

4. Avaliação dos Resultados

4.1. Introdução

Neste capítulo, são mostradas as análises que foram realizadas com a utilização do programa Ansys [19] com o intuito de testar, no âmbito deste programa, a eficiência e a confiabilidade do modelo numérico utilizado neste trabalho para o estudo de lajes nervuradas através da analogia de grelha. Posteriormente, são apresentados os resultados obtidos no estudo paramétrico baseado nas lajes nervuradas REDUZCON [21].

4.2. Validação dos Modelos Numéricos

4.2.1. Análise de uma Laje Maciça sem a Consideração das Vigas do Contorno

A primeira etapa do presente estudo consiste na validação do modelo numérico desenvolvido utilizando o programa computacional Ansys [19] para a análise de lajes pelo método da analogia de grelha.

Procede-se à reprodução de um caso típico (hipotético) de análise de uma laje maciça por tal método, sendo simplesmente apoiada nas extremidades, onde o apoio está livre para a rotação segundo o eixo perpendicular ao da barra da grelha, porém com a rotação impedida segundo o eixo da mesma. Este exemplo de aplicação de analogia de grelha para lajes está contido no artigo sobre o programa computacional AltoQI [36].

A grelha representa uma laje maciça quadrada de 4 m, ilustrada na Figura 4.1, e as barras desta estão espaçadas de 80 cm entre si, ou seja, 10 vigas de seção transversal de 10 x 80 cm. O carregamento distribuído uniformemente nas barras é de 4 kN/m, exceto nas oito barras do canto, o qual é de 3 kN/m.

Os demais parâmetros da seção transversal das faixas da grelha (10 x 80 cm) empregados na análise são:

- Área: 0,08 m²;
- Módulo de elasticidade longitudinal: $E_{cs} = 2,1 \times 10^7$ kN/m²;
- Momento de inércia à torção das barras da grelha: $I_x = 2,4567 \times 10^{-4}$ m⁴;
- Momento de inércia à flexão das barras da grelha em torno do eixo z: $I_z = 4,267 \times 10^{-3}$ m⁴;
- Momento de inércia à flexão das barras da grelha em torno do eixo y: $I_y = 6,667 \times 10^{-5}$ m⁴.

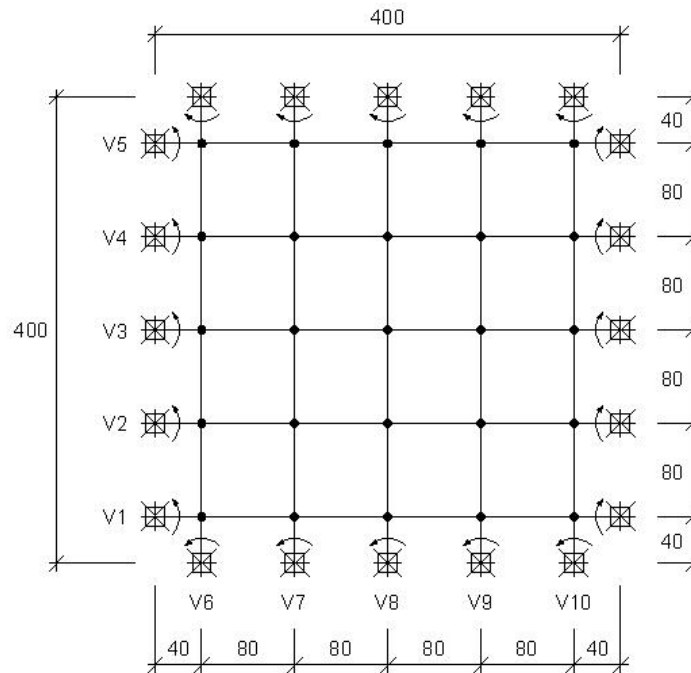


Figura 4.1 – Grelha de vigas com malha de 80 x 80 cm (cotas em cm)

Este exemplo mostrado na Figura 4.1 foi selecionado de forma a reduzir o número de variáveis e permitir um estudo detalhado de alguns aspectos significativos do comportamento das grelhas para representarem as lajes, principalmente, as lajes REDUZCON [21].

Os resultados fornecidos pelo referido artigo [36] são o deslocamento da viga central da grelha, viga V3, de 0,49cm; o momento fletor na mesma viga de 4,66 kNm e o momento torçor na extremidade da viga V1 de 6,04 kNm.

Na Tabela 4.1, pode-se observar os valores obtidos com a utilização do programa computacional Ansys [19] na análise dessa laje através do modelo numérico desenvolvido e a diferença percentual encontrada em relação ao referido artigo.

Tabela 4.1 – Comparação entre os resultados fornecidos pelo programa Ansys [19] e o programa AltoQI [36]

| Programa computacional utilizado | Deslocamento (cm) | Momento fletor (kNm) | Momento torçor (kNm) |
|----------------------------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| AltoQI [36] | 0,49 | 4,66 | 6,04 |
| Ansys [19] | 0,4967 | 4,779 | 6,511 |
| Diferença (%) | 1,37 | 2,55 | 7,8 |

A seguir, é mostrado, na Figura 4.2, o deslocamento obtido via programa Ansys [19], onde o diagrama com a deformada da viga central, V3, representa a maior deformada da grelha, correspondente ao seu nó central.

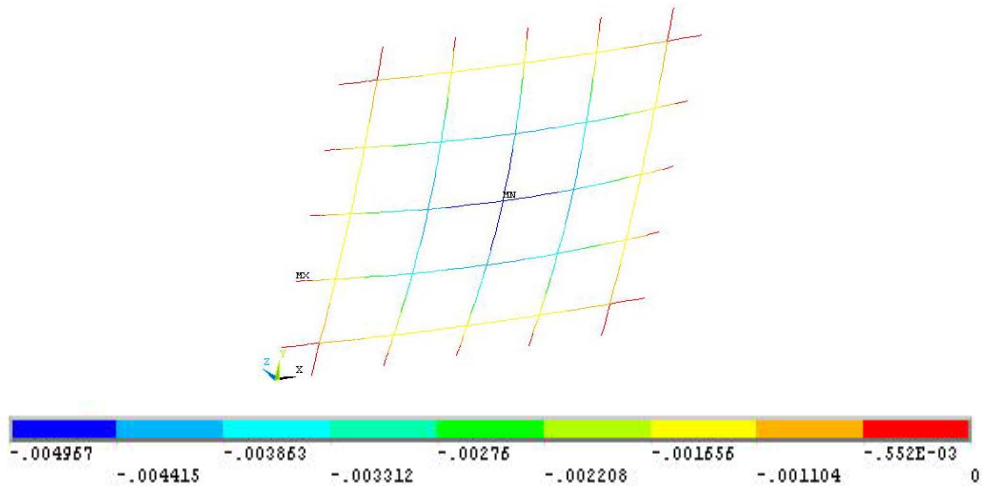


Figura 4.2 – Deslocamento da grelha (m)

Nos diagramas de momentos fletores é importante observar duas características peculiares das grelhas, a descontinuidade no gráfico devido aos momentos de torção e o fato de o momento fletor máximo nem sempre se encontrar no meio da grelha.

Na Figura 4.3, os pontos de descontinuidade correspondem aos nós da grelha e a diferença entre os valores em cada descontinuidade é exatamente igual ao momento de torção concentrado aplicado como reação à deformação à torção da viga neste ponto. Tal conclusão também é encontrada pela referência [36]. O momento fletor máximo na viga V3, que também é o máximo da grelha, está situado no final da segunda barra.

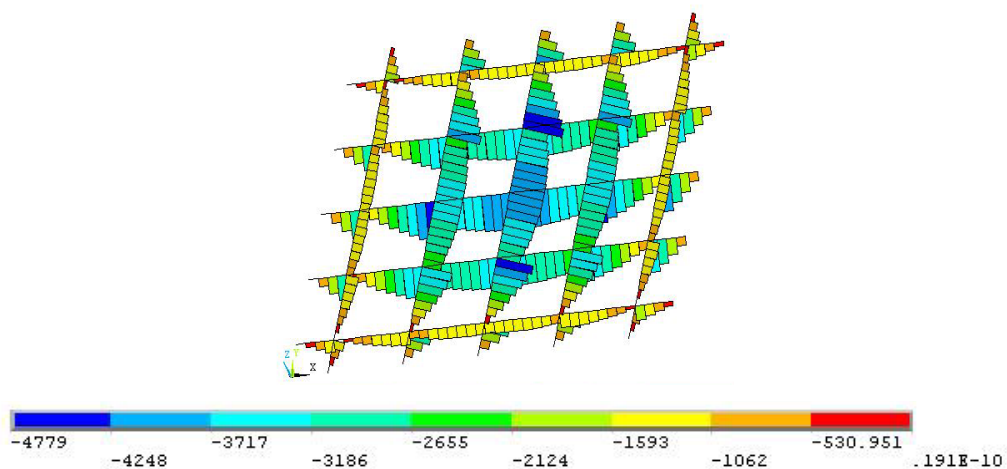


Figura 4.3 – Diagrama de momentos fletores da grelha (Nm)

Com relação ao diagrama de momento torçor, Figura 4.4, tem-se no primeiro nó com descontinuidade da viga V3 a diferença entre os valores dos momentos fletores de 0,33 kNm, que corresponde ao momento de torção no meio da viga V1 ($0,165 + 0,165$), sendo este mesmo quadro também é encontrado por outros autores em outra investigação [36]. O valor máximo do momento de torção desta grelha é encontrado na extremidade da viga V1

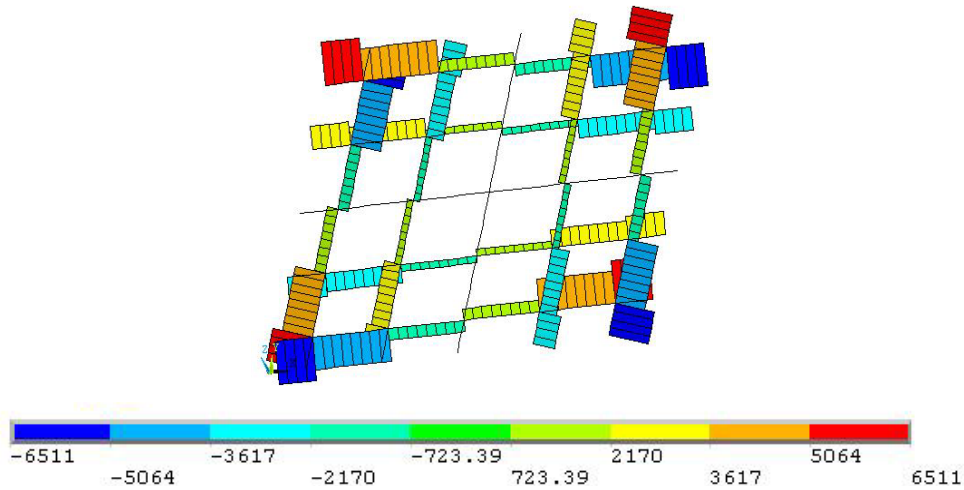


Figura 4.4 – Diagrama de momentos torçores da grelha (Nm)

Este mesmo exemplo foi refeito com uma redução de 95% do valor do momento de inércia à torção das barras, ou seja, considerando a grelha com barras praticamente sem rigidez à torção. Esta redução proporcionou um aumento significativo dos deslocamentos nodais, como pode ser observado na Figura 4.5.

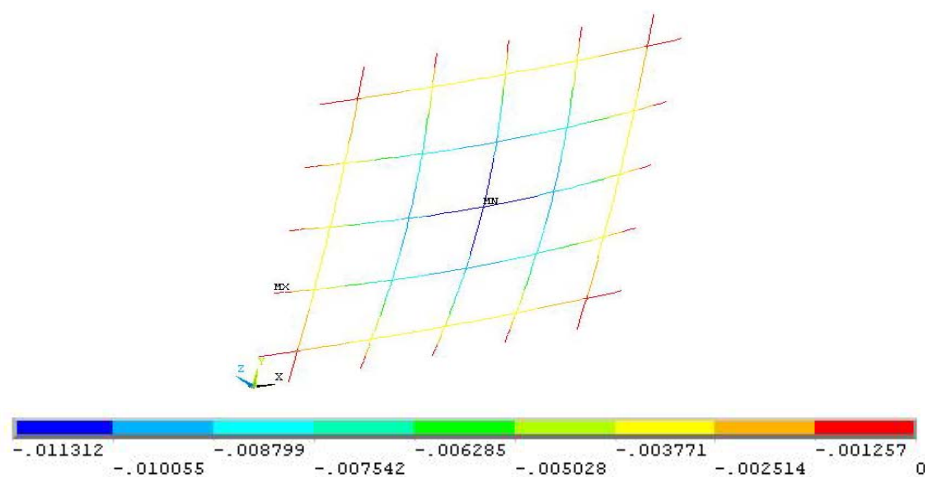


Figura 4.5 – Deslocamento da grelha sem rigidez à torção (m)

Observa-se, no diagrama de momentos fletores, um aumento nestes valores para a grelha, Figura 4.6, quando comparado àqueles obtidos sem a redução do momento de inércia à torção.

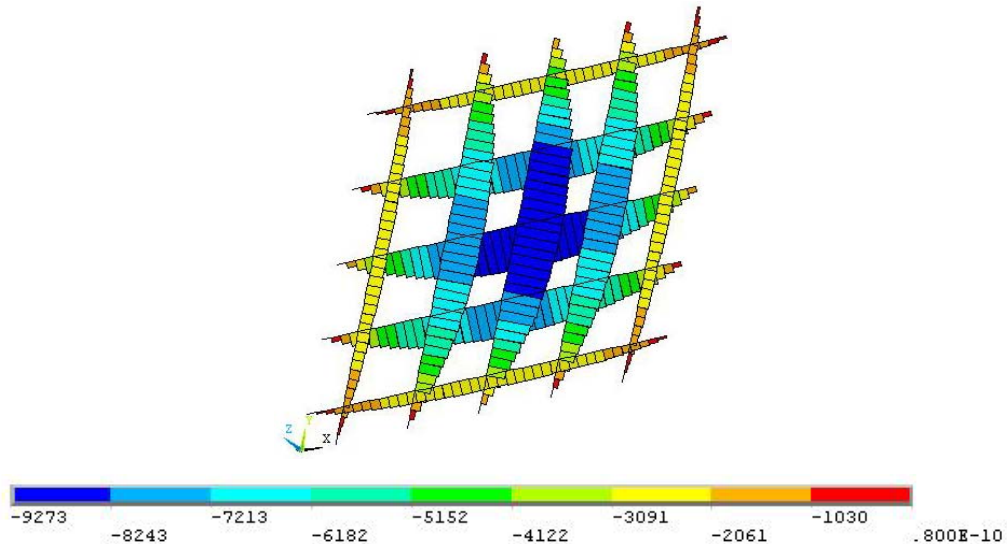


Figura 4.6 – Diagrama de momentos fletores da grelha, desprezando a rigidez à torção desta (Nm)

Esta redução da inércia à torção promove uma diminuição dos momentos torçores, fazendo com que as discontinuidades no diagrama dos momentos fletores se tornem bastante reduzidas. Desta forma, tem-se o momento fletor máximo no centro da grelha, no nó central da viga V3.

Porém, espera-se que os momentos torçores diminuam para praticamente zero quando se faz esta redução da inércia à torção das barras, segundo o artigo que contém este exemplo [36]. Como pode ser observado na Figura 4.7, este comportamento da grelha não acontece de forma tão satisfatória quanto para os outros parâmetros analisados (deslocamento e momento fletor).

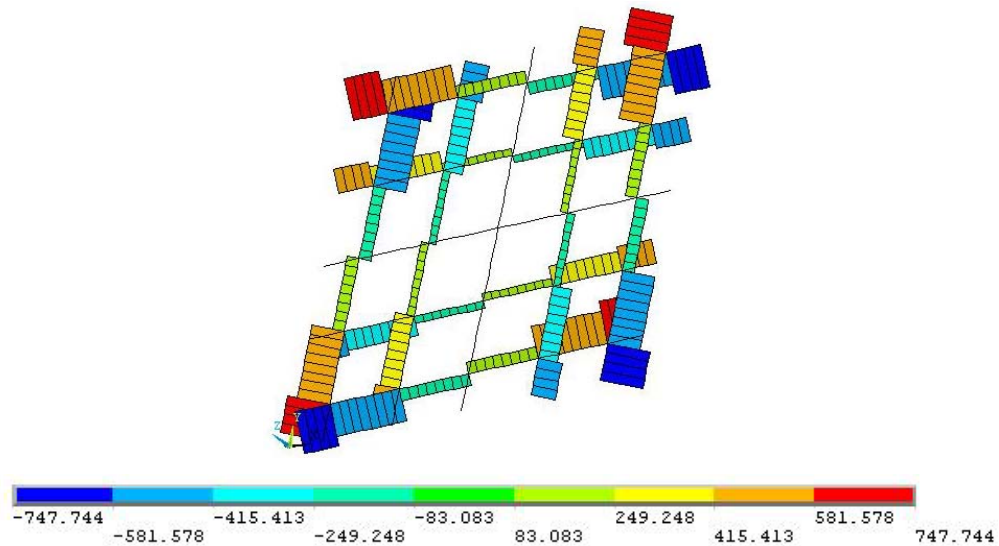


Figura 4.7 – Diagrama de momentos torçores da grelha, desprezando a rigidez à torção desta (Nm)

A Tabela 4.2 fornece uma comparação destas análises para os momentos fletor, torçor e deslocamento:

Tabela 4.2 – Comparação entre os resultados fornecidos pelo programa Ansys [19] e o programa AltoQI [36]

| Programa computacional utilizado | Deslocamento (cm) | Momento fletor (kNm) | Momento torçor (kNm) |
|----------------------------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| AltoQI [36] | 1,11 | 9,182 | 0,612 |
| Ansys [19] | 1,1312 | 9,273 | 0,747744 |
| Diferença (%) | 1,91 | 0,0099 | 22,18 |

4.2.2. Análise de uma Laje Nervurada sem a Consideração das Vigas do Contorno

Para um caso de analogia de grelha para lajes nervuradas, tem-se um exemplo retirado da dissertação de STRAMANDINOLI [7], exemplo 4, análise 1. Este exemplo, mostrado na Figura 4.8, consiste em uma laje nervurada quadrada, com vão livre de 5 m, simplesmente apoiada em apoios sem deslocamentos verticais e sem rotação em volta do eixo perpendicular ao apoio, porém com a rotação ao redor do eixo do apoio liberado.

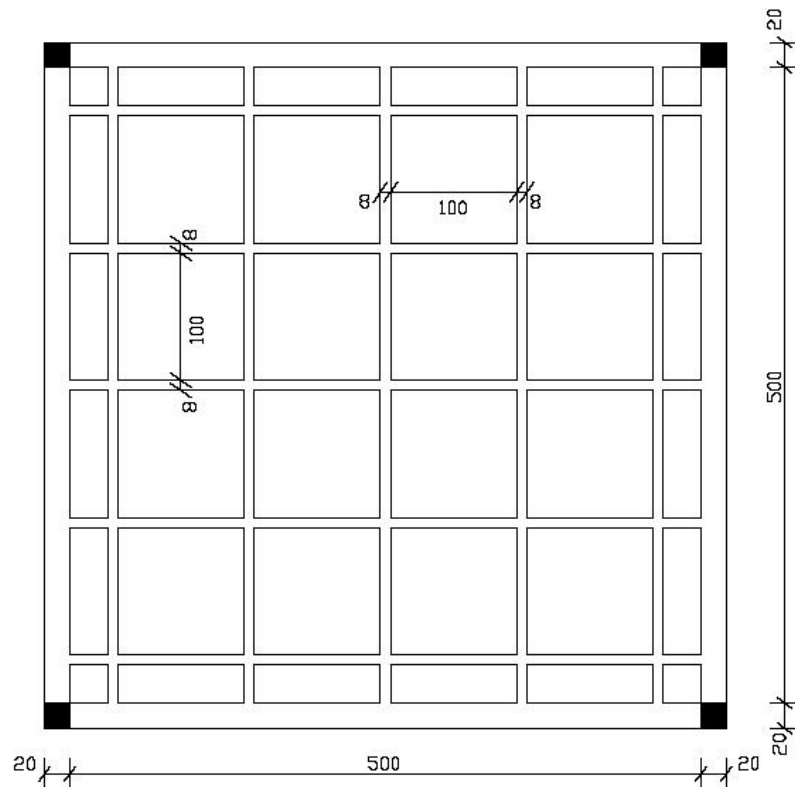


Figura 4.8 – Laje nervurada do exemplo 4, análise 1, STRAMANDINOLI [7] (cotas em cm)

Esta laje é discretizada em 10 vigas T, com seção transversal demonstrada na Figura 4.9, considerando o momento de inércia à torção da seção T integral (I e J calculados pelas equações 2.31 e 2.43, respectivamente).

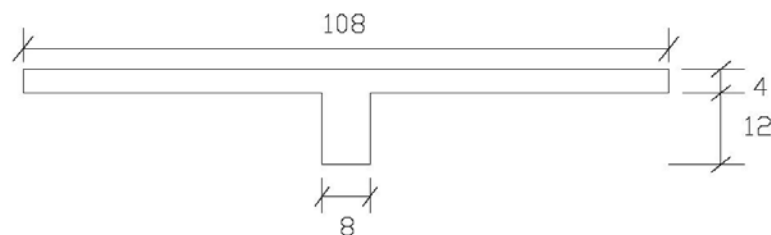


Figura 4.9 – Seção considerada para as barras da grelha do exemplo 4, STRAMANDINOLI [7] (cotas em cm)

Os resultados obtidos através da utilização do programa Ansys [19] são mostrados à seguir através dos diagramas de deslocamento e momentos fletores e torçores, Figura 4.10, Figura 4.11 e Figura 4.12, respectivamente.

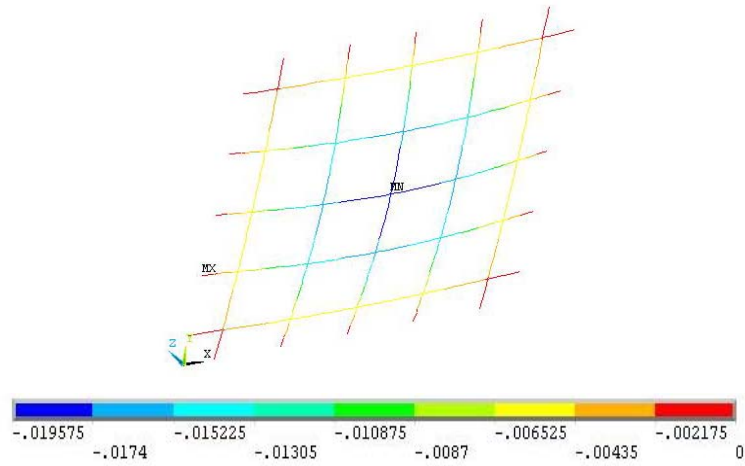


Figura 4.10 – Deslocamento da grelha (m)

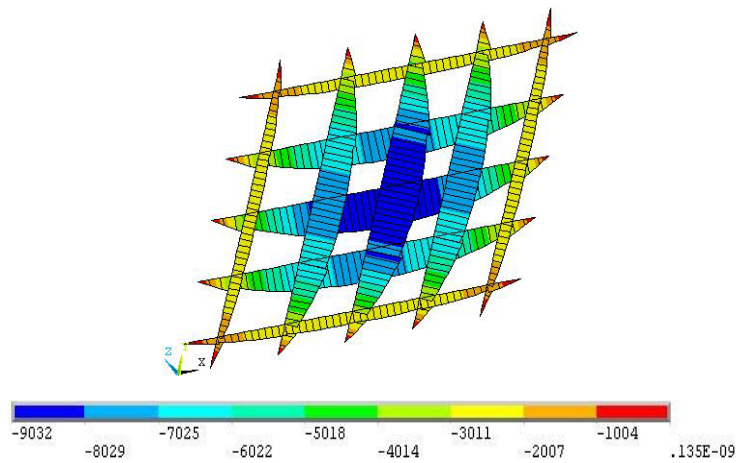


Figura 4.11 – Diagrama de momentos fletores da grelha (Nm)

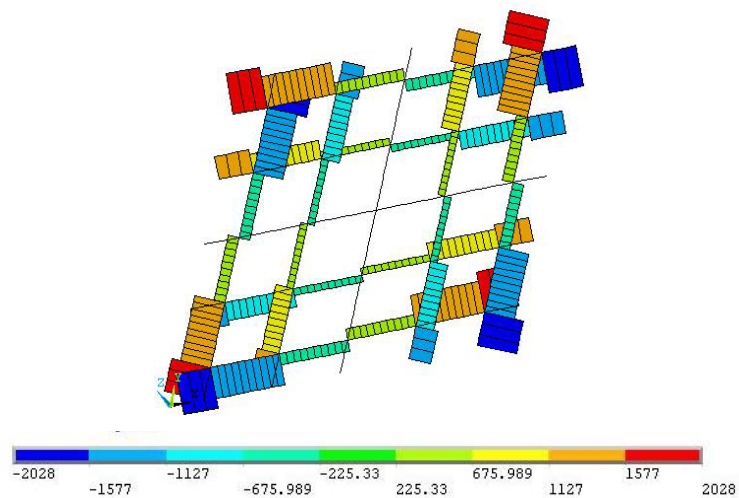


Figura 4.12 – Diagrama de momentos torçores da grelha (Nm)

Estes resultados podem melhor ser visualizados e comparados aos encontrados em STRAMANDINOLI [7] através da Tabela 4.3. Por esta, vê-se que a forma como é feita a discretização da laje nesta dissertação representa bem o seu comportamento, pois as diferenças encontradas não são significativas.

Tabela 4.3 – Comparação entre os resultados obtidos pelo programa Ansys [19] e pelos resultados de STRAMANDINOLI [7]

| Fonte | Deslocamento (cm) | Momento fletor (kNm) | Momento torçor (kNm) |
|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| STRAMANDINOLI [7] | 1,85 | 9,27 | 2 |
| Ansys [19] | 1,9575 | 9,032 | 2,028 |
| Diferença (%) | 5,81 | 2,57 | 1,4 |

4.2.3. Análise de uma Laje Maciça Considerando as Vigas do Contorno

Um exemplo considerando a flexibilidade das vigas de bordo na análise de uma laje através da analogia de grelha também é reproduzido com o emprego do programa Ansys [19].

Em seu trabalho, SILVA [37] analisa uma laje maciça quadrada de 3 m de vão, com 8 cm de espessura, como a da Figura 4.13, apoiadas em vigas de seção transversal de 0,2 x 0,3 m. Não é levada em conta a contribuição da laje adjacente.

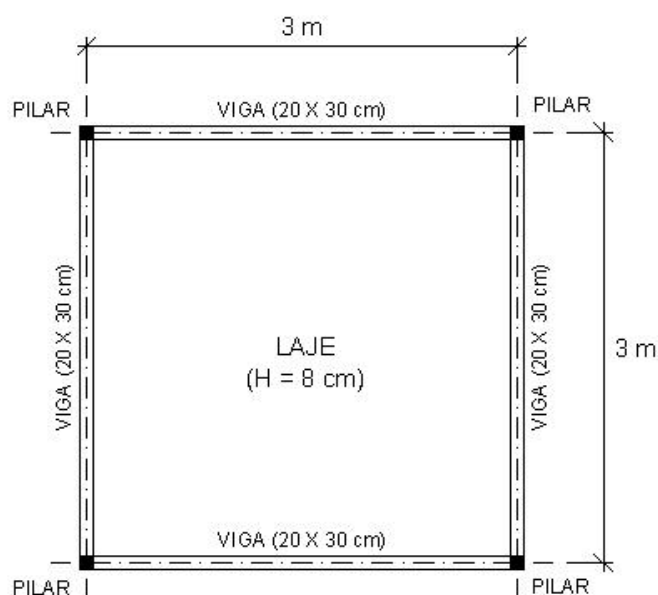


Figura 4.13 – Laje maciça apoiada em vigas consideradas deformáveis verticalmente [37]

As inércias à flexão e à torção são calculadas pelas equações 2.31 e 2.43, respectivamente, e a malha utilizada no processo de analogia de grelha tem barras de seção transversal de 8 x 15 cm.

As cargas são consideradas uniformemente distribuídas nos elementos da grelha equivalente e iguais a 2,25 e 4,5 kN/m para as barras do contorno e do centro, respectivamente. Ressalta-se que o carregamento total da laje é de 6 kN/m², sendo composto pelo peso próprio, 2 kN/m², carga permanente, 1 kN/m², e sobrecarga de utilização, 3 kN/m².

Através do método de analogia de grelha, obteve-se o deslocamento para esta laje, mostrado na Figura 4.14, sendo representada pela deformação da grelha equivalente.

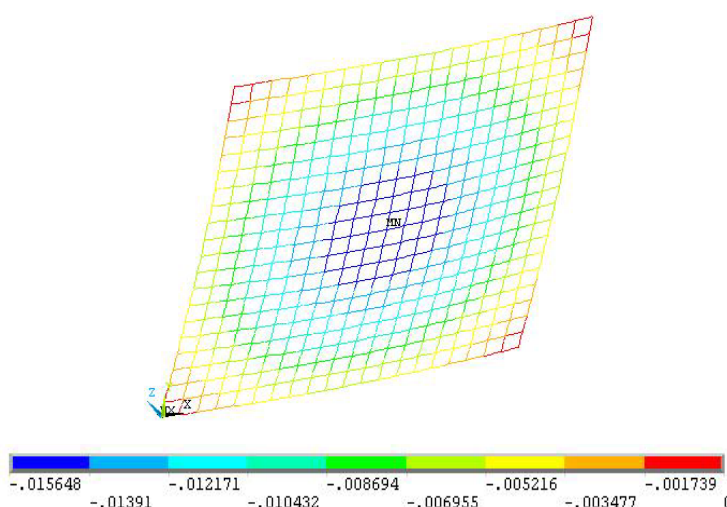


Figura 4.14 – Deslocamento da grelha (m)

Pode-se notar, através da Figura 4.15 (b), a influência do momento de inércia à torção das vigas de bordo. Sendo este momento de inércia elevado, com a mesma ordem de grandeza que o momento de inércia à flexão das mesmas, nos nós correspondentes ao encontro dos elementos de grelha que representam a laje com os elementos de grelha das vigas de bordo, surgem momentos fletores negativos elevados. Isto contribui para que ocorra uma redução no momento fletor positivo e da flecha no centro da placa.

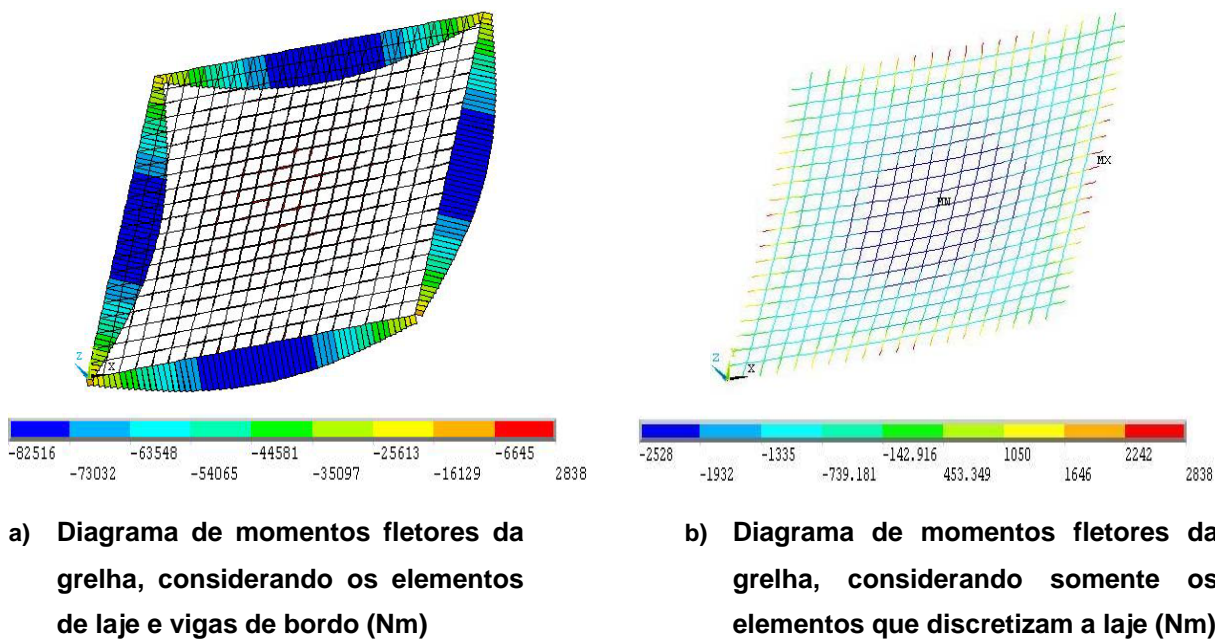


Figura 4.15 – Diagramas de momentos fletores da grelha (Nm)

Embora o referido artigo [37] não comente sobre os momentos torçores desta placa, apenas com finalidade de elucidar ao leitor, são mostrados, na Figura 4.16, os diagramas fornecidos pelo programa Ansys [19].

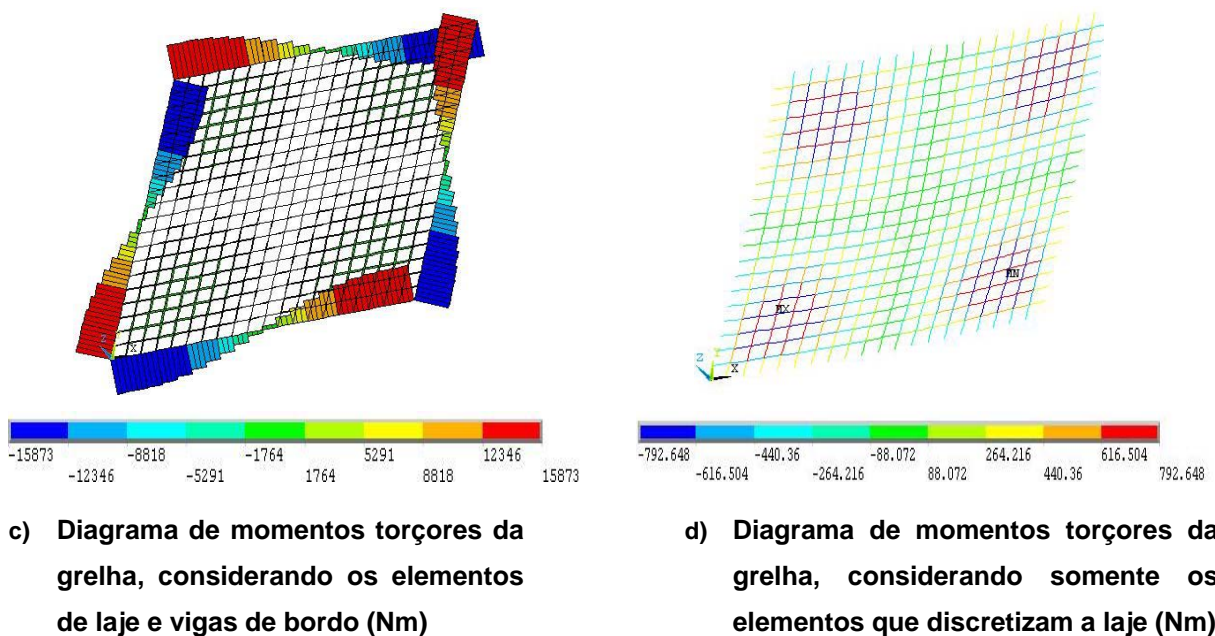


Figura 4.16 – Diagramas de momentos torçores da grelha (Nm)

A Tabela 4.4 apresenta os resultados desta comparação entre a análise feita no referido artigo e a reproduzida nesta dissertação.

Tabela 4.4 – Comparação entre os resultados obtidos pelo programa Ansys e pelos resultados de SILVA [37]

| Fonte | Deslocamento (cm) | Momento fletor (kNm) |
|---------------|-------------------|----------------------|
| SILVA [37] | 1,576 | 2,5395 |
| Ansys [19] | 1,5648 | 2,528 |
| Diferença (%) | 0,71 | 0,45 |

Cabe destacar que na maior parte dos casos refeitos, tanto os deslocamentos quanto os esforços fornecidos pelo programa Ansys [19] apresentaram valores um pouco superiores aos dos exemplos comparados.

4.3. Análises das Lajes Nervuradas Estudadas

4.3.1. Estudo sobre a Influência das Condições de Contorno

Nesta seção da dissertação, é analisada uma laje nervurada baseada naquelas do tipo REDUZCON [21], correspondente ao modelo com 13 cm de altura, de acordo com a Figura 3.10. Para a execução desta laje na prática, emprega-se o molde BRC100, já discutido anteriormente no Capítulo 3, como ilustrado na Figura 3.15. Inicialmente, as lajes nervuradas são modeladas considerando-se as mesmas simplesmente apoiadas em apoios rígidos, sem deslocamentos verticais, com restrição nestes apoios à rotação segundo o eixo das barras da grelha e sem esta restrição segundo o eixo perpendicular às mesmas. Esta condição de contorno (apoios rígidos) é empregada nos modelos objetivando demonstrar a influência do emprego (ou não) das vigas contorno das lajes, quando se considera a analogia de grelha.

As características consideradas para o concreto, assim como as características físicas e geométricas das faixas da grelha e os carregamentos são adotadas conforme os Itens 3.5 e 3.6, respectivamente.

Na seqüência do texto, a Tabela 4.5 apresenta uma análise bastante extensa, com base na variação do número de nervuras secundárias do modelo em estudo.

Observa-se, claramente, que os valores máximos de momentos fletores ocorrem nas faixas centrais dos modelos. No que se refere aos momentos torçores, os valores máximos surgem nas faixas do canto, sendo o posicionamento destas faixas mostrado na Figura 4.17.

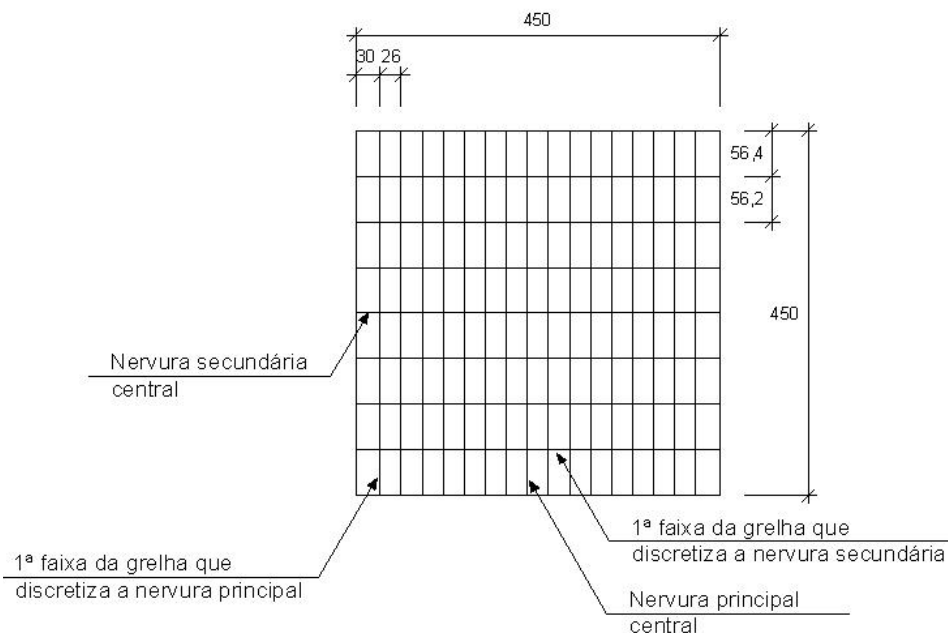


Figura 4.17 – Posicionamento das faixas da grelha para a laje com 7 nervuras secundárias

Tabela 4.5 - Resultados das análises da laje nervurada quadrada de 13 cm de altura feitas sem a consideração de vigas de bordo, apenas com apoios rígidos

| Momento de inércia à torção das faixas da grelha: integral | | | | | | | | | | |
|--|---------------------|-------------|---|--------------------|--|--------------------|--|------|-----------------------|------|
| Nerv. sec. | VB | Flecha (cm) | Momentos fletores da faixa do canto (kNm) | | Momentos fletores da faixa central (kNm) | | Momentos torçores (1ª e 2ª faixas da grelha - kNm) | | | |
| | | | M_x (nerv. princ.) | M_y (nerv. sec.) | M_x (nerv. princ.) | M_y (nerv. sec.) | M_{yx} (nerv. princ.) | | M_{xy} (nerv. sec.) | |
| | | | | | | | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| 16 | Apoio indesclocável | 0,67 | 0,32 | 0,43 | 1,57 | 2,05 | 0,39 | 0,35 | 0,65 | 0,59 |
| 15 | | 0,69 | 0,33 | 0,49 | 1,60 | 2,15 | 0,39 | 0,36 | 0,67 | 0,60 |
| 14 | | 0,70 | 0,33 | 0,56 | 1,63 | 2,23 | 0,40 | 0,37 | 0,69 | 0,61 |
| 13 | | 0,72 | 0,34 | 0,58 | 1,67 | 2,35 | 0,41 | 0,37 | 0,72 | 0,63 |
| 12 | | 0,74 | 0,35 | 0,63 | 1,73 | 2,40 | 0,42 | 0,38 | 0,76 | 0,65 |
| 11 | | 0,74 | 0,36 | 0,72 | 1,73 | 2,57 | 0,42 | 0,38 | 0,77 | 0,65 |
| 10 | | 0,75 | 0,36 | 0,83 | 1,77 | 2,68 | 0,43 | 0,39 | 0,80 | 0,65 |
| 9 | | 0,78 | 0,37 | 0,94 | 1,82 | 2,87 | 0,44 | 0,40 | 0,84 | 0,67 |
| 8 | | 0,80 | 0,38 | 1,12 | 1,89 | 3,03 | 0,45 | 0,41 | 0,89 | 0,67 |
| 7 | | 0,84 | 0,39 | 1,33 | 1,96 | 3,30 | 0,46 | 0,42 | 0,94 | 0,67 |
| 6 | | 0,87 | 0,40 | 1,62 | 2,05 | 3,50 | 0,48 | 0,44 | 1,01 | 0,64 |
| 5 | | 0,92 | 0,41 | 2,05 | 2,17 | 3,93 | 0,50 | 0,45 | 1,09 | 0,57 |
| 4 | 0,98 | 0,42 | 2,63 | 2,30 | 4,17 | 0,52 | 0,47 | 1,18 | 0,41 | |
| 3 | 1,06 | 0,43 | 3,52 | 2,54 | 5,00 | 0,54 | 0,49 | 1,28 | 0,00 | |

Para exemplificar o comportamento de uma grelha quando se considera as vigas de bordo na análise, têm-se, na Tabela 4.6, os resultados obtidos com o mesmo modelo de laje nervurada quadrada (vão livre de 4,5 m, 13 cm de altura – BRC100) e 7 nervuras secundárias. São apresentados valores de momento torçor nas nervuras principais no encontro com a viga de bordo, momento fletor no mesmo ponto e no centro da faixa (nervura principal).

Neste estudo, considera-se a inércia à torção integral das seções T das faixas da grelha que discretizam a laje nervurada, assim como a inércia à torção integral das faixas relativas às vigas de bordo, sendo que estas têm seção transversal de 15 x 40 cm. Estas características físicas e geométricas e o carregamento também foram calculadas de acordo com os Itens 3.5 e 3.6.

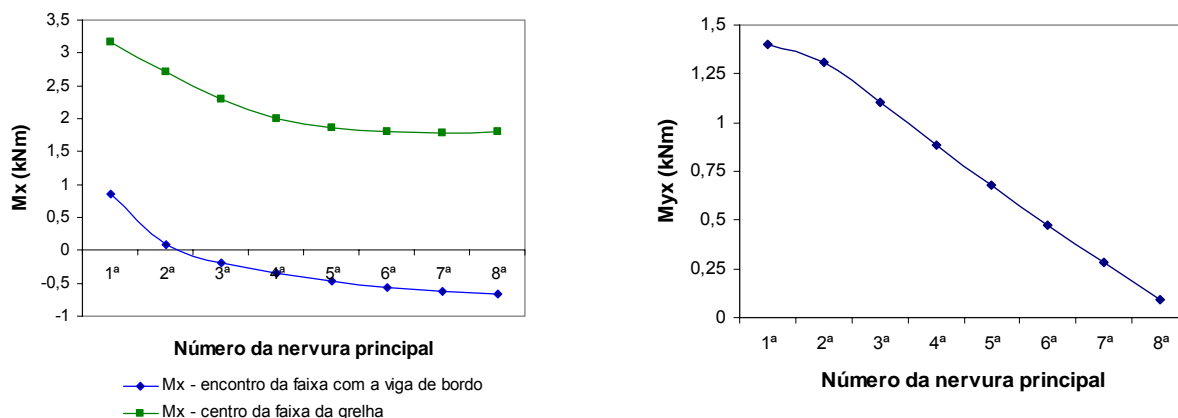
Tabela 4.6 - Resultados da análise da laje nervurada quadrada de 13 cm de altura, com 7 nervuras secundárias, feitas considerando as vigas de bordo (15 x 40 cm)

| Número da nervura principal | Momento torçor, M_{yx} , nas nervuras principais (kNm) | Momento fletor, M_x , no encontro das nervuras principais com a viga de bordo (kNm) | Momento fletor, M_x , no centro das faixas (nervuras principais) (kNm) |
|-----------------------------|--|---|--|
| 1ª | 1,40 | 0,86 | 3,17 |
| 2ª | 1,31 | 0,09 | 2,71 |
| 3ª | 1,10 | -0,19 | 2,29 |
| 4ª | 0,89 | -0,35 | 2,00 |
| 5ª | 0,68 | -0,47 | 1,86 |
| 6ª | 0,48 | -0,57 | 1,80 |
| 7ª | 0,28 | -0,63 | 1,79 |
| 8ª (meio do vão) | 0,09 | -0,66 | 1,79 |

Como o momento fletor no encontro com a viga de bordo é positivo nas faixas do canto, ele também é, no centro da mesma faixa, maior do que aquele no centro de uma faixa central, visto que nas faixas centrais existe um momento negativo nesse encontro com a viga de bordo, o qual diminui o momento fletor no centro desta faixa.

Este comportamento da grelha pode melhor ser observado através da Figura 4.18 (a), onde se compara o momento fletor de cada faixa da grelha no encontro com a viga de bordo e no centro da mesma, desde a primeira faixa até a faixa central.

Como é esperado, os momentos torçores são maiores no canto da laje, como pode ser observado na Figura 4.18 (b).



a) Relação entre os momentos fletores nas nervuras principais no centro destas e no encontro com a viga de bordo

b) Variação de momentos torçores da primeira nervura até a nervura principal central (kNm)

Figura 4.18 – Influência das vigas de bordo na analogia de grelha

Observa-se, também, que discretizando a laje com vigas de bordo, o deslocamento tende a diminuir, mesmo que estas tenham pequena altura, como no caso citado acima. Quando a laje é discretizada considerando o apoio indeslocável, o deslocamento obtido para o caso com 7 nervuras secundárias é de 0,84 cm. Já para as análises nas quais é levada em conta a deslocabilidade das vigas de bordo, este deslocamento caiu para 0,6; 0,32 e 0,25 cm para os vigas do contorno com seção transversal de 15 x 40, 15 x 70 e 15 x 100 cm, respectivamente, como pode ser observado nas tabelas com os resultados das análises das lajes nervuradas com 13 cm de altura, Anexo A -.

Para os casos analisados a seguir, a deslocabilidade do apoio é considerada e sua influência desloca os momentos fletores máximos das faixas centrais na maior parte dos casos, como pode ser observado nas tabelas subseqüentes. Também são feitas análises de lajes nervuradas com apenas 3 e 2 nervuras secundárias, que são as lajes nervuradas REDUZCON [21] reais obtidas na prática para este vão livre, considerando apoiadas em apoios indeslocáveis.

São expostos, nos próximos itens deste capítulo, os resultados das análises dos modelos apresentados no Item 3.7, sumarizados na Tabela 4.7 a Tabela 4.30, segundo as características físicas e geométricas e os carregamentos calculados de acordo com os Itens 3.5 e 3.6 para os vãos livres de 4,5 x 4,5 m; 4,5 x 6,75 m e 4,5 x 9 m.

4.3.2. Resultados das Análises das Lajes Nervuradas Quadradas ($L_x/L_y = 1$)

São apresentadas, a seguir, as tabelas com os resultados obtidos nas análises feitas com a consideração da deslocabilidade e do momento de inércia à torção das vigas de bordo das lajes nervuradas, além da influência da variação do número de nervuras secundárias e do momento de inércia à torção das faixas da grelha.

As análises são feitas utilizando os resultados de momentos fletores obtidos na faixa central, embora nas tabelas sejam apresentados estes e aqueles observados na faixa do canto, ou seja, na 1ª faixa da grelha que discretiza a laje nervurada, como é mostrado na Figura 4.19 para a laje com 7 nervuras secundárias. Quanto aos momentos torçores, também serão analisados aqueles obtidos na primeira faixa da grelha.

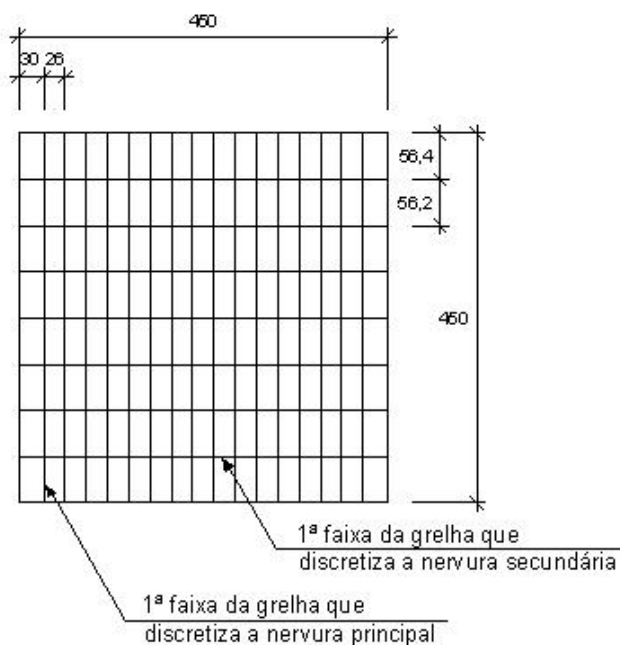


Figura 4.19 – Posicionamento das primeiras faixas que discretizam a laje nervurada

Isto se justifica devido ao fato de que estes esforços obtidos fora das faixas centrais, para momentos fletores, e fora da primeira faixa da grelha, para torçores, quando se analisa a laje com as vigas de bordo, provavelmente, são influenciados pela rigidez desta.

Observa-se que, quando as análises são feitas considerando as vigas de bordo, os esforços máximos são sempre obtidos nos nós centrais das faixas da grelha, embora não necessariamente na faixa central da grelha.

Provavelmente isto acontece devido à influência da rigidez das vigas de bordo ser muito maior do que a das faixas (seções T que representam as nervuras e uma parte da mesa da laje nervurada). Quando não se tem estas vigas de bordo, a posição dos valores

máximos para os esforços é dependente somente da inércia à torção das faixas; se esta é considerada, estes valores se deslocam dos nós centrais.

No caso de um estudo feito sem a consideração de vigas de apoio, ou seja, com a laje descarregando em apoios indeslocáveis, como por exemplo, a análise do Item 4.2.1, esses valores podem se deslocar para outros nós das faixas, mas se encontram sempre nas faixas centrais da grelha.

Tem-se que, para tornar as tabelas a seguir mais compactas, as expressões “nervura secundária”, “nervura principal” e “viga de bordo” são substituídas por NS, NP e VB.

Tabela 4.7 - Resultados das análises da laje nervurada quadrada de 17 cm de altura: momento de inércia à torção integral das faixas da grelha e o das vigas de bordo no estádio I

| NS | VB (m) | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} – NP | | M _{xy} – NS | |
| | | | M _x – NP (kNm) | M _y – NS (kNm) | M _x – NP (kNm) | M _y – NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| 16 | 0,15 x 0,4 | 0,49 | 4,13 | 3,78 | 2,68 | 3,25 | 2,52 | 2,12 | 2,38 | 1,97 |
| 13 | | 0,50 | 4,05 | 4,53 | 2,67 | 3,71 | 2,33 | 2,02 | 2,96 | 2,23 |
| 10 | | 0,51 | 4,05 | 5,67 | 2,59 | 4,31 | 2,06 | 1,84 | 3,68 | 2,44 |
| 7 | | 0,55 | 4,11 | 7,34 | 2,48 | 5,14 | 1,67 | 1,49 | 4,43 | 2,44 |
| 5 | | 0,60 | 4,26 | 8,41 | 2,36 | 5,99 | 1,26 | 1,10 | 4,88 | 1,98 |
| 3 | | 0,70 | 4,36 | 9,42 | 2,30 | 7,42 | 0,71 | 0,60 | 5,41 | 0** |
| 2 | | 0,84 | 5,69 | 9,24* | 2,88 | 9,24* | 0,28 | 0,19 | 4,93 | -*** |
| 16 | | 0,15 x 0,7 | 0,24 | 4,33 | 4,20 | 2,72 | 3,17 | 2,50 | 2,94 | 2,55 |
| 13 | 0,24 | | 4,23 | 5,00 | 2,68 | 3,64 | 2,28 | 2,72 | 3,41 | 3,24 |
| 10 | 0,25 | | 4,19 | 6,16 | 2,54 | 4,22 | 1,98 | 2,39 | 4,52 | 3,58 |
| 7 | 0,26 | | 4,04 | 7,71 | 2,33 | 5,05 | 1,60 | 1,86 | 5,68 | 3,57 |
| 5 | 0,29 | | 3,96 | 8,54 | 2,16 | 5,86 | 1,26 | 1,37 | 6,22 | 2,84 |
| 3 | 0,34 | | 3,89 | 9,30 | 2,04 | 7,06 | 0,80 | 0,80 | 6,26 | 0** |
| 2 | 0,42 | | 5,20 | 8,86* | 2,46 | 8,86* | 0,37 | 0,33 | 5,75 | -*** |
| 16 | 0,15 x 1 | | 0,17 | 4,78 | 4,71 | 2,81 | 3,23 | 1,85 | 3,22 | 2,12 |
| 13 | | 0,17 | 4,59 | 5,59 | 2,77 | 3,71 | 1,73 | 2,94 | 3,12 | 3,82 |
| 10 | | 0,18 | 4,44 | 6,84 | 2,62 | 4,33 | 1,57 | 2,55 | 4,52 | 4,32 |
| 7 | | 0,19 | 4,06 | 8,47 | 2,41 | 5,25 | 1,35 | 1,97 | 6,15 | 4,35 |
| 5 | | 0,21 | 3,79 | 9,56 | 2,21 | 6,25 | 1,15 | 1,49 | 7,09 | 3,54 |
| 3 | | 0,25 | 3,41 | 10,30 | 2,15 | 7,71 | 0,79 | 0,92 | 6,81 | 0** |
| 2 | | 0,31 | 4,61 | 9,94* | 2,41 | 9,94* | 0,42 | 0,44 | 6,24 | -*** |

Obs.:

- (*) Tem-se que, para as lajes com apenas duas nervuras secundárias, a faixa que é considerada do canto é a mesma central. Portanto, o momento fletor na faixa central será igual ao do canto, já que se trata da mesma nervura.
- (**) Nas lajes com três nervuras secundárias, o momento torçor, M_{xy}, na segunda faixa da grelha corresponde ao momento na nervura secundária central e, para esta, o momento torçor é nulo.
- (***) Como a laje tem somente duas nervuras secundárias, não existe uma segunda faixa antes do centro da laje para que se possa tomar o valor de momento torçor.

Tabela 4.8 - Resultados das análises da laje nervurada quadrada de 17 cm de altura: 1% do momento de inércia à torção das faixas da grelha e o das vigas de bordo no estádio I

| NS | VB (m) | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| 16 | 0,15 x 0,4 | 0,50 | 4,10 | 3,72 | 2,76 | 3,35 | 2,56 | 2,17 | 2,50 | 2,12 |
| 13 | | 0,51 | 4,01 | 4,48 | 2,75 | 3,83 | 2,38 | 2,08 | 3,11 | 2,38 |
| 10 | | 0,52 | 4,01 | 5,65 | 2,67 | 4,44 | 2,12 | 1,90 | 3,85 | 2,61 |
| 7 | | 0,56 | 4,05 | 7,35 | 2,57 | 5,29 | 1,74 | 1,58 | 4,66 | 2,60 |
| 5 | | 0,61 | 4,19 | 8,47 | 2,46 | 6,17 | 1,35 | 1,20 | 5,17 | 2,12 |
| 3 | | 0,71 | 4,25 | 9,58 | 2,41 | 7,65 | 0,83 | 0,72 | 5,81 | 0,00 |
| 2 | | 0,86 | 5,59 | 9,48 | 2,94 | 9,48 | 0,42 | 0,34 | 5,23 | - |
| 16 | | 0,15 x 0,7 | 0,25 | 4,34 | 4,16 | 2,83 | 3,32 | 2,51 | 3,02 | 2,68 |
| 13 | 0,25 | | 4,22 | 4,99 | 2,78 | 3,80 | 2,30 | 2,81 | 3,57 | 3,45 |
| 10 | 0,26 | | 4,16 | 6,19 | 2,65 | 4,40 | 2,03 | 2,48 | 4,71 | 3,80 |
| 7 | 0,27 | | 3,99 | 7,80 | 2,45 | 5,25 | 1,68 | 1,97 | 5,93 | 3,77 |
| 5 | 0,30 | | 3,90 | 8,70 | 2,28 | 6,11 | 1,37 | 1,50 | 6,51 | 3,00 |
| 3 | 0,35 | | 3,82 | 9,58 | 2,17 | 7,37 | 0,93 | 0,96 | 6,62 | 0,00 |
| 2 | 0,43 | | 5,11 | 9,18 | 2,52 | 9,18 | 0,52 | 0,51 | 6,02 | - |
| 16 | 0,15 x 1 | | 0,18 | 4,82 | 4,71 | 2,92 | 3,37 | 1,81 | 3,29 | 2,19 |
| 13 | | 0,18 | 4,62 | 5,62 | 2,87 | 3,87 | 1,72 | 3,02 | 3,22 | 4,01 |
| 10 | | 0,19 | 4,45 | 6,92 | 2,73 | 4,51 | 1,59 | 2,63 | 4,67 | 4,52 |
| 7 | | 0,20 | 4,04 | 8,62 | 2,51 | 5,45 | 1,41 | 2,08 | 6,36 | 4,54 |
| 5 | | 0,22 | 3,76 | 9,78 | 2,32 | 6,50 | 1,24 | 1,61 | 7,34 | 3,87 |
| 3 | | 0,26 | 3,40 | 10,63 | 2,27 | 8,02 | 0,91 | 1,06 | 7,13 | 0,00 |
| 2 | | 0,32 | 4,60 | 10,28 | 2,46 | 10,28 | 0,55 | 0,60 | 6,54 | - |

Tabela 4.9 - Resultados das análises da laje nervurada quadrada de 17 cm de altura: momento de inércia à torção integral das faixas da grelha e o das vigas de bordo no estádio II

| NS | VB (m) | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| 16 | 0,15 x 0,4 | 0,52 | 4,12 | 3,72 | 2,82 | 3,46 | 2,24 | 2,04 | 2,08 | 1,87 |
| 13 | | 0,53 | 4,02 | 4,51 | 2,83 | 3,96 | 2,05 | 1,94 | 2,64 | 2,14 |
| 10 | | 0,55 | 3,99 | 5,74 | 2,78 | 4,62 | 1,81 | 1,75 | 3,35 | 2,38 |
| 7 | | 0,59 | 3,95 | 7,56 | 2,72 | 5,59 | 1,47 | 1,43 | 4,11 | 2,38 |
| 5 | | 0,65 | 4,00 | 8,87 | 2,69 | 6,59 | 1,12 | 1,05 | 4,51 | 1,90 |
| 3 | | 0,77 | 3,94 | 10,42 | 2,78 | 8,42 | 0,61 | 0,56 | 4,69 | 0,00 |
| 2 | | 0,95 | 5,09 | 10,81 | 3,43 | 10,81 | 0,18 | 0,14 | 4,28 | - |
| 16 | | 0,15 x 0,7 | 0,29 | 4,69 | 4,55 | 3,08 | 3,64 | 1,62 | 3,00 | 1,70 |
| 13 | 0,29 | | 4,51 | 5,58 | 3,07 | 4,19 | 1,50 | 2,78 | 2,69 | 3,47 |
| 10 | 0,30 | | 4,33 | 7,10 | 2,98 | 4,90 | 1,36 | 2,45 | 4,11 | 3,99 |
| 7 | 0,32 | | 3,89 | 9,22 | 2,85 | 6,00 | 1,23 | 1,96 | 5,77 | 4,11 |
| 5 | 0,35 | | 3,53 | 10,67 | 2,80 | 7,20 | 1,10 | 1,52 | 6,62 | 3,32 |
| 3 | 0,42 | | 3,07 | 12,42 | 2,96 | 9,31 | 0,79 | 0,98 | 6,33 | 0,00 |
| 2 | 0,55 | | 4,16 | 12,67 | 3,29 | 12,67 | 0,37 | 0,46 | 5,75 | - |
| 16 | 0,15 x 1 | | 0,20 | 5,58 | 5,59 | 3,28 | 3,76 | 0,81 | 3,50 | 1,12 |
| 13 | | 0,21 | 5,24 | 6,80 | 3,27 | 4,33 | 0,85 | 3,19 | 2,39 | 4,41 |
| 10 | | 0,21 | 4,86 | 8,52 | 3,16 | 5,07 | 0,92 | 2,77 | 4,32 | 5,18 |
| 7 | | 0,22 | 4,08 | 10,87 | 3,01 | 6,25 | 1,02 | 2,21 | 6,78 | 5,34 |
| 5 | | 0,24 | 3,48 | 12,66 | 2,93 | 7,66 | 1,06 | 1,77 | 8,34 | 4,40 |
| 3 | | 0,30 | 2,68 | 14,32 | 3,15 | 10,26 | 0,86 | 1,21 | 8,23 | 0,00 |
| 2 | | 0,39 | 3,72 | 14,77 | 3,32 | 14,77 | 0,51 | 0,68 | 7,74 | - |

Tabela 4.10 - Resultados das análises da laje nervurada quadrada de 17 cm de altura: 1% do momento de inércia à torção das faixas da grelha e o das vigas de bordo no estádio II

| NS | VB (m) | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| 16 | 0,15 x 0,4 | 0,54 | 4,08 | 3,63 | 2,96 | 3,65 | 2,25 | 2,11 | 2,25 | 2,10 |
| 13 | | 0,55 | 3,97 | 4,45 | 2,97 | 4,17 | 2,09 | 2,02 | 2,85 | 2,39 |
| 10 | | 0,57 | 3,91 | 5,71 | 2,93 | 4,86 | 1,87 | 1,86 | 3,60 | 2,65 |
| 7 | | 0,61 | 3,84 | 7,62 | 2,89 | 5,87 | 1,58 | 1,56 | 4,45 | 2,66 |
| 5 | | 0,67 | 3,86 | 9,04 | 2,88 | 6,94 | 1,27 | 1,22 | 4,95 | 2,15 |
| 3 | | 0,80 | 3,70 | 10,79 | 3,02 | 8,90 | 0,83 | 0,78 | 5,27 | 0,00 |
| 2 | | 0,98 | 4,87 | 11,33 | 3,59 | 11,33 | 0,47 | 0,39 | 4,67 | - |
| 16 | | 0,15 x 0,7 | 0,32 | 4,75 | 4,56 | 3,27 | 3,90 | 1,54 | 3,14 | 1,83 |
| 13 | 0,32 | | 4,55 | 5,65 | 3,25 | 4,46 | 1,46 | 2,93 | 2,88 | 3,84 |
| 10 | 0,32 | | 4,32 | 7,24 | 3,16 | 5,20 | 1,38 | 2,60 | 4,39 | 4,38 |
| 7 | 0,34 | | 3,81 | 9,50 | 3,04 | 6,35 | 1,33 | 2,14 | 6,17 | 4,48 |
| 5 | 0,37 | | 3,41 | 11,08 | 3,01 | 7,63 | 1,26 | 1,72 | 7,12 | 3,62 |
| 3 | 0,45 | | 2,88 | 13,04 | 3,22 | 9,90 | 1,01 | 1,23 | 6,92 | 0,00 |
| 2 | 0,58 | | 3,94 | 13,37 | 3,45 | 13,37 | 0,65 | 0,74 | 6,17 | - |
| 16 | 0,15 x 1 | | 0,22 | 5,72 | 5,67 | 3,45 | 3,98 | 0,68 | 3,63 | 1,16 |
| 13 | | 0,22 | 5,34 | 6,94 | 3,43 | 4,56 | 0,78 | 3,32 | 2,50 | 4,72 |
| 10 | | 0,22 | 4,68 | 8,73 | 3,32 | 5,33 | 0,92 | 2,91 | 4,53 | 5,52 |
| 7 | | 0,23 | 4,05 | 11,20 | 3,17 | 6,55 | 1,09 | 2,37 | 7,10 | 5,65 |
| 5 | | 0,25 | 3,43 | 13,11 | 3,10 | 8,04 | 1,17 | 1,94 | 8,75 | 4,65 |
| 3 | | 0,31 | 2,59 | 14,94 | 3,36 | 10,78 | 1,02 | 1,42 | 8,73 | 0,00 |
| 2 | | 0,41 | 3,62 | 15,43 | 3,45 | 15,43 | 0,71 | 0,91 | 8,17 | - |

Tabela 4.11 - Resultados das análises da laje nervurada quadrada de 17 cm de altura: momento de inércia à torção integral das faixas da grelha e desprezando o das vigas de bordo

| NS | VB (m) | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| 16 | 0,15 x 0,4 | 0,53 | 4,12 | 3,71 | 2,85 | 3,51 | 2,17 | 2,02 | 2,01 | 1,85 |
| 13 | | 0,54 | 4,01 | 4,51 | 2,87 | 4,02 | 1,99 | 1,92 | 2,57 | 2,12 |
| 10 | | 0,56 | 3,97 | 5,75 | 2,82 | 4,70 | 1,75 | 1,74 | 3,27 | 2,36 |
| 7 | | 0,60 | 3,91 | 7,61 | 2,78 | 5,69 | 1,43 | 1,41 | 4,03 | 2,36 |
| 5 | | 0,66 | 3,93 | 8,98 | 2,77 | 6,75 | 1,08 | 1,05 | 4,42 | 1,88 |
| 3 | | 0,79 | 3,82 | 10,67 | 2,91 | 8,68 | 0,59 | 0,56 | 4,52 | 0,00 |
| 2 | | 0,98 | 4,91 | 11,22 | 3,59 | 11,22 | 0,15 | 0,13 | 4,12 | - |
| 16 | | 0,15 x 0,7 | 0,30 | 4,76 | 4,63 | 3,16 | 3,75 | 1,42 | 3,01 | 1,51 |
| 13 | 0,30 | | 4,57 | 5,72 | 3,16 | 4,31 | 1,31 | 2,79 | 2,52 | 3,52 |
| 10 | 0,31 | | 4,36 | 7,31 | 3,08 | 5,05 | 1,21 | 2,45 | 4,01 | 4,08 |
| 7 | 0,33 | | 3,85 | 9,59 | 2,96 | 6,21 | 1,14 | 1,98 | 5,79 | 4,22 |
| 5 | 0,36 | | 3,42 | 11,20 | 2,96 | 7,50 | 1,05 | 1,55 | 6,73 | 3,42 |
| 3 | 0,45 | | 2,85 | 13,23 | 3,21 | 9,88 | 0,78 | 1,03 | 6,40 | 0,00 |
| 2 | 0,59 | | 3,86 | 13,74 | 3,52 | 13,74 | 0,37 | 0,50 | 5,81 | - |
| 16 | 0,15 x 1 | | 0,21 | 5,74 | 5,78 | 3,38 | 3,87 | 0,59 | 3,55 | 0,92 |
| 13 | | 0,21 | 5,37 | 7,06 | 3,37 | 4,45 | 0,66 | 3,24 | 2,24 | 4,52 |
| 10 | | 0,21 | 4,93 | 8,88 | 3,27 | 5,22 | 0,78 | 2,81 | 4,29 | 5,35 |
| 7 | | 0,22 | 4,07 | 11,39 | 3,13 | 6,45 | 0,95 | 2,26 | 6,93 | 5,54 |
| 5 | | 0,25 | 3,41 | 13,34 | 3,08 | 7,94 | 1,03 | 1,83 | 8,63 | 4,57 |
| 3 | | 0,31 | 2,50 | 15,24 | 3,39 | 10,81 | 0,86 | 1,28 | 8,62 | 0,00 |
| 2 | | 0,41 | 3,48 | 16,00 | 3,57 | 16,00 | 0,52 | 0,74 | 8,21 | - |

Tabela 4.12 - Resultados das análises da laje nervurada quadrada de 17 cm de altura: 1% do momento de inércia à torção das faixas da grelha e desprezando o das vigas de bordo

| NS | VB (m) | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| 16 | 0,15 x 0,4 | 0,55 | 4,07 | 3,61 | 3,00 | 3,72 | 2,18 | 2,10 | 2,19 | 2,09 |
| 13 | | 0,56 | 3,95 | 4,44 | 3,02 | 4,26 | 2,02 | 2,01 | 2,78 | 2,39 |
| 10 | | 0,58 | 3,88 | 5,72 | 3,00 | 4,96 | 1,81 | 1,85 | 3,54 | 2,66 |
| 7 | | 0,63 | 3,78 | 7,68 | 2,97 | 6,02 | 1,54 | 1,56 | 4,40 | 2,67 |
| 5 | | 0,69 | 3,76 | 9,18 | 2,99 | 7,15 | 1,24 | 1,23 | 4,90 | 2,16 |
| 3 | | 0,82 | 3,52 | 11,12 | 3,19 | 9,24 | 0,83 | 0,80 | 5,14 | 0,00 |
| 2 | | 1,01 | 4,65 | 11,84 | 3,79 | 11,84 | 0,44 | 0,41 | 4,55 | - |
| 16 | | 0,15 x 0,7 | 0,33 | 4,84 | 4,65 | 3,37 | 4,03 | 1,30 | 3,16 | 1,62 |
| 13 | 0,33 | | 4,62 | 5,80 | 3,36 | 4,61 | 1,26 | 2,95 | 2,71 | 3,92 |
| 10 | 0,33 | | 4,35 | 7,50 | 3,28 | 5,38 | 1,22 | 2,63 | 4,31 | 4,50 |
| 7 | 0,35 | | 3,76 | 9,92 | 3,18 | 6,61 | 1,24 | 2,17 | 6,24 | 4,63 |
| 5 | 0,39 | | 3,28 | 11,69 | 3,20 | 8,00 | 1,23 | 1,78 | 7,30 | 3,76 |
| 3 | 0,48 | | 2,62 | 13,96 | 3,50 | 10,57 | 1,03 | 1,31 | 7,07 | 0,00 |
| 2 | 0,63 | | 3,59 | 14,58 | 3,71 | 14,58 | 0,68 | 0,81 | 6,27 | - |
| 16 | 0,15 x 1 | | 0,23 | 5,91 | 5,88 | 3,56 | 4,11 | 0,43 | 3,69 | 0,94 |
| 13 | | 0,23 | 5,48 | 7,22 | 3,54 | 4,70 | 0,57 | 3,38 | 2,34 | 4,87 |
| 10 | | 0,23 | 4,98 | 9,13 | 3,45 | 5,49 | 0,77 | 2,96 | 4,50 | 5,72 |
| 7 | | 0,24 | 4,05 | 11,77 | 3,31 | 6,77 | 1,01 | 2,42 | 7,27 | 5,87 |
| 5 | | 0,26 | 3,36 | 13,85 | 3,27 | 8,34 | 1,15 | 2,01 | 9,08 | 4,85 |
| 3 | | 0,33 | 2,40 | 15,93 | 3,61 | 11,38 | 1,04 | 1,50 | 9,18 | 0,00 |
| 2 | | 0,43 | 3,35 | 16,75 | 3,72 | 16,75 | 0,75 | 0,99 | 8,68 | - |

4.3.2.1. Influência do Momento de Inércia à Torção das Faixas da Grelha

Nesta seção, faz-se uma comparação entre os resultados obtidos considerando a inércia à torção das faixas da grelha integral e apenas 1% desta, considerando sempre a inércia à torção das vigas de bordo nula.

Nos gráficos a seguir, estão os valores de deslocamento e esforços obtidos para cada modelo com o número de nervuras secundárias considerado. Estes valores são ligados por retas (relação linear), visto que não há como estimar com precisão, de outra forma, os resultados para situações intermediárias não analisadas, conforme definido no Item 3.7.

Observa-se que, como é esperado, diminuindo a inércia à torção das faixas da grelha, o deslocamento da laje nervurada aumenta, como mostrado no gráfico para as lajes com viga de contorno de 15 x 40 cm, Figura 4.20 (a).

Outro comportamento também esperado e verificado na Figura 4.20 (b) e (c), as quais representam os deslocamentos das lajes com vigas de bordo de seção de 15 x 70 e 15 x 100 cm, respectivamente, é que aumentando a rigidez à flexão da viga de bordo, através do aumento da altura da seção transversal desta, o deslocamento diminui.

Tem-se, também, que com a diminuição do número de nervuras secundárias, o deslocamento aumenta. Isto também é esperado, já que a rigidez do sistema estrutural diminui quando o número de nervuras é reduzido.

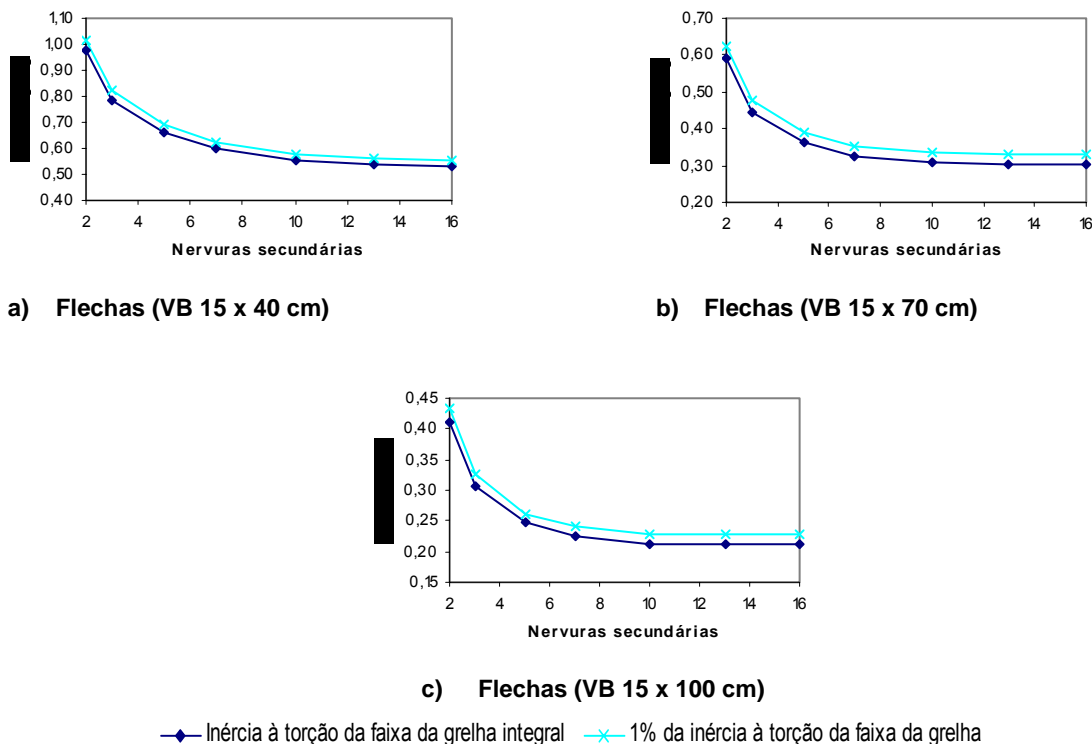
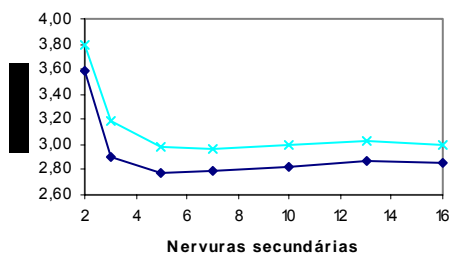


Figura 4.20 – Deslocamentos em função da inércia à torção das faixas da grelha

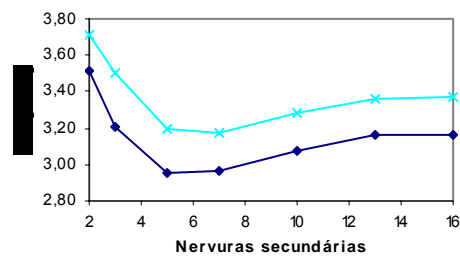
O comportamento da laje nervurada com relação ao momentos fletores nas nervuras principais, M_x , e secundárias, M_y , também ficou dentro do esperado, ou seja, diminuindo-se a inércia à torção das faixas da grelha, obteve-se um aumento no valor desses esforços, como pode ser observado na Figura 4.21.

Porém, devido à influência das vigas de bordo, os momentos torçores nas nervuras principais e secundárias, Figura 4.22, não se reduzem à valores insignificantes quando a inércia à torção das faixas da grelha é praticamente desprezada (1% do valor total). Mesmo não se considerando a inércia à torção das vigas do contorno das lajes, a inércia à flexão destas é muito maior do que a das faixas da grelha e esta influência é determinante no comportamento à torção da laje.

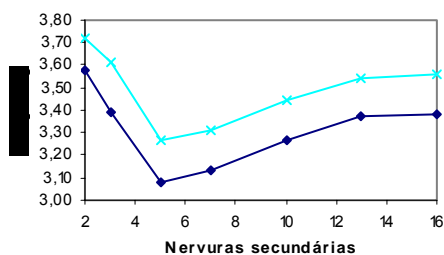
Observa-se que para os momentos fletores nas nervuras principais, M_x , os valores mínimos são obtidos utilizando-se 5 nervuras secundárias. Já para os momentos fletores nas nervuras secundárias, M_y , a laje bidirecional com a mesma quantidade de nervuras nas duas direções apresenta os menores valores, para todas as seções trasversais de vigas de bordo estudadas.



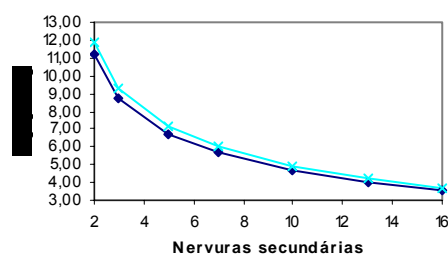
a) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 40 cm)



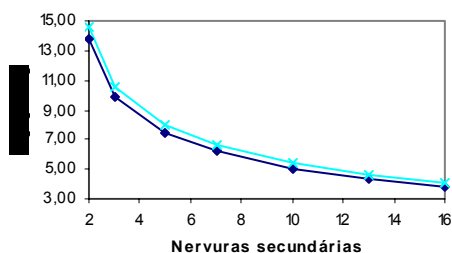
b) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 70 cm)



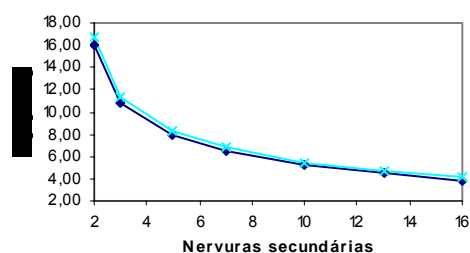
c) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 100 cm)



d) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 40 cm)



e) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 70 cm)



f) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 100 cm)

—●— Inércia à torção da faixa da grelha integral —x— 1% da inércia à torção da faixa da grelha

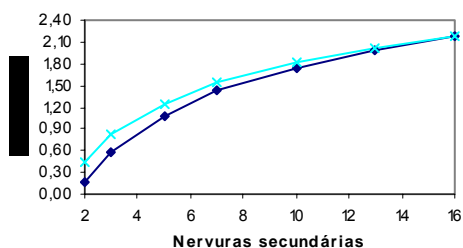
Figura 4.21 – Momentos fletores em função da inércia à torção das faixas da grelha

Tem-se, na Figura 4.22 (a) a (c), novamente demonstrada a influência da consideração da viga de bordo na análise. A variação da sua rigidez, através do aumento da altura da seção transversal, modifica o ponto onde o valor do momento torçor na nervura principal, M_{yx} , aproxima-se nas duas análises (considerando o momento de inércia à torção das faixas que discretizam a laje nervurada integral e apenas 1% deste valor).

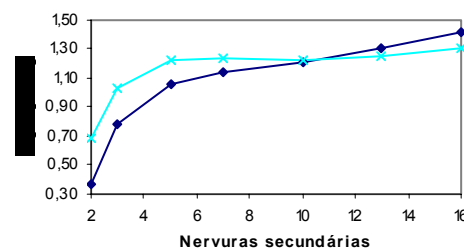
Os momentos torçores nas nervuras secundárias, M_{xy} , Figura 4.22 (d) a (f), aproximam-se nas duas análises (considerando o momento de inércia à torção das faixas que discretizam a laje nervurada integral e apenas 1% deste valor) à medida que aumenta a altura da viga de bordo, principalmente nos modelos com maior número de nervuras

secundárias. Ou seja, a influência da rigidez das vigas de apoio da laje é muito maior do que a influência causada pela rigidez das faixas que discretizam as nervuras secundárias.

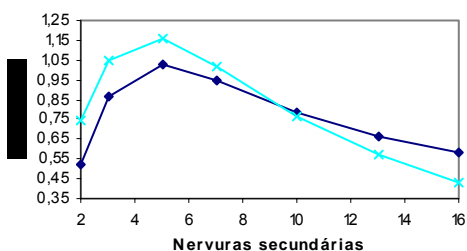
No entanto, como já mencionado, a análise que considera a inércia à torção integral das faixas da grelha não apresenta os maiores valores de momentos torçores. Provavelmente, este fato se deve à influência causada pela consideração das vigas do contorno na análise da laje nervurada.



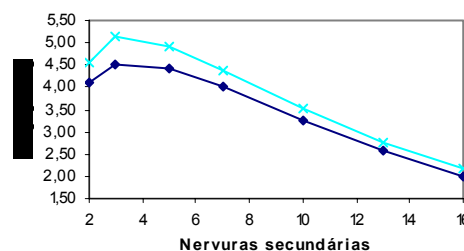
a) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 40 cm)



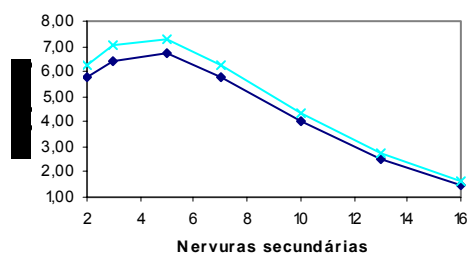
b) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 70 cm)



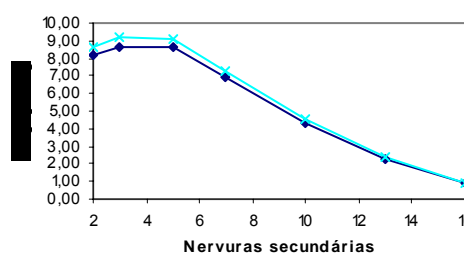
c) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 100 cm)



d) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 40 cm)



e) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 70 cm)



f) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 100 cm)

—●— Inércia à torção da faixa da grelha integral —x— 1% da inércia à torção da faixa da grelha

Figura 4.22 – Momentos torçores em função da inércia à torção das faixas da grelha

4.3.2.2. Influência do Momento de Inércia à Torção das Vigas de Bordo

No intuito de se verificar o comportamento destas lajes frente à variação de inércia à torção para as diversas seções de vigas de bordo adotadas no estudo, faz-se uma comparação entre as análises que consideram a inércia à torção das vigas do contorno das lajes nervuradas no estágio I (não fissurado), no estágio II (fissurado) e nula. Para isto, adotam-se os valores obtidos nas análises com a inércia à torção das faixas da grelha integral.

Como pode ser visto na Figura 4.23, as flechas das lajes nervuradas aumentam com a diminuição da inércia à torção das vigas de bordo, sendo este o comportamento esperado. Tem-se, também, que aumentando a altura da viga de apoio ou o número de nervuras secundárias da laje nervurada, o deslocamento da laje nervurada diminui.

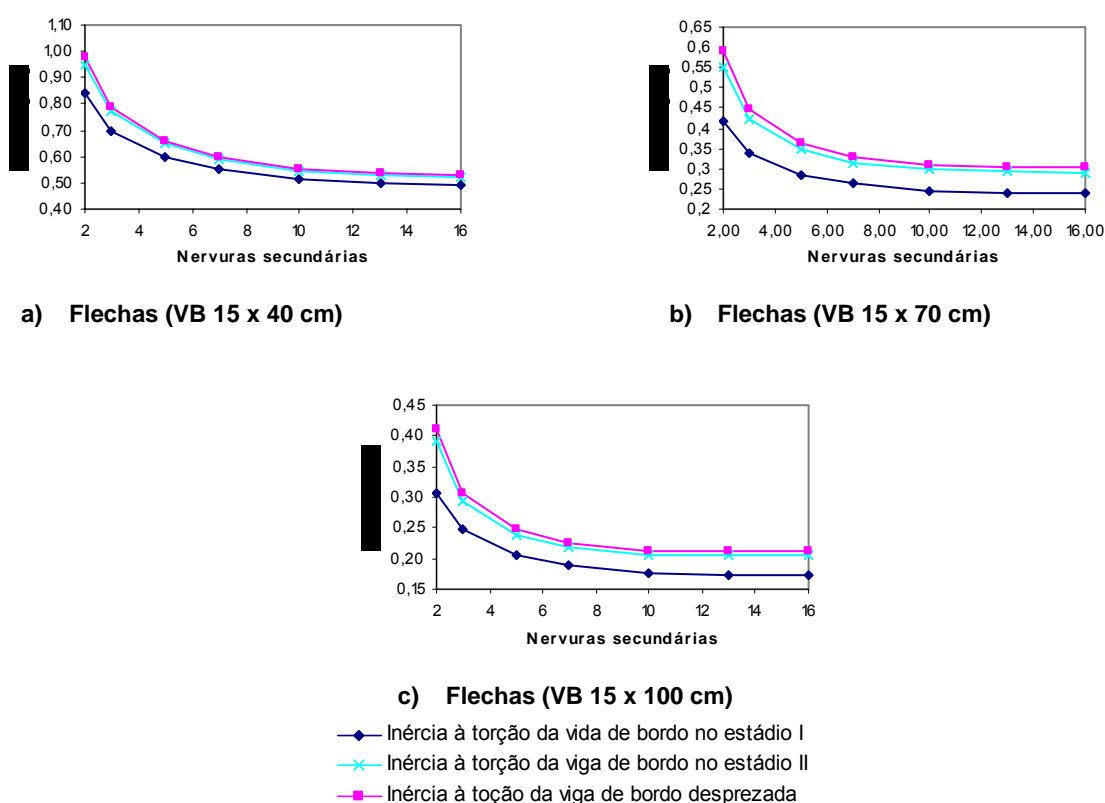


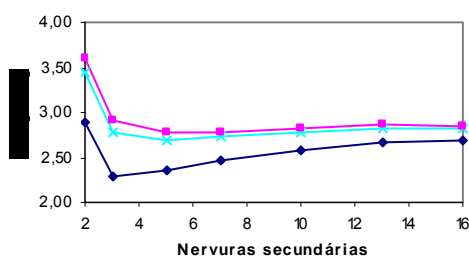
Figura 4.23 – Deslocamentos em função da inércia à torção das vigas de bordo

Com relação aos momentos fletores nas nervuras principais e secundárias, M_x e M_y , respectivamente, mostrados na Figura 4.24, tem-se a mesma conclusão que para as flechas, já que com o aumento do deslocamento causado pela diminuição da inércia à torção das vigas de bordo, tem-se aumentados os momentos fletores.

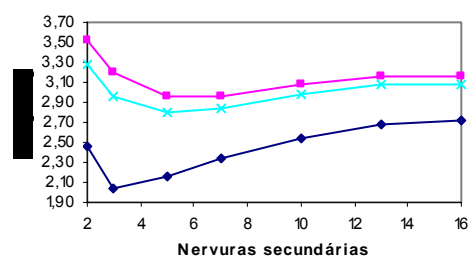
Para a análise com as vigas de bordo no estágio I com relação à inércia à torção, os valores mínimos de momento fletor na nervura principal, M_x , são obtidos com apenas 3

nervuras secundárias na laje nervurada. Quando se considera as vigas de bordo no estágio II ou se despreza o valor de seu momento de inércia à torção, este menor valor de momento fletor na nervura principal é obtido na laje com 5 nervuras secundárias

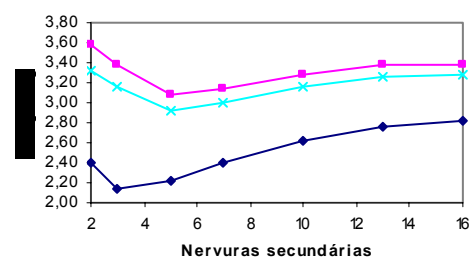
Percebe-se, principalmente para os momentos fletores nas nervuras secundárias, M_y , na Figura 4.24 (d) a (f), que não existe grande diferença nas análises feitas considerando a viga de bordo no estágio II ou simplesmente considerando nula a sua inércia à torção. Isto é um comportamento razoável, já que a viga no estágio II tem somente 10% do valor integral de sua inércia à torção.



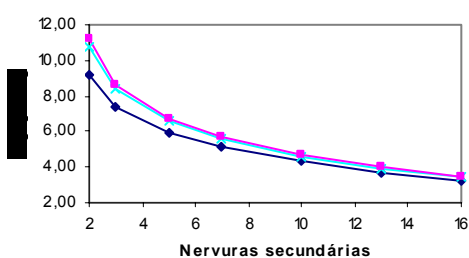
a) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 40 cm)



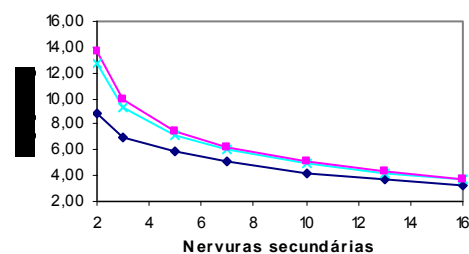
b) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 70 cm)



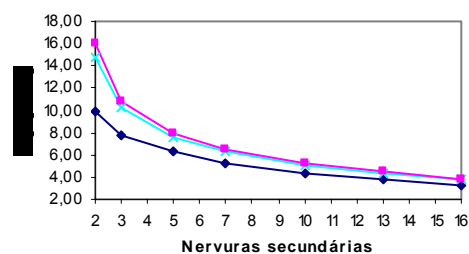
c) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 100 cm)



d) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 40 cm)



e) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 70 cm)

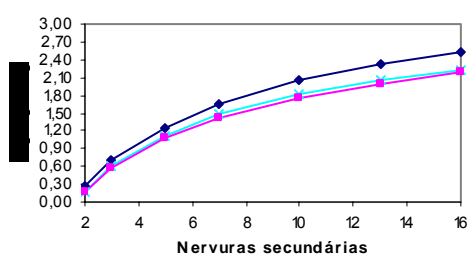


f) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 100 cm)

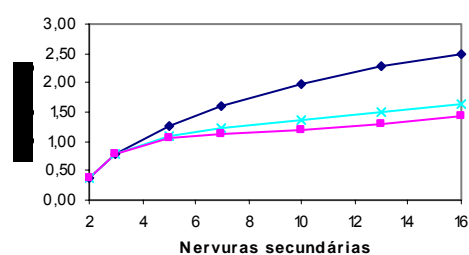
- Inércia à torção da viga de bordo no estágio I
- ×— Inércia à torção da viga de bordo no estágio II
- Inércia à torção da viga de bordo desprezada

Figura 4.24 – Momentos fletores em função da inércia à torção das vigas de bordo

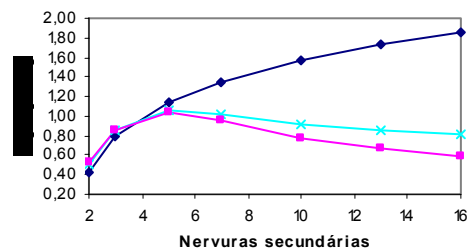
Para os momentos torçores, têm-se os valores máximos quando se considera a viga de contorno da laje no estádio I, com relação à inércia à torção. Estes valores diminuem quando se considera-as no estádio II e obtêm-se os valores mínimos para a análise com inércia à torção nula para as vigas de bordo, tal como ilustrado na Figura 4.25. Isto se deve à redistribuição de esforços da laje, já que o inverso ocorre para os momentos fletores nas duas direções, ou seja, para a condição de rigidez à torção da viga de bordo na qual apresenta os maiores valores de momentos fletores na laje, esta mesma condição determinará os menores valores de momentos torçores para que se mantenha o equilíbrio dos esforços do sistema.



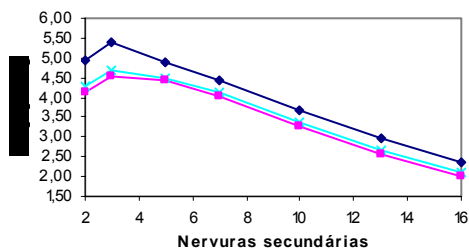
a) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 40 cm)



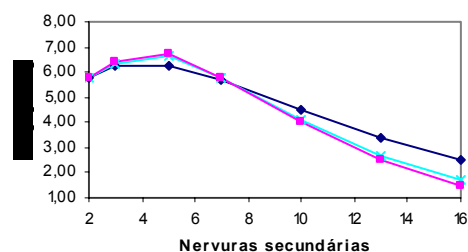
b) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 70 cm)



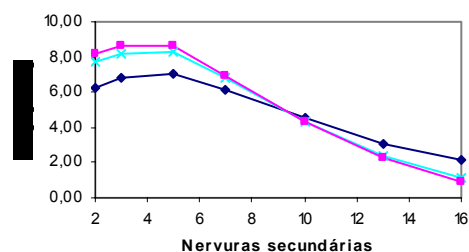
c) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 100 cm)



d) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 40 cm)



e) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 70 cm)



f) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 100 cm)

- Inércia à torção da viga de bordo no estádio I
- x— Inércia à torção da viga de bordo no estádio II
- Inércia à torção da viga de bordo desprezada

Figura 4.25 – Momentos torçores em função da inércia à torção das vigas de bordo

Porém, nota-se uma inversão do comportamento do momento torçor quando se aumenta a altura da viga e, simultaneamente, diminui-se o número de nervuras secundárias. Esta inversão passa por uma transição quando se considera as viga do contorno da laje nervurada com seção transversal de 15 x 70 cm e é bastante nítida para as de seção transversal de 15 x 100 cm.

4.3.2.3. Comparação entre os Modelos Computacionais Desenvolvidos com e sem Vigas de Bordo para as Lajes Quadradas ($L_x/L_y = 1$)

Afim de se demonstrar a diferença nos resultados entre as análises onde se consideram a deslocabilidade e a rigidez à torção das vigas de bordo e aquelas nas quais as lajes nervuradas são consideradas apoiadas em apoios rígidos, é mostrado, neste item, os valores para deslocamentos e momentos fletores e torçores para estas distintas formas de se considerar a condição de contorno do sistema estrutural.

Ressalta-se que esta avaliação somente é feita para as lajes nervuradas do tipo REDUZCON [21] reais que são analisadas neste trabalho, ou seja, aquelas que podem ser construídas para o vão livre perpendicular às nervuras secundárias de 4,5 m utilizando a forma BRC130. Portanto, lajes com apenas 2 e 3 nervuras secundárias.

A seguir, são apresentados, nas Tabela 4.13 e Tabela 4.14, os resultados das análises das lajes sem a consideração das vigas de apoio. Isto quer dizer que cada faixa da grelha equivalente é simplesmente apoiada nas extremidades em apoios indeslocáveis, onde o apoio está livre para a rotação segundo o eixo perpendicular ao da barra da grelha, porém com a rotação impedida segundo o eixo da mesma.

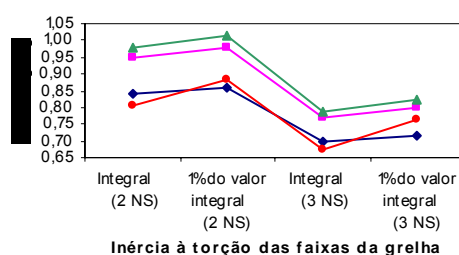
Tabela 4.13 - Resultados das análises das lajes nervuradas quadradas de 17 cm de altura, apoiada em apoios indeslocáveis: momento de inércia à torção integral das faixas da grelha

| NS | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| | | | | | | | | | |
| 3 | 0,68 | 0,56 | 5,07 | 3,31 | 7,18 | 0,51 | 0,46 | 1,54 | 0,00 |
| 2 | 0,81 | 0,66 | 7,80 | 4,06 | 7,80 | 0,52 | 0,48 | 0,93 | - |

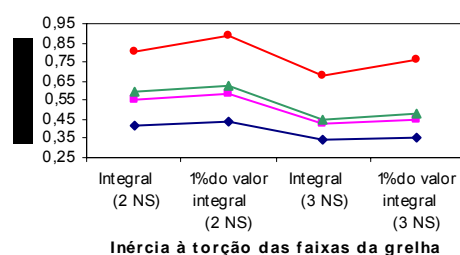
Tabela 4.14 - Resultados das análises das lajes nervuradas quadradas de 17 cm de altura, apoiada em apoios indeslocáveis: 1% do momento de inércia à torção das faixas da grelha

| NS | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| | | | | | | | | | |
| 3 | 0,76 | 0,65 | 5,77 | 3,79 | 8,19 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,00 |
| 2 | 0,89 | 0,71 | 8,65 | 4,38 | 8,65 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | - |

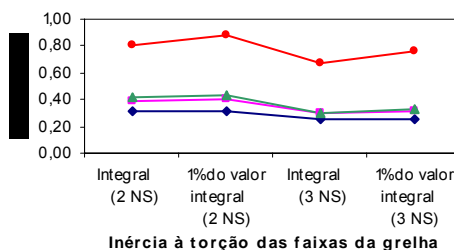
A seguir, as Figura 4.26 a Figura 4.28 apresentam os deslocamentos e os esforços encontrados para os diversos casos analisados.



a) Flechas (VB 15 x 40 cm)



b) Flechas (VB 15 x 70 cm)



c) Flechas (VB 15 x 100 cm)

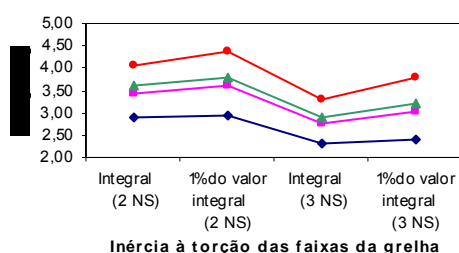
- Inércia à torção das vigas de bordo no estádio I
- ▲— Inércia à torção das vigas de bordo desprezada
- Inércia à torção das vigas de bordo no estádio II
- Sem vigas de bordo (apoios rígidos)

Figura 4.26 – Deslocamentos em função da inércia à torção dos elementos

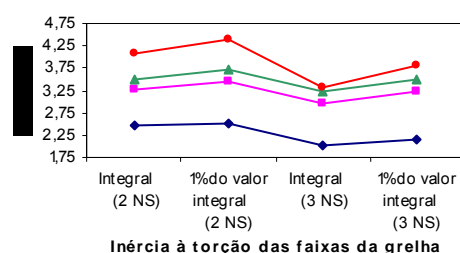
Como pode ser visto na Figura 4.26, as flechas das lajes nervuradas analisadas são muito dependentes da condição de apoio. Quando o estudo é realizado com vigas de bordo de seção transversal de 15 x 40 cm, os deslocamentos obtidos nas lajes são maiores do que aqueles da análise com apoios rígidos, como mostrado na Figura 4.26 (a). Porém, para as outras seções de vigas de bordo, 15 x 70 e 15 x 100 cm, Figura 4.26 (b) e (c), respectivamente, este deslocamento é consideravelmente menor do que o obtido com apoios rígidos, ainda que se despreze o momento de inércia à torção dessas vigas.

Isto se deve ao fato de que com o apoio rígido, as faixas da grelha estão livres para rotacionar neste apoio, ou seja, em torno do eixo perpendicular ao eixo da faixa. Porém, quando se considera a deslocabilidade da viga de apoio da laje, surge um engaste no encontro da faixa da grelha que discretiza a laje nervurada com a que discretiza a viga de bordo, o que faz com que o deslocamento do sistema estrutural seja menor quanto maior a rigidez à flexão e à torção desta viga.

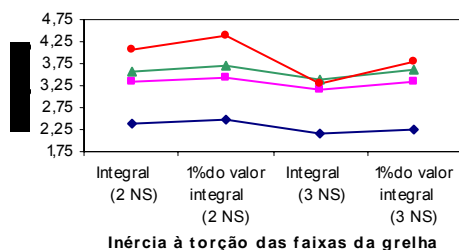
Com relação aos momentos fletores nas nervuras principais, M_x , mostrados na Figura 4.27 (a) a (c), tem-se os maiores valores na análise com apoios rígidos (sem viga de bordo). O comportamento inverso é observado para os momentos fletores nas nervuras secundárias, M_y , ilustrado na Figura 4.27 (d) a (f).



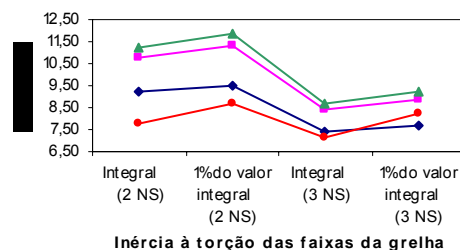
a) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 40 cm)



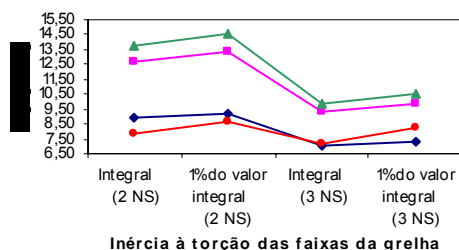
b) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 70 cm)



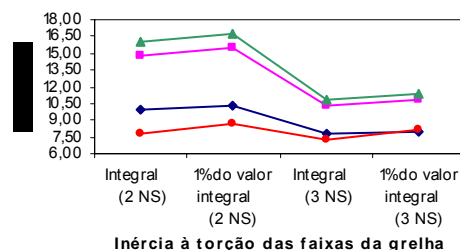
c) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 100 cm)



d) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 40 cm)



e) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 70 cm)



f) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 100 cm)

—●— Inércia à torção das vigas de bordo no estádio I
—▲— Inércia à torção das vigas de bordo desprezada

—■— Inércia à torção das vigas de bordo no estádio II
—●— Sem vigas de bordo (apoios rígidos)

Figura 4.27 – Momentos fletores em função da inércia à torção dos elementos

Na análise com apoios rígidos, a diminuição da rigidez à torção das faixas da grelha através da diminuição de seu momento de inércia à torção faz com que os momentos torçores diminuam e, conseqüentemente, os momentos fletores nas duas direções e a flecha aumentem para que seja mantido o equilíbrio do sistema. Isto não é sentido nas análises com vigas de bordo, pois existe uma interferência da rigidez destas vigas neste comportamento, como pode ser observado nas figuras relativas aos momentos torçores, Figura 4.28.

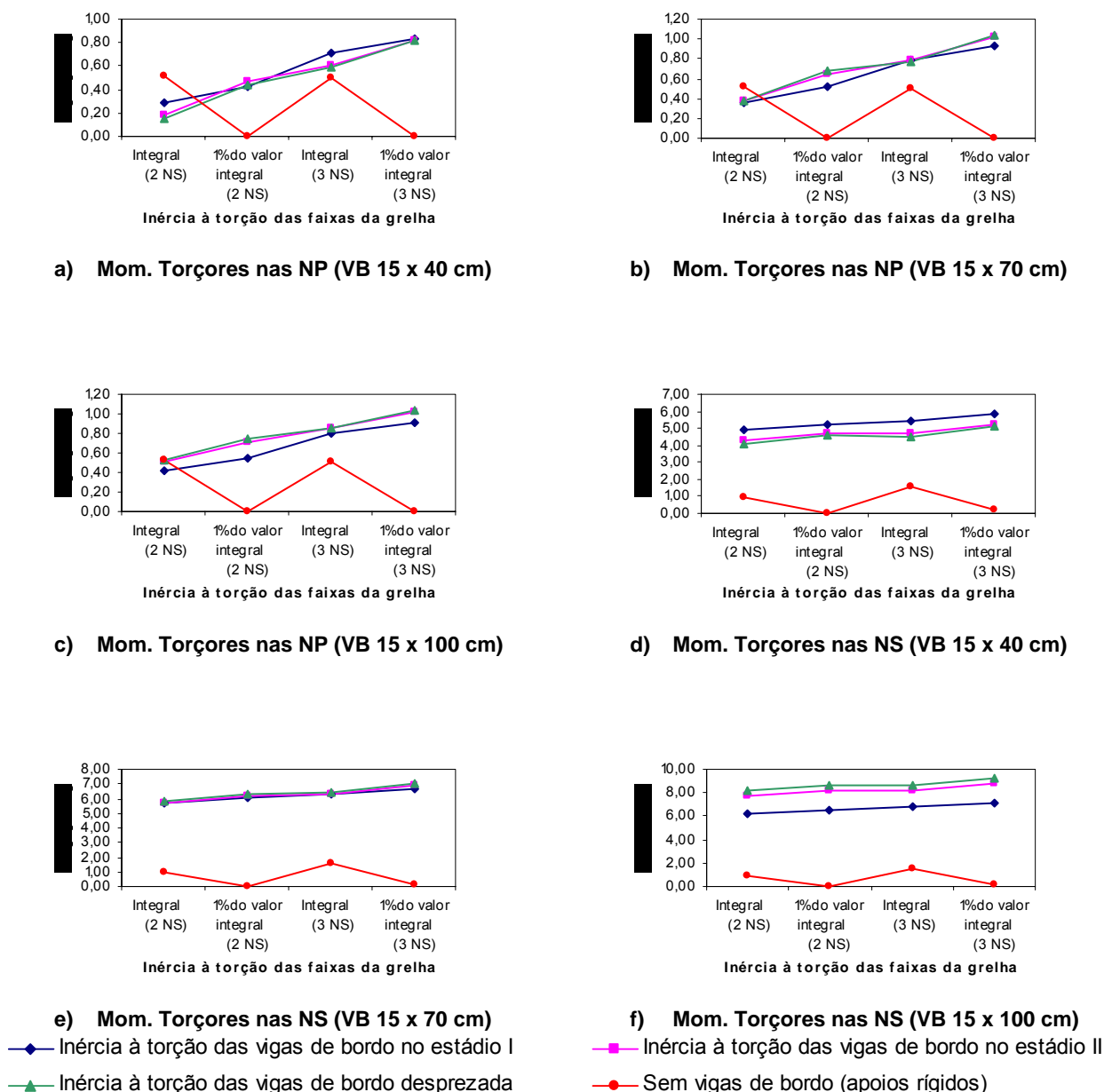


Figura 4.28 – Momentos torçores em função da inércia à torção dos elementos

O comportamento da laje nervurada apoiada em apoios rígidos no que tange aos momentos torçores nas nervuras principais, M_{yx} , e também nas nervuras secundárias, M_{xy} , Figura 4.28, é didaticamente mais elucidativo do que aquele na qual a laje se apóia em vigas de bordo com deslocabilidade. Para a análise com apoios rígidos, a inércia à torção das faixas da grelha é o único parâmetro determinante para o comportamento dos momentos torçores, já que a diminuição deste parâmetro das faixas da grelha faz com que os momentos torçores caiam à praticamente zero quando este parâmetro é desprezado. O mesmo não acontece quando se considera esta mesma grelha apoiada em vigas com deslocabilidade, ou seja, com rigidez à flexão e à torção, já que estas rigidezes interferem nos esforços e deslocamentos do sistema estrutural.

Percebe-se, claramente, para praticamente todas as análises de momentos torçores, que o estudo realizado com a consideração de apoios rígidos fornecem valores inferiores àqueles realizados com vigas de bordo, devido à influência que a rigidez das vigas causam no sistema.

Ressalta-se que, seja qual for a condição de contorno da laje considerada nas análises feitas neste trabalho, os momentos fletores nas nervuras secundárias são muito superiores àqueles das nervuras principais. Isto já é esperado, pois tendo menor número de nervuras, o momento fletor que deve ser resistido pelas secundárias é maior do que aquele resistido pelas principais, sendo que estas estão em maior número e sua redistribuição diminui o valor do momento fletor em cada nervura principal.

4.3.3. Resultados das Análises das Lajes Nervuradas com $L_x/L_y = 1,5$

Neste item são apresentados os resultados das análises feitas com os mesmos parâmetros do Item 4.3.2 (características físicas e geométricas e carregamentos), porém com a relação entre os vãos das lajes, L_x/L_y , igual a 1,5.

A seguir, nas Tabela 4.15 a Tabela 4.20, são apresentados os resultados obtidos para as lajes nervuradas com a relação entre os vãos igual a 1,5.

Tabela 4.15 - Resultados das análises das lajes de 17 cm de altura, com $L_x/L_y = 1,5$: momento de inércia à torção integral das faixas da grelha e o das vigas de bordo no estádio I

| NS | VB (m) | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| 16 | 0,15 x 0,4 | 1,50 | 3,80 | 9,24 | 3,92 | 6,18 | 4,72 | 3,79 | 3,58 | 2,79 |
| 13 | | 1,52 | 3,71 | 10,88 | 3,96 | 7,11 | 4,42 | 3,68 | 4,52 | 3,19 |
| 10 | | 1,56 | 3,74 | 13,48 | 3,93 | 8,36 | 3,99 | 3,45 | 5,69 | 3,53 |
| 7 | | 1,66 | 3,91 | 17,58 | 3,88 | 9,85 | 3,33 | 2,98 | 6,95 | 3,48 |
| 5 | | 1,82 | 4,18 | 20,57 | 3,82 | 11,21 | 2,64 | 2,35 | 7,55 | 2,70 |
| 3 | | 2,12 | 4,47 | 22,10 | 3,83 | 13,40 | 1,66 | 1,48 | 7,74 | 0,00 |
| 2 | | 2,55 | 6,04 | 18,22 | 4,20 | 18,22 | 0,72 | 0,60 | 6,42 | - |
| 16 | | 0,15 x 0,7 | 0,64 | 3,90 | 9,68 | 4,43 | 5,48 | 5,47 | 5,24 | 4,04 |
| 13 | 0,64 | | 3,98 | 11,29 | 4,38 | 6,34 | 5,01 | 4,91 | 5,31 | 4,65 |
| 10 | 0,64 | | 4,12 | 13,77 | 4,22 | 7,42 | 4,38 | 4,41 | 6,97 | 5,19 |
| 7 | 0,67 | | 4,17 | 17,42 | 4,02 | 8,51 | 3,54 | 3,61 | 8,76 | 5,11 |
| 5 | 0,72 | | 4,18 | 19,51 | 3,86 | 9,32 | 2,78 | 2,77 | 9,43 | 3,90 |
| 3 | 0,82 | | 4,19 | 19,51 | 3,76 | 10,34 | 1,76 | 1,70 | 8,93 | 0,00 |
| 2 | 0,99 | | 5,72 | 14,56 | 4,03 | 14,56 | 0,82 | 0,75 | 7,47 | - |
| 16 | 0,15 x 1 | | 0,43 | 4,87 | 10,25 | 4,41 | 5,65 | 4,96 | 5,70 | 3,41 |
| 13 | | 0,43 | 4,90 | 12,00 | 4,36 | 6,55 | 4,58 | 5,30 | 4,79 | 5,50 |
| 10 | | 0,44 | 4,92 | 14,67 | 4,21 | 7,67 | 4,07 | 4,71 | 6,77 | 6,33 |
| 7 | | 0,45 | 4,66 | 18,52 | 4,00 | 8,81 | 3,36 | 3,82 | 9,15 | 6,36 |
| 5 | | 0,48 | 4,39 | 21,25 | 3,82 | 9,86 | 2,73 | 2,99 | 10,54 | 5,01 |
| 3 | | 0,54 | 3,95 | 21,12 | 3,68 | 11,09 | 1,81 | 1,89 | 9,82 | 0,00 |
| 2 | | 0,66 | 5,39 | 16,39 | 3,89 | 16,39 | 0,93 | 0,94 | 8,35 | - |

Tabela 4.16 - Resultados das análises das lajes de 17 cm de altura, $L_x/L_y = 1,5$: 1% do momento de inércia à torção das faixas da grelha e o das vigas de bordo no estádio I

| NS | VB (m) | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| 16 | 0,15 x 0,4 | 1,51 | 3,66 | 9,22 | 4,06 | 6,26 | 4,79 | 3,87 | 3,72 | 2,94 |
| 13 | | 1,53 | 3,60 | 10,87 | 4,09 | 7,19 | 4,49 | 3,77 | 4,68 | 3,35 |
| 10 | | 1,57 | 3,63 | 13,48 | 4,06 | 8,44 | 4,07 | 3,55 | 5,88 | 3,70 |
| 7 | | 1,68 | 3,78 | 17,62 | 4,00 | 9,95 | 3,43 | 3,09 | 7,18 | 3,65 |
| 5 | | 1,84 | 4,05 | 20,64 | 3,94 | 11,31 | 2,75 | 2,50 | 7,83 | 2,84 |
| 3 | | 2,14 | 4,32 | 22,21 | 3,96 | 13,52 | 1,79 | 1,62 | 8,13 | 0,00 |
| 2 | | 2,57 | 5,89 | 18,36 | 4,32 | 18,36 | 0,88 | 0,77 | 6,72 | - |
| 16 | | 0,15 x 0,7 | 0,67 | 3,83 | 9,69 | 4,64 | 5,61 | 5,55 | 5,39 | 4,24 |
| 13 | 0,67 | | 3,89 | 11,33 | 4,58 | 6,48 | 5,10 | 5,07 | 5,52 | 4,91 |
| 10 | 0,67 | | 4,00 | 13,86 | 4,41 | 7,57 | 4,49 | 4,57 | 7,21 | 5,44 |
| 7 | 0,70 | | 4,04 | 17,58 | 4,21 | 8,68 | 3,68 | 3,78 | 9,02 | 5,33 |
| 5 | 0,75 | | 4,04 | 19,74 | 4,04 | 9,50 | 2,94 | 2,96 | 9,74 | 4,06 |
| 3 | 0,85 | | 4,08 | 19,80 | 3,94 | 10,55 | 1,95 | 1,91 | 9,30 | 0,00 |
| 2 | 1,01 | | 5,57 | 14,82 | 4,20 | 14,82 | 1,02 | 0,98 | 7,75 | - |
| 16 | 0,15 x 1 | | 0,46 | 4,86 | 10,32 | 4,61 | 5,80 | 5,00 | 5,85 | 3,52 |
| 13 | | 0,46 | 4,87 | 12,12 | 4,55 | 6,71 | 4,65 | 5,45 | 4,92 | 5,73 |
| 10 | | 0,46 | 4,84 | 14,85 | 4,40 | 7,84 | 4,17 | 4,87 | 6,92 | 6,56 |
| 7 | | 0,47 | 4,57 | 18,80 | 4,18 | 9,00 | 3,49 | 4,00 | 9,35 | 6,57 |
| 5 | | 0,50 | 4,31 | 21,62 | 3,99 | 10,07 | 2,88 | 3,18 | 10,81 | 5,16 |
| 3 | | 0,56 | 3,91 | 21,55 | 3,85 | 11,31 | 1,98 | 2,10 | 10,17 | 0,00 |
| 2 | | 0,68 | 5,35 | 16,72 | 4,06 | 16,72 | 1,12 | 1,15 | 8,66 | - |

Tabela 4.17 - Resultados das análises das lajes de 17 cm de altura, com $L_x/L_y = 1,5$: momento de inércia à torção integral das faixas da grelha e o das vigas de bordo no estádio II

| NS | VB (m) | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| 16 | 0,15 x 0,4 | 1,54 | 3,65 | 9,24 | 4,16 | 6,29 | 4,47 | 3,73 | 3,29 | 2,64 |
| 13 | | 1,56 | 3,57 | 10,90 | 4,21 | 7,24 | 4,16 | 3,61 | 4,17 | 3,03 |
| 10 | | 1,60 | 3,56 | 13,53 | 4,20 | 8,52 | 3,74 | 3,37 | 5,30 | 3,38 |
| 7 | | 1,71 | 3,63 | 17,70 | 4,17 | 10,08 | 3,14 | 2,91 | 6,51 | 3,34 |
| 5 | | 1,88 | 3,80 | 20,79 | 4,14 | 11,52 | 2,50 | 2,32 | 7,04 | 2,55 |
| 3 | | 2,19 | 3,94 | 22,54 | 4,23 | 13,88 | 1,56 | 1,44 | 6,84 | 0,00 |
| 2 | | 2,65 | 5,23 | 18,89 | 4,72 | 18,89 | 0,62 | 0,56 | 5,56 | - |
| 16 | | 0,15 x 0,7 | 0,75 | 4,42 | 9,89 | 4,98 | 5,97 | 4,48 | 5,25 | 3,13 |
| 13 | 0,75 | | 4,43 | 11,69 | 4,95 | 6,94 | 4,11 | 4,90 | 4,47 | 4,78 |
| 10 | 0,75 | | 4,39 | 14,50 | 4,81 | 8,18 | 3,64 | 4,38 | 6,37 | 5,55 |
| 7 | 0,78 | | 4,01 | 18,74 | 4,63 | 9,60 | 3,07 | 3,60 | 8,57 | 5,66 |
| 5 | 0,84 | | 3,60 | 21,53 | 4,51 | 10,82 | 2,54 | 2,84 | 9,49 | 4,39 |
| 3 | 0,96 | | 3,06 | 22,59 | 4,54 | 12,71 | 1,71 | 1,84 | 8,50 | 0,00 |
| 2 | 1,18 | | 4,30 | 18,18 | 4,99 | 18,18 | 0,81 | 0,86 | 6,96 | - |
| 16 | 0,15 x 1 | | 0,52 | 6,33 | 11,09 | 5,00 | 6,52 | 3,54 | 5,87 | 2,39 |
| 13 | | 0,52 | 6,18 | 13,29 | 4,99 | 7,60 | 3,35 | 5,43 | 4,02 | 6,25 |
| 10 | | 0,53 | 5,81 | 16,68 | 4,89 | 8,98 | 3,13 | 4,83 | 6,55 | 7,48 |
| 7 | | 0,54 | 4,85 | 21,76 | 4,75 | 10,58 | 2,84 | 3,99 | 9,81 | 7,73 |
| 5 | | 0,57 | 4,02 | 25,81 | 4,62 | 12,22 | 2,55 | 3,26 | 11,85 | 6,21 |
| 3 | | 0,66 | 2,88 | 27,23 | 4,61 | 14,86 | 1,88 | 2,23 | 11,20 | 0,00 |
| 2 | | 0,83 | 4,17 | 23,26 | 5,01 | 23,26 | 1,05 | 1,22 | 9,77 | - |

Tabela 4.18 - Resultados das análises das lajes de 17 cm de altura, com $L_x/L_y = 1,5$: 1% do momento de inércia à torção das faixas da grelha e o das vigas de bordo no estádio II

| NS | VB (m) | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| 16 | 0,15 x 0,4 | 1,57 | 3,49 | 9,21 | 4,39 | 6,40 | 4,52 | 3,85 | 3,48 | 2,88 |
| 13 | | 1,59 | 3,40 | 10,89 | 4,44 | 7,36 | 4,23 | 3,74 | 4,39 | 3,29 |
| 10 | | 1,63 | 3,37 | 13,55 | 4,42 | 8,65 | 3,84 | 3,51 | 5,55 | 3,66 |
| 7 | | 1,74 | 3,42 | 17,77 | 4,38 | 10,23 | 3,27 | 3,06 | 6,84 | 3,62 |
| 5 | | 1,90 | 3,57 | 20,90 | 4,34 | 11,68 | 2,66 | 2,49 | 7,44 | 2,79 |
| 3 | | 2,22 | 3,64 | 22,73 | 4,45 | 14,08 | 1,77 | 1,65 | 7,38 | 0,00 |
| 2 | | 2,67 | 4,96 | 19,12 | 4,93 | 19,12 | 0,88 | 0,81 | 5,93 | - |
| 16 | | 0,15 x 0,7 | 0,80 | 4,39 | 9,95 | 5,33 | 6,20 | 4,48 | 5,47 | 3,38 |
| 13 | 0,80 | | 4,37 | 11,81 | 5,27 | 7,18 | 4,16 | 5,12 | 4,77 | 5,25 |
| 10 | 0,80 | | 4,27 | 14,71 | 5,12 | 8,45 | 3,75 | 4,62 | 6,74 | 6,01 |
| 7 | 0,82 | | 3,82 | 19,09 | 4,93 | 9,90 | 3,24 | 3,85 | 9,02 | 6,07 |
| 5 | 0,88 | | 3,37 | 22,01 | 4,80 | 11,17 | 2,76 | 3,11 | 10,02 | 4,70 |
| 3 | 1,00 | | 2,79 | 23,19 | 4,83 | 13,14 | 1,99 | 2,15 | 9,11 | 0,00 |
| 2 | 1,22 | | 4,01 | 18,72 | 5,27 | 18,72 | 1,13 | 1,19 | 7,39 | - |
| 16 | 0,15 x 1 | | 0,56 | 6,47 | 11,28 | 5,30 | 6,79 | 3,47 | 6,09 | 2,51 |
| 13 | | 0,56 | 6,24 | 13,57 | 5,28 | 7,88 | 3,35 | 5,65 | 4,20 | 6,68 |
| 10 | | 0,56 | 5,78 | 17,08 | 5,18 | 9,26 | 3,20 | 5,06 | 6,81 | 7,91 |
| 7 | | 0,58 | 4,74 | 22,36 | 5,03 | 10,94 | 2,99 | 4,24 | 10,17 | 8,11 |
| 5 | | 0,60 | 3,88 | 26,58 | 4,89 | 12,61 | 2,76 | 3,52 | 12,30 | 6,49 |
| 3 | | 0,70 | 2,74 | 28,12 | 4,89 | 15,33 | 2,13 | 2,52 | 11,75 | 0,00 |
| 2 | | 0,86 | 4,01 | 23,98 | 5,28 | 23,98 | 1,33 | 1,53 | 10,23 | - |

Tabela 4.19 - Resultados das análises das lajes de 17 cm de altura, com $L_x/L_y = 1,5$: momento de inércia à torção integral das faixas da grelha e desprezando o das vigas de bordo

| NS | VB (m) | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| 16 | 0,15 x 0,4 | 1,54 | 3,62 | 9,23 | 4,20 | 6,31 | 4,42 | 3,72 | 3,24 | 2,61 |
| 13 | | 1,57 | 3,54 | 10,90 | 4,27 | 7,26 | 4,11 | 3,60 | 4,10 | 3,00 |
| 10 | | 1,61 | 3,52 | 13,54 | 4,25 | 8,55 | 3,69 | 3,36 | 5,21 | 3,35 |
| 7 | | 1,72 | 3,57 | 17,72 | 4,23 | 10,12 | 3,10 | 2,89 | 6,42 | 3,31 |
| 5 | | 1,89 | 3,71 | 20,82 | 4,20 | 11,57 | 2,47 | 2,31 | 6,93 | 2,52 |
| 3 | | 2,21 | 3,81 | 22,61 | 4,32 | 13,96 | 1,54 | 1,43 | 6,65 | 0,00 |
| 2 | | 2,67 | 5,03 | 18,99 | 4,84 | 18,99 | 0,60 | 0,55 | 5,38 | - |
| 16 | | 0,15 x 0,7 | 0,77 | 4,53 | 9,92 | 5,09 | 6,07 | 4,27 | 5,24 | 2,93 |
| 13 | 0,77 | | 4,53 | 11,76 | 5,06 | 7,06 | 3,91 | 4,89 | 4,28 | 4,81 |
| 10 | 0,78 | | 4,45 | 14,63 | 4,92 | 8,34 | 3,48 | 4,37 | 6,24 | 5,61 |
| 7 | 0,80 | | 3,98 | 19,00 | 4,75 | 9,82 | 2,96 | 3,60 | 8,54 | 5,75 |
| 5 | 0,86 | | 3,47 | 21,94 | 4,64 | 11,13 | 2,48 | 2,86 | 9,54 | 4,48 |
| 3 | 0,99 | | 2,80 | 23,22 | 4,70 | 13,23 | 1,70 | 1,87 | 8,45 | 0,00 |
| 2 | 1,22 | | 3,95 | 18,97 | 5,19 | 18,97 | 0,80 | 0,88 | 6,88 | - |
| 16 | 0,15 x 1 | | 0,54 | 6,65 | 11,26 | 5,12 | 6,70 | 3,23 | 5,89 | 2,19 |
| 13 | | 0,54 | 6,45 | 13,55 | 5,12 | 7,81 | 3,07 | 5,45 | 3,88 | 6,40 |
| 10 | | 0,54 | 5,99 | 17,08 | 5,03 | 9,25 | 2,91 | 4,84 | 6,53 | 7,70 |
| 7 | | 0,56 | 4,89 | 22,42 | 4,90 | 10,93 | 2,71 | 4,01 | 9,99 | 7,99 |
| 5 | | 0,59 | 3,94 | 26,75 | 4,78 | 12,68 | 2,50 | 3,30 | 12,17 | 6,44 |
| 3 | | 0,69 | 2,65 | 28,53 | 4,81 | 15,64 | 1,88 | 2,29 | 11,58 | 0,00 |
| 2 | | 0,87 | 3,88 | 24,82 | 5,26 | 24,82 | 1,07 | 1,28 | 10,19 | - |

Tabela 4.20 - Resultados das análises das lajes de 17 cm de altura, com $L_x/L_y = 1,5$: 1% do momento de inércia à torção das faixas da grelha e desprezando o das vigas de bordo

| NS | VB (m) | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| 16 | 0,15 x 0,4 | 1,58 | 3,45 | 9,21 | 4,54 | 6,42 | 4,46 | 3,85 | 3,43 | 2,86 |
| 13 | | 1,60 | 3,35 | 10,89 | 4,51 | 7,39 | 4,18 | 3,73 | 4,33 | 3,28 |
| 10 | | 1,65 | 3,32 | 13,56 | 4,50 | 8,68 | 3,79 | 3,50 | 5,48 | 3,64 |
| 7 | | 1,75 | 3,34 | 17,79 | 4,46 | 10,28 | 3,23 | 3,06 | 6,77 | 3,61 |
| 5 | | 1,92 | 3,46 | 20,94 | 4,43 | 11,75 | 2,64 | 2,50 | 7,37 | 2,77 |
| 3 | | 2,24 | 3,47 | 22,82 | 4,56 | 14,17 | 1,76 | 1,66 | 7,22 | 0,00 |
| 2 | | 2,70 | 4,73 | 19,23 | 5,06 | 19,23 | 0,88 | 0,82 | 5,77 | - |
| 16 | | 0,15 x 0,7 | 0,83 | 4,52 | 9,99 | 5,48 | 6,33 | 4,24 | 5,48 | 3,18 |
| 13 | 0,83 | | 4,48 | 11,90 | 5,42 | 7,33 | 3,95 | 5,13 | 4,60 | 5,31 |
| 10 | 0,83 | | 4,33 | 14,86 | 5,26 | 8,64 | 3,58 | 4,62 | 6,64 | 6,12 |
| 7 | 0,85 | | 3,78 | 19,39 | 5,08 | 10,16 | 3,13 | 3,87 | 9,05 | 6,22 |
| 5 | 0,91 | | 3,22 | 22,48 | 4,96 | 11,51 | 2,72 | 3,15 | 10,12 | 4,83 |
| 3 | 1,04 | | 2,48 | 23,91 | 5,02 | 13,71 | 2,00 | 2,20 | 9,13 | 0,00 |
| 2 | 1,27 | | 3,62 | 19,58 | 5,49 | 19,58 | 1,16 | 1,25 | 7,36 | - |
| 16 | 0,15 x 1 | | 0,59 | 6,82 | 11,48 | 5,44 | 6,99 | 3,13 | 6,12 | 2,30 |
| 13 | | 0,58 | 6,54 | 13,87 | 5,42 | 8,12 | 3,05 | 5,68 | 4,06 | 6,87 |
| 10 | | 0,58 | 5,98 | 17,54 | 5,34 | 9,59 | 2,97 | 5,08 | 6,81 | 8,19 |
| 7 | | 0,60 | 4,77 | 23,10 | 5,21 | 11,33 | 2,86 | 4,27 | 10,39 | 8,41 |
| 5 | | 0,63 | 3,79 | 27,62 | 5,08 | 13,12 | 2,71 | 3,58 | 12,66 | 6,75 |
| 3 | | 0,72 | 2,47 | 29,53 | 5,11 | 16,18 | 2,14 | 2,60 | 12,18 | 0,00 |
| 2 | | 0,90 | 3,69 | 25,64 | 5,55 | 25,64 | 1,36 | 1,61 | 10,70 | - |

4.3.3.1. Influência do Momento de Inércia à Torção das Faixas da Grelha

Faz-se neste item, assim como é feito no Item 4.3.2.1, uma comparação entre os resultados obtidos considerando a inércia à torção das faixas da grelha integral e apenas 1% desta, considerando sempre a inércia à torção das vigas de bordo nula. Porém, as lajes aqui consideradas são retangulares com a relação entre os vãos, L_x/L_y , igual a 1,5.

Na seqüência do texto, tem-se, nas Figura 4.29 a Figura 4.31, apresentados os gráficos de deslocamentos e esforços obtidos para estas lajes nervuradas.

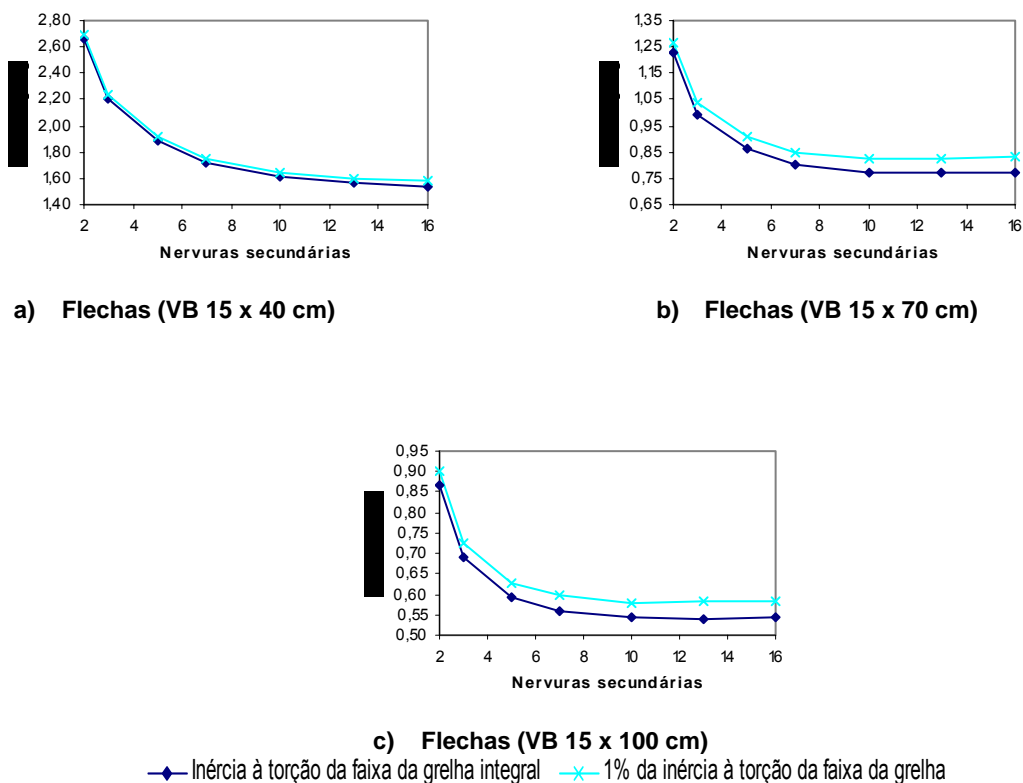
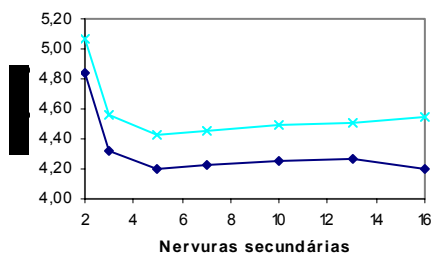


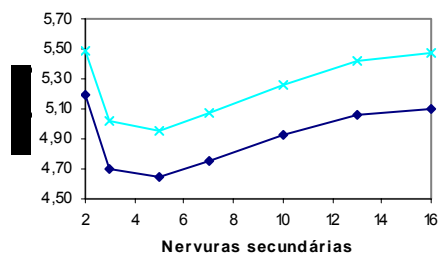
Figura 4.29 – Deslocamentos em função da inércia à torção das faixas da grelha

Como ilustrado na Figura 4.29 (a), o decréscimo do momento de inércia à torção das faixas da grelha acarreta o aumento do deslocamento da laje nervurada, como também aconteceu para as lajes quadradas. No entanto, é quase imperceptível este aumento para as lajes apoiadas em vigas de 15 x 40 cm. Já para aquelas apoiadas em vigas de 15 x 70 e 15 x 100 cm, Figura 4.29 (b) e (c), respectivamente, a diferença entre esses deslocamentos devidos à diminuição da inércia à torção das faixas da grelha é mais acentuada.

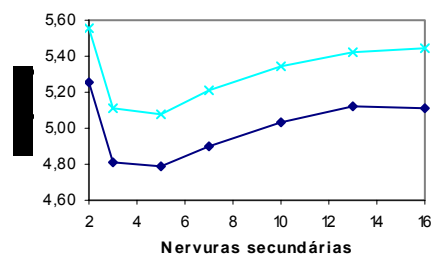
Assim como acontece para as lajes quadradas, o deslocamento das lajes retangulares diminui com o aumento da rigidez à flexão da viga de bordo, através do aumento da altura da seção transversal desta e, com a diminuição do número de nervuras secundárias, tem-se seu deslocamento aumentado.



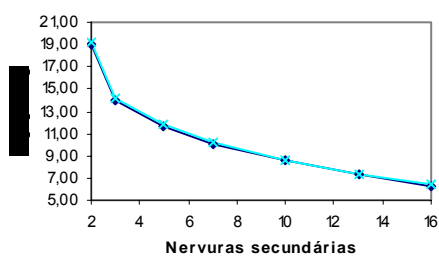
a) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 40 cm)



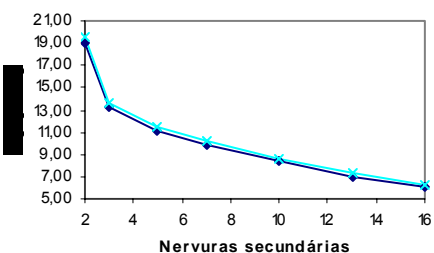
b) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 70 cm)



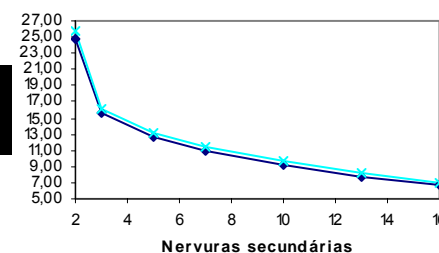
c) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 100 cm)



d) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 40 cm)



e) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 70 cm)



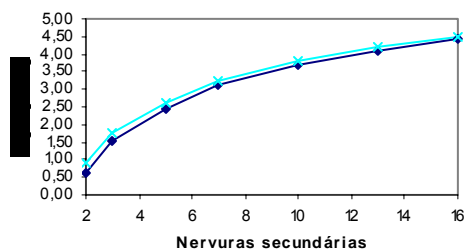
f) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 100 cm)

—●— Inércia à torção da faixa da grelha integral —x— 1% da inércia à torção da faixa da grelha

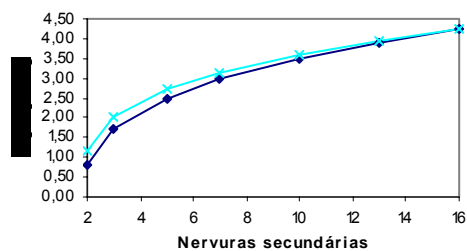
Figura 4.30 – Momentos fletores em função da inércia à torção das faixas da grelha

Observa-se que com a diminuição da inércia à torção das faixas da grelha, obteve-se um aumento no valor dos momentos fletores nas nervuras principais, M_x , e secundárias, M_y , das lajes nervuradas, Figura 4.30.

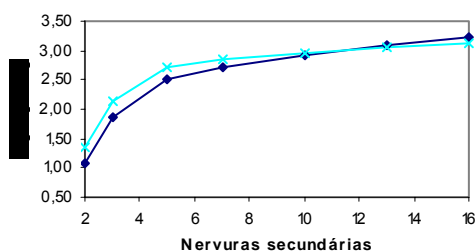
Para os momentos fletores nas nervuras secundárias, Figura 4.30 (d) a (f), não há influência significativa do momento de inércia à torção das faixas da grelha que representam a laje nervurada, já que praticamente são obtidos os mesmos valores quando se considera ou não o seu valor na análise.



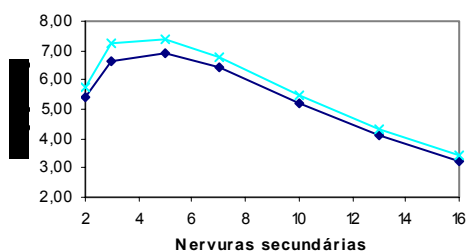
a) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 40 cm)



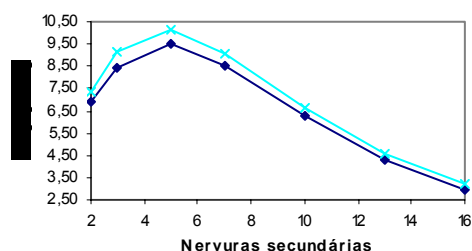
b) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 70 cm)



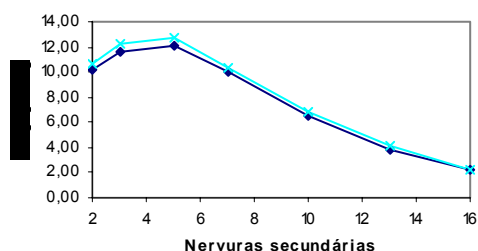
c) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 100 cm)



d) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 40 cm)



e) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 70 cm)



f) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 100 cm)

—●— Inércia à torção da faixa da grelha integral —x— 1% da inércia à torção da faixa da grelha

Figura 4.31 – Momentos torçores em função da inércia à torção das faixas da grelha

Assim como acontece para as lajes quadradas, para as retangulares com a relação entre os comprimentos dos lados igual a 1,5 também ocorre a grande influência das vigas de bordo, que faz com que os momentos torçores nas nervuras principais e secundárias não se reduzam à valores insignificantes quando a inércia à torção das faixas da grelha é praticamente desprezada (1% do valor total), Figura 4.31. Mesmo não se considerando a inércia à torção das vigas do contorno das lajes, a inércia à flexão destas é muito maior do que a das faixas da grelha e esta influência é determinante no comportamento à torção da laje. Porém, para os momentos torçores nas nervuras principais, M_{yx} , Figura 4.31 (a) a (c), percebe-se que esta influência da viga de bordo não é mais observada à medida que se aumenta a altura da viga de bordo, ou seja, a sua rigidez, e, simultaneamente, o número de

nervuras secundárias do sistema estrutural. Tem-se, desta forma, a laje comportando da maneira esperada, onde o decréscimo do momento de inércia à torção das faixas da grelha proporciona uma aproximação entre os valores das duas análises, Figura 4.31 (a) e (b), e um decréscimo no valor de momento torçor na análise com 1% da inércia à torção, Figura 4.31 (c).

4.3.3.2. Influência do Momento de Inércia à Torção das Vigas de Bordo

Neste item, é feita uma comparação entre as análises das lajes nervuradas retangulares com relação entre os vãos igual a 1,5, considerando a inércia à torção das vigas do bordo das lajes no estágio I (não fissurado), no estágio II (fissurado) e considerando nula o seu valor, mantendo-se o momento de inércia à torção das faixas da grelha integral. Na sequência do texto, as Figura 4.32 a Figura 4.34 apresentam todas comparações e análises pertinentes a esta situação específica.

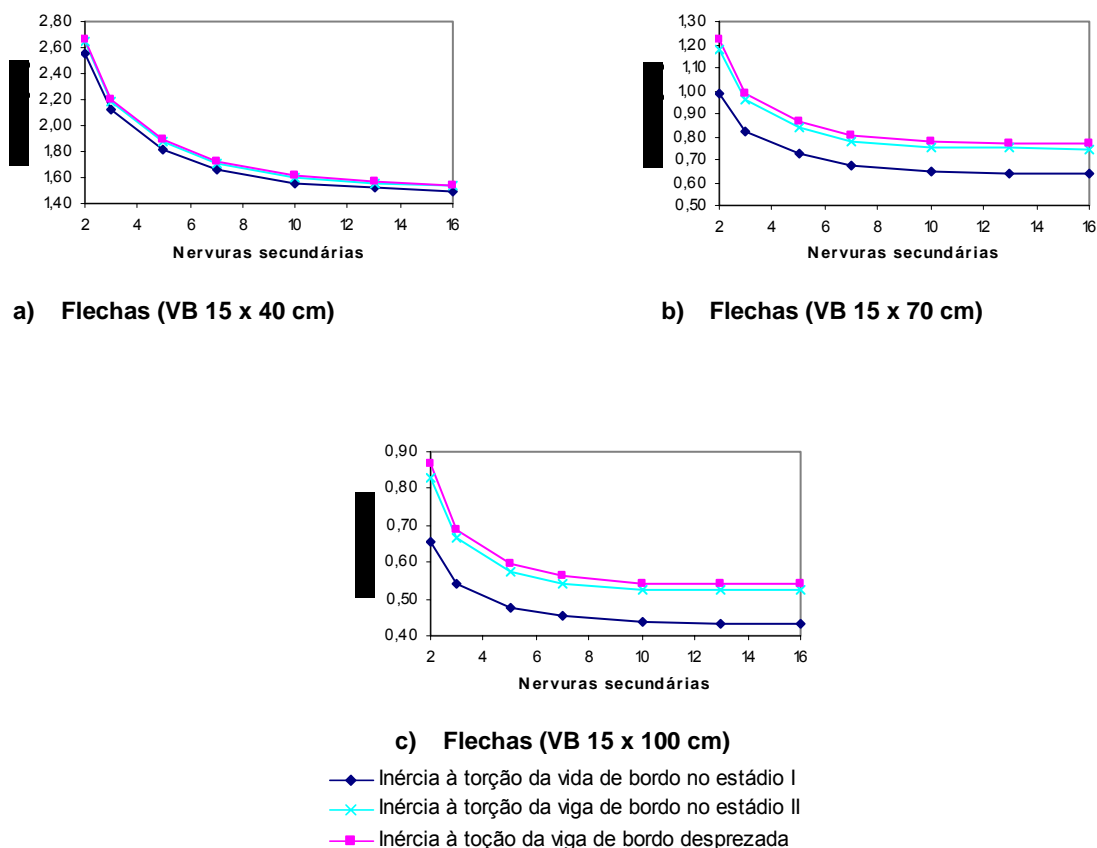
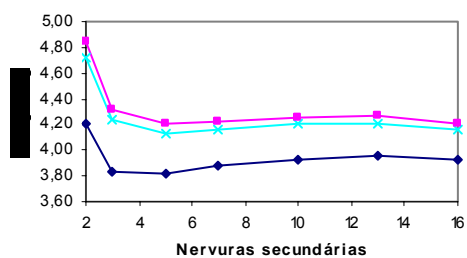


Figura 4.32 – Deslocamentos em função da inércia à torção das vigas de bordo

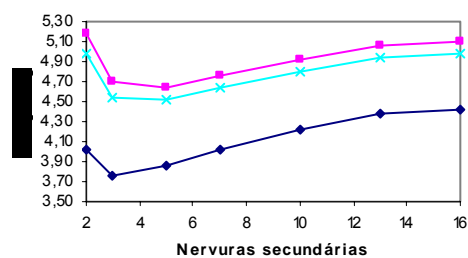
Como é ilustrado na Figura 4.32 (a), a diferença entre a análise com viga de bordo de seção transversal de 15 x 40 cm considerando a inércia à torção da viga de bordo no estágio

II e aquela na qual este parâmetro é desconsiderado é insignificante. Mesmo para a análise feita com a consideração da inércia total à torção, não se verifica grande diferença desta para as demais considerações de inércia à torção. Para as outras seções de viga, Figura 4.32 (b) e (c), tem-se um pequeno aumento nesta diferença.

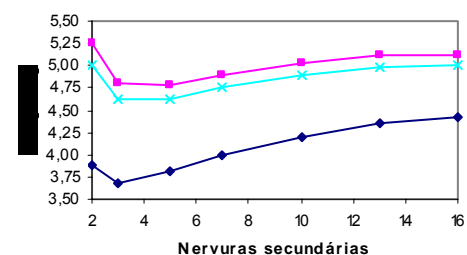
Assim como para as lajes anteriormente estudadas (as quadradas), as flechas das lajes nervuradas aumentam com a diminuição da inércia à torção das vigas de bordo e diminuem com o aumento da altura da viga de apoio ou o número de nervuras secundárias.



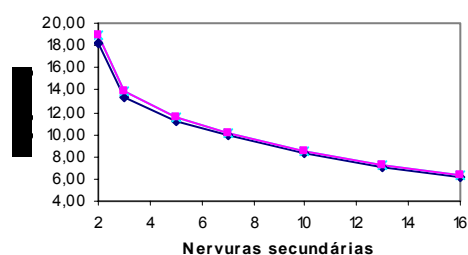
a) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 40 cm)



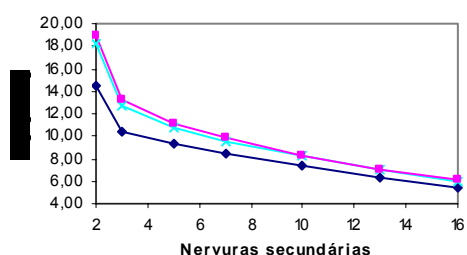
b) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 70 cm)



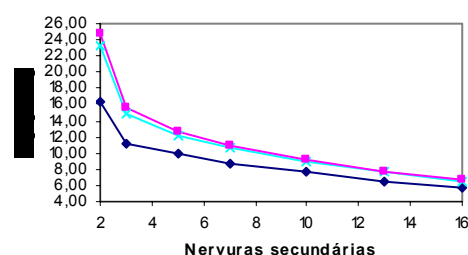
c) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 100 cm)



d) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 40 cm)



e) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 70 cm)

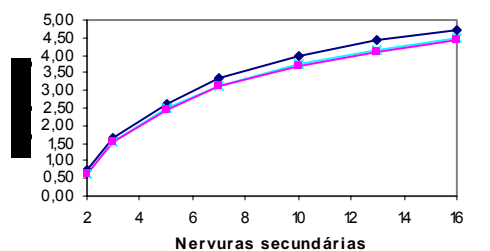


f) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 100 cm)

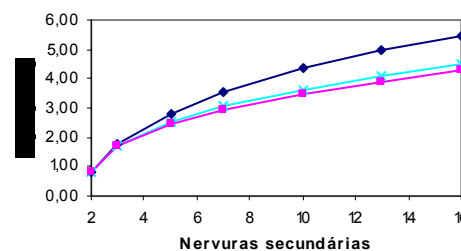
- ◆ Inércia à torção da viga de bordo no estágio I
- ✕ Inércia à torção da viga de bordo no estágio II
- Inércia à torção da viga de bordo desprezada

Figura 4.33 – Momentos fletores em função da inércia à torção das vigas de bordo

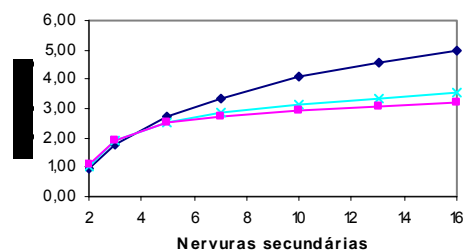
Também para os momentos fletores não há grande diferença nos resultados apresentados quando se utiliza o momento de inércia à torção das vigas de bordo no estádio II ou nulo. Como pode ser visto na Figura 4.33 (d), para as vigas de bordo de 15 x 40 cm, os momentos fletores na nervura secundária, M_y , não se distinguem quando se varia a inércia à torção das vigas de bordo. Para as outras vigas de bordo, Figura 4.33 (e) e (f), essa diferença aumenta, porém de forma bem inexpressiva.



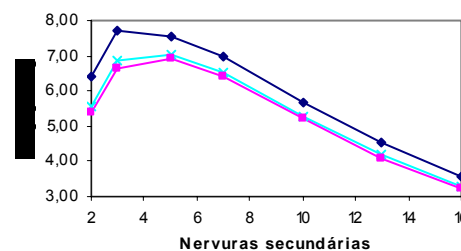
a) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 40 cm)



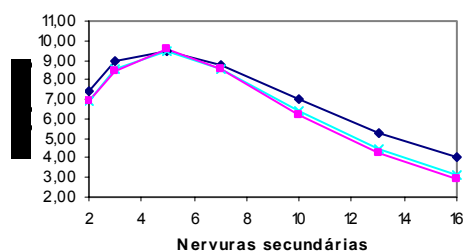
b) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 70 cm)



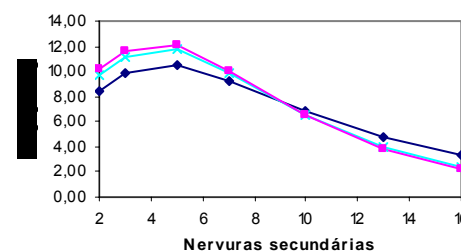
c) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 100 cm)



d) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 40 cm)



e) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 70 cm)



f) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 100 cm)

- Inércia à torção da viga de bordo no estádio I
- x— Inércia à torção da viga de bordo no estádio II
- Inércia à torção da viga de bordo desprezada

Figura 4.34 – Momentos torçores em função da inércia à torção das vigas de bordo

Os momentos torçores têm-se seu comportamento similar àquele das lajes nervuradas quadradas, onde os valores máximos são para a análise com a viga de contorno

da laje no estádio I, com relação à inércia à torção. Obtêm-se valores intermediários quando se considera as vigas no estádio II e os valores mínimos são para a análise com inércia à torção nula, embora haja pontos onde os valores de momento torçor praticamente se igualem para os três casos ou se invertam, como acontece por exemplo, na Figura 4.34 (b) e (f), respectivamente.

4.3.3.3. Comparação entre os Modelos Computacionais Desenvolvidos com e sem Vigas de Bordo para as Lajes Retangulares ($L_x/L_y = 1,5$)

São apresentados, nas Tabela 4.21 e Tabela 4.22, os resultados das análises sem a consideração das vigas de apoio para as lajes nervuradas do tipo REDUZCON [21] com 2 e 3 nervuras secundárias.

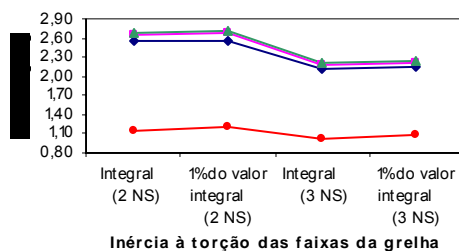
A seguir, apresentam-se na Figura 4.35, Figura 4.37 e Figura 4.38, os gráficos comparativos com estes resultados de lajes com apoios indeslocáveis e aqueles obtidos com a consideração da deslocabilidade das vigas de apoio, para as diversas condições de rigidezes consideradas no estudo.

Tabela 4.21 - Resultados das análises das lajes nervuradas de 17 cm de altura, com $L_x/L_y = 1,5$, apoiada em apoios indeslocáveis: momento de inércia à torção integral das faixas da grelha

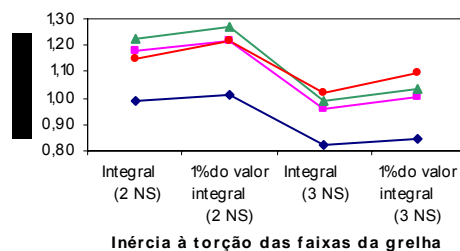
| NS | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| | | | | | | | | | |
| 3 | 1,02 | 0,85 | 3,67 | 4,99 | 5,01 | 0,55 | 0,51 | 1,68 | 0,00 |
| 2 | 1,15 | 0,96 | 5,60 | 5,60 | 5,60 | 0,54 | 0,50 | 0,99 | - |

Tabela 4.22 - Resultado das análises das lajes nervuradas de 17 cm de altura, com $L_x/L_y = 1,5$, apoiada em apoios indeslocáveis: 1% do momento de inércia à torção das faixas da grelha

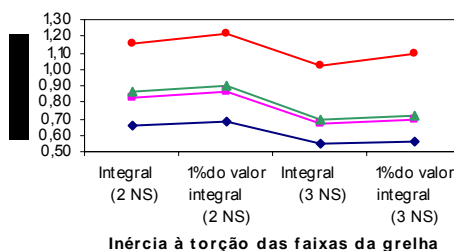
| NS | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| | | | | | | | | | |
| 3 | 1,10 | 0,92 | 3,75 | 5,42 | 5,20 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,00 |
| 2 | 1,22 | 0,97 | 5,62 | 5,90 | 5,62 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | - |



a) Flechas (VB 15 x 40 cm)



b) Flechas (VB 15 x 70 cm)



c) Flechas (VB 15 x 100 cm)

- ◆ Inércia à torção das vigas de bordo no estádio I
- ◆ Inércia à torção das vigas de bordo no estádio II
- ▲ Inércia à torção das vigas de bordo desprezada
- Sem vigas de bordo (apoios rígidos)

Figura 4.35 – Deslocamentos em função da inércia à torção dos elementos

É possível observar, nas figuras que apresentam o comportamento das flechas para as distintas maneiras de se considerar o apoio da laje, Figura 4.35, a transição dos valores para os deslocamentos da análise com apoios rígidos quando comparada àquela na qual se considera a deslocabilidade das vigas de bordo. Para a viga de 15 x 40cm, Figura 4.35 (a), a sua rigidez à flexão e à torção é muito baixa, permitindo um deslocamento do sistema estrutural muito maior do que aquele apresentado pelos apoios rígidos. Estes apoios rígidos permitem uma rotação da faixa da grelha perpendicular ao seu eixo, porém tem-se impedido totalmente o deslocamento vertical, como na Figura 4.36, justificando, desta maneira, o deslocamento maior do que para as vigas de maior rigidez, 15 x 70 e 15 x 100 cm.

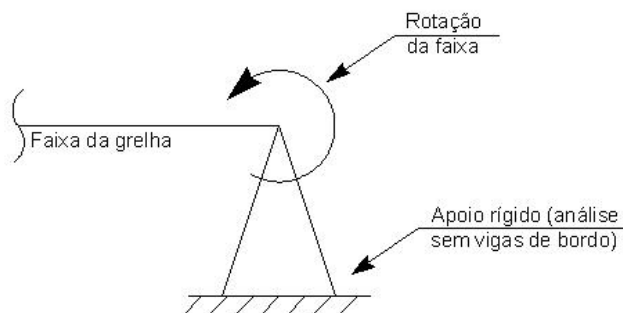
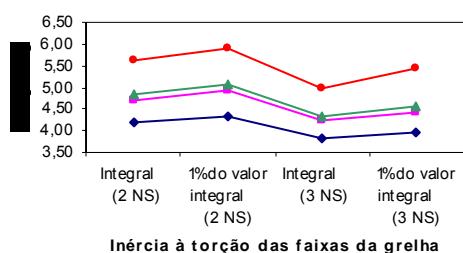


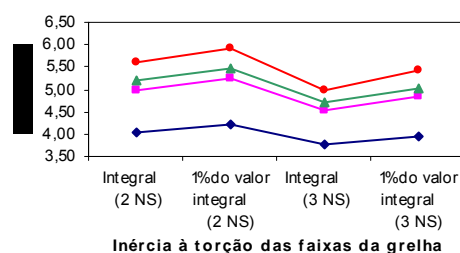
Figura 4.36 – Deslocamento da faixa da grelha com a consideração de apoios rígidos

Com relação aos momentos fletores, é observado um comportamento semelhante ao das lajes quadradas, onde os momentos fletores nas nervuras principais, M_x , são maiores para a análise com apoios rígidos, Figura 4.37 (a) a (c), e menores para estes esforços nas nervuras secundárias, M_y , como apresentado na Figura 4.37 (d) a (f).

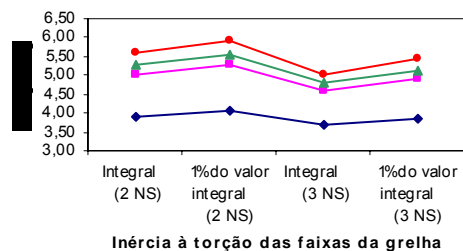
Os momentos fletores nas nervuras principais apresentaram os maiores valores quando a laje é analisada apoiada em apoios rígidos. Provavelmente, isto se deve ao fato da viga de bordo absorver uma parte dos momentos que, quando consideram-se apoios rígidos, são resistidos apenas pela laje.



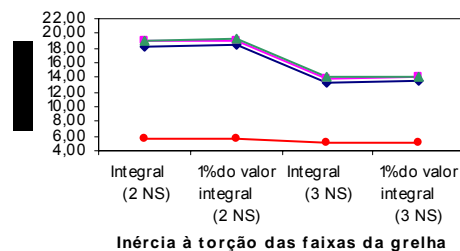
a) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 40 cm)



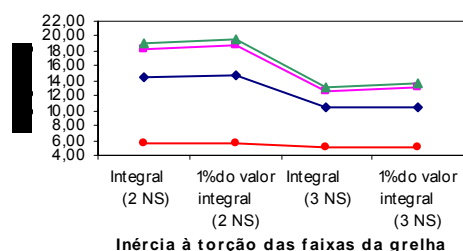
b) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 70 cm)



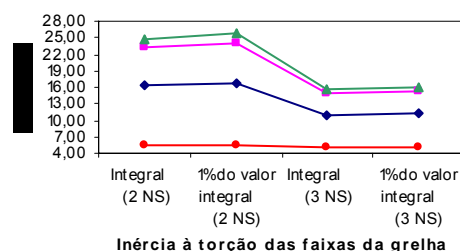
c) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 100 cm)



d) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 40 cm)



e) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 70 cm)

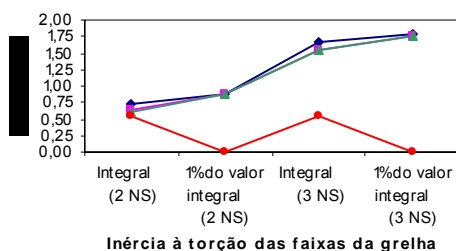


f) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 100 cm)

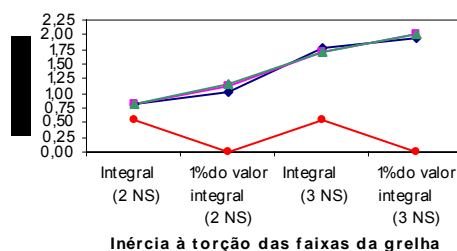
- Inércia à torção das vigas de bordo no estádio I
- ▲— Inércia à torção das vigas de bordo desprezada
- Inércia à torção das vigas de bordo no estádio II
- Sem vigas de bordo (apoios rígidos)

Figura 4.37 – Momentos fletores em função da inércia à torção dos elementos

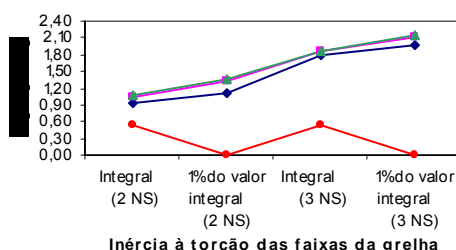
Nas lajes nervuradas retangulares, assim como nas quadradas, a desconsideração do momento de inércia a torção das faixas da grelha que se apóiam em apoios rígidos faz com que os momentos torçores caiam à praticamente zero, como verifica-se na Figura 4.38. Este comportamento também não se verifica para as lajes retangulares quando se considera esta mesma grelha apoiada em vigas com deslocabilidade, pois as rigidezes destas vigas de bordo interferem nos esforços e deslocamentos do sistema estrutural.



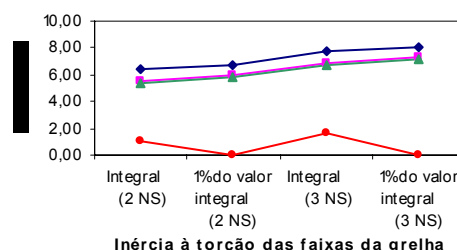
a) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 40 cm)



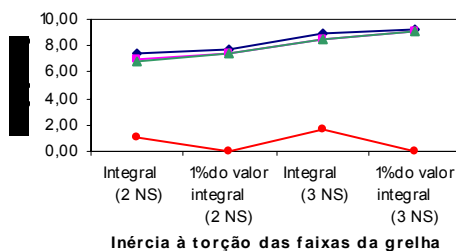
b) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 70 cm)



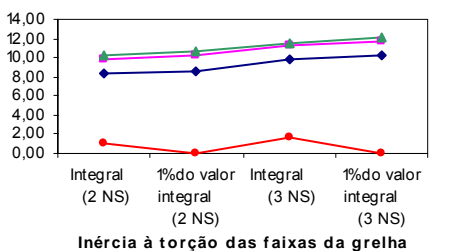
c) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 100 cm)



d) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 40 cm)



e) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 70 cm)



f) Mom. Torçores nas Ns (VB 15 x 100 cm)

- Inércia à torção das vigas de bordo no estádio I
- ▲— Inércia à torção das vigas de bordo desprezada
- Inércia à torção das vigas de bordo no estádio II
- Sem vigas de bordo (apoios rígidos)

Figura 4.38 – Momentos torçores em função da inércia à torção dos elementos

4.3.4. Resultados das Análises das Lajes Nervuradas com $L_x/L_y = 2$

Neste item são apresentados os resultados das lajes analisadas com os mesmos parâmetros do Item 4.3.2, porém com a relação entre os comprimentos dos vãos da lajes nervuradas, L_x/L_y , igual a 2.

Tabela 4.23 - Resultados das análises das lajes de 17 cm de altura, com $L_x/L_y = 2$: momento de inércia à torção integral das faixas da grelha e o das vigas de bordo no estádio I

| NS | VB (m) | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| | | | | | | | | | | |
| 16 | 0,15 x 0,4 | 3,69 | 2,77 | 15,38 | 4,71 | 10,99 | 6,09 | 5,55 | 5,14 | 3,87 |
| 13 | | 3,72 | 2,53 | 18,15 | 4,76 | 12,75 | 5,77 | 5,40 | 6,40 | 4,35 |
| 10 | | 3,80 | 2,43 | 22,63 | 4,73 | 15,22 | 5,32 | 5,13 | 7,99 | 4,78 |
| 7 | | 4,01 | 2,56 | 30,30 | 4,65 | 18,34 | 4,69 | 4,58 | 9,75 | 4,77 |
| 5 | | 4,37 | 2,91 | 37,23 | 4,54 | 21,15 | 4,00 | 3,88 | 10,58 | 3,72 |
| 3 | | 5,09 | 3,54 | 43,04 | 4,50 | 25,20 | 2,86 | 2,74 | 10,24 | 0,00 |
| 2 | | 6,25 | 5,57 | 34,79 | 4,74 | 34,79 | 1,43 | 1,33 | 8,61 | - |
| 16 | | 0,15 x 0,7 | 1,24 | 2,29 | 15,59 | 5,71 | 9,45 | 6,87 | 7,48 | 5,64 |
| 13 | 1,24 | | 2,29 | 18,20 | 5,61 | 11,02 | 6,36 | 7,01 | 7,33 | 6,22 |
| 10 | 1,25 | | 2,43 | 22,37 | 5,39 | 13,07 | 5,70 | 6,35 | 9,56 | 6,84 |
| 7 | 1,29 | | 2,64 | 29,05 | 5,11 | 15,21 | 4,85 | 5,34 | 11,99 | 6,74 |
| 5 | 1,38 | | 2,89 | 34,03 | 4,85 | 16,69 | 4,04 | 4,31 | 12,94 | 5,14 |
| 3 | 1,56 | | 3,39 | 35,86 | 4,66 | 18,10 | 2,81 | 2,87 | 11,73 | 0,00 |
| 2 | 1,87 | | 5,44 | 25,06 | 4,80 | 25,06 | 1,40 | 1,38 | 9,79 | - |
| 16 | 0,15 x 1 | | 0,75 | 3,79 | 15,92 | 5,62 | 9,50 | 5,90 | 7,81 | 4,37 |
| 13 | | 0,74 | 3,68 | 18,59 | 5,51 | 11,07 | 5,54 | 7,24 | 6,23 | 7,33 |
| 10 | | 0,75 | 3,67 | 22,78 | 5,30 | 13,09 | 5,07 | 6,47 | 8,89 | 8,31 |
| 7 | | 0,76 | 3,55 | 29,36 | 5,01 | 15,14 | 4,41 | 5,37 | 12,14 | 8,31 |
| 5 | | 0,79 | 3,51 | 34,88 | 4,74 | 16,89 | 3,76 | 4,34 | 14,12 | 6,55 |
| 3 | | 0,89 | 3,50 | 35,87 | 4,51 | 18,12 | 2,65 | 2,89 | 12,85 | 0,00 |
| 2 | | 1,06 | 5,39 | 25,89 | 4,61 | 25,89 | 1,40 | 1,47 | 10,86 | - |

Tabela 4.24 - Resultados das análises das lajes de 17 cm de altura, com $L_x/L_y = 2$: 1% do momento de inércia à torção das faixas da grelha e o das vigas de bordo no estádio I

| NS | VB (m) | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| 16 | 0,15 x 0,4 | 3,71 | 2,59 | 15,38 | 4,85 | 11,02 | 6,15 | 5,64 | 5,26 | 4,00 |
| 13 | | 3,74 | 2,35 | 18,15 | 4,89 | 12,78 | 5,84 | 5,50 | 6,53 | 4,49 |
| 10 | | 3,81 | 2,25 | 22,64 | 4,85 | 15,25 | 5,40 | 5,23 | 8,15 | 4,92 |
| 7 | | 4,03 | 2,38 | 30,33 | 4,76 | 18,37 | 4,77 | 4,69 | 9,94 | 4,91 |
| 5 | | 4,38 | 2,74 | 37,27 | 4,65 | 21,17 | 4,09 | 4,00 | 10,82 | 3,84 |
| 3 | | 5,11 | 3,36 | 43,08 | 4,59 | 25,21 | 2,97 | 2,87 | 10,57 | 0,00 |
| 2 | | 6,26 | 5,39 | 34,82 | 4,83 | 34,82 | 1,57 | 1,49 | 8,88 | - |
| 16 | | 0,15 x 0,7 | 1,28 | 2,07 | 15,63 | 5,95 | 9,52 | 6,94 | 7,65 | 5,79 |
| 13 | 1,27 | | 2,07 | 18,25 | 5,82 | 11,09 | 6,44 | 7,18 | 7,49 | 6,44 |
| 10 | 1,27 | | 2,20 | 22,45 | 5,59 | 13,14 | 5,80 | 6,52 | 9,73 | 7,04 |
| 7 | 1,32 | | 2,42 | 29,17 | 5,28 | 15,28 | 4,97 | 5,51 | 12,17 | 6,89 |
| 5 | 1,40 | | 2,69 | 34,19 | 5,01 | 16,76 | 4,19 | 4,49 | 13,14 | 5,24 |
| 3 | 1,58 | | 3,25 | 36,04 | 4,80 | 18,15 | 2,98 | 3,08 | 11,98 | 0,00 |
| 2 | 1,89 | | 5,25 | 25,18 | 4,92 | 25,18 | 1,59 | 1,60 | 10,00 | - |
| 16 | 0,15 x 1 | | 0,78 | 3,65 | 16,01 | 5,84 | 9,59 | 5,92 | 7,96 | 4,40 |
| 13 | | 0,77 | 3,53 | 18,71 | 5,72 | 11,16 | 5,59 | 7,39 | 6,28 | 7,51 |
| 10 | | 0,77 | 3,50 | 22,95 | 5,49 | 13,19 | 5,15 | 6,63 | 8,95 | 8,48 |
| 7 | | 0,78 | 3,38 | 29,60 | 5,17 | 15,25 | 4,52 | 5,54 | 12,22 | 8,45 |
| 5 | | 0,81 | 3,36 | 35,18 | 4,89 | 16,99 | 3,90 | 4,52 | 14,27 | 6,63 |
| 3 | | 0,91 | 3,43 | 36,19 | 4,65 | 18,22 | 2,81 | 3,09 | 13,08 | 0,00 |
| 2 | | 1,08 | 5,30 | 26,10 | 4,73 | 26,10 | 1,57 | 1,69 | 11,10 | - |

Tabela 4.25 - Resultados das análises das lajes de 17 cm de altura, com $L_x/L_y = 2$: momento de inércia à torção integral das faixas da grelha e o das vigas de bordo no estádio II

| NS | VB (m) | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| 16 | 0,15 x 0,4 | 3,73 | 2,52 | 15,39 | 4,94 | 11,02 | 5,85 | 5,50 | 4,83 | 3,72 |
| 13 | | 3,76 | 2,25 | 18,16 | 5,00 | 12,79 | 5,52 | 5,34 | 6,03 | 4,19 |
| 10 | | 3,84 | 2,11 | 22,65 | 4,97 | 15,27 | 5,08 | 5,05 | 7,58 | 4,63 |
| 7 | | 4,05 | 2,17 | 30,34 | 4,89 | 18,42 | 4,50 | 4,52 | 9,33 | 4,64 |
| 5 | | 4,41 | 2,46 | 37,29 | 4,79 | 21,26 | 3,86 | 3,84 | 10,15 | 3,59 |
| 3 | | 5,14 | 2,98 | 43,13 | 4,76 | 25,36 | 2,76 | 2,71 | 9,55 | 0,00 |
| 2 | | 6,31 | 4,72 | 34,93 | 5,08 | 34,93 | 1,34 | 1,29 | 7,86 | - |
| 16 | | 0,15 x 0,7 | 1,37 | 2,38 | 15,66 | 6,29 | 9,71 | 5,59 | 7,38 | 4,38 |
| 13 | 1,36 | | 2,28 | 18,35 | 6,17 | 11,35 | 5,21 | 6,87 | 6,14 | 6,19 |
| 10 | 1,36 | | 2,23 | 22,67 | 5,95 | 13,52 | 4,74 | 6,18 | 8,60 | 7,01 |
| 7 | 1,40 | | 2,10 | 29,69 | 5,66 | 15,89 | 4,20 | 5,20 | 11,45 | 7,10 |
| 5 | 1,49 | | 1,96 | 35,10 | 5,41 | 17,68 | 3,65 | 4,25 | 12,70 | 5,51 |
| 3 | 1,68 | | 2,01 | 37,63 | 5,26 | 19,74 | 2,63 | 2,90 | 11,24 | 0,00 |
| 2 | 2,03 | | 3,62 | 27,35 | 5,54 | 27,35 | 1,30 | 1,42 | 9,08 | - |
| 16 | 0,15 x 1 | | 0,87 | 4,97 | 16,38 | 6,22 | 10,15 | 3,73 | 7,62 | 2,79 |
| 13 | | 0,86 | 4,56 | 19,36 | 6,14 | 11,88 | 3,63 | 7,00 | 4,91 | 7,88 |
| 10 | | 0,86 | 4,11 | 24,08 | 5,96 | 14,17 | 3,54 | 6,21 | 8,13 | 9,22 |
| 7 | | 0,88 | 3,28 | 31,64 | 5,70 | 16,68 | 3,44 | 5,19 | 12,24 | 9,45 |
| 5 | | 0,92 | 2,71 | 38,33 | 5,46 | 18,99 | 3,26 | 4,32 | 14,85 | 7,58 |
| 3 | | 1,03 | 2,06 | 40,84 | 5,28 | 21,47 | 2,49 | 3,02 | 13,85 | 0,00 |
| 2 | | 1,25 | 3,62 | 31,71 | 5,53 | 31,71 | 1,37 | 1,63 | 11,80 | - |

Tabela 4.26 - Resultados das análises das lajes de 17 cm de altura, com $L_x/L_y = 2$: 1% do momento de inércia à torção das faixas da grelha e o das vigas de bordo no estádio II

| NS | VB (m) | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| 16 | 0,15 x 0,4 | 3,76 | 2,26 | 15,39 | 5,15 | 11,05 | 5,89 | 5,62 | 4,98 | 3,92 |
| 13 | | 3,78 | 1,99 | 18,17 | 5,20 | 12,82 | 5,58 | 5,47 | 6,20 | 4,42 |
| 10 | | 3,86 | 1,84 | 22,67 | 5,16 | 15,30 | 5,17 | 5,19 | 7,79 | 4,86 |
| 7 | | 4,07 | 1,90 | 30,37 | 5,06 | 18,44 | 4,61 | 4,66 | 9,60 | 4,87 |
| 5 | | 4,43 | 2,20 | 37,33 | 4,93 | 21,28 | 3,99 | 4,00 | 10,50 | 3,79 |
| 3 | | 5,15 | 2,67 | 43,17 | 4,89 | 25,37 | 2,93 | 2,89 | 10,02 | 0,00 |
| 2 | | 6,32 | 4,45 | 34,94 | 5,19 | 34,94 | 1,55 | 1,51 | 8,21 | - |
| 16 | | 0,15 x 0,7 | 1,42 | 2,12 | 15,71 | 6,64 | 9,81 | 5,57 | 7,59 | 4,56 |
| 13 | 1,41 | | 2,01 | 18,44 | 6,49 | 11,46 | 5,24 | 7,09 | 6,35 | 6,57 |
| 10 | 1,41 | | 1,94 | 22,81 | 6,23 | 13,64 | 4,83 | 6,40 | 8,86 | 7,37 |
| 7 | 1,44 | | 1,74 | 29,90 | 5,91 | 16,02 | 4,34 | 5,43 | 11,75 | 7,40 |
| 5 | 1,52 | | 1,65 | 35,38 | 5,64 | 17,82 | 3,84 | 4,49 | 13,05 | 5,73 |
| 3 | 1,71 | | 1,70 | 37,96 | 5,46 | 19,90 | 2,87 | 3,18 | 11,66 | 0,00 |
| 2 | 2,05 | | 3,29 | 27,59 | 5,72 | 27,59 | 1,59 | 1,73 | 9,39 | - |
| 16 | 0,15 x 1 | | 0,92 | 4,88 | 16,54 | 6,54 | 10,31 | 3,60 | 7,80 | 2,79 |
| 13 | | 0,91 | 4,43 | 19,59 | 6,44 | 12,06 | 3,57 | 7,17 | 4,96 | 8,21 |
| 10 | | 0,90 | 3,92 | 24,40 | 6,27 | 14,36 | 3,57 | 6,40 | 8,24 | 9,54 |
| 7 | | 0,92 | 3,04 | 32,10 | 5,96 | 16,91 | 3,55 | 5,40 | 12,41 | 9,69 |
| 5 | | 0,95 | 2,48 | 38,92 | 5,70 | 19,24 | 3,42 | 4,55 | 15,09 | 7,75 |
| 3 | | 1,06 | 1,88 | 40,75 | 5,50 | 21,74 | 2,70 | 3,28 | 14,19 | 0,00 |
| 2 | | 1,27 | 3,40 | 32,18 | 5,72 | 32,18 | 1,62 | 1,91 | 12,12 | - |

Tabela 4.27 - Resultados das análises das lajes de 17 cm de altura, com $L_x/L_y = 2$: momento de inércia à torção integral das faixas da grelha e desprezando o das vigas de bordo

| NS | VB (m) | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| 16 | 0,15 x 0,4 | 3,73 | 2,48 | 15,39 | 4,98 | 11,02 | 5,81 | 5,50 | 4,78 | 3,69 |
| 13 | | 3,76 | 2,20 | 18,16 | 5,04 | 12,79 | 5,47 | 5,33 | 5,96 | 4,17 |
| 10 | | 3,85 | 2,05 | 22,65 | 5,01 | 15,27 | 5,04 | 5,04 | 7,50 | 4,60 |
| 7 | | 4,06 | 2,10 | 30,34 | 4,93 | 18,42 | 4,47 | 4,51 | 9,26 | 4,61 |
| 5 | | 4,41 | 2,37 | 37,28 | 4,83 | 21,27 | 3,84 | 3,83 | 10,10 | 3,57 |
| 3 | | 5,14 | 2,86 | 43,12 | 4,80 | 25,38 | 2,75 | 2,71 | 9,45 | 0,00 |
| 2 | | 6,32 | 4,54 | 34,91 | 5,13 | 34,91 | 1,32 | 1,29 | 7,75 | - |
| 16 | | 0,15 x 0,7 | 1,39 | 2,41 | 15,66 | 6,39 | 9,75 | 5,35 | 7,36 | 4,13 |
| 13 | 1,38 | | 2,30 | 18,36 | 6,27 | 11,40 | 4,98 | 6,85 | 5,91 | 6,18 |
| 10 | 1,38 | | 2,21 | 22,70 | 6,04 | 13,59 | 4,55 | 6,15 | 8,42 | 7,03 |
| 7 | 1,42 | | 1,96 | 29,77 | 5,75 | 16,01 | 4,07 | 5,18 | 11,37 | 7,17 |
| 5 | 1,51 | | 1,79 | 35,26 | 5,51 | 17,85 | 3,58 | 4,25 | 12,71 | 5,59 |
| 3 | 1,70 | | 1,73 | 37,90 | 5,35 | 20,05 | 2,60 | 2,91 | 11,24 | 0,00 |
| 2 | 2,05 | | 3,23 | 27,73 | 5,65 | 27,73 | 1,28 | 1,43 | 9,02 | - |
| 16 | 0,15 x 1 | | 0,89 | 5,22 | 16,45 | 6,33 | 10,27 | 3,31 | 7,58 | 2,49 |
| 13 | | 0,89 | 4,75 | 19,48 | 6,25 | 12,03 | 3,25 | 6,94 | 4,68 | 7,98 |
| 10 | | 0,89 | 4,21 | 24,30 | 6,08 | 14,36 | 3,23 | 6,14 | 8,02 | 9,39 |
| 7 | | 0,90 | 3,23 | 32,04 | 5,82 | 16,96 | 3,24 | 5,14 | 12,31 | 9,64 |
| 5 | | 0,94 | 2,56 | 38,95 | 5,59 | 19,38 | 3,14 | 4,31 | 15,06 | 7,77 |
| 3 | | 1,05 | 1,78 | 41,76 | 5,42 | 22,10 | 2,44 | 3,03 | 14,15 | 0,00 |
| 2 | | 1,28 | 3,25 | 32,85 | 5,68 | 32,85 | 1,35 | 1,65 | 12,12 | - |

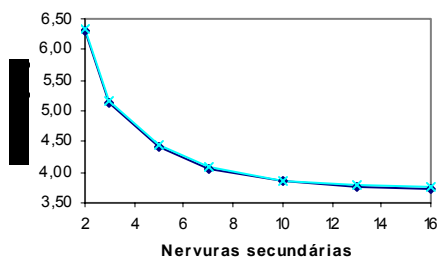
Tabela 4.28 - Resultados das análises das lajes de 17 cm de altura, com $L_x/L_y = 2$: 1% do momento de inércia à torção das faixas da grelha e desprezando o das vigas de bordo

| NS | VB (m) | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| 16 | 0,15 x 0,4 | 3,76 | 2,20 | 15,39 | 5,21 | 11,06 | 5,85 | 5,62 | 4,93 | 3,91 |
| 13 | | 3,79 | 1,92 | 18,17 | 5,25 | 12,82 | 5,53 | 5,46 | 6,14 | 4,41 |
| 10 | | 3,87 | 1,77 | 22,67 | 5,21 | 15,30 | 5,12 | 5,18 | 7,72 | 4,86 |
| 7 | | 4,08 | 1,81 | 30,37 | 5,11 | 18,44 | 4,57 | 4,66 | 9,55 | 4,87 |
| 5 | | 4,44 | 2,09 | 37,32 | 4,98 | 21,28 | 3,97 | 4,00 | 10,47 | 3,79 |
| 3 | | 5,16 | 2,51 | 43,16 | 4,94 | 25,37 | 2,92 | 2,90 | 9,97 | 0,00 |
| 2 | | 6,33 | 4,25 | 34,90 | 5,25 | 34,90 | 1,55 | 1,52 | 8,13 | - |
| 16 | | 0,15 x 0,7 | 1,45 | 2,15 | 15,72 | 6,76 | 9,86 | 5,30 | 7,58 | 4,31 |
| 13 | 1,43 | | 2,02 | 18,45 | 6,60 | 11,52 | 5,00 | 7,07 | 6,12 | 6,59 |
| 10 | 1,43 | | 1,91 | 22,84 | 6,34 | 13,72 | 4,63 | 6,37 | 8,69 | 7,43 |
| 7 | 1,46 | | 1,62 | 30,00 | 6,01 | 16,15 | 4,21 | 5,41 | 11,70 | 7,49 |
| 5 | 1,54 | | 1,46 | 35,55 | 5,75 | 18,01 | 3,77 | 4,50 | 13,09 | 5,82 |
| 3 | 1,73 | | 1,38 | 38,25 | 5,57 | 20,24 | 2,84 | 3,20 | 11,71 | 0,00 |
| 2 | 2,08 | | 2,86 | 27,99 | 5,84 | 27,99 | 1,59 | 1,76 | 9,36 | - |
| 16 | 0,15 x 1 | | 0,94 | 5,15 | 16,63 | 6,67 | 10,45 | 3,14 | 7,76 | 2,48 |
| 13 | | 0,93 | 4,62 | 19,73 | 6,57 | 12,22 | 3,16 | 7,12 | 4,72 | 8,35 |
| 10 | | 0,93 | 4,01 | 24,66 | 6,38 | 14,58 | 3,24 | 6,33 | 8,14 | 9,74 |
| 7 | | 0,94 | 2,98 | 32,55 | 6,10 | 17,21 | 3,34 | 5,36 | 12,51 | 9,92 |
| 5 | | 0,97 | 2,32 | 39,60 | 5,84 | 19,66 | 3,31 | 4,55 | 15,32 | 7,95 |
| 3 | | 1,08 | 1,57 | 42,48 | 5,65 | 22,41 | 2,66 | 3,31 | 14,52 | 0,00 |
| 2 | | 1,31 | 3,00 | 33,38 | 5,89 | 33,38 | 1,62 | 1,95 | 12,47 | - |

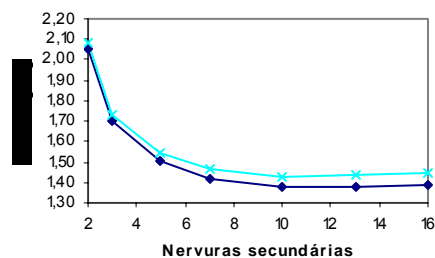
4.3.4.1. Influência do Momento de Inércia à Torção das Faixas da Grelha

Assim como para as lajes quadradas e retangulares com relação entre os comprimentos dos vãos igual a 2, faz-se, neste item, um estudo comparativo entre os resultados obtidos da consideração da inércia total à torção das faixas da grelha e apenas 1% deste valor, sempre desprezando este parâmetro para as vigas de bordo.

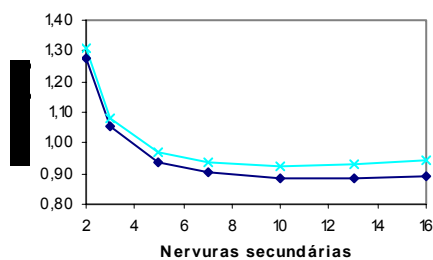
Na sequência do texto, as Figura 4.39 a Figura 4.41 apresentam todas comparações e análises pertinentes a esta situação específica.



a) Flechas (VB 15 x 40 cm)



b) Flechas (VB 15 x 70 cm)



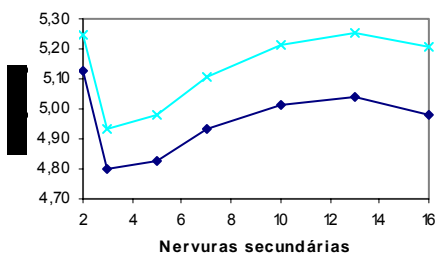
c) Flechas (VB 15 x 100 cm)

—●— Inércia à torção da faixa da grelha integral —x— 1% da inércia à torção da faixa da grelha

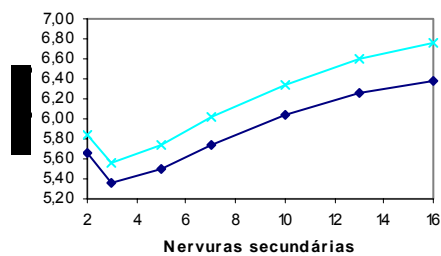
Figura 4.39 – Deslocamentos em função da inércia à torção das faixas da grelha

Pelos gráficos apresentados na Figura 4.39, pode-se perceber a pouca influência do momento de inércia à torção das faixas da grelha que representam a laje nervurada com a relação entre os vãos igual a 2. Com exceção dos momentos fletores das nervuras principais, todos os outros esforços e o deslocamento não apresentaram diferença significativa com esta variação de inércia. Este comportamento é mais acentuado para as vigas com menor rigidez, como a de seção transversal de 15 x 40 cm.

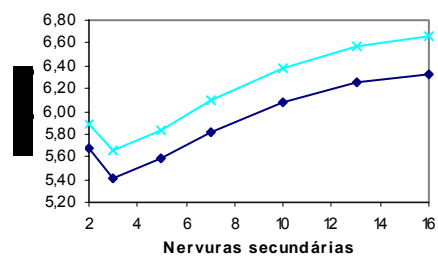
Percebe-se, através da Figura 4.40 (a) a (c), que as nervuras principais são as mais susceptíveis à variação de inércia à torção das faixas que discretizam a laje nervurada, pois, para estas nervuras, as duas curvas referentes à este parâmetro estão mais distanciadas.



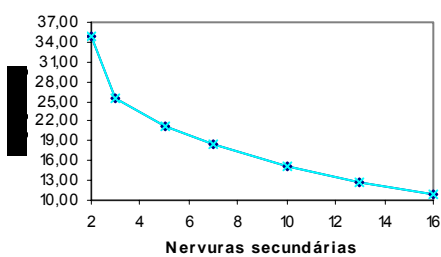
a) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 40 cm)



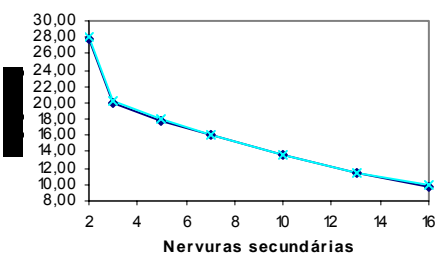
b) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 70 cm)



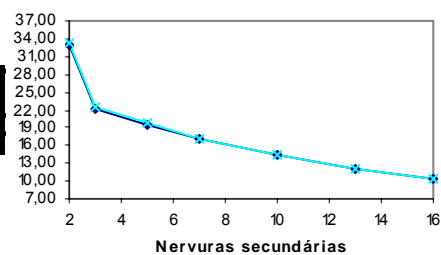
c) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 100 cm)



d) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 40 cm)



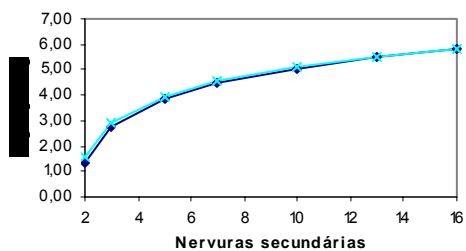
e) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 70 cm)



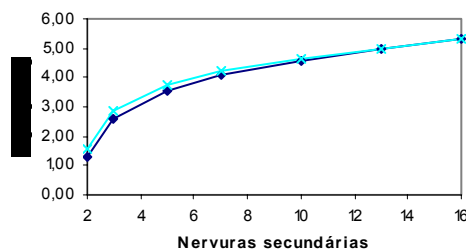
h) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 100 cm)

◆ Inércia à torção da faixa da grelha integral ✕ 1% da inércia à torção da faixa da grelha

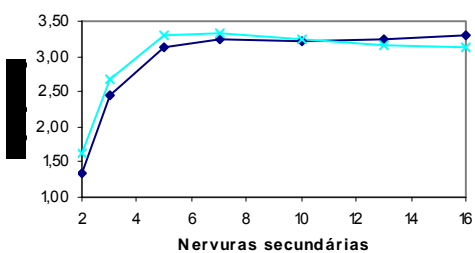
Figura 4.40 – Momentos fletores em função da inércia à torção das faixas da grelha



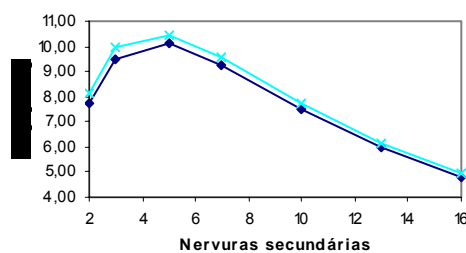
a) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 40 cm)



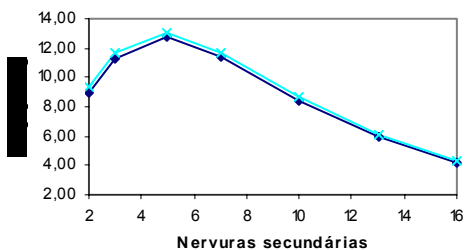
b) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 70 cm)



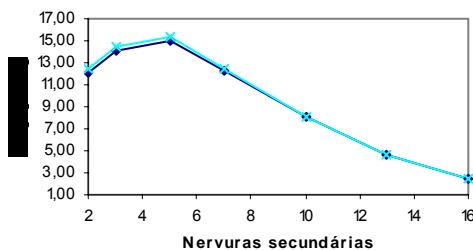
c) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 100 cm)



d) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 40 cm)



e) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 70 cm)



f) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 100 cm)

—◆— Inércia à torção da faixa da grelha integral —×— 1% da inércia à torção da faixa da grelha

Figura 4.41 – Momentos torçores em função da inércia à torção das faixas da grelha

4.3.4.2. Influência do Momento de Inércia à Torção das Vigas de Bordo

No intuito de se comparar o comportamento das lajes nervuradas retangulares com relação entre os vãos igual a 2, tem-se neste item as análises que consideram a inércia à torção das vigas do bordo das lajes no estágio I (não fissurado), no estágio II (fissurado) e nula, tendo sempre o momento de inércia à torção das faixas da grelha integral.

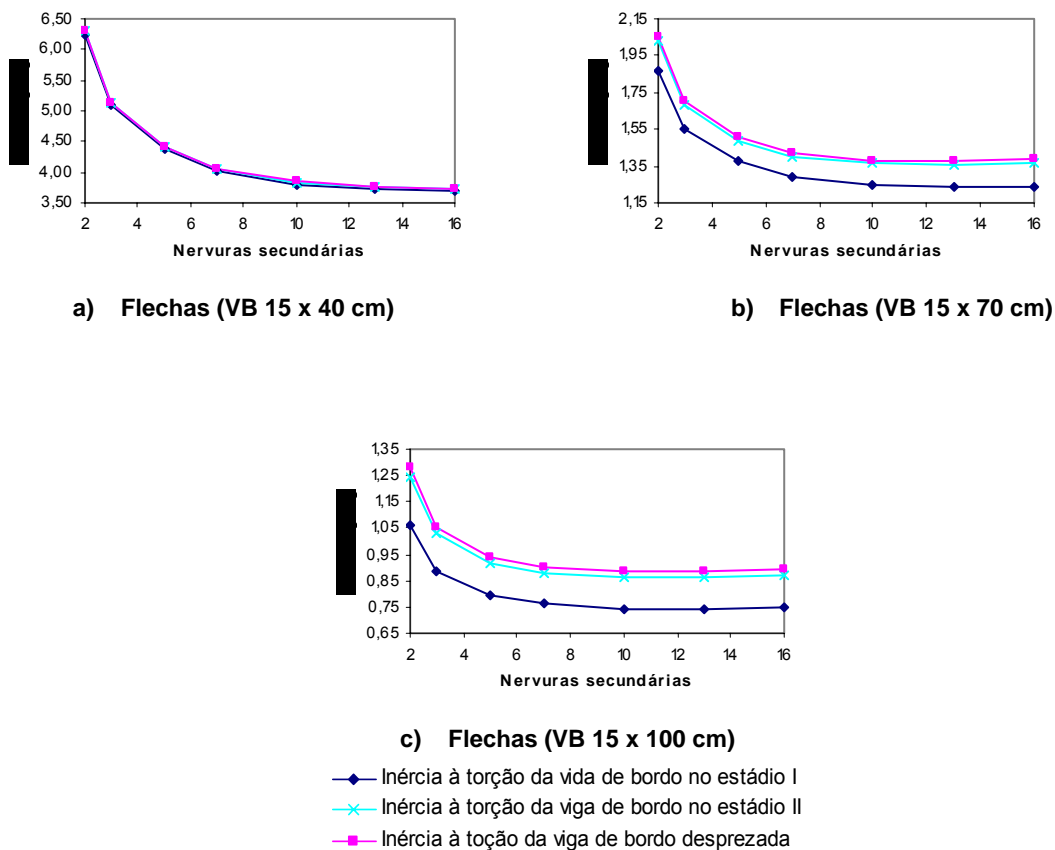


Figura 4.42 – Deslocamentos em função da inércia à torção das vigas de bordo

Para as lajes com vigas de bordo de 15 x 40 cm, o deslocamento praticamente não se altera com a modificação da inércia à torção destas, como é ilustrado na Figura 4.42 (a). Assim como para as lajes retangulares com $L_x/L_y = 1,5$, quando se aumenta a rigidez das vigas de bordo, ocorre um distanciamento entre as curvas dos gráficos, Figura 4.42 (b) e (c), embora este seja bem reduzido entre a análise que considera a viga no estágio II e aquele que desconsidera a inércia à torção.

Para todas as análises anteriormente apresentadas (laje com $L_x/L_y = 1$ e $1,5$), assim como para esta, o comportamento da laje nervurada, com relação à flecha, é semelhante, pois quando se diminui o momento de inércia à torção das vigas de bordo ou o número de nervuras secundárias tem-se o deslocamento do centro da laje aumentado.

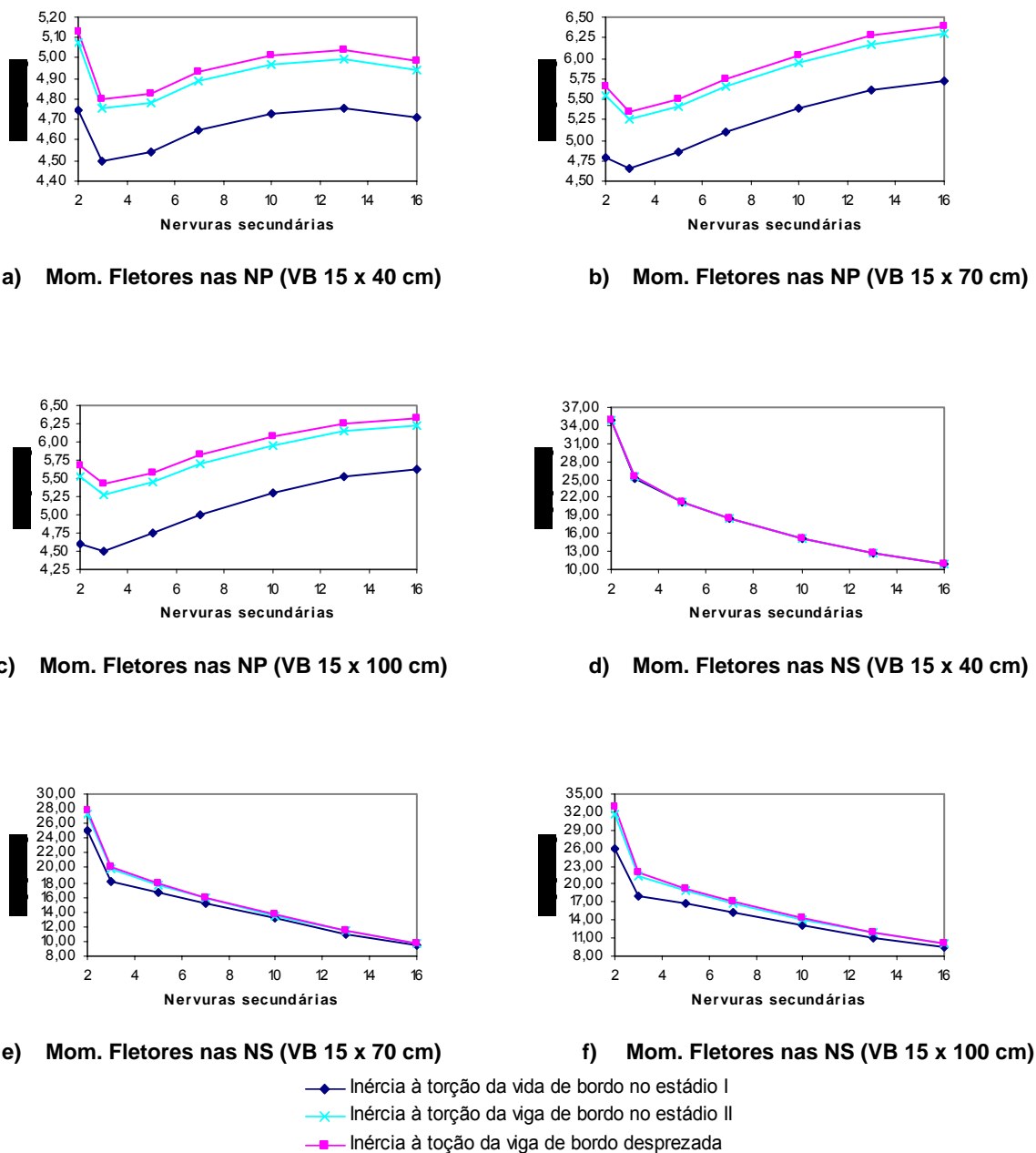
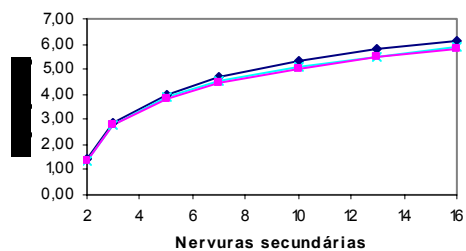
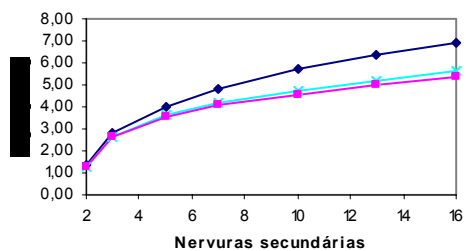


Figura 4.43 – Momentos fletores em função da inércia à torção das vigas de bordo

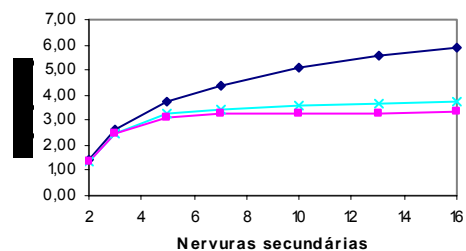
Os momentos fletores nas nervuras principais e secundárias, M_x e M_y , Figura 4.43, assim como os torçores, M_{yx} e M_{xy} , Figura 4.44, têm o comportamento parecido com o das lajes com outras relações de vãos estudadas. A diferença mais relevante está nos valores obtidos, sendo que estes aumentam à medida que se aumenta a relação entre os comprimentos dos vãos ($L_x/L_y = 1, 1,5$ e 2).



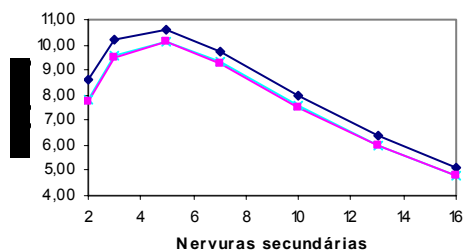
a) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 40 cm)



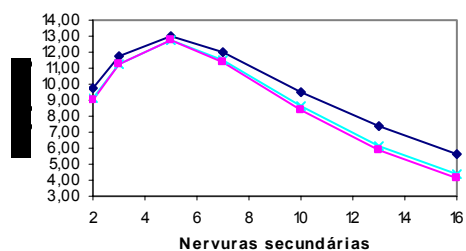
b) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 70 cm)



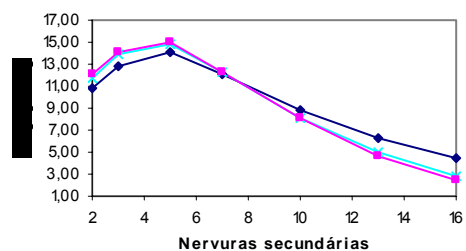
c) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 100 cm)



d) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 40 cm)



e) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 70 cm)



f) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 100 cm)

- Inércia à torção da vida de bordo no estádio I
- x— Inércia à torção da viga de bordo no estádio II
- Inércia à torção da viga de bordo desprezada

Figura 4.44 – Momentos torçores em função da inércia à torção das vigas de bordo

4.3.4.3. Comparação entre os Modelos Computacionais Desenvolvidos com e sem Vigas de Bordo para as Lajes Retangulares ($L_x/L_y = 2$)

As Tabela 4.29 e Tabela 4.30 apresentam os valores de esforços e deslocamentos (flechas) obtidos nas análises das lajes nervuradas do tipo REDUZCON [21] com 2 e 3 nervuras secundárias cujas condições de apoio são os apoios rígidos.

Posteriormente, apresentam-se nas Figura 4.45, Figura 4.46 e Figura 4.47 os resultados destas análises acima citadas comparadas com os obtidos com a consideração da deslocabilidade das vigas de apoio, para as diversas condições de rigidezes consideradas no estudo.

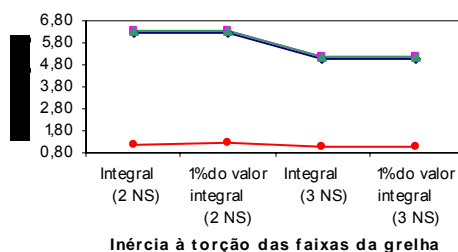
Tabela 4.29 - Resultados das análises das lajes nervuradas de 17 cm de altura, com $L_x/L_y = 2$, apoiada em apoios indeslocáveis: momento de inércia à torção integral das faixas da grelha

| NS | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| | | | | | | | | | |
| 3 | 1,06 | 0,66 | 3,42 | 5,25 | 4,62 | 0,53 | 0,50 | 1,61 | 0,00 |
| 2 | 1,18 | 0,75 | 5,30 | 5,73 | 5,30 | 0,53 | 0,49 | 0,94 | - |

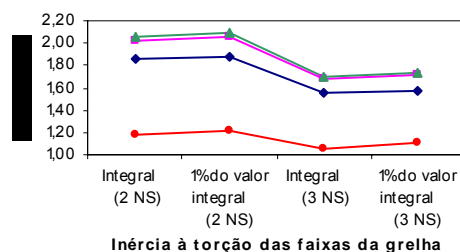
Tabela 4.30 - Resultado das análises das lajes nervuradas de 17 cm de altura, com $L_x/L_y = 2$, apoiada em apoios indeslocáveis: 1% do momento de inércia à torção das faixas da grelha

| NS | Flecha (cm) | Momentos Fletores | | | | Momentos Torçores (1ª e 2ª faixas da grelha) | | | |
|----|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|------|----------------------|------|
| | | Faixa do canto | | Faixa central | | M _{yx} - NP | | M _{xy} - NS | |
| | | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | M _x - NP (kNm) | M _y - NS (kNm) | 1ª | 2ª | 1ª | 2ª |
| | | | | | | | | | |
| 3 | 1,11 | 0,71 | 3,50 | 5,50 | 4,48 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,00 |
| 2 | 1,22 | 0,75 | 5,36 | 5,90 | 5,36 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | - |

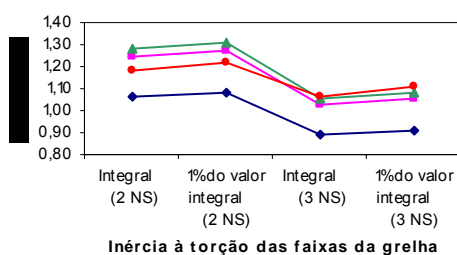
Na sequência, as Figura 4.45 a Figura 4.47 apresentam todas comparações e análises pertinentes a este item.



a) Flechas (VB 15 x 40 cm)



b) Flechas (VB 15 x 70 cm)

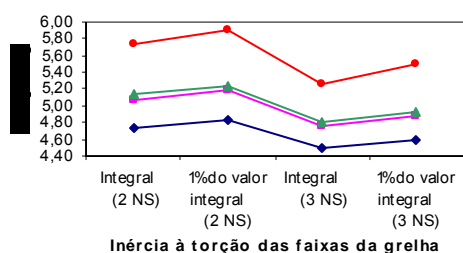


c) Flechas (VB 15 x 100 cm)

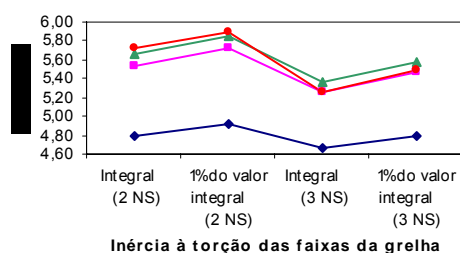
- Inércia à torção das vigas de bordo no estádio I
- ▲— Inércia à torção das vigas de bordo desprezada
- Inércia à torção das vigas de bordo no estádio II
- Sem vigas de bordo (apoios rígidos)

Figura 4.45 – Deslocamentos em função da inércia à torção dos elementos

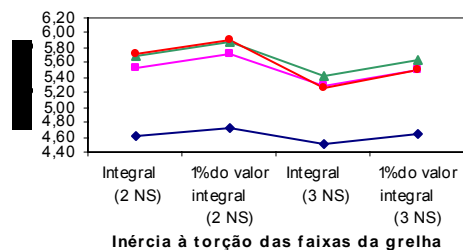
Nestas análises, onde as lajes têm 4,5 x 9 m de vão livre, os deslocamentos apresentados com o estudo feito com apoios rígidos são consideravelmente menores quando comparados àqueles com vigas de bordo, principalmente com as vigas de seções transversais de 15 x 40 e 15 x 70 cm, Figura 4.45 (a) e (b), respectivamente. Percebe-se, portanto, que para os deslocamentos, a modelagem da laje nervurada com apoios indeslocáveis tem comportamento similar àquela feita com apoios deslocáveis com seção transversal de 15 x 100 cm, mostrado na Figura 4.45 (c), pois o comportamento observado na análise com apoios rígidos é próximo daquele obtido para vigas de bordo de seção transversal de 15 x 100 cm.



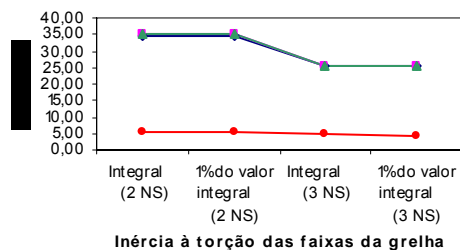
a) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 40 cm)



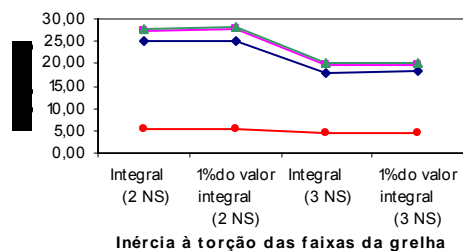
b) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 70 cm)



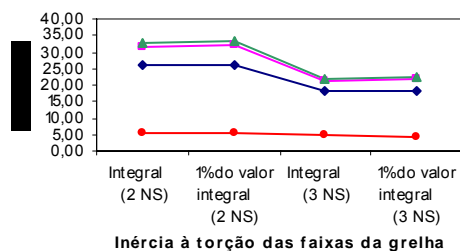
c) Mom. Fletores nas NP (VB 15 x 100 cm)



d) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 40 cm)



e) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 70 cm)



f) Mom. Fletores nas NS (VB 15 x 100 cm)

—◆— Inércia à torção das vigas de bordo no estádio I
—▲— Inércia à torção das vigas de bordo desprezada

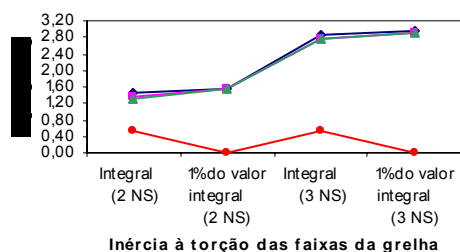
—■— Inércia à torção das vigas de bordo no estádio II
—●— Sem vigas de bordo (apoios rígidos)

Figura 4.46 – Momentos fletores em função da inércia à torção dos elementos

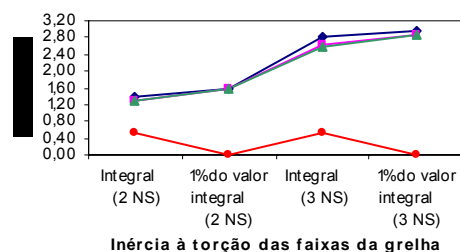
Diferentemente do que acontece nas outras lajes anteriormente analisadas (laje nervurada quadrada e retangular com relação entre os vãos igual a 1,5), os momentos

fletores nas nervuras principais, M_x , para a análise com apoios rígidos, nem sempre têm os maiores valores quando comparados àqueles obtidos com a consideração de vigas de bordo, como pode ser observado na Figura 4.46 (a) a (c).

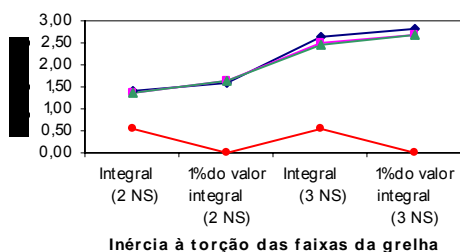
Para os momentos fletores nas nervuras secundárias, M_y , observa-se, na análise com vigas de seção transversal de 15 x 40 cm, Figura 4.46 (d), que a variação do momento de inércia à torção destas vigas não implica nenhuma diferença significativa nos valores. Porém, comparando aos resultados das lajes nervuradas com apoios rígidos, tem-se uma grande diferença entre os valores fornecidos pelas duas formas de se considerar a condição de apoio. Ainda com relação ao momento fleter nas nervuras secundárias, percebe-se o distanciamento entre as curvas que representam as vigas de bordo nos diferentes valores de momento de inércia à torção quando se aumenta a sua rigidez, ou seja, para as seções de 15 x 70 e 15 x 100 cm, ilustrado nas Figura 4.46 (e) e (f).



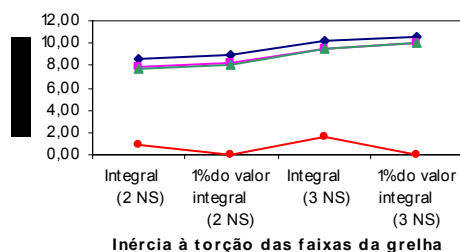
a) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 40 cm)



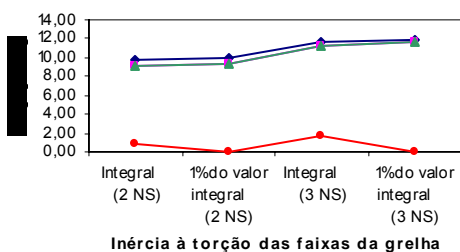
b) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 70 cm)



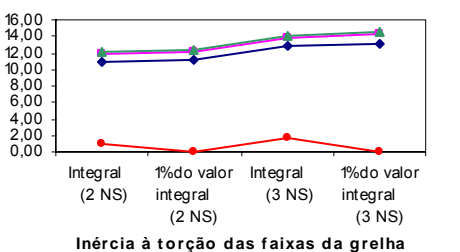
c) Mom. Torçores nas NP (VB 15 x 100 cm)



d) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 40 cm)



e) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 70 cm)



f) Mom. Torçores nas NS (VB 15 x 100 cm)

—●— Inércia à torção das vigas de bordo no estádio I
—▲— Inércia à torção das vigas de bordo desprezada

—■— Inércia à torção das vigas de bordo no estádio II
—●— Sem vigas de bordo (apoios rígidos)

Figura 4.47 – Momentos torçores em função da inércia à torção dos elementos

Com relação aos momentos torçores na duas direções, M_{yx} e M_{xy} , ilustrados na Figura 4.47, a laje com $L_x/L_y = 2$ tem comportamento similar à retangular com a relação igual a 1,5, sendo a principal diferença o fato de que as lajes com relação entre os vãos igual a 2 apresenta valores significativamente maiores.

4.3.5. Comparação entre os Resultados para as Diferentes Dimensões das Lajes Nervuradas

Afim de se demonstrar as diferenças existentes entre as lajes nervuradas com as relações entre os comprimentos dos vãos (L_x/L_y) iguais a 1, 1,5 e 2, é feita, neste item, uma comparação entre os deslocamentos e esforços (momentos fletores e torçores) encontrados nas análises para as lajes REDUZCON [21]. Apresentam-se somente os resultados daquelas lajes com 2 e 3 nervuras secundárias, que são aquelas reais utilizadas na prática para estes vãos livres.

Ressalta-se que, nas análises, é considerado somente 1% do momento de inércia à torção das faixas e o das vigas de bordo é desconsiderado. Estes e os demais parâmetros utilizados na investigação são os mesmos considerados na Capítulo 4, ou seja, para as características físicas e geométricas e para os carregamentos, os cálculos são feitos de acordo com os Itens 3.5 e 3.6 e os vãos livres das lajes considerados são de 4,5 x 4,5 m; 4,5 x 6,75 m e 4,5 x 9 m (Tabela 4.12, Tabela 4.14, Tabela 4.20, Tabela 4.22, Tabela 4.28 e Tabela 4.30).

A seguir, são expostos nas Figura 4.48 a Figura 4.50 os gráficos de deslocamentos e esforços nas lajes com 2 e 3 nervuras secundárias.

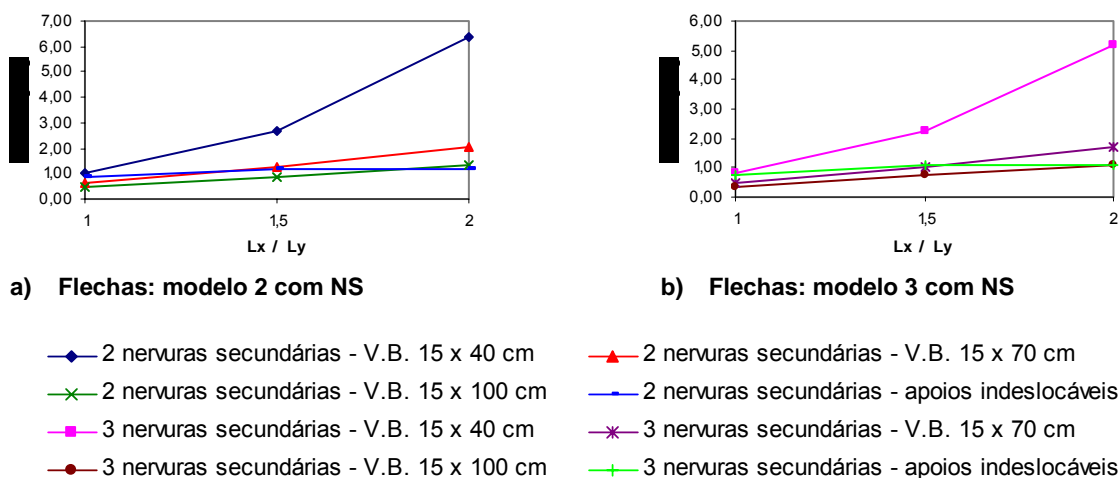
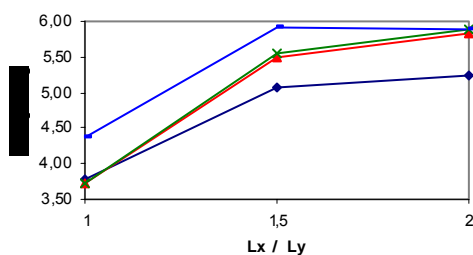
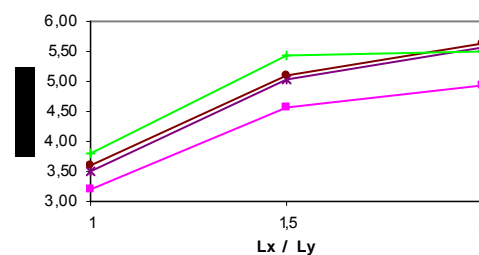
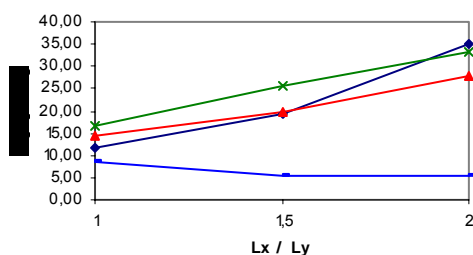
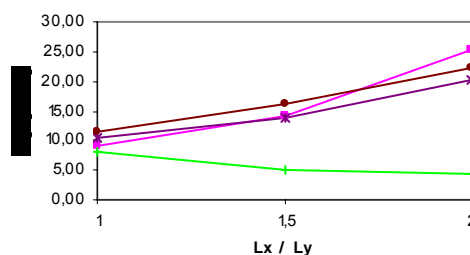


Figura 4.48 – Deslocamentos nas lajes nervuradas com diferentes relações entre os comprimentos dos vãos

Os deslocamentos das lajes, Figura 4.48, apresentam comportamento semelhante tanto para as lajes com 2 quanto para as com 3 nervuras secundárias, apenas apresentando valores ligeiramente maiores para aquelas com o menor número de nervuras (considerando lajes com a mesma relação L_x/L_y). Porém, quando se analisa a relação entre os comprimentos dos vãos das lajes, observa-se uma grande influência deste parâmetro, já que o aumento de L_x/L_y acarreta num acréscimo nos valores de flechas das lajes.

a) M_x na NP: modelo 2 com NSb) M_x na NP: modelo 3 com NSc) M_y na NS: modelo 2 com NSd) M_y na NS: modelo 3 com NS

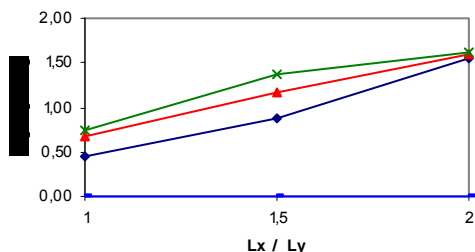
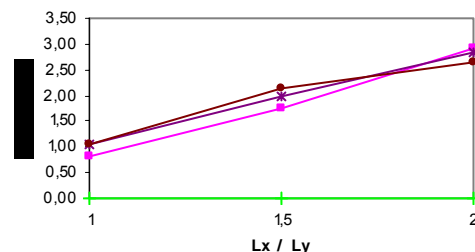
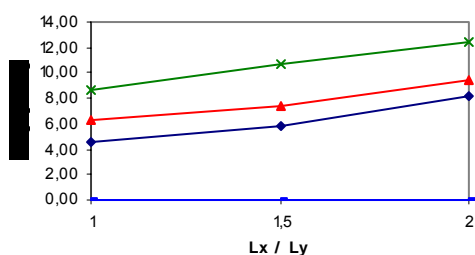
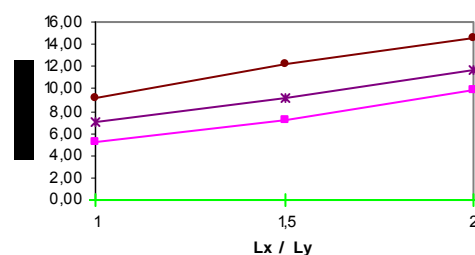
—●— 2 nervuras secundárias - V.B. 15 x 40 cm
—×— 2 nervuras secundárias - V.B. 15 x 100 cm
—■— 3 nervuras secundárias - V.B. 15 x 40 cm
—●— 3 nervuras secundárias - V.B. 15 x 100 cm

—▲— 2 nervuras secundárias - V.B. 15 x 70 cm
—■— 2 nervuras secundárias - apoios indeslocáveis
—×— 3 nervuras secundárias - V.B. 15 x 70 cm
—+— 3 nervuras secundárias - apoios indeslocáveis

Figura 4.49 – Momentos fletores nas lajes nervuradas com diferentes relações entre os comprimentos dos vãos

Os momentos fletores nas nervuras principais e secundárias, M_x e M_y , representados na Figura 4.50, têm comportamento similar entre si, ou seja, aumentando-se a relação L_x/L_y , os valores de momentos também aumentam. É observado, no entanto, que os valores de momentos fletores nas nervuras secundárias obtidos na análise com apoios rígidos têm comportamento inverso àquele da análise com vigas de bordo deslocáveis, ou seja, aumentando-se L_x/L_y , os valores encontrados decrescem. Isto acontece devido à redistribuição de esforços para o equilíbrio do sistema estrutural, pois enquanto os momentos fletores nas nervuras principais aumentam com o aumento de L_x/L_y , aqueles observados nas nervuras secundárias diminuem. Para as análises das lajes com vigas de bordo, mesmo

quando se desconsidera a rigidez à torção dos elementos da grelha, isto não necessariamente ocorre, já que estas apresentam momentos torçores que também influenciam nesta redistribuição de esforços.

a) M_{yx} na NP: modelo 2 com NSb) M_{yx} na NP: modelo 3 com NSc) M_{xy} na NS: modelo 2 com NSd) M_{xy} na NS: modelo 3 com NS

- | | |
|---|---|
| ◆ 2 nervuras secundárias - V.B. 15 x 40 cm | ▲ 2 nervuras secundárias - V.B. 15 x 70 cm |
| × 2 nervuras secundárias - V.B. 15 x 100 cm | ◆ 2 nervuras secundárias - apoios indeslocáveis |
| ■ 3 nervuras secundárias - V.B. 15 x 40 cm | * 3 nervuras secundárias - V.B. 15 x 70 cm |
| ● 3 nervuras secundárias - V.B. 15 x 100 cm | + 3 nervuras secundárias - apoios indeslocáveis |

Figura 4.50 – Momentos torçores nas lajes nervuradas com diferentes relações entre os comprimentos dos vãos

Para os momentos torçores nas nervuras principais e secundárias, M_{yx} e M_{xy} , Figura 4.50, tem-se que aumentando a relação L_x/L_y , aumenta-se os valores destes esforços. Observa-se, ainda, que para o estudo com apoios rígidos, os momentos torçores encontrados quando se despreza o momento de inércia à torção dos elementos da grelha é praticamente nulo. Já para o mesmo estudo, porém com vigas de bordo deslocáveis como condição de contorno, existe momento torçor de valor considerável causado, provavelmente, pela rigidez destas vigas, como já mencionado anteriormente.

4.4. Comparação com Modelos que Discretizam a Mesa das Faixas como Placa

Para se comparar os resultados obtidos através do método de analogia de grelha à uma outra forma de discretização destas lajes, faz-se um modelo intermediário entre a grelha e a laje inteiramente discretizada por elementos finitos, o qual se discretiza as nervuras da laje nervurada como elementos de vigas retangulares e a mesa como elementos finitos de placa. Esta estratégia de análise foi implementada apenas para o modelo estrutural BRC130.

4.4.1. Modelo Numérico “Viga – Placa”

Este novo modelo numérico utilizado para discretizar as lajes nervuradas, como já mencionado anteriormente, consiste em representar as almas das faixas das grelhas (seção T) através de elementos de viga com seções transversais retangulares e as mesas, através de elementos de placa, como mostrado na Figura 4.51.

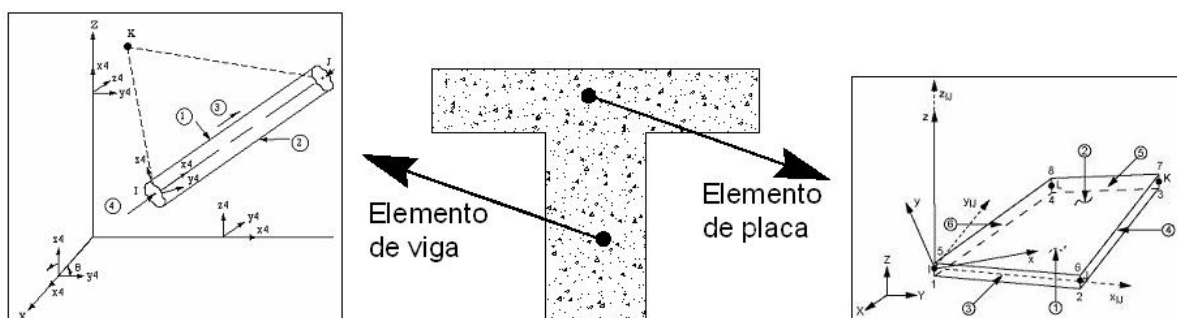


Figura 4.51 – Discretização das nervuras no modelo numérico “viga-placa”

Os elementos de viga são os mesmos utilizados na analogia de grelha, BEAM44 [19], comentado no Item 3.3, Figura 3.7.

O elemento de placa que discretiza as mesas das vigas T das faixas da grelha que representam a laje nervurada é o SHELL63 [19] e está representado na Figura 4.52.

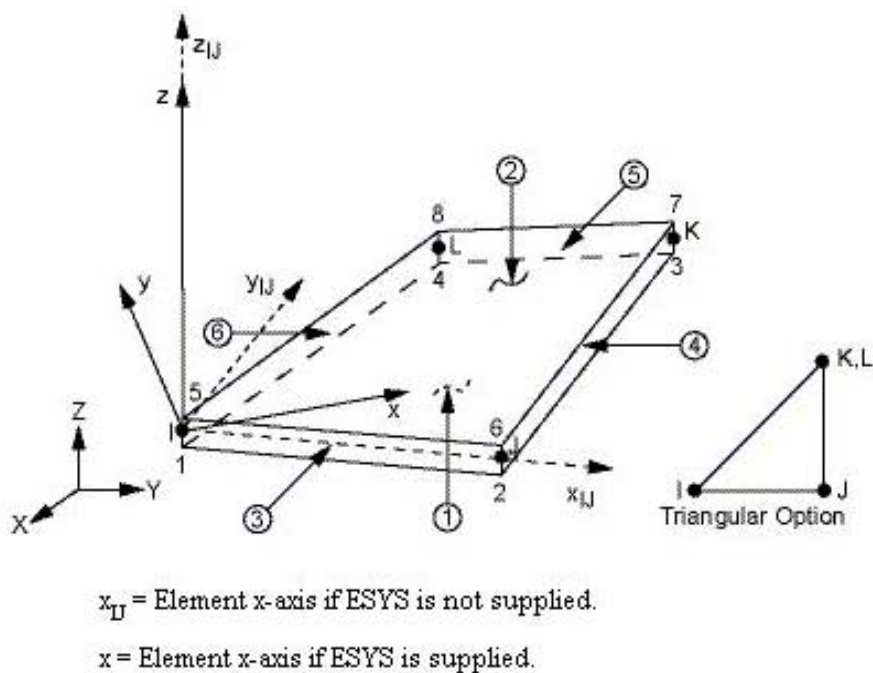


Figura 4.52 – Elemento SHELL63 [19]

Este elemento finito é definido por quatro nós, sendo que cada um destes podem ter uma espessura distinta. Além disto, considera efeitos de membrana e/ou flexão. O elemento tem seis graus de liberdade por nó, sendo três translações e três rotações nas direções x, y e z, e admite a utilização de cargas normais e no plano.

São feitas análises de lajes quadradas com 4,5 m de vão de livre com 16, 3 e 2 nervuras secundárias. Estas lajes são idealizadas com o molde BRC130, ou seja, com 17 cm de altura, conforme explicitado no Capítulo 3, Figura 3.16. Também são utilizados os carregamentos e as características físicas e geométricas descritas neste mesmo capítulo, Itens 3.6 e 3.5, respectivamente, para a discretização destas lajes nervuradas como grelha ou como o modelo numérico de viga-placa.

Para as lajes nervuradas analisadas neste item, para a condição de contorno tem-se a consideração de apoios rígidos (indeslocáveis) e para momento de inércia à torção das faixas da grelha tem-se apenas 1% de seu valor integral.

Na seqüência, na Tabela 4.31 estão apresentados os resultados de deslocamento e esforços (momentos fletores e torçores) comparados para estas duas formas de discretização de uma laje nervurada.

Tabela 4.31 – Comparação entre os modelos de analogia de grelha e viga-placa

| Modelo de análise | NS | Flecha (cm) | Momentos Fletores (kNm) | | Momentos Torçores (kNm) | |
|--------------------|----|-------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| | | | M _x (NP) | M _y (NS) | M _x (NP) | M _y (NS) |
| Analogia de grelha | 16 | 0,38 | 1,85 | 2,60 | 0,003 | 0,006 |
| Viga e placa | 16 | 0,37 | 2,00 | 3,00 | 0,022 | 0,087 |
| Diferença (%) | | 2,63 | 8,11 | 15,4 | - | - |
| Analogia de grelha | 3 | 0,76 | 3,79 | 8,15 | 0,005 | 0,017 |
| Viga e placa | 3 | 0,57 | 3,10 | 6,00 | 0,031 | 0,090 |
| Diferença (%) | | 25 | 18,2 | 26,4 | - | - |
| Analogia de grelha | 2 | 0,88 | 4,3 | 8,65 | 0,005 | 0,009 |
| Viga e placa | 2 | 0,60 | 3,0 | 6,00 | 0,028 | 0,025 |
| Diferença (%) | | 31,8 | 30,2 | 30,6 | - | - |

Obs.: Ressalta-se que, para tornar as tabelas a seguir mais compactas, as expressões “nervura secundária” e “nervura principal” são substituídas por NS e NP.

Ressalta-se que a diferença numérica entre os modelos para os momentos torçores não deve ser considerada, pois para a analogia de grelha estes valores são praticamente zero e para o modelo de viga-placa têm-se um pouco aumentado estes valores. Portanto, para qualquer número ligeiramente maior do que zero já é obtida uma diferença percentual muito grande.

Observa-se que à medida que se diminui o número de nervuras secundárias do sistema estrutural, a diferença percentual entre os diferentes métodos de análise aumenta sensivelmente.

Tal fato, muito provavelmente é motivado pela ortotropia do sistema, pois quando este se aproxima de uma laje nervurada isotrópica, não são verificadas diferenças tão significativas quanto para as lajes com poucas nervuras secundárias, nitidamente ortotrópicas.

Observa-se que, mesmo tendo o mesmo número de nervuras nas duas direções, o sistema não pode ser considerado isotrópico, visto que a largura das nervuras secundárias são maiores do que a das principais. Não é feita uma análise com uma laje com nervuras de larguras iguais nas duas direções, no entanto, imagina-se que a diferença entre a análise por grelha e por viga-placa fique ainda menor para este caso isotrópico.

Convém ressaltar o fato de que estas análises numéricas necessitam, também, de uma calibração experimental, mesmo considerando-se que os modelos computacionais desenvolvidos nesta dissertação foram devidamente calibrados com base nos resultados obtidos por outros autores [7,36,37].