

5. Análise dos Resultados

5.1.

Análise dos Resultados para Lajes Simplesmente Apoiada

Foi escolhido, para fins de comparação, o deslocamento máximo obtido em cada laje, de forma a determinar qual configuração apresenta maior flexibilidade e, portanto, maior desvantagem como sistema estrutural. Outro dado utilizado para comparação foi o obtido a partir do dimensionamento das nervuras, sendo estes a quantidade de aço necessária em cada nervura e os seus respectivos volumes.

Esses valores foram apresentados para cada modelo estudado no capítulo 4 através das Tabelas 4.2, 4.4 e 4.6 e são reapresentados em um formato comparativo dispondo da porcentagem da diferença entre cada configuração. Esses dados são também apresentados em gráficos para uma melhor visualização dos resultados e, por fim, comentados.

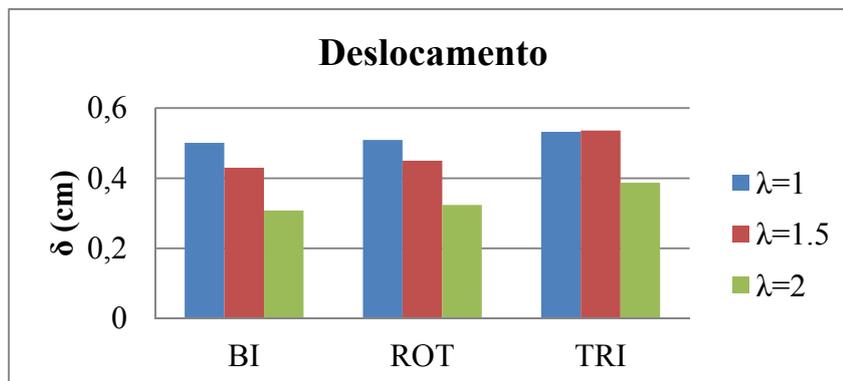


Figura 5.1 – Gráfico comparativo entre deslocamentos máximos no caso 1.

	$\lambda=1$			Diferença (%)		
	BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
δ (cm)	-0,50	-0,51	-0,53	1,60	6,19	4,52
	$\lambda=1.5$			Diferença (%)		
	BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
δ (cm)	-0,43	-0,45	-0,54	4,65	24,65	19,11
	$\lambda=2$			Diferença (%)		
	BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
δ (cm)	-0,31	-0,32	-0,39	5,19	25,65	19,44

Tabela 5.1 – Comparação entre deslocamentos máximos no caso 1.

Nessa primeira análise que cada λ é estudado separadamente, é possível observar que para $\lambda=1$ ocorre uma maior deformação da laje ao se rotacionar as nervuras, sendo o deslocamento acrescido de 1,60%. Já quando se compara a laje bidirecional com a tridirecional, observa-se também um acréscimo de 6,19% no deslocamento. Conclui-se que, para esta laje tipo, com a rotação das nervuras ou utilização do modelo tridirecional, encontra-se desvantagem quanto à deformação medida no Estado Limite de Serviço.

O mesmo ocorre quando analisado o $\lambda=1,5$, havendo um acréscimo de flecha de 4,65% quando rotacionadas as nervuras, e de 24,65% quando idealizada a laje tridirecional. É possível também observar o mesmo padrão de comportamento quando analisado o $\lambda=2$, sendo o aumento de deslocamento de 5,19% da bidirecional para a rotacionada, e de 25,65% da bidirecional para a tridirecional.

Por fim, podemos estudar o comportamento do efeito da rotação das nervuras quando o λ é variado. Neste quesito, observamos que a menor variação de deslocamento acontece quando o $\lambda=1$, aumentando consideravelmente a diferença à medida que o λ aumenta, como pode ser observado na figura 5.1.

Com isso, conclui-se que, para o caso 1 de Marcus, nesta laje tipo, a rotação das nervuras, diferentemente do que Rocha [11] diz, é desvantajosa diante do método bidirecional. Isso se deve ao fato do comprimento da nervura central aumentar consideravelmente, provocando um maior vão entre apoios, não sendo balanceada pela rigidez provocada pelas nervuras de menor vão, mais próximas aos apoios. Tem-se, também, que a melhor situação possível de apresentar uma pequena vantagem é quando o $\lambda=1$, pois a diferença entre a laje bidirecional e a rotacionadas apresentaram valores bem próximos de deslocamentos.

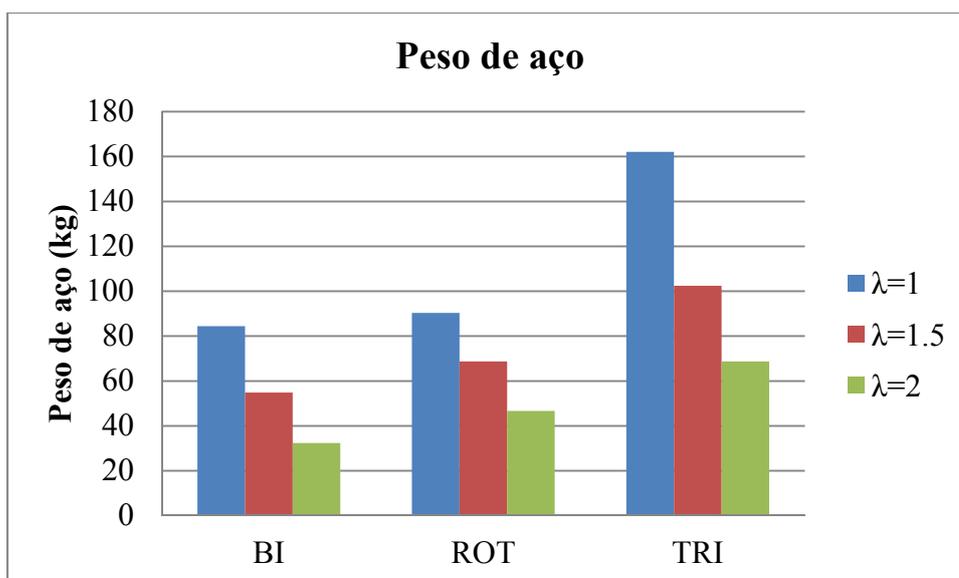


Figura 5.2 – Gráfico comparativo entre peso de aço nas nervuras no caso 1.

	λ=1			Diferença (%)		
	BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
Peso de aço (Kg)	84,43	90,35	162,08	1,04	81,25	79,38
	λ=1.5			Diferença (%)		
	BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
Peso de aço (Kg)	54,83	68,71	102,45	25,33	86,87	49,10
	λ=2			Diferença (%)		
	BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
Peso de aço (Kg)	32,39	46,69	68,71	44,15	112,15	47,17

Tabela 5.2 – Comparação entre peso de aço nas nervuras no caso 1.

Utilizando a mesma sequência de análise adotada para o deslocamento, é comparado, através da variação de λ , o peso resultante de aço nas nervuras, calculado através do dimensionamento no Estado Limite Último. Para $\lambda=1$, obteve-se uma variação semelhante a dos deslocamentos, onde o acréscimo do peso foi de 1,04% da bidirecional em relação a rotacionada. Já quando se adiciona uma terceira nervura, o acréscimo do peso resultante é consideravelmente alto, de 79,38%. Isso se deve à armadura necessária para esta terceira nervura, não sendo balanceado pela diminuição de aço nas outras duas.

Uma variação semelhante ocorre para as outras duas lajes, observando na de 6x4 m² um aumento de 25,33% quando rotacionadas as nervuras e 86,87% quando acrescida a terceira. Para a laje 6x3 m², a variação é ainda maior, sendo de 44,15% no primeiro comparativo e 112,15% no segundo.

Isso reforça a ideia de que, quanto maior o λ , os novos processos construtivos se tornam mais desvantajosos diante do processo clássico de duas direções de nervuras ortogonais aos eixos cartesianos.

Uma explicação para esse acréscimo considerável de aço é o aumento do momento positivo nas nervuras centrais quando rotacionadas, pois seu vão (aproximadamente 8,5 m para a laje 6x6 m²) é bem maior do que nas ortogonais (6 metros para a laje 6x6 m²). Outro fator é que nas nervuras mais próximas aos apoios, o momento positivo é pequeno, por vezes inexistente, gerando um alto momento negativo e uma elevada taxa de aço.

Um terceiro fator que contribui para o acréscimo dos momentos, e conseqüentemente do peso de aço, é o aumento do peso próprio da estrutura, pois a maior rigidez obtida com a rotação das nervuras não compensa o aumento do carregamento.

Os cálculos da quantidade de peso de aço para cada tipo foram realizados somente nas nervuras, visto que na capa é necessária somente uma armadura construtiva que será igual em todos os casos.

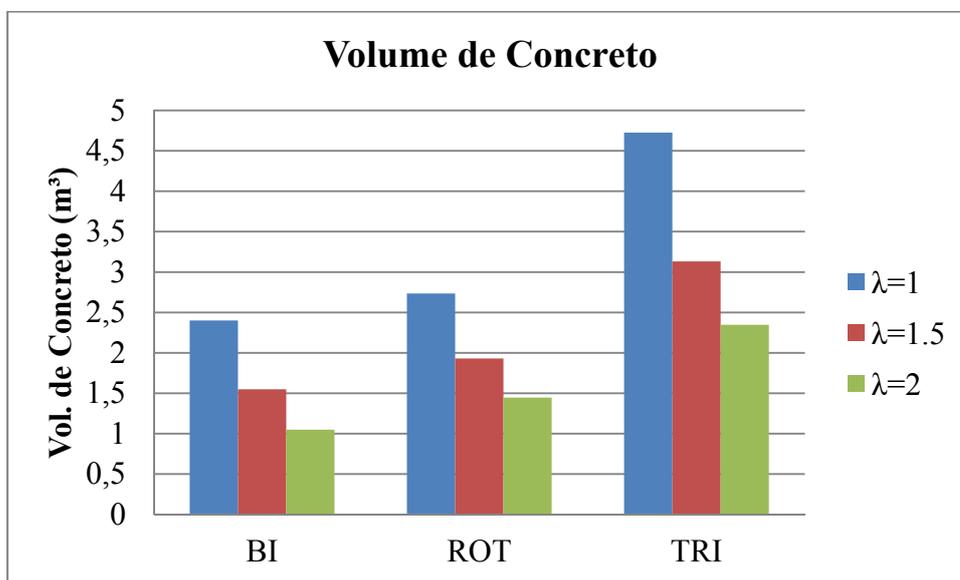


Figura 5.3 – Gráfico comparativo entre volume de concreto das nervuras no caso 1.

	$\lambda=1$			Diferença (%)		
	BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
Vol. de Concreto (m³)	2,4	2,73	4,73	13,95	96,91	72,80
	$\lambda=1.5$			Diferença (%)		
	BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
Vol. de Concreto (m³)	1,55	1,94	3,13	24,58	102	62,14
	$\lambda=2$			Diferença (%)		
	BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
Vol. de Concreto (m³)	1,05	1,45	2,35	37,86	123,57	62,18

Tabela 5.3 – Comparação entre volume de concreto das nervuras no caso 1.

Por último, é verificado o volume de concreto utilizado para fabricação de cada modelo. É possível observar que, nesse quesito, há também um acréscimo do volume quando as nervuras são rotacionadas, e isso se deve ao fato da colocação das nervuras a 45° produzir comprimentos maiores das nervuras do que quando elas são dispostas ortogonalmente. Além disso, quando rotacionadas há o acréscimo de cinco nervuras pequenas próximas aos apoios para completar o contorno da laje. Para a laje tridirecional o acréscimo de uma terceira fileira de nervura contribui consideravelmente no aumento do volume de concreto da estrutura.

Para $\lambda=1$, observa-se que o acréscimo de volume quando a laje é rotacionada é de 13,95%, e quando acrescida a terceira nervura, de 96,91%. Para $\lambda=1,5$, os valores são de 24,58% e 102%, respectivamente. Por fim, para $\lambda=2$, o aumento percentual é de 37,86% e 123,57% respectivamente.

Quanto à comparação da compressão das bielas na seção crítica C do pilar, com exceção do caso rotacionado para $\lambda=1,5$, todas as lajes apresentaram resultado satisfatório. No caso em que a biela colapsou, é necessário um acréscimo de altura útil da faixa que trabalha como laje, tornando esse caso ainda mais desvantajoso perante os outros, e tornando o modelo não mais laje lisa, e sim laje cogumelo devido ao acréscimo do capitel.

Com o acréscimo do volume de concreto com o aumento de λ , é possível ser conclusivo quando se diz que em nenhuma circunstância a laje rotacionada ou tridirecional apresentou vantagem perante a tradicional para essas lajes tipos.

5.2.

Análise dos Resultados para Lajes com Diversas Condições de Apoio

De posse dos resultados expostos no item 5.1 deste trabalho, foi possível optar pelo painel mais favorável para os novos modelos construtivos, a fim de tornar válida a averiguação de algum possível resultado positivo para estes sistemas. Com isso, foi constatado que a laje tipo com menor porcentagem de ineficácia, quando as novas lajes são comparadas com a convencional, foi aquela que apresenta λ igual a 1, ou seja, laje quadrada.

Com a utilização do mesmo padrão de laje, buscou-se nos casos restantes de Marcus algum resultado satisfatório, com o intuito de mostrar que a literatura, mesmo com suas diversas hipóteses simplificadoras, ainda seja em parte verídica quando se trata das vantagens da inclinação das nervuras.

Com os mesmos princípios explanados na seção anterior, é feita uma análise dos deslocamentos verticais, da quantidade de aço medido em quilos, e do volume de concreto resultante em cada modelo.

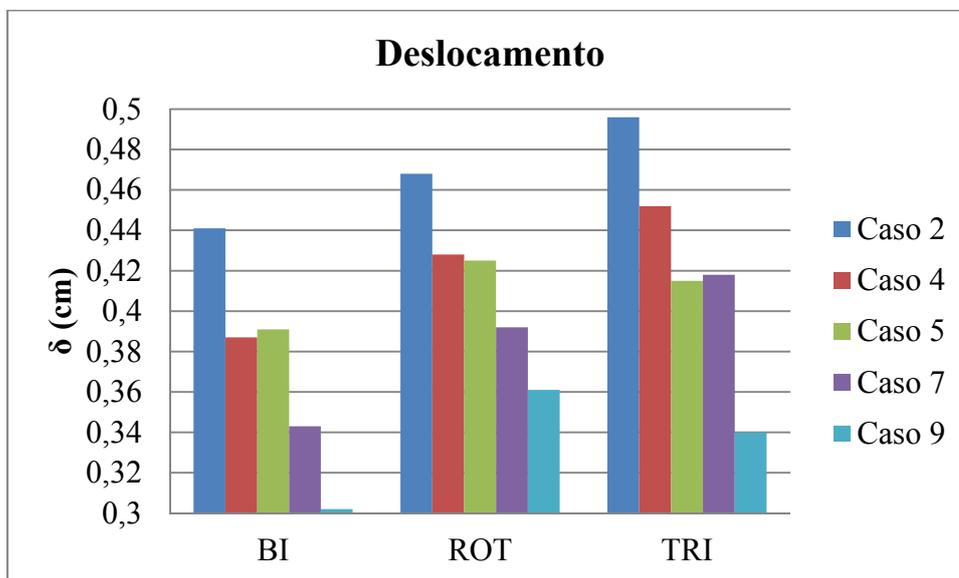


Figura 5.4 – Gráfico comparativo entre deslocamentos máximos.

		Caso 2			Diferença (%)		
		BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
δ (cm)		-0,44	-0,47	-0,50	6,12	12,47	5,98
		Caso 4			Diferença (%)		
		BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
δ (cm)		-0,39	-0,43	-0,45	10,59	16,80	5,61
		Caso 5			Diferença (%)		
		BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
δ (cm)		-0,39	-0,42	-0,41	8,70	6,14	2,35
		Caso 7			Diferença (%)		
		BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
δ (cm)		-0,34	-0,39	-0,42	14,29	21,87	6,63
		Caso 9			Diferença (%)		
		BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
δ (cm)		-0,30	-0,36	-0,34	19,54	12,58	5,82

Tabela 5.4 – Comparação entre deslocamentos máximos.

Através dos dados demonstrados na Tabela 5.4 e na figura 5.4, é possível observar que, em todos os casos, o deslocamento da laje bidirecional apresenta valores menores, ou seja, a laje proporciona maior rigidez à deformação do que os outros modelos, tendo como variação de 6,12% no caso dois, até 19,54% no caso nove, comparando-se às lajes bidirecionais e rotacionadas.

Observa-se, portanto, que mesmo com a condição de continuidade aplicada em cada laje, os engastes em ambos os casos são equivalentes, fazendo com que o aumento da rigidez na laje bidirecional seja equivalente ao aumento de rigidez da laje rotacionada.

Por fim, foi possível constatar que, para os casos 5 e 9, as lajes tridirecionais se tornaram mais rígidas do que as rotacionadas, com índices de 2,35% e 5,82%, respectivamente. Isso se deve ao fato de que, nestes casos, a terceira nervura colaborou para que o deslocamento da laje fosse menor, pois ela contém agora três direções de continuidade.

Conclui-se que, para esta laje tipo, em nenhuma das hipóteses apresentadas, a laje rotacionada e tridirecional apresentou vantagem diante da clássica bidirecional no quesito deflexão.

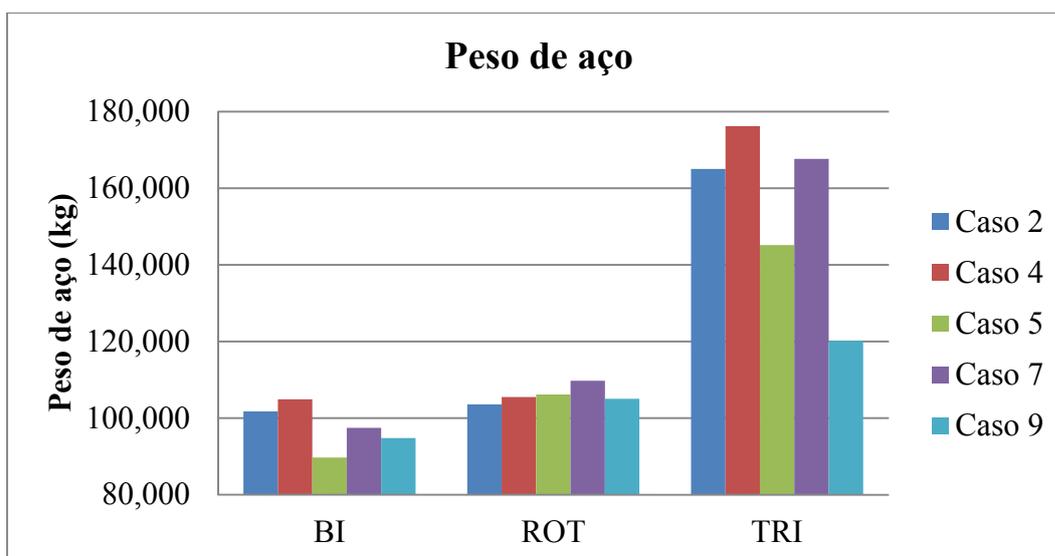


Figura 5.5 – Gráfico comparativo entre peso de aço nas nervuras.

	Caso 2			Diferença (%)		
	BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
Peso de aço (Kg)	101,75	103,59	165,02	1,81	62,18	59,30
	Caso 4			Diferença (%)		
	BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
Peso de aço (Kg)	104,91	105,50	176,21	0,56	67,96	67,02
	Caso 5			Diferença (%)		
	BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
Peso de aço (Kg)	89,74	106,18	145,19	18,31	61,78	36,74
	Caso 7			Diferença (%)		
	BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
Peso de aço (Kg)	97,49	109,77	167,66	12,60	71,98	52,74
	Caso 9			Diferença (%)		
	BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
Peso de aço (Kg)	94,80	105,07	120,16	10,84	26,75	14,36

Tabela 5.5 – Comparação entre peso de aço nas nervuras.

Com o surgimento do engaste nos vértices das lajes, ocorre, conseqüentemente, um aumento significativo do momento negativo, proporcionando, para o dimensionamento, uma maior quantidade de aço resultante se comparado com a laje simplesmente apoiada em seus bordos.

Para que os novos métodos sejam vantajosos neste aspecto, é necessário que a elevação do momento positivo na nervura central, nos casos que ocorreram rotação, seja balanceada através da diminuição dos momentos negativos nas nervuras rotacionadas próximas aos vértices da laje.

No entanto, não foi observado este balanceamento, tornando mais onerosos os métodos novos devido ao aumento, tanto do momento positivo na nervura central, quanto o aumento significativo dos momentos negativos nas nervuras próximas aos apoios.

Para o caso quatro, a diferença é de apenas 0,56%, sendo este o caso menos desvantajoso no quesito peso de aço, se comparado a bidirecional e rotacionada. O caso cinco apresentou maior disparidade com 18,31% entre estes modelos.

O modelo tridirecional continua apresentando maior custo diante do clássico, variando de 26,7% até 71,99% para os casos nove e sete respectivamente.

Fica claro que em nenhuma hipótese das apresentadas, o construtor obterá economia no quesito taxa de aço.

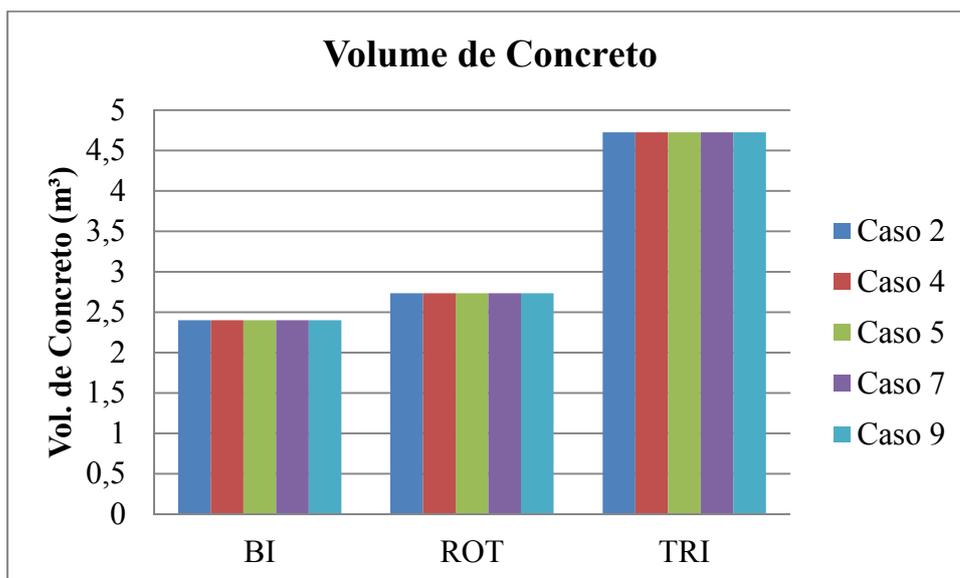


Figura 5.6 – Gráfico comparativo entre volume de concreto das nervuras.

	Caso 2			Diferença (%)		
	BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
Vol. de Concreto (m ³)	2,4	2,73	4,73	13,95	96,91	72,80
	Caso 4			Diferença (%)		
	BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
Vol. de Concreto (m ³)	2,4	2,73	4,73	13,95	96,91	72,80
	Caso 5			Diferença (%)		
	BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
Vol. de Concreto (m ³)	2,4	2,73	4,73	13,95	96,91	72,80
	Caso 7			Diferença (%)		
	BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
Vol. de Concreto (m ³)	2,4	2,73	4,73	13,95	96,91	72,80
	Caso 9			Diferença (%)		
	BI	ROT	TRI	BI/ROT	BI/TRI	ROT/TRI
Vol. de Concreto (m ³)	2,4	2,73	4,73	13,95	96,91	72,80

Tabela 5.6 – Comparação entre volume de concreto nas nervuras.

Com a inclinação das nervuras, assim como no caso da laje simplesmente apoiada em seus bordos, a quantidade de volume de concreto necessário para estes novos modelos sofre um aumento de 13,95% para as rotacionadas, e 96,91% para as tridirecionais, quando comparadas com as bidirecionais.

Assim como para as armaduras, o volume de concreto acrescido devido a essas novas tecnologias apresentam mais gastos ao construtor. Por não apresentarem vantagens na rigidez global do sistema, assim como um maior custo em materiais, fica provado que, para os modelos estudados, os novos sistemas construtivos não apresentam vantagens diante dos clássicos.

Os métodos clássicos da literatura não contemplam o acréscimo de material devido à rotação, assim como não demonstram que, ao utilizar os novos sistemas estruturais, o peso próprio da estrutura aumenta consideravelmente, ocasionando um maior deslocamento da mesma. Além disto, a literatura utiliza de métodos conservadores, os quais fazem uso de hipóteses simplificadoras, como a não utilização do efeito de torção nas nervuras, que, com o modelo com *offset*, demonstrou ter uma grande diferença nos momentos finais.

5.3.

Análise Numérica de Lajes Contínuas ligadas por Vigas Faixas Nervuradas

Ao observar o deslocamento global da estrutura bidirecional devido à mesma ter geometria e carregamento simétricos, verifica-se a simetria também dos deslocamentos, com menor deformação na laje central, devido à continuidade dos dois sentidos principais, x e y.

As vigas faixas trabalham em conjunto com a laje, apresentando deslocamentos verticais relativamente menores do que os das lajes, pois esses elementos dão uma maior rigidez à estrutura. A Figura 5.7 exibe o deslocamento em centímetros no Estado Limite de Serviço da estrutura bidirecional.

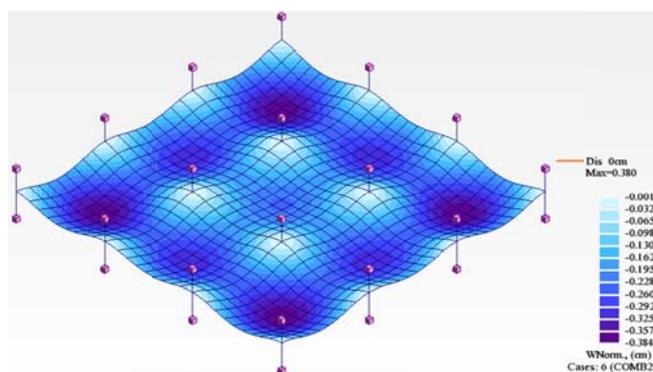


Figura 5.7 – Deslocamentos da laje bidirecional.

Para as lajes com nervuras rotacionadas, o comportamento da estrutura não é perfeitamente simétrico, pois, com a inclinação, um dos sentidos apresenta uma maior quantidade de nervuras, tornando mais rígido um dos eixos devido ao engaste com a laje adjacente. A Figura 5.8 apresenta a deformada da estrutura.

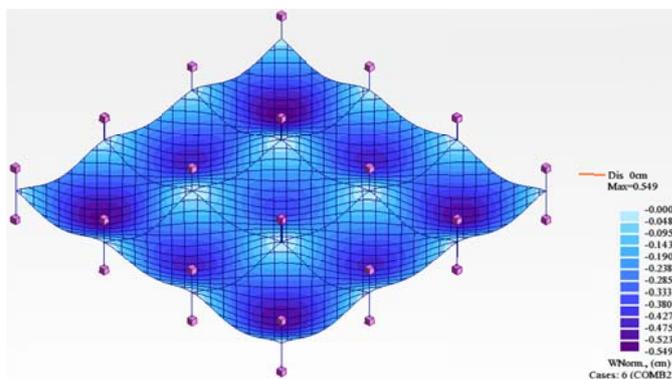


Figura 5.8 – Deslocamentos da laje rotacionada.

O mesmo fenômeno acontece para a laje rotacionada com faixas nervuradas, sendo um dos eixos mais rígido. A Figura 5.9 mostra os deslocamentos finais da estrutura para o Estado Limite de Serviço, sendo possível observar que as nervuras na terceira direção trabalham como faixas, tendo, portanto o comportamento desejado.

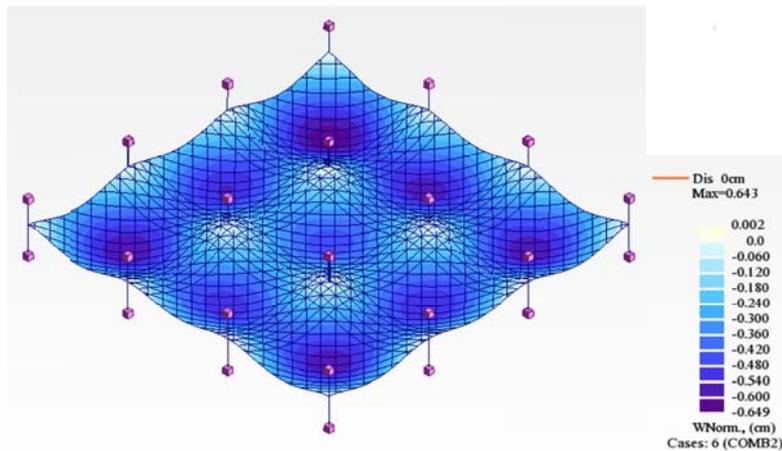


Figura 5.9 – Deslocamentos da laje com faixas nervuradas.

A Tabela 5.7 expõe os deslocamentos para a laje central de cada um dos três casos, relacionando a efetividade de cada uma percentualmente, sendo posteriormente demonstrado através da figura 5.10.

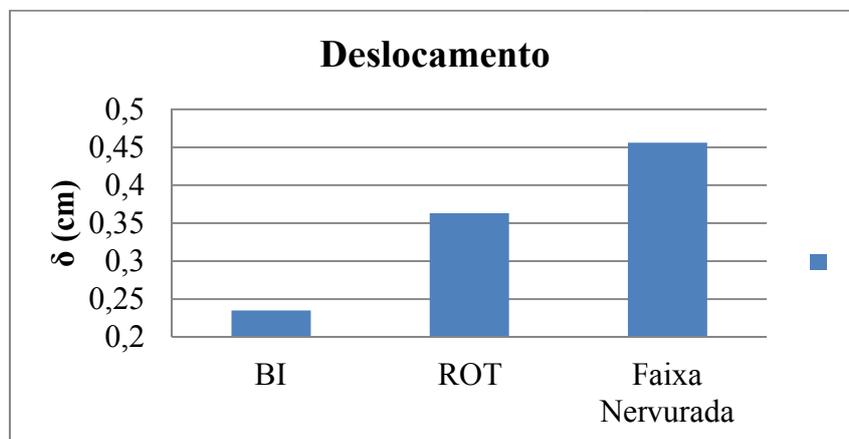


Figura 5.10 – Gráfico comparativo entre deslocamentos máximos .

δ (cm)	-			Diferença (%)		
	BI	ROT	F.N.	BI/ROT	BI/F.N.	ROT/F.N.
	-0,23	-0,36	-0,46	54,47	94,04	25,62

Tabela 5.7 – Comparação entre deslocamentos máximos.

Para os modelos apresentados formados por nove placas, a rotação das nervuras, assim como demonstrado para todos os casos de Marcus, não demonstrou vantagem, pois o deslocamento da laje central foi 54,47% maior do que no caso da laje bidirecional. A utilização das nervuras como faixa conectora entre lajes também não apresentou vantagem diante da clássica, obtendo um deslocamento de 94,04% maior do que a laje bidirecional.

Conclui-se que no quesito deslocamento, a utilização de nervuras ao invés de faixas maciças de concreto demonstra uma desvantagem significativa devido ao grande aumento de deformação, tornando, assim, a laje mais flexível.

Para uma comparação mais fidedigna, foi dimensionado não só as nervuras da laje, mas também as faixas, sendo elas maciças ou nervuradas. A Tabela 5.8 e a figura 5.11 apresentam os valores de peso de aço já somados para esses elementos na laje central.

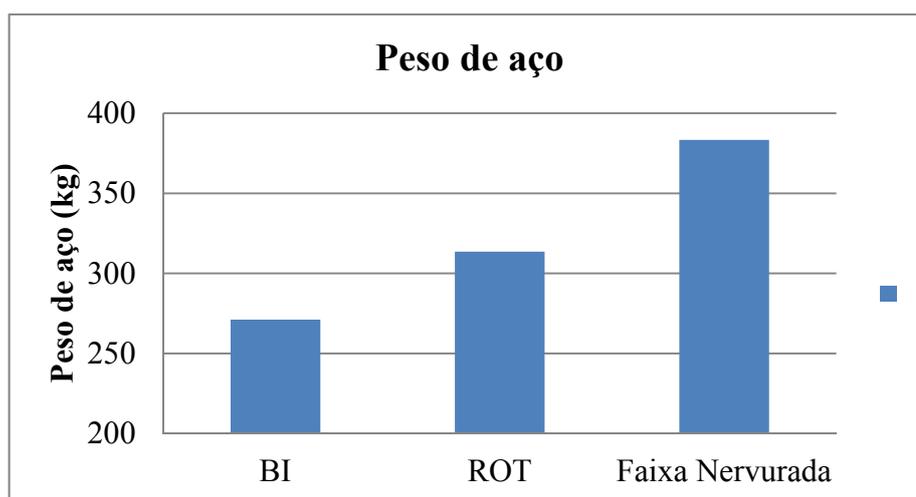


Figura 5.11 – Gráfico comparativo entre peso de aço das nervuras e vigas faixa.

Peso de aço (Kg)	-			Diferença (%)		
	BI	ROT	F.N.	BI/ROT	BI/F.N.	ROT/F.N.
	271,13	313,57	383,32	15,65	41,38	22,24

Tabela 5.8 – Comparação entre peso de aço das nervuras e vigas faixa.

No quesito peso de aço, o aumento ao utilizar a faixa nervurada foi significativo, sendo 41,38% maior do que no caso da laje bidirecional. Para a região das faixas, isso se deve à diminuição da inércia e volume de concreto, acarretando em uma maior área de aço necessária para combater os momentos.

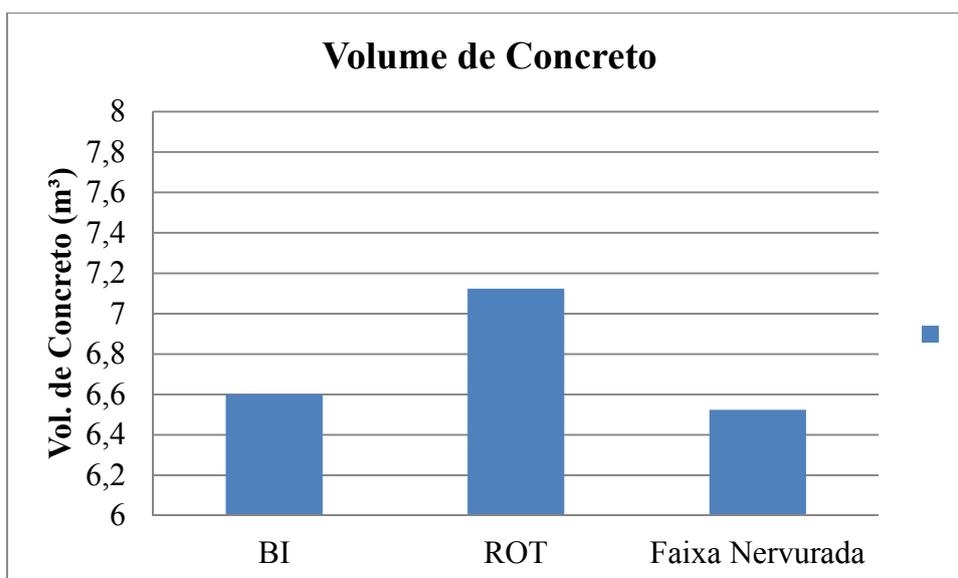


Figura 5.12 – Gráfico comparativo entre volume de concreto das nervuras e vigas faixa.

Vol. de Concreto (m³)	-			Diferença (%)		
	BI	ROT	F.N.	BI/ROT	BI/F.N.	ROT/F.N.
	6,6	7,12	6,52	7,94	-1,15	-8,42

Tabela 5.9 – Comparação entre volume de concreto das nervuras e vigas faixa.

Por fim, ao analisar o volume de concreto necessário para a construção de cada sistema, observa-se, para a laje com faixas nervuradas, a diminuição no valor de 1,15% se comparada à laje com nervuras ortogonais e faixas maciças. Essa diferença demonstraria uma pequena vantagem caso as nervuras fossem suficientes para evitar o esmagamento das bielas (Tabela 4.11), o que não acontece. Torna-se necessário, portanto, o acréscimo da área da seção transversal das vigas faixas, a fim de evitar o colapso por cisalhamento.

Esse acréscimo não é necessário quando são utilizadas faixas maciças, pois as bielas no contorno crítico dos pilares apresentaram tensão de cisalhamento solicitante (τ_{sd}) menor do que a resistente (τ_{rd2}), estando, assim, íntegra na verificação ao cisalhamento no Estado Limite de Utilização. Esta região maciça acresce um valor que equipara, ou até torna maior, o volume de concreto no modelo com faixas nervuradas, tornando-a não mais vantajosa nesse quesito.