$W_{mn} = \frac{P_{mn}}{\pi^4 \left[D_x \left(\frac{m}{a} \right)^4 + 2B \left(\frac{mn}{ab} \right)^2 + D_y \left(\frac{n}{b} \right)^4 \right]} \quad (10)$$

onde P_{mn} são os coeficientes da expansão da carga em série dupla de Fourier.

Esses coeficientes podem ser obtidos na referência [15] para diversos tipos de carga.

Para as seis lajes analisadas anteriormente, tem-se que $D_x = D_y = D$, pois a seção transversal das lajes é a mesma nas duas direções, conforme a fig. 2. Então, $B = D$ e as lajes são isotrópicas. Neste caso, pode-se fazer a análise de uma laje maciça

com a espessura equivalente $h_{e,cal}$ dada na equação (7), como já foi demonstrado.

Entretanto, em diversas publicações, a rigidez à torção da laje nervurada tem sido reduzida, na suposição de que as nervuras funcionam como vigas, independentes da laje maciça da mesa. Assim, a rigidez à torção é calculada como

$$B = \frac{E_{cs} h_f^3}{12(1-\nu^2)} + \frac{GJ_w}{b_f} \quad (11)$$

onde a primeira parcela corresponde à colaboração da mesa e a segunda parcela é a colaboração da nervura para a rigidez à torção da laje nervurada.

Na equação (11), $G = \frac{E_{cs}}{2(1+\nu)}$ é o módulo de elasticidade transversal do concreto e J_w é a constante de torção da nervura. Admitindo que $h_w \geq b_w$, tem-se

$$J_w = kh_w b_w^3 \quad (12)$$

onde

$$k = \frac{1}{3} - 0,21 \frac{b_w}{h_w} \left[1 - \frac{1}{12} \left(\frac{b_w}{h_w} \right)^4 \right] \quad (13)$$

Observa-se que a rigidez à torção está sendo calculada como se a mesa estivesse desacoplada da nervura. Neste caso, admite-se que a mesa funciona como uma placa e as nervuras funcionam como vigas submetidas à torção de Saint-Venant. Ocorre que a mesa e as nervuras transversais oferecem uma forte restrição ao empenamento, o que faz com que a rigidez à torção das nervuras seja aumentada [16]. A equação (12) subestima bastante a contribuição das nervuras para a rigidez à torção da laje nervurada.

Além disso, esse procedimento é inconsistente pois, quando a distância livre entre nervuras, l_o , for nula, resulta $B \neq D$. Ou seja, a solução não convergirá para a solução exata com a redução do espaçamento entre as nervuras.

Na tabela 7, apresentam-se as flechas das lajes nervuradas, obtidas com os dois procedimentos de cálculo descritos. Nessa tabela, W_{exp} é a flecha experimental para a carga $P = 10 \text{ kN}$, W_a é a flecha calculada como laje maciça isotrópica

possuindo a espessura equivalente dada na equação (7), e W_b é a flecha calculada como placa ortotrópica possuindo a rigidez à torção indicada na equação (11).

Tabela 7 – Flechas das lajes nervuradas

Laje	W_{exp} (mm)	W_a (mm)	W_b (mm)	$\frac{W_a}{W_{exp}}$	$\frac{W_b}{W_{exp}}$
S1	0,13	0,23	0,38	1,77	2,92
S2	0,29	0,25	0,43	0,86	1,48
S3	0,29	0,30	0,51	1,03	1,76
S4	0,45	0,39	0,66	0,87	1,47
S5	0,10	0,11	0,19	1,10	1,90
S6	0,77	0,86	1,39	1,12	1,81

Analisando a tabela 7, verifica-se que a equação (11) não representa a rigidez à torção das lajes nervuradas.

O cálculo mais adequado é aquele indicado nas normas de projeto, que consiste em substituir a laje nervurada por uma laje maciça com uma espessura equivalente. Se as nervuras forem diferentes nas duas direções, a laje pode ser calculada como placa ortotrópica, porém com a rigidez à torção $B = \sqrt{D_x D_y}$.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi mostrado que, conforme é admitido nas principais normas de projeto, inclusive na atual norma brasileira NBR-6118, as lajes nervuradas de concreto armado apresentam um comportamento muito semelhante ao das lajes maciças. Ao contrário do que tem sido divulgado em algumas publicações, essas lajes possuem uma rigidez à torção elevada, o que permite fazer o cálculo como laje maciça equivalente.

Deve-se ter em mente que as lajes nervuradas fissuram, mesmo para as cargas de serviço. A fissuração do concreto ocasiona uma redução da rigidez da laje, com o conseqüente aumento da flecha. Este fato tem sido associado, erroneamente, com uma rigidez à torção reduzida das lajes nervuradas. A redução de rigidez é decorrente da fissuração do concreto e ocorre em todas as estruturas de concreto armado como, por exemplo, nas vigas, não tendo relação com a falta de rigidez à torção.

O cálculo mais adequado é aquele indicado nas normas de projeto, que consiste em substituir a laje

nervurada por uma laje maciça equivalente. A princípio, pode-se calcular a espessura equivalente com o emprego da equação (7). Se as nervuras forem diferentes nas duas direções, a laje pode ser calculada como placa ortotrópica, porém com a rigidez à torção $B = \sqrt{D_x D_y}$.

REFERÊNCIAS

1. Associação Brasileira de Normas Técnicas - *Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado: NBR-6118*. Rio de Janeiro, 1980.
2. Araújo, J.M. – *Curso de Concreto Armado*, v.2, 2^a. ed., Editora Dunas, Rio Grande, 2003.
3. Araújo, J.M. – *Curso de Concreto Armado*, v.4, 2^a. ed., Editora Dunas, Rio Grande, 2003.
4. Associação Brasileira de Normas Técnicas - *Projeto de Estruturas de Concreto*. Projeto de revisão da NBR-6118. Agosto, 2001.
5. Araújo, J.M. – *Algumas considerações sobre o projeto da nova NBR-6118*. Revista Engenharia, Ciência e Tecnologia, v.5, n. 1, p.3-10, UFES, Vitória, Janeiro/Fevereiro, 2002.
6. Associação Brasileira de Normas Técnicas – *Projeto de Estruturas de Concreto. NBR-6118*. Rio de Janeiro, 2003.
7. European Committee for Standardization - *Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. Final draft, Dec. 2003, 223 p.
8. Comité Euro-International du Béton. *CEB-FIP Model Code 1990*. Lausanne, 1993.
9. American Concrete Institute. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95)*. Detroit, 1995.
10. Dias, R.H.; Giongo, J.S.; Paiva, J.B. – *Análises numéricas de laje nervurada sem vigas considerando diferentes modelos mecânicos*. 43^o Congresso do IBRACON, Trabalho i014.pdf, 14 p., Foz do Iguaçu, 2001.
11. Dias, R.H.; Giongo, J.S.; Paiva, J.B. – *Modelos simplificados e realistas na consideração da excentricidade entre nervuras e capa em lajes nervuradas*. 44^o Congresso do IBRACON, Trabalho I052.pdf, 21 p., Belo Horizonte, 2002.
12. Stramandinoli, J.S.B.; Loriggio, D.D. – *Lajes nervuradas: cálculo dos esforços e deslocamentos usando o processo de analogia de grelha*. V Simpósio EPUSP Sobre Estruturas

- de Concreto, Trabalho SIMP111.pdf, 20 p., São Paulo, 2003.
13. Araújo, J.M. – *Análise não-linear de lajes maciças e lajes nervuradas de concreto armado*. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, n. 52, p.43-52, Lisboa, Setembro, 2003.
 14. Abdul-Wahab, H. M. S., Khalil, M. H. - *Rigidity and strength of orthotropic reinforced concrete waffle slabs*. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 126, n. 2, p.219-227, 2000.
 15. Szilard, R. - *Theory and Analysis of Plates: classical and numerical methods*. Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1974.
 16. Timoshenko, S. P.; Goodier, J. N. - *Teoria da Elasticidade*. Ed. Guanabara Dois, 3^a ed., Rio de Janeiro, 1980.