

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Lucas Pergher Silva

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE LAJES NERVURADAS E
MACIÇAS EM FUNÇÃO DOS VÃOS ENTRE APOIOS**

Porto Alegre
dezembro 2010

LUCAS PERGHER SILVA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE LAJES NERVURADAS E
MACIÇAS EM FUNÇÃO DOS VÃOS ENTRE APOIOS**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Civil

Orientador: Roberto Domingo Rios

Porto Alegre
dezembro 2010

LUCAS PERGHER SILVA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE LAJES NERVURADAS E
MACIÇAS EM FUNÇÃO DOS VÃOS ENTRE APOIOS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2010

Prof. Roberto Domingo Rios
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Rubem Clécio Schwingel (UFRGS)
Me. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof.a Virgínia Maria Rosito d'Avila (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Roberto Domingo Rios (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho ao meu avô Umberto Pergher, uma
pessoa tão especial e um exemplo a ser seguido.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Roberto Domingo Rios, orientador deste trabalho, pelos conhecimentos valiosos repassados, pela sua paciência, dedicação e amizade.

Agradeço à Profa. Carin Maria Schmitt, pela atenção e pelo acompanhamento durante todas as etapas deste trabalho, ensinando tudo aquilo que é necessário para se realizar um bom trabalho de pesquisa e por sempre ajudar quando solicitada.

Agradeço imensamente aos meus pais, Gerson Luis da Silva e Selene Beatriz Castellã Pergher, pela educação, incentivo, sabedoria, amor e por estarem sempre presentes na minha vida, me ajudando a encontrar o caminho da felicidade.

Agradeço a minha namorada Aline Lazari da Silva Cabral, por me incentivar e ouvir nos momentos mais difíceis, por compartilhar comigo momentos inteiramente felizes, por ser minha inspiração e pelo futuro promissor que teremos juntos.

Agradeço a minha irmã Natasha Pergher Silva, pelos momentos bons que passamos juntos e pelo companheirismo e amizade que sempre tivemos, apesar das brigas.

Agradeço aos meus avós Umberto Pergher e Jacy Castellã Pergher, pelo esforço em tentar sempre me fazer feliz e pelo imenso carinho e atenção em todas as etapas da minha vida.

Agradeço aos engenheiros responsáveis pela empresa de cálculo estrutural Vantec, Carlos de Moraes e Edemir Simonato, pela confiança depositada e pela oportunidade de crescimento profissional e pessoal oferecida.

Agradeço aos engenheiros da empresa de cálculo estrutural Estádio 3 pela oportunidade de emprego, pela confiança na minha capacidade e pelo conhecimento compartilhado.

Agradeço a todos os meus colegas da Engenharia Civil, por compartilhar conhecimento e por tornar a faculdade mais divertida.

Não são os grandes planos que dão certo, são os pequenos
detalhes.

Stephen Kanitz

RESUMO

SILVA, L. P. **Estudo comparativo entre lajes nervuradas e maciças em função dos vãos entre apoios**. 2010. 85 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este trabalho versa sobre a comparação entre lajes nervuradas e maciças para diferentes vãos, analisando-se, para cada situação, o consumo de materiais das mesmas a fim de se obter um melhor aproveitamento tanto do concreto quanto do aço, a partir da obtenção dos esforços e deslocamentos da estrutura. Para os diferentes conjuntos de vãos são calculados os esforços e deslocamentos da laje bidirecional mediante tabelas desenvolvidas a partir da equação diferencial das placas (Teoria da Flexão das Placas) e depois, calculados também pelo SAP2000 para, a partir dos valores encontrados, definir a altura da laje que seria a mais indicada considerando-se o menor consumo de materiais. São apresentados além das definições e características das lajes maciças e nervuradas, os critérios para o dimensionamento de lajes, os quais apresentam as considerações relativas ao cobrimento nominal e classe de agressividade ambiental, assim como estados limites, dimensões exigidas pela norma, deslocamentos máximos, taxas de armadura admissíveis e as cargas que devem ser consideradas para o cálculo. Quadros com a distribuição das armaduras, utilização de concreto e aço e dados relativos às lajes, além de gráficos para comparação do consumo de materiais em função dos vãos entre apoios e tipo de laje são dispostos ao longo do trabalho. Após uma comparação dos resultados obtidos, é feita uma discussão sobre os mesmos, a partir dos temas abordados no desenvolvimento do trabalho. Finalmente, conclui-se o tipo de laje mais indicada tendo-se em vista a menor utilização de materiais para as diversas combinações de vãos entre apoios estudadas, determinando, também, as suas dimensões e consumo de concreto e aço. Percebe-se, para as condições estudadas neste trabalho e em função do consumo de concreto, que quando se tem apoio simples nos quatro bordos, para vãos menores de 6 m, aproximadamente, a laje indicada é a maciça, enquanto que para vãos maiores, as nervuradas apresentam o menor consumo de materiais. Quando a condição de contorno é o engaste, o valor é de aproximadamente 8 m, sendo que para vãos menores a maciça é a mais indicada enquanto que para os vãos maiores, a nervurada é a melhor escolha.

Palavras-chave: lajes nervuradas; lajes maciças; vãos entre apoios; teoria da flexão das placas; consumo de materiais.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: representação esquemática do delineamento da pesquisa	17
Figura 2: laje nervurada com nervuras aparentes	21
Figura 3: laje nervurada com superfície plana, utilizando material inerte	21
Figura 4: esforços solicitantes no elemento de placa	33
Figura 5: coeficientes de cálculo para uma laje retangular simplesmente apoiada no contorno com sua carga uniformemente distribuída	35
Figura 6: coeficientes de cálculo para uma laje retangular engastada em todo o contorno, com carga uniformemente distribuída	36
Figura 7: momentos e reações de apoio	38
Figura 8: características da laje nervurada moldada a partir da fôrma RO 180	45
Figura 9: características da laje nervurada moldada a partir da fôrma RO 210	46
Figura 10: características das lajes nervuradas moldadas a partir da fôrma RO 800	46
Figura 11: características da laje nervurada moldada a partir da fôrma RO 900	46
Figura 12: exemplo de cálculo de momentos fletores de uma laje quadrada maciça de 6m pelo SAP2000.....	65
Figura 13: exemplo de cálculo da flecha de uma laje quadrada maciça de 6m pelo SAP2000	66
Figura 14: comparação do volume de concreto entre lajes nervuradas quadradas apoiadas	69
Figura 15: comparação do volume de concreto entre lajes nervuradas e maciças quadradas apoiadas	70
Figura 16: comparação do volume de concreto entre lajes nervuradas quadradas engastadas	72
Figura 17: comparação do volume de concreto entre lajes nervuradas e maciças quadradas engastadas	73
Figura 18: comparação da quantidade de aço entre lajes nervuradas quadradas apoiadas	74
Figura 19: comparação da quantidade de aço entre lajes nervuradas e maciças apoiadas	75
Figura 20: comparação da quantidade de aço entre lajes nervuradas engastadas	77
Figura 21: comparação da quantidade de aço entre lajes nervuradas e maciças engastadas	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: classes de agressividade ambiental	24
Quadro 2: correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$	25
Quadro 3: limites para deslocamentos	29
Quadro 4: valores mínimos das cargas verticais	30
Quadro 5: taxas mínimas de armadura de flexão	31
Quadro 6: cálculo do consumo de materiais para lajes quadradas maciças apoiadas	41
Quadro 7: cálculo do consumo de materiais para lajes retangulares maciças apoiadas ...	42
Quadro 8: cálculo do consumo de materiais para lajes quadradas maciças engastadas ...	43
Quadro 9: cálculo do consumo de materiais para lajes retangulares maciças engastadas	44
Quadro 10: cálculo do consumo de materiais para lajes quadradas nervuradas (RO 180) apoiadas	48
Quadro 11: cálculo do consumo de materiais para lajes retangulares nervuradas (RO 180) apoiadas	48
Quadro 12: cálculo do consumo de materiais para lajes quadradas nervuradas (RO 210) apoiadas	49
Quadro 13: cálculo do consumo de materiais para lajes retangulares nervuradas (RO 210) apoiadas	50
Quadro 14: cálculo do consumo de materiais para lajes quadradas nervuradas (RO 800 e altura livre da fôrma de 350 mm) apoiadas	51
Quadro 15: cálculo do consumo de materiais para lajes retangulares nervuradas (RO 800 e altura livre da fôrma de 350 mm) apoiadas	52
Quadro 16: consumo de materiais para lajes quadradas nervuradas (RO 800 e altura livre da fôrma de 400 mm) apoiadas	53
Quadro 17: consumo de materiais para lajes retangulares nervuradas (RO 800 e altura livre da fôrma de 400 mm) apoiadas	54
Quadro 18: consumo de materiais para lajes quadradas nervuradas (RO 900) apoiadas .	55
Quadro 19: consumo de materiais para lajes retangulares nervuradas (RO 900) apoiadas	56
Quadro 20: consumo de materiais para lajes quadradas nervuradas (RO 180) engastadas	57
Quadro 21: consumo de materiais para lajes retangulares nervuradas (RO 180) engastadas	58
Quadro 22: consumo de materiais para lajes quadradas nervuradas (RO 210) engastadas	59
Quadro 23: consumo de materiais para lajes retangulares nervuradas (RO 210) engastadas	59

Quadro 24: consumo de materiais para lajes quadradas nervuradas (RO 800 e altura livre da fôrma de 350 mm) engastadas	60
Quadro 25: consumo de materiais para lajes retangulares nervuradas (RO 800 e altura livre da fôrma de 350 mm) engastadas	61
Quadro 26: consumo de materiais para lajes quadradas nervuradas (RO 800 e altura livre da fôrma de 400 mm) engastadas	62
Quadro 27: consumo de materiais para lajes retangulares nervuradas (RO 800 e altura livre da fôrma de 400 mm) engastadas	62
Quadro 28: consumo de materiais para lajes quadradas nervuradas (RO 900) engastadas	63
Quadro 29: consumo de materiais para lajes retangulares nervuradas (RO 900) engastadas	64
Quadro 30: comparação do volume de concreto para as lajes quadradas apoiadas	68
Quadro 31: comparação do volume de concreto para as lajes retangulares apoiadas	68
Quadro 32: comparação do volume de concreto para as lajes quadradas engastadas	71
Quadro 33: comparação do volume de concreto para as lajes retangulares engastadas ...	71
Quadro 34: comparação do consumo de aço para as lajes quadradas apoiadas	75
Quadro 35: comparação do consumo de aço para as lajes retangulares apoiadas	76
Quadro 36: comparação do consumo de aço para as lajes quadradas engastadas	78
Quadro 37: comparação do consumo de aço para as lajes retangulares engastadas	79
Quadro 38: definição do tipo e características da laje com o menor consumo de materiais para as lajes quadradas apoiadas	82
Quadro 39: definição do tipo e características da laje com o menor consumo de materiais para as lajes retangulares apoiadas	82
Quadro 40: definição do tipo e características da laje com o menor consumo de materiais para as lajes quadradas engastadas	83
Quadro 41: definição do tipo e características da laje com o menor consumo de materiais para as lajes retangulares engastadas	83

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 MÉTODO DE PESQUISA	15
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	15
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	15
2.2.1 Objetivo principal	15
2.2.2 Objetivos secundários	16
2.3 PRESSUPOSTO	16
2.4 DELIMITAÇÕES	16
2.5 LIMITAÇÕES	16
2.6 DELINEAMENTO	17
2.6.1 Pesquisa bibliográfica	18
2.6.2 Definição das lajes estudadas	18
2.6.3 Cálculo das solicitações pela Teoria da Flexão das Placas	18
2.6.4 Cálculo das solicitações pelo SAP2000	18
2.6.5 Determinação das espessuras e consumo de materiais das lajes	19
2.6.6 Comparação dos resultados obtidos	19
2.6.7 Análise final e conclusões	19
3 CARACTERÍSTICAS DAS LAJES	20
3.1 CARACTERÍSTICAS DAS LAJES NERVURADAS	20
3.2 CARACTERÍSTICAS DAS LAJES MACIÇAS	23
4 CRITÉRIOS PARA DIMENSIONAMENTO DAS LAJES	24
4.1 CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL	24
4.2 COBRIMENTO NOMINAL	25
4.3 ESTADOS LIMITES	25
4.3.1 Estados limites últimos	26
4.3.2 Estados limites de serviço	26
4.4 LIMITES MÍNIMOS	26
4.4.1 Lajes maciças	27
4.4.2 Lajes nervuradas	27
4.5 DESLOCAMENTOS LIMITES	28
4.6 CARGAS VERTICAIS MÍNIMAS	30
4.7 TAXAS DE ARMADURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS	30
5 MÉTODO DE CÁLCULO DAS LAJES	32

5.1 TEORIA DA FLEXÃO DAS PLACAS	32
5.2 TABELAS DE LAJES PARA O CÁLCULO	34
6 DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE MATERIAIS	39
6.1 CONSUMO DE MATERIAIS PARA AS LAJES MACIÇAS	39
6.1.1 Lajes maciças apoiadas	41
6.1.2 Lajes maciças engastadas	43
6.2 CONSUMO DE MATERIAIS PARA AS LAJES NERVURADAS	44
6.2.1 Lajes nervuradas apoiadas	47
6.2.1.1 Lajes nervuradas apoiadas e moldadas a partir da cubeta RO 180	47
6.2.1.2 Lajes nervuradas apoiadas e moldadas a partir da cubeta RO 210	49
6.2.1.3 Lajes nervuradas apoiadas e moldadas a partir da cubeta RO 800	51
6.2.1.4 Lajes nervuradas apoiadas e moldadas a partir da cubeta RO 900	55
6.2.2 Lajes nervuradas engastadas	57
6.2.2.1 Lajes nervuradas engastadas e moldadas a partir da cubeta RO 180	57
6.2.2.2 Lajes nervuradas engastadas e moldadas a partir da cubeta RO 210	58
6.2.2.3 Lajes nervuradas engastadas e moldadas a partir da cubeta RO 800	60
6.2.2.4 Lajes nervuradas engastadas e moldadas a partir da cubeta RO 900	63
6.3 CÁLCULO PELO SAP2000	64
7 COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS	67
7.1 COMPARAÇÃO DO VOLUME DE CONCRETO	67
7.1.1 Volume de concreto para as lajes apoiadas	67
7.1.2 Volume de concreto para as lajes engastadas	70
7.2 COMPARAÇÃO DA QUANTIDADE DE AÇO	73
7.2.1 Quantidade de aço para as lajes apoiadas.....	74
7.2.2 Quantidade de aço para as lajes engastadas	77
8 CONCLUSÃO	80
REFERÊNCIAS	85
APÊNDICE A	86

1 INTRODUÇÃO

A construção civil evoluiu consideravelmente nos últimos anos, tendência esta que deve ser mantida. Portanto, novas técnicas e materiais vêm sendo utilizados a fim de melhorar o desempenho das construções e fazer com que os gastos com a execução fiquem cada vez menores. Esta exigência torna necessários estudos comparativos entre diferentes tipos de estruturas e métodos construtivos para que se possa possibilitar a escolha adequada da estrutura que apresenta melhor comportamento e menor consumo de materiais, o que diminuiria os custos.

Muito se discute em relação às diferenças quanto à viabilidade técnica e econômica referentes às lajes maciças e nervuradas. As lajes maciças tiveram seu uso mais difundido ao longo do tempo devido a sua simplicidade, enquanto que as lajes nervuradas surgiram na construção civil apenas a partir de 1854, patenteadas por William Boutland Wilkinson. Desta forma, deve-se comparar esses dois tipos de laje, que são eficazes e que possuem características próprias.

Admite-se que as lajes nervuradas, por apresentarem maior altura útil, resistem melhor à flexão, sendo capazes de admitir maiores vãos, com um menor consumo de materiais e consequente diminuição do peso, visto que o concreto que seria tracionado na parte inferior é substituído por um material inerte ou é simplesmente deixado um espaço vazio. Porém, nem sempre as lajes nervuradas são mais adequadas quando comparadas às maciças, tomando como critérios de comparação a facilidade de execução, espessura mínima disposta nas normas, facilidade de obtenção de fôrmas e o tipo de apoio nos contornos, já que quando a laje é simplesmente apoiada não se tem momentos nos apoios (diferentemente de quando se tem engaste no contorno, fazendo com que haja um momento negativo).

Neste trabalho, as lajes nervuradas e maciças foram comparadas variando o vão entre os apoios, assim como condições de contorno. Tais lajes foram verificadas com base na flecha e nos esforços para que esta obtivesse um melhor aproveitamento do concreto e do aço (de preferência no Domínio 3) e respeitasse as normas brasileiras (como a NBR 6118/2007 que impõe dimensões mínimas de espessura, por exemplo), o que resultou em um determinado

consumo de materiais para os diferentes vãos entre apoios. Feito isso, foram comparados esses consumos de concreto e aço dos dois tipos de lajes para que se verificasse qual deles era o menor, facilitando a escolha prévia da técnica empregada na execução de uma estrutura com características semelhantes às analisadas.

Os cálculos foram realizados pelo método da Teoria da Flexão de Placas, com a utilização de tabelas de lajes. Também foi utilizado para o cálculo das lajes o programa computacional SAP2000, que utiliza o método dos elementos finitos.

Os resultados obtidos foram dispostos em forma de quadros e gráficos, a fim de melhorar a visualização das diferenças entre os dois tipos de lajes comparadas e fazer com que, com uma simples consulta ao material, o leitor possa encontrar os dados referentes às características apresentadas (espessura, consumo de materiais, domínio) nas lajes maciças e nas nervuradas para cada vão entre apoios, e, com isso, saber qual delas demanda o menor consumo de concreto e aço para o projeto da estrutura.

Assim, após esta introdução, tem-se no segundo capítulo a apresentação do método de pesquisa do trabalho, incluindo a questão de pesquisa, objetivos, pressupostos, delimitações, limitações e delineamento que orientaram a realização deste trabalho. No terceiro capítulo são apresentadas as diferentes características das lajes maciças e nervuradas, com suas vantagens e desvantagens, assim como definições dessas lajes obtidas na pesquisa bibliográfica e explicações referentes ao seu comportamento.

O quarto capítulo mostra os critérios para o dimensionamento das lajes, no qual são comentados alguns dos fatores que são importantes para o cálculo, como a classe de agressividade ambiental, o cobrimento nominal, os estados limites, as mínimas dimensões geométricas, os deslocamentos máximos que podem ocorrer e as cargas mínimas que devem ser consideradas para um determinado local segundo sua utilização futura. O quinto capítulo apresenta o método de cálculo que foi utilizado para a realização deste trabalho, isto é, a utilização de tabelas de lajes desenvolvidas a partir da equação diferencial das placas, chamada Teoria da Flexão das Placas. Também são apresentadas neste capítulo as tabelas utilizadas para o cálculo.

No sexto capítulo, são mostrados os resultados obtidos através dos cálculos. Estes resultados estão dispostos em forma de tabelas que contém a altura escolhida para as lajes maciças ou o

tipo de fôrma escolhida para as lajes nervuradas, além das características relacionadas à distribuição de armadura e o consumo de concreto e aço. Também há uma descrição sobre a comparação dos cálculos feitos pela teoria da flexão das placas em relação aos cálculos obtidos pelo SAP2000.

Os resultados são comparados por meio de tabelas e gráficos no sétimo capítulo, no qual estão dispostos tabelas e gráficos que comparam o volume de concreto e quantidade de aço para todas as combinações de vãos estudados e para as duas diferentes condições de contorno. Por fim, no oitavo capítulo, têm-se as conclusões do trabalho, com algumas análises relativas aos resultados observados, assim como a definição do tipo e características da laje que requer o menor consumo de materiais para as combinações estudadas dos vãos entre apoios para as lajes simplesmente apoiadas nos quatro bordos e para as engastadas.

2 MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo, serão apresentados tópicos referentes ao método utilizado para realizar o trabalho, como a questão de pesquisa, objetivos do trabalho, pressuposto, delimitações, limitações e delineamento.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: qual o tipo de laje, maciça ou nervurada, que possui um menor consumo de concreto e aço em função dos vãos entre apoios, para diferentes condições de contorno, considerando o melhor aproveitamento desses materiais?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho consiste na determinação de qual tipo de laje, maciça ou nervurada, possui um menor consumo de concreto e de aço em função dos vãos entre apoios, para diferentes condições de contorno, considerando o melhor aproveitamento desses materiais.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários deste trabalho são a determinação da espessura em função do vão entre apoios e do consumo de materiais, nas diferentes condições de contorno para lajes:

- a) maciças;
- b) nervuradas.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressupostos que o cálculo pela Teoria da Flexão das Placas apresenta bons resultados para as lajes em questão, assim como os obtidos através do SAP2000, desde que seja adequadamente modelado, e que os apoios não sofrem deformações, isto é, são indeslocáveis.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo de lajes retangulares e quadradas com dimensões compatíveis aos projetos correntes destinados a escritórios.

2.5 LIMITAÇÕES

As limitações da pesquisa são abaixo apresentadas:

- a) a comparação se refere ao consumo de concreto e de aço;
- b) o trabalho ficou limitado ao cálculo das lajes bidirecionais, isto é, lajes armadas em duas direções;
- c) não foi analisada a frequência da laje ou efeitos de vibração;
- d) foram analisadas as fôrmas para lajes nervuradas de apenas uma empresa.

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 1 e detalhadas nos próximos itens:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição das lajes estudadas;
- c) cálculo das solicitações pela Teoria da Flexão das Placas;
- d) cálculo das solicitações pelo SAP2000;
- e) determinação das espessuras e consumo de materiais das lajes;
- f) comparação dos resultados obtidos;
- g) análise final e conclusões.

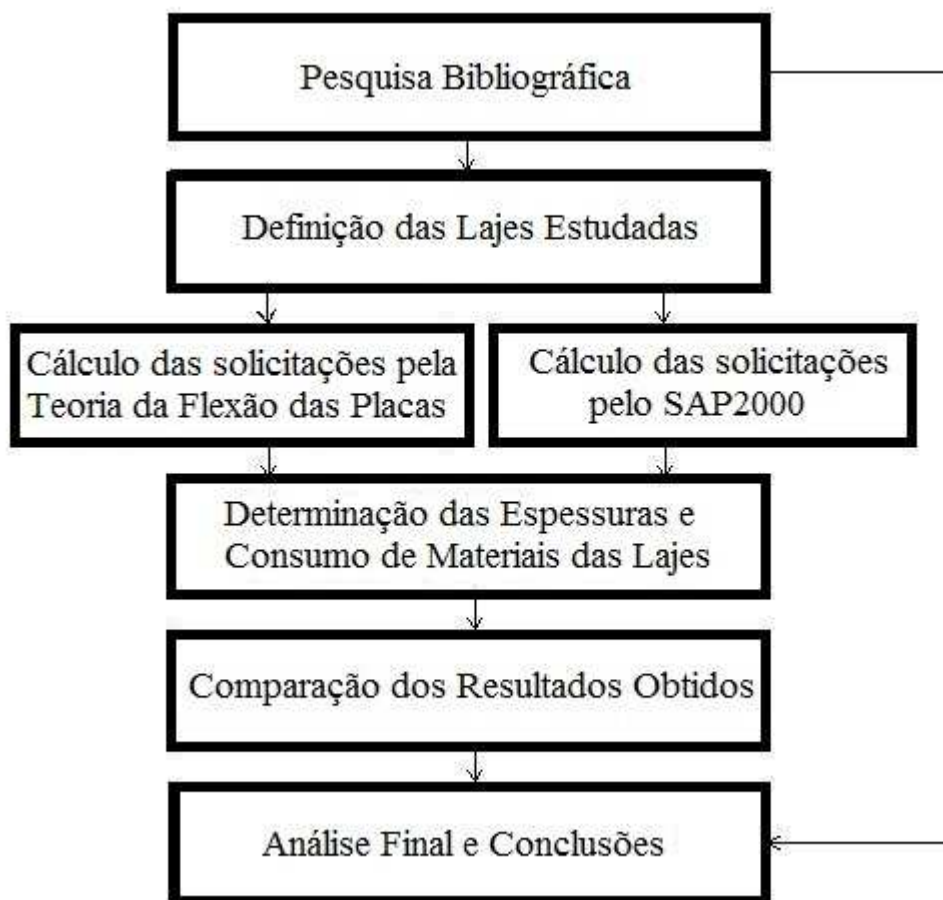


Figura 1: representação esquemática do delineamento da pesquisa

2.6.1 Pesquisa bibliográfica

A pesquisa bibliográfica foi direcionada a um aprofundamento do conhecimento relacionado às lajes maciças e nervuradas, sendo estudadas nesta etapa as características de cada uma delas e a forma de calcular as deformações e esforços, tanto através das tabelas de lajes (pela teoria da flexão das placas) quanto pelo programa de cálculo estrutural SAP2000 (que utiliza o método dos elementos finitos). Por ser uma etapa de obtenção de conhecimento, ela teve uma duração maior que as outras etapas, estendendo-se do início até o final do trabalho.

2.6.2 Definição das lajes estudadas

Esta etapa teve como característica a compreensão e detalhamento do problema para tornar possível a definição dos valores que foram estudados neste trabalho, como o carregamento que foi utilizado para o cálculo da laje e as condições de contorno.

2.6.3 Cálculo das solicitações pela Teoria da Flexão das Placas

Esta etapa foi definida pela aplicação dos cálculos para obtenção das deformações e esforços pela Teoria da Flexão das Placas. Essa forma de cálculo consiste na substituição dos valores dos vãos e condições de contorno para encontrar nas tabelas os valores correspondentes às flechas, momentos fletores e reações para cada situação de cálculo.

2.6.4 Cálculo das solicitações pelo SAP2000

Nesta etapa os cálculos foram realizados através do programa de cálculo estrutural SAP2000, que utiliza o método dos elementos finitos para realizar os cálculos. Os resultados obtidos nesta etapa foram comparados com os resultados da etapa anterior, para verificar se os resultados estão aproximados, e, portanto, nenhum erro grosseiro foi cometido na etapa de cálculo por Teoria da Flexão das Placas.

2.6.5 Determinação das espessuras e consumo de materiais das lajes

Nesta etapa os resultados encontrados através das etapas de cálculo, detalhadas anteriormente, foram analisados para encontrar a melhor solução referente à espessura das lajes maciças e nervuradas, para o menor consumo de materiais nas diferentes condições de contorno e vãos entre apoios.

2.6.6 Comparação dos resultados obtidos

Os valores obtidos através da etapa anterior foram organizados segundo os vãos entre apoios e comparados em função do consumo de materiais, para a definição da laje que possui o menor consumo para cada situação. Com isso, foi possível fazer uma observação comparativa e indicativa das lajes em questão.

2.6.7 Análise final e conclusões

A análise final consistiu na avaliação das lajes escolhidas como mais adequadas para as situações verificadas, analisando-se a escolha obtida com relação à pesquisa bibliográfica. A conclusão do trabalho foi feita definindo-se qual laje apresenta o menor consumo de concreto e aço para os diferentes vãos estudados, analisando-se qual das duas (maciça ou nervurada) obteve o melhor resultado no geral.

3 CARACTERÍSTICAS DAS LAJES

Neste capítulo, serão apresentadas algumas características e definições importantes em relação às lajes maciças e nervuradas.

Segundo a NBR 6118, as placas são “Elementos de superfície plana sujeitos principalmente a ações normais a seu plano. As placas de concreto são usualmente denominadas lajes.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003¹, p. 75).

Segundo Carvalho e Pinheiro (2009, p. 43) “[...] quando se emprega o modelo de placa (laje maciça), por exemplo, efetuando o cálculo usando-se tabelas, admite-se implicitamente que as vigas do contorno sejam indeslocáveis, e, portanto, a inércia dessas vigas não é considerada.”. Consideração essa que foi explicitada no pressuposto desse trabalho.

Carvalho e Pinheiro (2009, p. 27) também fazem uma comparação das características da laje em relação às vigas, observando que a laje está submetida a esforços de menor intensidade e possui o estado de deformação menor que o elemento com comportamento de viga, sendo a flecha da laje cerca de 30% daquela da viga (considerando o cálculo linear, sem fissuração e fluência).

As lajes podem ser de vários tipos segundo seu método construtivo (maciças, nervuradas, lisas, protendidas), mas nesse trabalho serão analisadas apenas as lajes maciças e nervuradas, cujas características serão tratadas a seguir.

3.1 CARACTERÍSTICAS DAS LAJES NERVURADAS

As lajes nervuradas são definidas pela NBR 6118 da seguinte forma: “Lajes nervuradas são as lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos está localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 86).

¹ A NBR 6118 possui uma atualização, referente ao ano de 2007. Porém, suas alterações não se referem ao estudo que esta sendo realizado neste trabalho. Portanto, o conteúdo aqui descrito não sofrerá alterações.

Carvalho e Pinheiro (2009, p. 32) definem a laje nervurada como:

[...] um sistema estrutural onde se procura afastar o concreto da seção transversal da linha neutra, aumentando a altura da laje, o que proporciona um maior braço de alavanca, formando um conjunto de nervuras, em uma ou em duas direções, com espaçamentos uniformes entre si.

A figura 2 mostra um exemplo de laje nervurada com as nervuras aparentes, isto é, na região inferior da laje o concreto maciço foi substituído por nervuras intercaladas por espaços vazios. Na figura 3, os espaços vazios são preenchidos por um material inerte, para deixar plana a superfície inferior e para facilitar a execução desta laje.

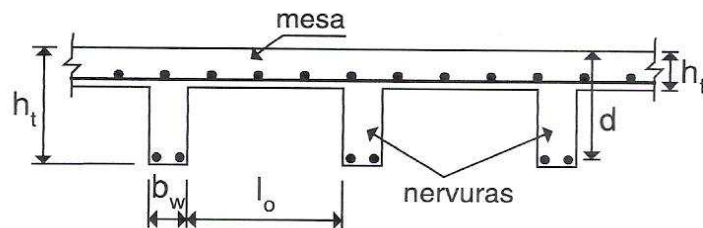


Figura 2: laje nervurada com nervuras aparentes (ARAÚJO, 2003b, p. 144)

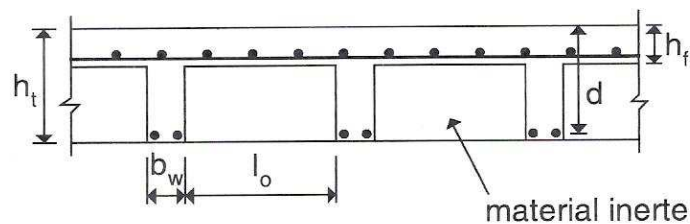


Figura 3: laje nervurada com superfície plana, utilizando material inerte (ARAÚJO, 2003b, p. 143)

As lajes consideradas normais são as que têm a forma de T na seção transversal, tendo as nervuras inferiores e uma mesa superior de concreto, deixando espaços entre as nervuras onde se têm vazios ou blocos sem função estrutural. Portanto, estas lajes são bastante eficientes para resistir aos momentos fletores positivos, isto é, aqueles que tracionam a região inferior onde estão as nervuras e tem área menor, e comprimem a região superior que tem área maior

(mesa). Para os momentos negativos a situação é exatamente inversa, já que se tem a compressão da nervura e a tração da mesa (CARVALHO; PINHEIRO, 2009, p. 18).

Araújo (2003b, p. 144) comenta que “[...] se a laje for [do tipo] contínua, torna-se necessário que as faixas próximas aos apoios intermediários sejam maciças [...]”. Essa solução fará com que a região inferior tenha sua área aumentada, resistindo mais a compressão imposta pelo momento negativo.

A altura das lajes nervuradas (nervura mais mesa) é a outra grande diferença em relação à laje maciça. Como a parte inferior da laje normalmente está trabalhando à tração, essa parte não é bem aproveitada, pois o concreto resiste à tração em torno de 10% do que resiste à compressão. Por outro lado, quanto maior for a altura da laje, maior será o braço de alavanca, aumentando a resistência à flexão da mesma.

Portanto, nas lajes nervuradas tem-se a substituição de parte do concreto situado na borda inferior por um material inerte ou espaços vazios, fazendo com que as armaduras situadas nas nervuras fiquem responsáveis pela resistência à tração, permitindo uma maior altura da laje, com o conseqüente ganho de resistência.

Araújo (2003b, p. 144) explica que as lajes nervuradas demandam uma altura cerca de 50% maior que a das lajes maciças, mas seu peso e consumo de concreto são inferiores. O autor estima que as lajes nervuradas são mais econômicas para vãos acima de 8 metros, aproximadamente.

Carvalho e Pinheiro (2009, p. 32) explicam que para uma mesma altura, as lajes nervuradas apresentam uma flecha maior que as maciças, se for considerado o estágio I (sem fissuração). Portanto, é necessária uma altura maior para as lajes nervuradas, para aumentar a sua inércia e diminuir a sua deformação. Os mesmos autores citam a necessidade do atendimento às condições previstas em norma para os estados limites, sendo necessária a verificação em relação aos estados limites últimos para o cálculo da armadura longitudinal e de cisalhamento, enquanto que a deformação excessiva e as aberturas de fissuras devem ser verificadas em relação aos estados limites de serviço.

Deve-se sempre dimensionar a laje nervurada de modo a evitar o uso de estribos ou de outro tipo de armadura transversal para resistir ao cisalhamento. Desta forma, a verificação será feita considerando o elemento como laje, de forma a analisar se a espessura da nervura e a

distância entre elas permite que não seja utilizada a armadura transversal (CARVALHO; PINHEIRO, 2009, p. 39).

Carvalho e Pinheiro (2009, p. 42) explicam que as lajes nervuradas moldadas no local podem ser armadas em uma ou duas direções. Quando a relação entre os vãos for menor ou igual a dois, as nervuras são bidirecionais, formando uma malha, quase sempre paralelas à borda e de forma ortogonal entre si. Isso faz com que os esforços e deformações sejam diminuídos, gerando uma melhor distribuição das reações no contorno.

As principais desvantagens das lajes nervuradas segundo Carvalho e Pinheiro (2009, p. 14) são “[...] a dificuldade na passagem de tubulações e a demanda por alturas maiores do edifício e de cada andar.”.

3.2 CARACTERÍSTICAS DAS LAJES MACIÇAS

A laje maciça convencional é a mais utilizada e sua forma é a mais simples possível, assim, dispensa maiores explicações, pois como o próprio nome já diz, as lajes maciças são placas planas de concreto armado que possuem uma determinada espessura. Por definição, “As lajes convencionais são placas de espessura uniforme, apoiadas ao longo do seu contorno. Os apoios podem ser constituídos por vigas ou por alvenarias, sendo este tipo de laje predominante nos edifícios residenciais onde os vãos são relativamente pequenos.” (ARAÚJO, 2003a, p. 2).

Carvalho e Pinheiro (2009, p. 28) citam como vantagens das lajes maciças a sua execução simples e rápida e o fato de apresentar pouca deformação e esforços relativamente pequenos. Além disso, “[...] para pequenos vãos, pelo menos no estado limite último, boa parte do concreto da laje maciça pouco contribui na resistência à flexão, pois geralmente a linha neutra tem pequena profundidade, resultando em uma grande quantidade de concreto tracionado.”.

4 CRITÉRIOS PARA DIMENSIONAMENTO DAS LAJES

Para o estudo das lajes, torna-se necessário um estudo dos critérios para seu dimensionamento, isto é, o que deve ser considerado para o cálculo segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas. Os critérios que foram considerados são a classe de agressividade ambiental, o cobrimento nominal, os estados limites, os deslocamentos limites, as cargas verticais mínimas e a taxa de armadura.

4.1 CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

A NBR 6118 comenta nos itens 6.4.1 e 6.4.2 que a agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que agem nas estruturas de concreto, sendo sua classificação para os projetos de estruturas dada na tabela 6.1, mostrada neste trabalho através do quadro 1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 16).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1), 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1), 2)}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1), 3)}	Elevado
		Respingos de maré	

¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Quadro 1: classes de agressividade ambiental
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 16)

4.2 COBRIMENTO NOMINAL

A NBR 6118 define no item 7.4.7.2 o cobrimento nominal como sendo o cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução e depende da classe de agressividade ambiental e do tipo de estrutura, isso é apresentado no quadro 2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 18).

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ³⁾
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ²⁾	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido ¹⁾	Todos	30	35	45	55

¹⁾ Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

²⁾ Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

³⁾ Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Quadro 2: correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 19)

4.3 ESTADOS LIMITES

Os estados limites são fatores fundamentais que devem ser considerados nos cálculos de dimensionamento e verificação das estruturas. A seguir, se tem uma explicação referente aos estados limites últimos (ELU) e de serviço (ELS).

4.3.1 Estados limites últimos

Em relação aos estados limites últimos, a NBR 6118 cita quando a consideração dos ELU devem ser considerados, através do item 10.3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 50):

A segurança das estruturas de concreto deve sempre ser verificada em relação aos seguintes estados limites últimos:

- a) estado limite último da perda do equilíbrio da estrutura, admitida como corpo rígido;
- b) estado limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, devido às solicitações normais e tangenciais, admitindo-se a redistribuição de esforços internos [...];
- c) estado limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, considerando os efeitos de segunda ordem;
- d) estado limite último provocado por solicitações dinâmicas [...];
- e) estado limite último de colapso progressivo;
- f) outros estados limites últimos que eventualmente possam ocorrer em casos especiais.

4.3.2 Estados limites de serviço

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 50) explica que os ELS “[...] são aqueles relacionados à durabilidade das estruturas, aparência, conforto do usuário e à boa utilização funcional das mesmas, seja em relação aos usuários, seja em relação às máquinas e aos equipamentos utilizados.”.

4.4 LIMITES MÍNIMOS

A NBR 6118 especifica alguns limites mínimos para a espessura das lajes maciças e nervuradas e também algumas condições que devem ser consideradas no projeto das lajes nervuradas. Esses limites são mostrados nos próximos itens.

4.4.1 Lajes maciças

Os limites mínimos estabelecido pela NBR 6118 para lajes maciças são representados a seguir (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 67):

Nas lajes maciças devem ser respeitados os seguintes limites mínimos para a espessura:

- a) 5 cm para lajes de cobertura não em balanço;
- b) 7 cm para lajes de piso ou de cobertura em balanço;
- c) 10 cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30 kN;
- d) 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30 kN;
- e) 15 cm para lajes com protensão apoiadas em vigas, $L/42$ para lajes de piso biapoiadas e $L/42$ para lajes de piso contínuas;
- f) 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes-cogumelo.

4.4.2 Lajes nervuradas

Os limites mínimos e condições estabelecidas pela NBR 6118 para lajes nervuradas são representados a seguir (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 67):

A espessura da mesa, quando não houver tubulações horizontais embutidas, deve ser maior ou igual a $1/15$ da distância entre nervuras e não menor que 3 cm.

O valor mínimo absoluto deve ser 4 cm, quando existirem tubulações embutidas de diâmetro máximo 12,5 mm.

A espessura das nervuras não deve ser inferior a 5 cm.

Nervuras com espessura menor que 8 cm não devem conter armadura de compressão.

Para o projeto das lajes nervuradas devem ser obedecidas as seguintes condições:

- a) para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras menor ou igual a 65 cm, pode ser dispensada a verificação da flexão da mesa, e para a verificação do cisalhamento da região das nervuras, permite-se a consideração dos critérios de laje;
- b) para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras entre 65 cm e 110 cm, exige-se a verificação da flexão da mesa e as nervuras devem ser verificadas ao cisalhamento como vigas; permite-se essa verificação como lajes se o espaçamento entre eixos de nervuras for até 90 cm e a largura média das nervuras for maior que 12 cm;

c) para lajes nervuradas com espaçamento entre eixos de nervuras maior que 110 cm, a mesa deve ser projetada como laje maciça, apoiada na grelha de vigas, respeitando-se os seus limites mínimos de espessura.

4.5 DESLOCAMENTOS LIMITES

Os deslocamentos limites estabelecidos são apresentados a seguir e mostrados no quadro 3, referente à tabela 13.2 da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 69):

Deslocamentos limites são valores práticos utilizados para verificação em serviço do estado limite de deformações excessivas da estrutura. Para os efeitos desta Norma são classificados nos quatro grupos básicos a seguir relacionados e devem obedecer aos limites estabelecidos na tabela 13.2:

a) aceitabilidade sensorial: o limite é caracterizado por vibrações indesejáveis ou efeito visual desagradável. [...];

b) efeitos específicos: os deslocamentos podem impedir a utilização adequada da construção;

c) efeitos em elementos não estruturais: deslocamentos podem ocasionar o mau funcionamento de elementos que, apesar de não fazerem parte da estrutura, estão a ela ligados;

d) efeitos em elementos estruturais: os deslocamentos podem afetar o comportamento do elemento estrutural, provocando afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas. Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-as ao modelo estrutural adotado.

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$\ell / 250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	$\ell / 350$
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	$\ell / 250^{1)}$
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	$\ell / 350 +$ contraflecha ²⁾
			Ocorrido após a construção do piso	$\ell / 600$
Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após nivelamento do equipamento	De acordo com recomendação do fabricante do equipamento	
Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	$\ell / 500^{3)}$ ou 10 mm ou $\theta = 0,0017 \text{ rad}^{4)}$
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos	Ocorrido após a instalação da divisória	$\ell / 250^{3)}$ ou 25 mm
		Movimento lateral de edifícios	Provocado pela ação do vento para combinação freqüente ($\psi_1=0,30$)	$H/1700$ ou $H/850^{5)}$ entre pavimentos ⁶⁾
		Movimentos térmicos verticais	Provocado por diferença de temperatura	$\ell / 400^{7)}$ ou 15 mm
	Forros	Movimentos térmicos horizontais	Provocado por diferença de temperatura	$H/500$
		Revestimentos colados	Ocorrido após construção do forro	$\ell / 350$
		Revestimentos pendurados ou com juntas	Deslocamento ocorrido após construção do forro	$\ell / 175$
	Pontes rolantes	Desalinhamento de trilhos	Deslocamento provocado pelas ações decorrentes da frenagem	$H/400$
Efeitos em elementos estruturais	Afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas	Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-os ao modelo estrutural adotado.		

¹⁾ As superfícies devem ser suficientemente inclinadas ou o deslocamento previsto compensado por contraflechas, de modo a não se ter acúmulo de água.

²⁾ Os deslocamentos podem ser parcialmente compensados pela especificação de contraflechas. Entretanto, a atuação isolada da contraflecha não pode ocasionar um desvio do plano maior que $\ell / 350$.

³⁾ O vão ℓ deve ser tomado na direção na qual a parede ou a divisória se desenvolve.

⁴⁾ Rotação nos elementos que suportam paredes.

⁵⁾ H é a altura total do edifício e H_i o desnível entre dois pavimentos vizinhos.

⁶⁾ Esse limite aplica-se ao deslocamento lateral entre dois pavimentos consecutivos devido à atuação de ações horizontais. Não devem ser incluídos os deslocamentos devidos a deformações axiais nos pilares. O limite também se aplica para o deslocamento vertical relativo das extremidades de lintéis conectados a duas paredes de contraventamento, quando H_i representa o comprimento do lintel.

⁷⁾ O valor ℓ refere-se à distância entre o pilar externo e o primeiro pilar interno.

NOTAS

1 Todos os valores limites de deslocamentos supõem elementos de vão ℓ suportados em ambas as extremidades por apoios que não se movem. Quando se tratar de balanços, o vão equivalente a ser considerado deve ser o dobro do comprimento do balanço.

2 Para o caso de elementos de superfície, os limites prescritos consideram que o valor ℓ é o menor vão, exceto em casos de verificação de paredes e divisórias, onde interessa a direção na qual a parede ou divisória se desenvolve, limitando-se esse valor a duas vezes o vão menor.

3 O deslocamento total deve ser obtido a partir da combinação das ações características ponderadas pelos coeficientes definidos na seção 11.

4 Deslocamentos excessivos podem ser parcialmente compensados por contraflechas.

Quadro 3: limites para deslocamentos
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 70)

4.6 CARGAS VERTICAIS MÍNIMAS

Deve-se projetar as estruturas para um determinado destino de utilização. Esse destino irá definir a carga mínima de utilização que deverá ser considerada no cálculo, de acordo com o seu uso. Essa carga é denominada carga acidental e é definida pela NBR 6120 da seguinte forma: “É toda aquela [carga] que pode atuar sobre a estrutura de edificações em função do seu uso (pessoas, móveis, materiais diversos, veículos etc.)” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980, p. 1). Alguns dos valores mínimos definidos na NBR 6120, são apresentados no quadro 4.

Local		Carga (KN/m ²)
Bibliotecas	Sala de leitura	2,5
Escritórios	Salas de uso geral e banheiro	2,0
Ginásios de Esportes	-	5,0
Lojas	-	4,0
Restaurantes	-	3,0

Quadro 4: valores mínimos das cargas verticais (adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980, p. 3-4)

4.7 TAXAS DE ARMADURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS

As lajes devem respeitar sempre as taxas máximas e mínimas de armadura na sua seção transversal. Por isso, a NBR 6118 apresenta um quadro relacionando a taxa de armadura mínima com o f_{ck} do concreto e a forma da seção, representado pelo quadro 5.

Forma da seção	Valores de $\rho_{\min}^{1)}$ ($A_{s,\min}/A_c$)							
	ω_{\min}	%						
	f_{ck}	20	25	30	35	40	45	50
Retangular	0,035	0,150	0,150	0,173	0,201	0,230	0,259	0,288
T (mesa comprimida)	0,024	0,150	0,150	0,150	0,150	0,158	0,177	0,197
T (mesa tracionada)	0,031	0,150	0,150	0,153	0,178	0,204	0,229	0,255
Circular	0,070	0,230	0,288	0,345	0,403	0,460	0,518	0,575

¹⁾ Os valores de ρ_{\min} estabelecidos nesta tabela pressupõem o uso de aço CA-50, $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$. Caso esses fatores sejam diferentes, ρ_{\min} deve ser recalculado com base no valor de ω_{\min} dado.

NOTA Nas seções tipo T, a área da seção a ser considerada deve ser caracterizada pela alma acrescida da mesa colaborante.

Quadro 5: taxas mínimas de armadura de flexão
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 117)

Em relação à taxa máxima de armadura, tem-se que “A soma das armaduras de tração e de compressão ($A_s + A_s'$) não deve ter valor maior que 4% A_c , calculada na região fora da zona de emendas.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 119).

5 MÉTODO DE CÁLCULO DAS LAJES

Existem vários métodos de cálculo para o dimensionamento de lajes. Araújo (2003a, p. 31-32) descreve alguns dos processos para as lajes bidirecionais, como o Método de Marcus, a Teoria das Linhas de Ruptura, a Teoria da Flexão das Placas, o Método das Diferenças Finitas e o Método dos Elementos Finitos.

Neste trabalho, o cálculo das solicitações nas lajes será através da Teoria de Flexão das Placas, para a qual foram criadas tabelas a partir da integração da equação diferencial das placas, para determinadas condições de contorno, sendo possível encontrar os valores da flecha, momentos fletores e reações a partir da relação entre os vãos. Neste capítulo, estão apresentadas a Teoria da Flexão das Placas, com sua definição e formulação e as Tabelas de Lajes que tornam o cálculo possível, através da relação entre os vãos e as condições de contorno.

5.1 TEORIA DA FLEXÃO DAS PLACAS

Segundo Araújo (2003a, p. 31) dentro dos princípios da elasticidade a Teoria de Flexão de Placas é exata, sendo que a solução do problema é obtida resolvendo a equação diferencial das placas incluindo as condições de contorno. Para esse método, normalmente é considerado um comportamento elástico linear para o material. Porém, pelo fato do método da Teoria da Flexão das Placas ser muito amplo, não serão dados detalhes quanto a sua resolução, apenas serão comentados detalhes fundamentais para o seu entendimento.

Araújo (2003a, p. 42) explica que: “A equação diferencial da placa é obtida considerando-se o equilíbrio de um elemento infinitesimal ($d_x d_y$) tomado em uma posição genérica no plano da placa.”. O elemento infinitesimal citado sofre esforços solicitantes em suas faces, como se pode observar na figura 4.

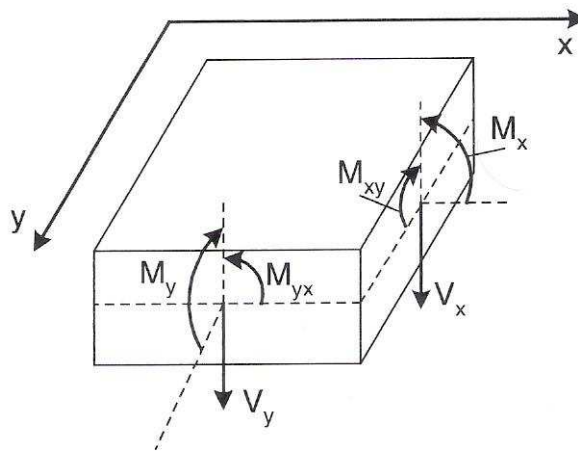


Figura 4: esforços solicitantes no elemento de placa (ARAÚJO, 2003a, p. 42)

Para o cálculo pelo método da Flexão das Placas, a teoria de Kirchoff para placas finas com pequenas deflexões deve ser respeitada. Szilard² (1974 apud ARAÚJO, 2003a, p. 37), Timoshenko e Woinowsky-Krieger³ (1970 apud ARAÚJO, 2003a, p. 37) citam as considerações dessa teoria:

1. O material da placa é elástico linear, homogêneo e isotrópico.
2. A espessura da placa é pequena em relação às outras dimensões.
3. As deflexões são pequenas em relação à espessura da placa.
4. As rotações da superfície média deformada são pequenas em relação à unidade.
5. Linhas retas, inicialmente normais à superfície média, permanecem retas e normais à superfície média após as deformações. Esta hipótese é equivalente à hipótese das seções planas da teoria de vigas e consiste em desprezar as deformações por corte.
6. As deflexões da placa são normais ao plano indeformado inicial.
7. As tensões normais à superfície média são desprezíveis ($\sigma_z \cong 0$).

A equação diferencial da placa, válida para uma placa com rigidez à flexão constante, também conhecida como equação de Lagrange, disponível em Araújo (2003a, p. 44) é mostrada a seguir:

2 SZILARD, R. **Theory and Analysis of Plates**: classical and numerical methods. New Jersey: Prentice-Hall, 1974.

3 TIMOSHENKO, S. P.; WOINOWSKY-KRIEGER, S. **Theory of Plates and Shells**. New York: McGraw-Hill, 1970.

$$\frac{\delta^4 w}{\delta x^4} + 2 \frac{\delta^4 w}{\delta x^2 \delta y^2} + \frac{\delta^4 w}{\delta y^4} = \frac{p(x, y)}{D} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

w = flecha no centro da laje;

p (x,y) = carregamento uniformemente distribuído na laje;

D = rigidez à flexão da placa.

A solução exata da equação diferencial da placa somente pode ser obtida para alguns casos particulares. Nos casos mais gerais de carregamento e condições de contorno são encontradas soluções em que são adotadas expansões em série de Fourier, como a solução de Navier e a solução de Lévy.

Por ser uma equação de quarta ordem de difícil solução, diversas tabelas para o cálculo de esforços e reações de apoio em placas são encontradas na literatura. Essas tabelas apresentam diferenças entre si por causa do valor adotado para o coeficiente de Poisson, e devido a aproximações de truncamento das séries de Fourier usadas para solucionar a equação.

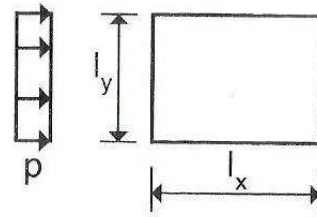
5.2 TABELAS DE LAJES PARA O CÁLCULO

Para este trabalho, serão usadas as tabelas disponíveis em Araújo (2003a, p. 285-290) que foram adaptadas de Kalmanok⁴ (1961 apud ARAÚJO, 2003a). A adaptação é referente à consideração do coeficiente igual a 0,2 (na tabela original foi considerado o coeficiente de Poisson igual a zero). Outra mudança foi a forma de fornecer as reações de apoio, já que foram fornecidas as reações uniformemente distribuídas ao longo do apoio, diferentemente da tabela original, na qual são oferecidos os valores totais das reações de apoio.

As tabelas correspondem a lajes retangulares apoiadas, com diferentes condições de contorno e submetidas a uma carga **p** uniformemente distribuída. Elas fornecem coeficientes que

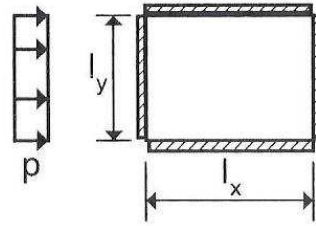
4 KALMANOK, A. S. **Manual Para Cálculo de Placas**. Montevideo: Inter Ciencia, 1961.

permitem calcular a flecha no centro da laje, os momentos fletores positivos (nos vãos) e negativos (nas bordas engastadas), o momento de torção nos cantos de lajes simplesmente apoiadas e as reações de apoio. O parâmetro de entrada é a relação entre os lados da laje. As figuras 5 e 6 mostram as tabelas de lajes com os coeficientes anteriormente citados junto com um desenho esquematizando as condições de contorno da laje que está sendo calculada.



l_y/l_x	w_c	m_x	m_y	m_{xy}	r_x	r_y
1,00	4,06	44,2	44,2	37,1	250	250
0,95	4,51	44,7	48,3	39,1	260	253
0,90	4,98	45,0	52,8	41,0	270	256
0,85	5,48	44,9	57,6	42,8	281	259
0,80	6,03	44,6	62,7	44,6	291	261
0,75	6,62	44,2	68,3	46,3	303	263
0,70	7,26	43,5	74,3	47,9	315	265
0,65	7,94	42,3	80,5	49,4	326	266
0,60	8,65	40,7	86,9	50,6	340	267
0,55	9,38	38,8	93,4	51,8	353	268
0,50	10,13	36,7	100,0	52,8	366	269

Figura 5: coeficientes de cálculo para uma laje retangular simplesmente apoiada no contorno com sua carga uniformemente distribuída
(adaptado de ARAÚJO, 2003a, p. 285)



l_y/l_x	w_c	m_{xe}	m_{ye}	m_x	m_y	r_x	r_y
1,00	1,27	-51,1	-51,1	21,1	21,1	250	250
0,95	1,42	-52,7	-54,3	21,3	23,3	262	251
0,90	1,56	-54,0	-58,0	21,1	25,5	275	251
0,85	1,70	-55,0	-62,0	20,5	27,7	286	251
0,80	1,84	-55,8	-66,1	19,7	30,0	299	251
0,75	1,97	-56,4	-69,8	18,8	32,3	313	250
0,70	2,09	-56,8	-73,1	17,8	34,5	326	249
0,65	2,22	-56,5	-75,9	16,5	36,5	339	247
0,60	2,35	-56,2	-78,4	14,9	38,2	353	244
0,55	2,45	-56,1	-80,6	13,2	39,6	367	242
0,50	2,51	-56,0	-82,6	11,8	40,9	380	241

Figura 6: coeficientes de cálculo para uma laje retangular engastada em todo o contorno, com carga uniformemente distribuída (adaptado de ARAÚJO, 2003a, p. 290)

A partir da relação entre os vãos, são obtidos os coeficientes para o deslocamento, momentos e reações, que são substituídos nas fórmulas 1 a 7:

$$W_c = 0,001w_c \frac{pl_y^4}{D} \quad (\text{fórmula 1})$$

$$M_x = 0,001m_x pl_y^2; M_y = 0,001m_y pl_y^2 \quad (\text{fórmula 2})$$

$$M_{xe} = 0,001m_{xe} pl_y^2; M_{ye} = 0,001m_{ye} pl_y^2 \quad (\text{fórmula 3})$$

$$R_x = 0,001r_x pl_y; R_y = 0,001r_y pl_y \quad (\text{fórmula 4})$$

$$R_{xe} = 0,001r_{xe} pl_y; R_{ye} = 0,001r_{ye} pl_y \quad (\text{fórmula 5})$$

$$M_{xy} = 0,001m_{xy} pl_y \quad (\text{fórmula 6})$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (\text{fórmula 7})$$

Onde:

W_c = flecha no centro da laje;

M_x, M_y = momentos positivos no centro da laje nas direções dos vãos l_x e l_y , respectivamente;

M_{xe}, M_{ye} = momentos negativos nos engastes nas direções dos vãos l_x e l_y , respectivamente;

M_{xy} = momento torçor nos cantos simplesmente apoiados;

R_x = reação de apoio por unidade de comprimento no lado l_x , quando este lado for um apoio simples;

R_{xe} = reação de apoio por unidade de comprimento no lado l_x , quando este lado for um engaste;

R_{ye} = reação de apoio por unidade de comprimento no lado l_y , quando este lado for um apoio simples;

R_y = reação de apoio por unidade de comprimento no lado l_y , quando este lado for um engaste;

D = rigidez à flexão da placa;

E = módulo de elasticidade longitudinal;

h = espessura da laje;

ν = coeficiente de Poisson;

$w_c, m_x, m_{xe}, m_y, m_{ye}, m_{xy}, r_x, r_{xe}, r_y, r_{ye}$ = coeficientes retirados das tabelas de lajes.

Quando não há necessidade de fazer distinção entre R_x e R_{xe} , as duas reações são denotadas por R_x . O mesmo é válido para R_y e R_{ye} . A figura 7 indica as grandezas correspondentes às tabelas.

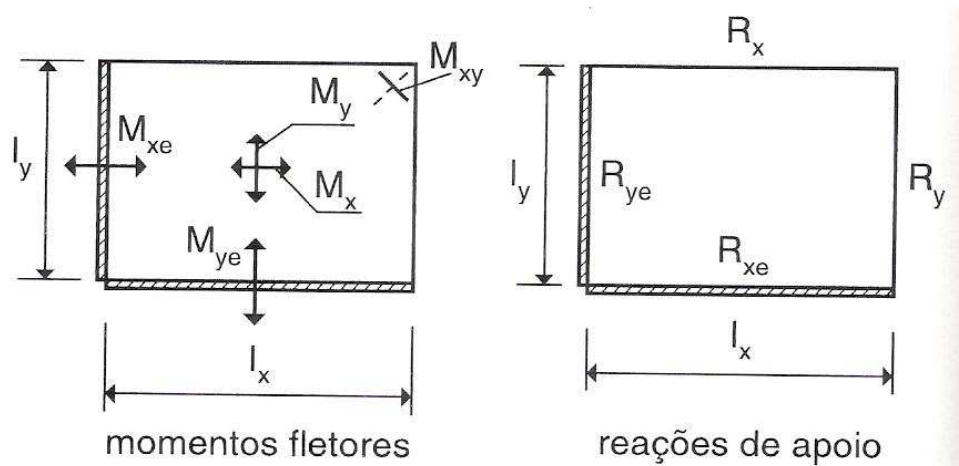


Figura 7: momentos e reações de apoio (ARAÚJO, 2003a, p. 282)

6 DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE MATERIAIS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos nos cálculos das lajes maciças e nervuradas a partir da determinação dos vãos entre apoios para o consumo de materiais.

Para realizar o cálculo, algumas considerações foram tomadas:

- a) classe de agressividade ambiental I, sendo o cobrimento $C=2,0$ cm;
- b) concreto C25 e aço CA50;
- c) coeficiente de Poisson igual a 0,2;
- d) sobrecarga de $2,0 \text{ kN/m}^2$ (referente à carga estimada para escritórios) com o acréscimo de $1,0 \text{ kN/m}^2$ (referente ao revestimento que deverá ser aplicado junto à laje);
- e) limitação da flecha das lajes em 10 mm, para o pior caso possível (havendo paredes de alvenaria, caixilhos e revestimentos limitando o valor da deformação).

6.1 CONSUMO DE MATERIAIS PARA AS LAJES MACIÇAS

Para encontrar os momentos fletores e deslocamentos para as lajes maciças, uma planilha foi desenvolvida, retirando-se os valores das tabelas de lajes e substituindo-se as incógnitas das fórmulas pela relação entre os vãos. Foram analisadas duas situações: uma na qual a laje está simplesmente apoiada nos quatro lados e outra na qual ela está engastada.

Primeiramente foram calculados os deslocamentos e momentos fletores a partir das combinações de vãos desde lajes de 2 m x 2 m até de 12 m x 12 m. Esses valores dependem da altura da laje, pois esta define o carregamento devido ao peso próprio, que irá influenciar no momento e deslocamento, gerando, portanto, um processo iterativo. Os valores encontrados são os que definem o consumo mínimo de concreto e aço, e que apresentam o deslocamento menor que o máximo permitido.

A partir da altura, é calculada a posição da linha neutra com a fórmula 8, que por sua vez é comparada às distâncias dos limites dos domínios 2 e 3, mostrados nas fórmulas 9 e 10, respectivamente, para verificar o domínio da laje. Com a linha neutra, define-se o valor da área de aço para resistir aos momentos obtidos, utilizando-se a fórmula 11:

$$x = 1,25 \cdot d \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{M_d}{0,425 \cdot d^2 \cdot f_{cd} \cdot b_w}} \right] \quad (\text{fórmula 8})$$

$$x_{23} = 0,259 \cdot d \quad (\text{fórmula 9})$$

$$x_{\text{lim}} = 0,628 \cdot d \quad (\text{fórmula 10})$$

$$A_s = \frac{0,68 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot x}{f_{yd}} \quad (\text{fórmula 11})$$

Os valores das áreas de aço devem respeitar as taxas máximas e mínimas de armadura para a seção transversal, isto é, a taxa mínima de aço deve ser maior ou igual a 0,15% e menor ou igual a 4%. Com os valores da área de aço e altura da laje, dimensiona-se a armadura responsável por resistir aos momentos fletores, e a partir desses dados, encontra-se o volume de concreto e a quantidade de aço disponível nas lajes para cada vão, tanto para as lajes apoiadas nos quatro bordos quanto para as engastadas.

O processo de cálculo que resultou nas áreas de aço para as lajes quadradas (que possuem o mesmo momento e mesma distribuição de aço nas duas direções) pode ser verificado no apêndice A.

6.1.1 Lajes maciças apoiadas

Nas lajes maciças simplesmente apoiadas nos quatro bordos, apenas tem-se momentos fletores positivos no centro da laje, pois os momentos nos bordos são nulos. Portanto, nessa etapa serão calculadas as áreas de aço que irão resistir aos momentos fletores positivos nas duas direções e suas respectivas armaduras e a altura da laje, além do valor do volume de concreto e quantidade de aço, conforme tem-se apresentado no quadro 6, para as lajes quadradas e no quadro 7, para as retangulares.

Lajes Quadradas Maciças - Apoiadas								
Ly x Lx (mxm)	h (cm)	Asx (cm ² /m)	Aço x (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y (vão)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 2	8	0,48	ø 5 c/20	0,48	ø 5 c/20	0,32	6,16	19,31
3 x 3	8	1,10	ø 5 c/17	1,10	ø 5 c/17	0,72	16,32	22,73
4 x 4	8	1,99	ø 6,3 c/15	1,99	ø 6,3 c/15	1,27	52,20	40,99
5 x 5	9	2,83	ø 6,3 c/11	2,83	ø 6,3 c/11	2,24	111,21	49,74
6 x 6	12	3,22	ø 8 c/15	3,22	ø 8 c/15	4,30	189,38	44,08
7 x 7	15	3,78	ø 8 c/13	3,78	ø 8 c/13	7,31	297,42	40,67
8 x 8	19	4,31	ø 8 c/11	4,31	ø 8 c/11	12,10	459,09	37,94
9 x 9	23	4,97	ø 10 c/15	4,97	ø 10 c/15	18,55	665,78	35,90
10 x 10	27	5,74	ø 10 c/13	5,74	ø 10 c/13	26,88	948,40	35,28
11 x 11	32	6,52	ø 10 c/12	6,52	ø 10 c/12	38,56	1243,19	32,24
12 x 12	37	7,40	ø 12,5 c/16	7,40	ø 12,5 c/16	53,06	1733,79	32,68

Quadro 6: cálculo do consumo de materiais para lajes quadradas maciças apoiadas

Lajes Retangulares Maciças - Apoiadas								
Ly x Lx (mxm)	h (cm)	Asx (cm ² /m)	Aço x (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y (vão)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 3	8	0,46	ø 5 c/20	0,86	ø 5 c/20	0,48	9,25	19,31
2 x 4	8	0,40	ø 5 c/20	1,10	ø 5 c/17	0,64	13,42	21,02
3 x 4	8	1,10	ø 5 c/17	1,72	ø 5 c/11	0,96	27,69	28,95
3 x 5	8	1,01	ø 5 c/19	2,22	ø 6,3 c/14	1,20	38,38	32,12
3 x 6	8	0,91	ø 5 c/20	2,57	ø 6,3 c/12	1,43	50,57	35,28
4 x 5	8	2,01	ø 6,3 c/15	2,89	ø 8 c/17	1,59	79,04	49,71
4 x 6	8	1,92	ø 6,3 c/16	3,69	ø 8 c/13	1,91	109,54	57,47
4 x 7	8	1,78	ø 5 c/11	4,34	ø 8 c/11	2,22	139,66	62,85
4 x 8	9	1,46	ø 5 c/13	4,23	ø 8 c/11	2,86	152,71	53,38
5 x 6	10	2,60	ø 6,3 c/12	3,50	ø 8 c/14	2,98	145,71	48,87
5 x 7	10	2,53	ø 6,3 c/12	4,36	ø 8 c/11	3,47	196,90	56,66
5 x 8	11	2,21	ø 6,3 c/14	4,65	ø 10 c/16	4,37	224,02	51,25
5 x 9	12	1,94	ø 6,3 c/16	4,81	ø 10 c/16	5,37	242,19	45,11
5 x 10	12	1,82	ø 6,3 c/17	5,22	ø 10 c/15	5,96	277,45	46,52
6 x 7	12	3,28	ø 8 c/15	4,21	ø 8 c/11	5,01	261,11	52,15
6 x 8	13	3,03	ø 8 c/16	4,80	ø 10 c/16	6,20	303,30	48,91
6 x 9	14	2,77	ø 6,3 c/11	5,25	ø 10 c/14	7,51	357,89	47,63
6 x 10	15	2,52	ø 6,3 c/12	5,57	ø 10 c/14	8,95	386,53	43,18
6 x 11	15	2,40	ø 6,3 c/13	6,02	ø 10 c/13	9,84	437,19	44,41
6 x 12	16	2,18	ø 6,3 c/14	6,19	ø 10 c/12	11,46	495,71	43,27
7 x 8	16	3,69	ø 8 c/13	4,57	ø 8 c/11	8,91	370,81	41,60
7 x 9	17	3,50	ø 8 c/14	5,23	ø 10 c/15	10,65	436,45	40,96
7 x 10	18	3,32	ø 8 c/15	5,80	ø 10 c/13	12,53	516,06	41,17
7 x 11	19	3,09	ø 8 c/16	6,24	ø 10 c/12	14,56	585,43	40,22
7 x 12	19	2,96	ø 8 c/17	6,80	ø 10 c/11	15,88	665,70	41,93
8 x 9	19	4,39	ø 8 c/11	5,30	ø 10 c/14	13,61	575,28	42,28
8 x 10	21	4,12	ø 8 c/12	5,87	ø 10 c/13	16,72	642,38	38,42
8 x 11	22	3,96	ø 8 c/12	6,53	ø 10 c/12	19,27	741,39	38,48
8 x 12	23	3,76	ø 8 c/13	7,08	ø 10 c/11	21,97	829,35	37,74
9 x 10	23	5,07	ø 10 c/15	5,98	ø 10 c/13	20,60	796,65	38,68
9 x 11	25	4,84	ø 10 c/16	6,66	ø 10 c/11	24,63	936,25	38,01
9 x 12	26	4,69	ø 10 c/16	7,38	ø 12,5 c/16	27,94	1066,28	38,16
10 x 11	27	5,84	ø 10 c/13	6,79	ø 10 c/11	29,56	1138,08	38,51
10 x 12	29	5,65	ø 10 c/13	7,55	ø 12,5 c/16	34,64	1291,45	37,29
11 x 12	32	6,62	ø 10 c/11	7,60	ø 12,5 c/16	42,04	1534,41	36,49

Quadro 7: consumo de materiais para lajes retangulares maciças apoiadas

6.1.2 Lajes maciças engastadas

Para o cálculo das lajes maciças engastadas nos quatro bordos repete-se o processo efetuado para as simplesmente apoiadas, calculando-se, ainda, os momentos fletores nos engastes, isto é, momentos negativos, que deverão ser resistidos por armaduras negativas junto aos bordos da laje. As armaduras negativas têm um comprimento de 0,25 vezes o vão correspondente para cada bordo.

Percebe-se que a altura da laje maciça engastada é definida pelos momentos negativos junto aos bordos, já que os momentos negativos nessas lajes são muito superiores aos momentos positivos no centro dos vãos. Isso leva a uma distribuição de armaduras, volume de concreto e quantidade de aço para esses vãos conforme mostradas no quadro 8, para as lajes quadradas e no quadro 9, para as retangulares.

Laje Quadradas Maciças - Engastadas												
Ly x Lx (m x m)	h (cm)	Asx (cm ² /m)	Aço x (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y (vão)	Asx' (cm ² /m)	Aço x (eng)	Asy' (cm ² /m)	Aço y (eng)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 2	8	0,23	ø 5 c/20	0,23	ø 5 c/20	0,56	ø 5 c/20	0,56	ø 5 c/20	0,32	9,49	29,78
3 x 3	8	0,52	ø 5 c/20	0,52	ø 5 c/20	1,27	ø 5 c/15	1,27	ø 5 c/15	0,72	23,61	32,93
4 x 4	8	0,93	ø 5 c/20	0,93	ø 5 c/20	2,32	ø 8 c/20	2,32	ø 8 c/20	1,27	57,48	45,17
5 x 5	8	1,47	ø 5 c/13	1,47	ø 5 c/13	3,77	ø 10 c/20	3,77	ø 10 c/20	1,98	138,80	70,02
6 x 6	8	2,15	ø 6,3 c/14	2,15	ø 6,3 c/14	5,72	ø 12,5 c/20	5,72	ø 12,5 c/20	2,84	303,83	106,94
7 x 7	10	2,39	ø 6,3 c/13	2,39	ø 6,3 c/13	6,24	ø 12,5 c/19	6,24	ø 12,5 c/19	4,84	441,37	91,12
8 x 8	12	2,71	ø 6,3 c/11	2,71	ø 6,3 c/11	7,03	ø 12,5 c/17	7,03	ø 12,5 c/17	7,60	661,84	87,13
9 x 9	14	3,10	ø 8 c/16	3,10	ø 8 c/16	7,98	ø 12,5 c/15	7,98	ø 12,5 c/15	11,22	942,72	84,02
10 x 10	17	3,39	ø 8 c/14	3,39	ø 8 c/14	8,67	ø 12,5 c/14	8,67	ø 12,5 c/14	16,84	1287,41	76,47
11 x 11	20	3,77	ø 8 c/13	3,77	ø 8 c/13	9,58	ø 16 c/20	9,58	ø 16 c/20	23,98	1744,76	72,77
12 x 12	23	4,20	ø 8 c/11	4,20	ø 8 c/11	10,65	ø 16 c/18	10,65	ø 16 c/18	32,82	2375,43	72,38

Quadro 8: consumo de materiais para lajes quadradas maciças engastadas

Laje Retangulares Maciças - Engastadas												
Ly x Lx (mxm)	h (cm)	Asx (cm ² /m)	Aço x (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y (vão)	Asx' (cm ² /m)	Aço x (eng)	Asy' (cm ² /m)	Aço y (eng)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 3	8	0,18	ø 5 c/20	0,39	ø 5 c/20	0,62	ø 5 c/20	0,82	ø 5 c/20	0,48	14,18	29,65
2 x 4	8	0,13	ø 5 c/20	0,44	ø 5 c/20	0,61	ø 5 c/20	0,91	ø 5 c/20	0,64	18,86	29,59
3 x 4	8	0,46	ø 5 c/20	0,80	ø 5 c/20	1,41	ø 6,3 c/20	1,76	ø 6,3 c/17	0,96	35,22	36,86
3 x 5	8	0,36	ø 5 c/20	0,94	ø 5 c/20	1,40	ø 6,3 c/20	1,99	ø 6,3 c/15	1,19	45,47	38,08
3 x 6	8	0,29	ø 5 c/20	1,01	ø 5 c/19	1,40	ø 6,3 c/20	2,10	ø 8 c/20	1,43	58,48	40,82
4 x 5	8	0,86	ø 5 c/20	1,33	ø 5 c/14	2,55	ø 8 c/19	3,06	ø 8 c/16	1,59	84,50	53,17
4 x 6	8	0,74	ø 5 c/20	1,60	ø 5 c/12	2,59	ø 8 c/19	3,51	ø 10 c/20	1,91	113,37	59,49
4 x 7	8	0,61	ø 5 c/20	1,75	ø 5 c/11	2,57	ø 8 c/19	3,76	ø 10 c/20	2,22	135,42	60,92
4 x 8	8	0,51	ø 5 c/20	1,84	ø 6,3 c/17	2,56	ø 8 c/19	3,91	ø 10 c/20	2,54	155,89	61,37
5 x 6	8	1,40	ø 5 c/14	2,01	ø 6,3 c/15	4,11	ø 10 c/19	4,80	ø 10 c/16	2,38	191,57	80,64
5 x 7	8	1,25	ø 5 c/15	2,41	ø 6,3 c/12	4,23	ø 10 c/18	5,59	ø 12,5 c/20	2,77	255,60	92,36
5 x 8	8	1,08	ø 5 c/18	2,68	ø 6,3 c/11	4,20	ø 10 c/18	6,05	ø 12,5 c/20	3,16	292,49	92,48
5 x 9	8	0,92	ø 5 c/20	2,84	ø 6,3 c/11	4,18	ø 10 c/18	6,35	ø 12,5 c/19	3,56	330,91	93,01
5 x 10	8	0,81	ø 5 c/20	2,95	ø 8 c/17	4,17	ø 10 c/18	6,57	ø 12,5 c/18	3,95	379,62	96,07
6 x 7	9	1,86	ø 6,3 c/16	2,51	ø 6,3 c/12	5,36	ø 12,5 c/20	6,10	ø 12,5 c/20	3,73	358,40	95,97
6 x 8	9	1,69	ø 5 c/11	2,99	ø 8 c/16	5,53	ø 12,5 c/20	7,10	ø 12,5 c/17	4,26	444,60	104,28
6 x 9	9	1,52	ø 5 c/12	3,34	ø 8 c/15	5,55	ø 12,5 c/20	7,74	ø 12,5 c/15	4,79	523,47	109,21
6 x 10	10	1,21	ø 5 c/16	3,23	ø 8 c/15	4,91	ø 10 c/16	7,17	ø 12,5 c/17	5,93	510,75	86,06
6 x 11	10	1,07	ø 5 c/18	3,36	ø 8 c/14	4,90	ø 10 c/16	7,41	ø 12,5 c/16	6,53	579,03	88,72
6 x 12	10	0,96	ø 5 c/20	3,48	ø 8 c/14	4,89	ø 10 c/16	7,62	ø 12,5 c/16	7,12	625,25	87,81
7 x 8	11	2,17	ø 6,3 c/14	2,81	ø 6,3 c/11	6,08	ø 12,5 c/20	6,78	ø 12,5 c/18	6,09	517,83	84,97
7 x 9	11	2,01	ø 6,3 c/15	3,30	ø 8 c/15	6,28	ø 12,5 c/19	7,80	ø 12,5 c/15	6,85	643,49	93,97
7 x 10	12	1,73	ø 5 c/11	3,44	ø 8 c/14	5,87	ø 12,5 c/20	7,79	ø 12,5 c/15	8,31	704,32	84,75
7 x 11	12	1,56	ø 5 c/12	3,69	ø 8 c/13	5,83	ø 12,5 c/20	8,22	ø 12,5 c/14	9,14	800,38	87,59
7 x 12	12	1,38	ø 5 c/14	3,88	ø 8 c/12	5,80	ø 12,5 c/20	8,53	ø 12,5 c/14	9,97	878,49	88,13
8 x 9	13	2,54	ø 6,3 c/12	3,17	ø 8 c/15	6,98	ø 12,5 c/17	7,66	ø 12,5 c/16	9,26	774,79	83,66
8 x 10	14	2,26	ø 6,3 c/13	3,49	ø 8 c/14	6,78	ø 12,5 c/18	8,18	ø 16 c/20	11,08	930,03	83,93
8 x 11	14	2,10	ø 6,3 c/14	3,90	ø 8 c/12	6,88	ø 12,5 c/17	8,91	ø 16 c/20	12,18	1066,04	87,49
8 x 12	15	1,85	ø 6,3 c/16	4,01	ø 8 c/12	6,53	ø 12,5 c/18	8,89	ø 16 c/20	14,26	1128,29	79,14
9 x 10	15	2,95	ø 8 c/17	3,60	ø 8 c/13	8,02	ø 12,5 c/15	8,69	ø 16 c/20	13,35	1156,13	86,58
9 x 11	16	2,68	ø 6,3 c/11	3,96	ø 8 c/12	7,87	ø 12,5 c/15	9,31	ø 16 c/20	15,68	1288,85	82,22
9 x 12	17	2,43	ø 6,3 c/12	4,24	ø 8 c/11	7,67	ø 12,5 c/16	9,70	ø 16 c/20	18,18	1397,45	76,86
10 x 11	18	3,29	ø 8 c/15	3,93	ø 8 c/12	8,81	ø 12,5 c/13	9,45	ø 16 c/20	19,60	1537,53	78,43
10 x 12	19	3,05	ø 8 c/16	4,34	ø 8 c/11	8,76	ø 12,5 c/14	10,17	ø 16 c/19	22,58	1688,01	74,74
11 x 12	21	3,68	ø 8 c/13	4,33	ø 8 c/11	9,78	ø 16 c/20	10,42	ø 16 c/19	27,46	2006,42	73,06

Quadro 9: consumo de materiais para lajes retangulares maciças engastadas

6.2 CONSUMO DE MATERIAIS PARA AS LAJES NERVURADAS

Para encontrar os momentos fletores e deslocamentos para as lajes nervuradas foi criada uma planilha parecida com a desenvolvida para as lajes maciças, com a diferença de que, para este caso, as dimensões já são definidas, pois foram analisadas determinadas dimensões de cubetas que dão a forma específica dessa lajes.

Considerou-se que os espaços entre nervuras ficariam apenas com espaços vazios, sem a utilização de algum material inerte. Isso faz com que não haja um acréscimo do peso.

Para escolher as diferentes opções de fôrmas que seriam trabalhadas, foi escolhido o catálogo de uma empresa fornecedora de fôrmas plásticas para moldar as lajes nervuradas. A partir desse catálogo, foram estudados cinco diferentes tipos de cubetas, todas com espessura de capa de 50 mm:

- a) RO 180;
- b) RO 210;
- c) RO 900;
- d) RO 800, com altura livre da fôrma de 350 mm;
- e) RO 800, com altura livre da fôrma de 400 mm.

Os valores da altura livre da fôrma, altura total, largura das nervuras, área de seção, volume do vazio, peso próprio e volume de concreto de cada uma delas podem ser visualizados nas figuras 8 a 11.

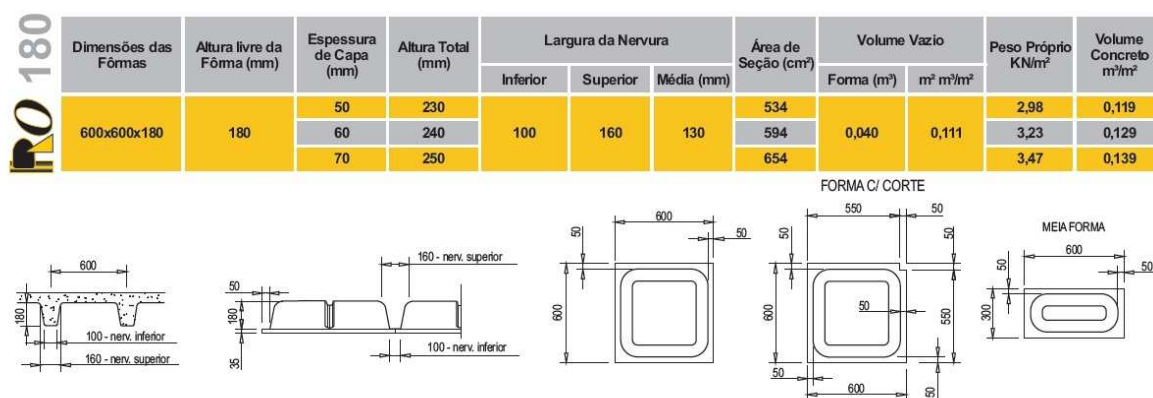


Figura 8: características da laje nervurada moldada a partir da fôrma RO 180 (RO-FORMAS CONSTRUTORA, IND. COM. E SERVIÇOS LTDA, 2010)

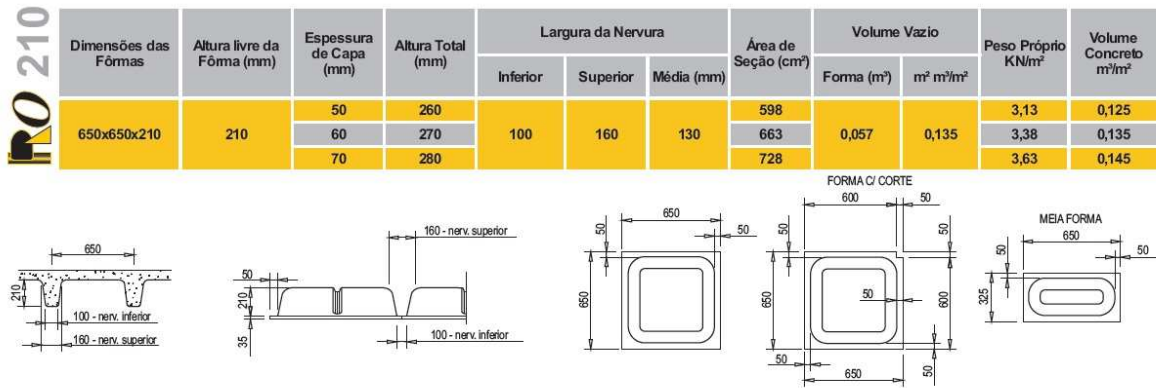


Figura 9: características da laje nervurada moldada a partir da fôrma RO 210 (RO-FORMAS CONSTRUTORA, IND. COM. E SERVIÇOS LTDA, 2010)

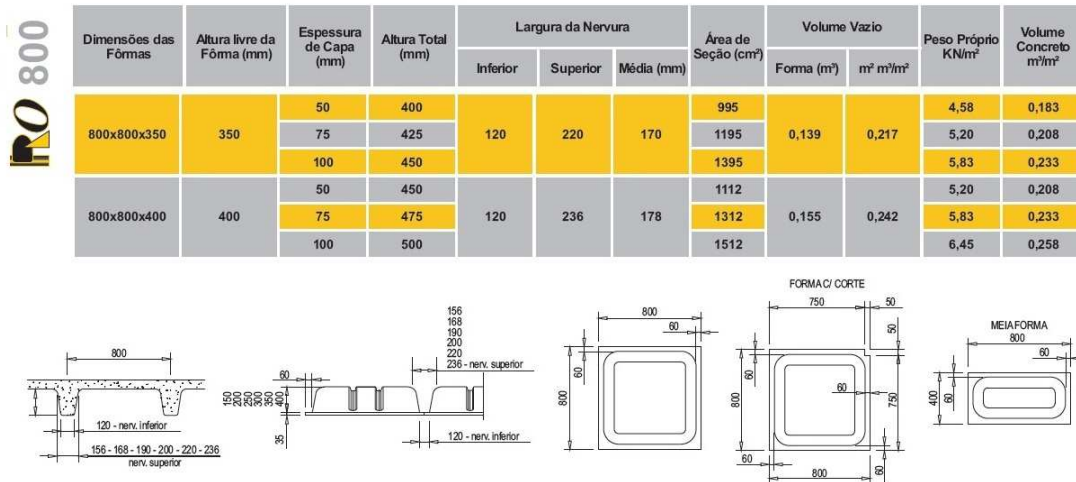


Figura 10: características das lajes nervuradas moldadas a partir da fôrma RO 800 (RO-FORMAS CONSTRUTORA, IND. COM. E SERVIÇOS LTDA, 2010)

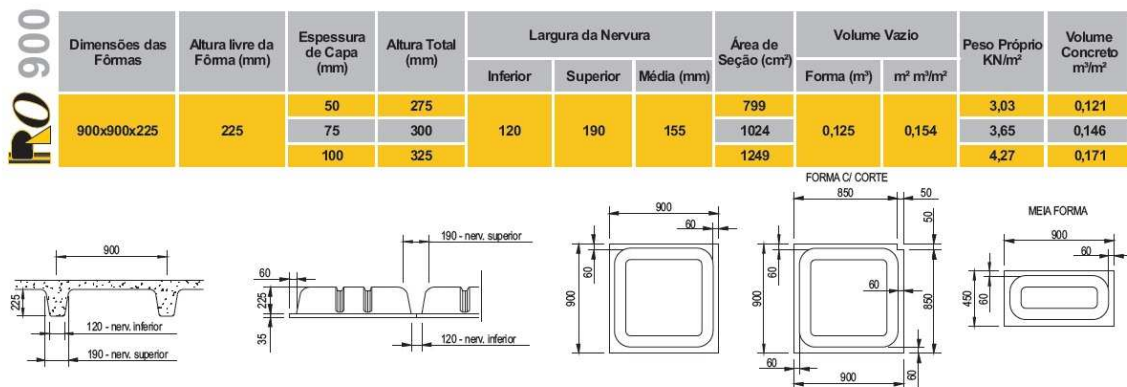


Figura 11: características da laje nervurada moldada a partir da fôrma RO 900 (RO-FORMAS CONSTRUTORA, IND. COM. E SERVIÇOS LTDA, 2010)

O momento de inércia das lajes nervuradas será diferente do momento de inércia das lajes maciças, fazendo com que a rigidez à flexão das placas sofra modificações. Isso também afetará, por consequência, a sua flecha.

Nos itens seguintes, serão apresentados quadros com os resultados obtidos para o dimensionamento das armaduras e consumo de materiais para os diferentes tipos de fôrmas estudadas. No processo de cálculo desses quadros, para determinados vãos, algumas das lajes nervuradas ficaram com a flecha maior que o permitido ou necessitaram de uma taxa de armadura fora do intervalo aceitável. Logo, para determinadas combinações de vãos e lajes, tem-se resultados marcados com um N, que significa que não apresentou resultados válidos.

6.2.1 Lajes nervuradas apoiadas

As lajes nervuradas que estão simplesmente apoiadas não terão momentos fletores negativos nos bordos, apenas momentos fletores positivos no centro da laje. A seguir, serão dadas as características das lajes nervuradas, assim como o consumo dos materiais, para os diferentes casos de fôrmas.

6.2.1.1 Lajes nervuradas moldadas a partir da cubeta RO 180

As lajes nervuradas moldadas a partir da cubeta RO 180 possuem uma altura livre da fôrma de 180 mm, e foi escolhida uma espessura de capa igual a 50 mm, resultando em uma altura total de 230 mm. A largura das nervuras varia ao longo da altura, sendo igual a 100 mm na parte inferior, aumentando até o valor de 160 mm na parte superior, tendo-se uma largura média de 130 mm. A área da seção é de 534 cm² e seu peso próprio é de 2,98 kN/m². Seu momento de inércia é igual a 24328,67 cm⁴.

Então, para as lajes nervuradas apoiadas, moldadas a partir da fôrma RO 180, as áreas de aço que deverão resistir aos momentos fletores nas duas direções, assim como a distribuição de armadura correspondente e o consumo de concreto e aço, estão apresentados no quadro 10, para as lajes quadradas e no quadro 11, para as retangulares.

Lajes Quadradas Nervuradas RO 180 (60 x 60 x 18) - Apoiadas							
Ly x Lx (mxm)	Asx (cm ² /m)	Aço x /nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y /nerv (vão)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 2	0,16	2 ø 5	0,16	2 ø 5	0,56	4,93	8,78
3 x 3	0,37	2 ø 5	0,37	2 ø 5	1,07	11,10	10,33
4 x 4	0,65	2 ø 5	0,65	2 ø 5	2,25	17,26	7,68
5 x 5	1,02	2 ø 6,3	1,02	2 ø 6,3	3,20	44,04	13,76
6 x 6	1,47	2 ø 8	1,47	2 ø 8	4,29	104,16	24,28
7 x 7	2,01	2 ø 10	2,01	2 ø 10	6,43	207,13	32,20
8 x 8	N	N	N	N	N	N	N
9 x 9	N	N	N	N	N	N	N
10 x 10	N	N	N	N	N	N	N
11 x 11	N	N	N	N	N	N	N
12 x 12	N	N	N	N	N	N	N

Quadro 10: consumo de materiais para lajes quadradas nervuradas (RO 180) apoiadas

Lajes Retangulares Nervuradas RO 180 (60 x 60 x 18) - Apoiadas							
Ly x Lx (mxm)	Asx (cm ² /m)	Aço x /nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y /nerv (vão)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 3	0,16	2 ø 5	0,29	2 ø 5	0,78	8,01	10,24
2 x 4	0,13	2 ø 5	0,37	2 ø 5	1,12	11,10	9,88
3 x 4	0,37	2 ø 5	0,57	2 ø 5	1,57	14,18	9,06
3 x 5	0,34	2 ø 5	0,72	2 ø 6,3	1,86	27,57	14,85
3 x 6	0,30	2 ø 5	0,83	2 ø 6,3	2,15	37,84	17,63
4 x 5	0,66	2 ø 5	0,93	2 ø 6,3	2,69	30,65	11,40
4 x 6	0,63	2 ø 5	1,16	2 ø 8	3,13	60,71	19,42
4 x 7	0,58	2 ø 5	1,34	2 ø 8	3,81	74,91	19,68
4 x 8	0,54	2 ø 5	1,48	2 ø 8	4,25	97,01	22,85
5 x 6	1,03	2 ø 6,3	1,37	2 ø 8	3,71	74,10	19,97
5 x 7	1,01	2 ø 6,3	1,68	2 ø 10	4,53	125,59	27,69
5 x 8	0,96	2 ø 6,3	1,94	2 ø 10	5,04	160,11	31,74
5 x 9	0,90	2 ø 6,3	2,16	2 ø 10	5,55	199,56	35,94
5 x 10	0,85	2 ø 6,3	2,33	2 ø 10	6,38	231,62	36,30
6 x 7	1,50	2 ø 8	1,90	2 ø 10	5,27	155,64	29,55
6 x 8	1,47	2 ø 8	2,29	2 ø 10	5,85	190,17	32,53
6 x 9	1,42	2 ø 8	2,64	2 ø 12,5	6,41	329,49	51,37
6 x 10	N	N	N	N	N	N	N
6 x 11	N	N	N	N	N	N	N
6 x 12	N	N	N	N	N	N	N
7 x 8	N	N	N	N	N	N	N
7 x 9	N	N	N	N	N	N	N
7 x 10	N	N	N	N	N	N	N
7 x 11	N	N	N	N	N	N	N
7 x 12	N	N	N	N	N	N	N
8 x 9	N	N	N	N	N	N	N
8 x 10	N	N	N	N	N	N	N
8 x 11	N	N	N	N	N	N	N
8 x 12	N	N	N	N	N	N	N
9 x 10	N	N	N	N	N	N	N
9 x 11	N	N	N	N	N	N	N
9 x 12	N	N	N	N	N	N	N
10 x 11	N	N	N	N	N	N	N
10 x 12	N	N	N	N	N	N	N
11 x 12	N	N	N	N	N	N	N

Quadro 11: consumo de materiais para lajes retangulares nervuradas (RO 180) apoiadas

6.2.1.2 Lajes nervuradas moldadas a partir da cubeta RO 210.

As lajes nervuradas moldadas a partir da cubeta RO 210 possuem uma altura livre da fôrma de 210 mm, e foi escolhida uma espessura de capa igual a 50 mm, resultando em uma altura total de 260 mm. A largura das nervuras varia ao longo da altura, sendo igual a 100 mm na parte inferior, aumentando até o valor de 160 mm na parte superior, tendo-se uma largura média de 130 mm. A área da seção é de 598 cm² e seu peso próprio é de 3,13 kN/m². Seu momento de inércia é igual a 35784,29 cm⁴.

Então, para as lajes nervuradas apoiadas, moldadas a partir da fôrma RO 210, as áreas de aço que deverão resistir aos momentos fletores nas duas direções, assim como a distribuição de armadura correspondente e o consumo de concreto e aço, estão apresentados nos quadros 12 e 13, para as lajes quadradas e retangulares, respectivamente.

Lajes Quadradas Nervuradas RO 210 (65 x 65 x 21) - Apoiadas							
Ly x Lx (mxm)	Asx (cm ² /m)	Aço x /nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y /nerv (vão)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 2	0,15	2 ø 5	0,15	2 ø 5	0,53	4,93	9,33
3 x 3	0,33	2 ø 5	0,33	2 ø 5	1,43	9,25	6,47
4 x 4	0,58	2 ø 5	0,58	2 ø 5	2,11	17,26	8,17
5 x 5	0,91	2 ø 6,3	0,91	2 ø 6,3	3,71	39,15	10,54
6 x 6	1,32	2 ø 8	1,32	2 ø 8	4,75	94,69	19,94
7 x 7	1,80	2 ø 10	1,80	2 ø 10	7,04	189,87	26,98
8 x 8	N	N	N	N	N	N	N
9 x 9	N	N	N	N	N	N	N
10 x 10	N	N	N	N	N	N	N
11 x 11	N	N	N	N	N	N	N
12 x 12	N	N	N	N	N	N	N

Quadro 12: consumo de materiais para lajes quadradas nervuradas (RO 210) apoiadas

Lajes Retangulares Nervuradas RO 210 (65 x 65 x 21) - Apoiadas							
Ly x Lx (mxm)	Asx (cm ² /m)	Aço x /nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y /nerv (vão)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 3	0,14	2 ø 5	0,26	2 ø 5	0,88	7,09	8,08
2 x 4	0,12	2 ø 5	0,33	2 ø 5	1,06	11,10	10,50
3 x 4	0,33	2 ø 5	0,51	2 ø 5	1,76	13,25	7,55
3 x 5	0,30	2 ø 5	0,65	2 ø 6,3	2,31	24,20	10,49
3 x 6	0,27	2 ø 5	0,74	2 ø 6,3	2,63	33,98	12,91
4 x 5	0,59	2 ø 5	0,83	2 ø 6,3	2,81	28,20	10,03
4 x 6	0,56	2 ø 5	1,04	2 ø 8	3,17	55,97	17,68
4 x 7	0,52	2 ø 5	1,20	2 ø 8	3,86	69,39	17,96
4 x 8	0,48	2 ø 5	1,33	2 ø 8	4,22	90,69	21,49
5 x 6	0,93	2 ø 6,3	1,23	2 ø 8	4,21	66,92	15,88
5 x 7	0,90	2 ø 6,3	1,51	2 ø 8	5,11	80,33	15,71
5 x 8	0,86	2 ø 6,3	1,74	2 ø 10	5,61	147,80	26,34
5 x 9	0,81	2 ø 6,3	1,93	2 ø 10	6,51	174,92	26,87
5 x 10	0,76	2 ø 6,3	2,08	2 ø 10	7,01	216,84	30,93
6 x 7	1,34	2 ø 8	1,70	2 ø 10	5,79	142,28	24,57
6 x 8	1,32	2 ø 8	2,05	2 ø 10	6,32	175,57	27,76
6 x 9	1,27	2 ø 8	2,36	2 ø 10	7,37	202,69	27,50
6 x 10	1,21	2 ø 8	2,61	2 ø 12,5	7,89	355,57	45,07
6 x 11	1,16	2 ø 8	2,81	2 ø 12,5	8,93	407,59	45,64
6 x 12	1,09	2 ø 8	3,02	2 ø 12,5	9,46	486,57	51,44
7 x 8	1,83	2 ø 10	2,25	2 ø 10	7,72	223,16	28,92
7 x 9	N	N	N	N	N	N	N
7 x 10	N	N	N	N	N	N	N
7 x 11	N	N	N	N	N	N	N
7 x 12	N	N	N	N	N	N	N
8 x 9	N	N	N	N	N	N	N
8 x 10	N	N	N	N	N	N	N
8 x 11	N	N	N	N	N	N	N
8 x 12	N	N	N	N	N	N	N
9 x 10	N	N	N	N	N	N	N
9 x 11	N	N	N	N	N	N	N
9 x 12	N	N	N	N	N	N	N
10 x 11	N	N	N	N	N	N	N
10 x 12	N	N	N	N	N	N	N
11 x 12	N	N	N	N	N	N	N

Quadro 13: consumo de materiais para lajes retangulares nervuradas (RO 210) apoiadas

6.2.1.3 Lajes nervuradas moldadas a partir da cubeta RO 800

As lajes nervuradas moldadas a partir da cubeta RO 800 possuem fôrmas com diferentes alturas. Para este trabalho, foram escolhidas as alturas livres da fôrma de 350 mm e 400 mm, formando uma laje nervurada com uma altura mais elevada em relação às outras, o que fará com que estas lajes resistam melhor aos momentos fletores.

Para a laje moldada a partir da cubeta RO 800 com altura livre da fôrma de 350 mm, e com uma espessura de capa igual a 50 mm, tem-se uma altura total de 400 mm. A largura das nervuras varia ao longo da altura, sendo igual a 120 mm na parte inferior, aumentando até o valor de 220 mm na parte superior, tendo-se uma largura média de 170 mm. A área da seção é de 995 cm² e seu peso próprio é de 4,58 kN/m². Seu momento de inércia é igual a 86999,69cm⁴.

Então, para as lajes nervuradas apoiadas, moldadas a partir da fôrma RO 800 com altura livre da fôrma de 350 mm, as áreas de aço que deverão resistir aos momentos fletores nas duas direções, assim como a distribuição de armadura correspondente e o consumo de concreto e aço, estão apresentados nos quadros 14 e 15, para as lajes quadradas e retangulares, respectivamente.

Lajes Quadradas Nervuradas RO 800 (80 x 80 x 35) - Apoiadas							
Ly x Lx (mxm)	Asx (cm ² /m)	Aço x /nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y /nerv (vão)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 2	0,11	2 ø 5	0,11	2 ø 5	1,04	3,70	3,54
3 x 3	0,26	2 ø 5	0,26	2 ø 5	2,35	7,40	3,15
4 x 4	0,46	2 ø 5	0,46	2 ø 5	2,93	14,80	5,06
5 x 5	0,71	2 ø 6,3	0,71	2 ø 6,3	4,99	34,25	6,86
6 x 6	1,03	2 ø 8	1,03	2 ø 8	7,58	75,75	9,99
7 x 7	1,40	2 ø 10	1,40	2 ø 10	10,69	155,35	14,53
8 x 8	1,83	2 ø 10	1,83	2 ø 10	11,68	216,99	18,58
9 x 9	2,32	2 ø 12,5	2,32	2 ø 12,5	15,54	416,11	26,78
10 x 10	N	N	N	N	N	N	N
11 x 11	N	N	N	N	N	N	N
12 x 12	N	N	N	N	N	N	N

Quadro 14: consumo de materiais para lajes quadradas nervuradas (RO 800 e altura livre da fôrma de 350 mm) apoiadas

Laje Retangulares Nervuradas RO 800 (80 x 80 x 35) - Apoiadas								
Ly x Lx (mxm)	Asx (cm ² /m)	Aço x/nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y/nerv (vão)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)	
2 x 3	0,11	2 ø 5	0,20	2 ø 5	1,57	5,55	3,54	
2 x 4	0,09	2 ø 5	0,26	2 ø 5	1,81	9,25	5,11	
3 x 4	0,26	2 ø 5	0,40	2 ø 5	2,71	11,10	4,09	
3 x 5	0,24	2 ø 5	0,50	2 ø 6,3	3,50	20,83	5,96	
3 x 6	0,21	2 ø 5	0,58	2 ø 6,3	4,28	27,19	6,35	
4 x 5	0,46	2 ø 5	0,65	2 ø 6,3	3,83	24,52	6,40	
4 x 6	0,44	2 ø 5	0,81	2 ø 8	4,73	45,27	9,57	
4 x 7	0,41	2 ø 5	0,93	2 ø 8	5,64	57,11	10,13	
4 x 8	0,38	2 ø 5	1,03	2 ø 8	5,84	76,84	13,15	
5 x 6	0,72	2 ø 6,3	0,96	2 ø 8	6,16	55,00	8,93	
5 x 7	0,70	2 ø 6,3	1,17	2 ø 8	7,32	66,84	9,13	
5 x 8	0,67	2 ø 6,3	1,35	2 ø 10	7,65	125,62	16,42	
5 x 9	0,63	2 ø 6,3	1,50	2 ø 10	8,81	150,28	17,05	
5 x 10	0,59	2 ø 6,3	1,62	2 ø 10	9,98	177,41	17,78	
6 x 7	1,04	2 ø 8	1,32	2 ø 10	9,01	115,55	12,83	
6 x 8	1,03	2 ø 8	1,59	2 ø 10	9,46	146,37	15,48	
6 x 9	0,99	2 ø 8	1,83	2 ø 10	10,88	171,03	15,72	
6 x 10	0,94	2 ø 8	2,02	2 ø 12,5	12,29	288,31	23,45	
6 x 11	0,90	2 ø 8	2,18	2 ø 12,5	13,72	334,55	24,39	
6 x 12	0,85	2 ø 8	2,33	2 ø 12,5	14,16	407,75	28,79	
7 x 8	1,42	2 ø 10	1,75	2 ø 10	11,26	186,17	16,53	
7 x 9	1,41	2 ø 10	2,07	2 ø 12,5	12,94	285,73	22,08	
7 x 10	1,38	2 ø 10	2,36	2 ø 12,5	14,62	328,11	22,44	
7 x 11	1,32	2 ø 10	2,61	2 ø 12,5	16,31	374,34	22,96	
7 x 12	1,27	2 ø 10	2,83	2 ø 12,5	16,87	447,55	26,52	
8 x 9	1,86	2 ø 10	2,23	2 ø 12,5	13,48	316,55	23,48	
8 x 10	1,85	2 ø 10	2,60	2 ø 12,5	15,28	358,93	23,48	
8 x 11	1,82	2 ø 10	2,95	2 ø 12,5	17,09	405,17	23,71	
8 x 12	N	N	N	N	N	N	N	
9 x 10	N	N	N	N	N	N	N	
9 x 11	N	N	N	N	N	N	N	
9 x 12	N	N	N	N	N	N	N	
10 x 11	N	N	N	N	N	N	N	
10 x 12	N	N	N	N	N	N	N	
11 x 12	N	N	N	N	N	N	N	

Quadro 15: consumo de materiais para lajes retangulares nervuradas (RO 800 e altura livre da fôrma de 350 mm) apoiadas

Para a laje moldada a partir da cubeta RO 800 com altura livre da fôrma de 400 mm, e com uma espessura de capa igual a 50 mm, tem-se uma altura total de 450 mm. A largura das nervuras varia ao longo da altura, sendo igual a 120 mm na parte inferior, aumentando até o valor de 236 mm na parte superior, tendo-se uma largura média da 178 mm. A área da seção é de 1112 cm² e seu peso próprio é de 5,20 kN/m². O momento de inércia é igual a 225424,90cm⁴.

Então, para as lajes nervuradas apoiadas, moldadas a partir da fôrma RO 800 com altura livre da fôrma de 400 mm, as áreas de aço que deverão resistir aos momentos fletores nas duas direções, assim como a distribuição de armadura correspondente e o consumo de concreto e aço, estão apresentados no quadro 16, para as lajes quadradas e no quadro 17, para as retangulares.

Lajes Quadradas Nervuradas RO 800 (80 x 80 x 40) - Apoiadas							
Ly x Lx (mxm)	Asx (cm ² /m)	Aço x /nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y /nerv (vão)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 2	0,10	2 ø 5	0,10	2 ø 5	1,18	3,70	3,13
3 x 3	0,23	2 ø 5	0,23	2 ø 5	2,66	7,40	2,78
4 x 4	0,40	2 ø 5	0,40	2 ø 5	3,33	14,80	4,44
5 x 5	0,63	2 ø 6,3	0,63	2 ø 6,3	5,67	34,25	6,04
6 x 6	0,91	2 ø 8	0,91	2 ø 8	8,61	75,75	8,80
7 x 7	1,23	2 ø 8	1,23	2 ø 8	12,13	99,42	8,19
8 x 8	1,61	2 ø 10	1,61	2 ø 10	13,30	216,99	16,32
9 x 9	2,05	2 ø 12,5	2,05	2 ø 12,5	17,67	416,11	23,55
10 x 10	2,53	2 ø 12,5	2,53	2 ø 12,5	22,65	500,87	22,11
11 x 11	3,07	2 ø 12,5	3,07	2 ø 12,5	28,22	593,34	21,02
12 x 12	N	N	N	N	N	N	N

Quadro 16: consumo de materiais para lajes quadradas nervuradas (RO 800 e altura livre da fôrma de 400 mm) apoiadas

Lajes Retangulares Nervuradas RO 800 (80 x 80 x 40) - Apoiadas								
Ly x Lx (mxm)	Asx (cm ² /m)	Aço x /nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y /nerv (vão)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)	
2 x 3	0,11	2 ø 5	0,20	2 ø 5	1,77	5,55	3,13	
2 x 4	0,09	2 ø 5	0,26	2 ø 5	2,05	9,25	4,51	
3 x 4	0,26	2 ø 5	0,40	2 ø 5	3,08	11,10	3,61	
3 x 5	0,24	2 ø 5	0,50	2 ø 6,3	3,96	20,83	5,26	
3 x 6	0,21	2 ø 5	0,58	2 ø 6,3	4,85	27,19	5,61	
4 x 5	0,46	2 ø 5	0,65	2 ø 6,3	4,35	24,52	5,63	
4 x 6	0,44	2 ø 5	0,81	2 ø 8	5,38	45,27	8,42	
4 x 7	0,41	2 ø 5	0,93	2 ø 8	6,40	57,11	8,92	
4 x 8	0,38	2 ø 5	1,03	2 ø 8	6,65	76,84	11,55	
5 x 6	0,72	2 ø 6,3	0,96	2 ø 8	6,99	55,00	7,86	
5 x 7	0,70	2 ø 6,3	1,17	2 ø 8	8,31	66,84	8,04	
5 x 8	0,67	2 ø 6,3	1,35	2 ø 10	8,70	125,62	14,44	
5 x 9	0,63	2 ø 6,3	1,50	2 ø 10	10,02	150,28	15,00	
5 x 10	0,59	2 ø 6,3	1,62	2 ø 10	11,34	177,41	15,65	
6 x 7	1,04	2 ø 8	1,32	2 ø 10	10,22	115,55	11,31	
6 x 8	1,03	2 ø 8	1,59	2 ø 10	10,75	146,37	13,62	
6 x 9	0,99	2 ø 8	1,83	2 ø 10	12,36	171,03	13,83	
6 x 10	0,94	2 ø 8	2,02	2 ø 12,5	13,96	288,31	20,65	
6 x 11	0,90	2 ø 8	2,18	2 ø 12,5	15,57	334,55	21,48	
6 x 12	0,85	2 ø 8	2,33	2 ø 12,5	16,10	407,75	25,33	
7 x 8	1,42	2 ø 10	1,75	2 ø 10	12,80	186,17	14,55	
7 x 9	1,41	2 ø 10	2,07	2 ø 12,5	14,70	285,73	19,44	
7 x 10	1,38	2 ø 10	2,36	2 ø 12,5	16,60	328,11	19,76	
7 x 11	1,32	2 ø 10	2,61	2 ø 12,5	18,51	374,34	20,23	
7 x 12	1,27	2 ø 10	2,83	2 ø 12,5	19,17	447,55	23,34	
8 x 9	1,86	2 ø 10	2,23	2 ø 12,5	15,34	316,55	20,64	
8 x 10	1,85	2 ø 10	2,60	2 ø 12,5	17,38	358,93	20,65	
8 x 11	1,82	2 ø 10	2,95	2 ø 12,5	19,43	405,17	20,85	
8 x 12	1,77	2 ø 10	3,26	2 ø 16	19,90	714,50	35,91	
9 x 10	2,36	2 ø 12,5	2,78	2 ø 12,5	20,01	458,49	22,91	
9 x 11	2,35	2 ø 12,5	3,20	2 ø 16	22,33	694,12	31,08	
9 x 12	2,32	2 ø 12,5	3,60	2 ø 16	22,96	814,06	35,45	
10 x 11	2,92	2 ø 12,5	3,38	2 ø 16	25,26	736,50	29,15	
10 x 12	2,91	2 ø 12,5	3,87	2 ø 16	26,04	856,44	32,90	
11 x 12	3,54	2 ø 16	4,05	2 ø 16	29,08	1092,07	37,55	

Quadro 17: consumo de materiais para lajes retangulares nervuradas (RO 800 e altura livre da fôrma de 400 mm) apoiadas

6.2.1.4 Lajes nervuradas moldadas a partir da cubeta RO 900.

As lajes nervuradas moldadas a partir da cubeta RO 900 possuem uma altura livre da fôrma de 225 mm, e foi escolhida uma espessura de capa igual a 50 mm, resultando em uma altura total de 275 mm. A largura das nervuras varia ao longo da altura, sendo igual a 120 mm na parte inferior, aumentando até o valor de 190 mm na parte superior, tendo-se uma largura média de 155 mm. A área da seção é de 799 cm² e seu peso próprio é de 3,03 kN/m². Seu momento de inércia é igual a 52797,21 cm⁴.

Então, para as lajes nervuradas apoiadas, moldadas a partir da fôrma RO 900, as áreas de aço que deverão resistir aos momentos fletores nas duas direções, assim como a distribuição de armadura correspondente e o consumo de concreto e aço, estão apresentados nos quadros 18 e 19, para as lajes quadradas e retangulares, respectivamente.

Lajes Quadradas Nervuradas RO 900 (90 x 90 x 22,5) - Apoiadas							
Ly x Lx (mxm)	Asx (cm ² /m)	Aço x /nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y /nerv (vão)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 2	0,14	2 ø 5	0,14	2 ø 5	0,60	3,70	6,16
3 x 3	0,32	2 ø 5	0,32	2 ø 5	1,35	7,40	5,48
4 x 4	0,57	2 ø 6,3	0,57	2 ø 6,3	2,40	19,57	8,16
5 x 5	0,90	2 ø 8	0,90	2 ø 8	3,75	47,34	12,64
6 x 6	1,30	2 ø 10	1,30	2 ø 10	5,39	103,57	19,21
7 x 7	1,77	2 ø 12,5	1,77	2 ø 12,5	7,33	215,76	29,44
8 x 8	2,32	2 ø 12,5	2,32	2 ø 12,5	9,57	277,41	28,98
9 x 9	N	N	N	N	N	N	N
10 x 10	N	N	N	N	N	N	N
11 x 11	N	N	N	N	N	N	N
12 x 12	N	N	N	N	N	N	N

Quadro 18: consumo de materiais para lajes quadradas nervuradas (RO 900) apoiadas

Lajes Retangulares Nervuradas RO 900 (90 x 90 x 22,5) - Apoiadas							
Ly x Lx (mxm)	Asx (cm ² /m)	Aço x /nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y /nerv (vão)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 3	0,14	2 ø 5	0,25	2 ø 5	0,90	5,55	6,16
2 x 4	0,12	2 ø 5	0,32	2 ø 5	1,20	8,01	6,68
3 x 4	0,32	2 ø 5	0,50	2 ø 6,3	1,80	13,49	7,49
3 x 5	0,30	2 ø 5	0,64	2 ø 6,3	2,25	18,38	8,17
3 x 6	0,27	2 ø 5	0,73	2 ø 8	2,70	36,84	13,66
4 x 5	0,58	2 ø 6,3	0,82	2 ø 8	3,00	33,46	11,16
4 x 6	0,55	2 ø 6,3	1,02	2 ø 8	3,60	42,93	11,93
4 x 7	0,51	2 ø 6,3	1,18	2 ø 10	4,19	78,83	18,80
4 x 8	0,48	2 ø 6,3	1,30	2 ø 10	4,79	98,56	20,57
5 x 6	0,91	2 ø 8	1,21	2 ø 10	4,49	75,45	16,79
5 x 7	0,89	2 ø 8	1,48	2 ø 10	5,24	92,72	17,69
5 x 8	0,84	2 ø 8	1,71	2 ø 10	5,99	112,44	18,77
5 x 9	0,79	2 ø 8	1,90	2 ø 12,5	6,10	214,39	35,12
5 x 10	0,75	2 ø 8	2,05	2 ø 12,5	6,85	254,84	37,21
6 x 7	1,32	2 ø 10	1,67	2 ø 10	6,29	120,83	19,21
6 x 8	1,30	2 ø 10	2,01	2 ø 12,5	7,18	190,49	26,52
6 x 9	1,25	2 ø 10	2,32	2 ø 12,5	7,33	242,50	33,10
6 x 10	1,19	2 ø 10	2,57	2 ø 12,5	8,22	282,95	34,42
6 x 11	1,14	2 ø 10	2,77	2 ø 16	9,09	503,13	55,32
6 x 12	1,08	2 ø 8	2,96	2 ø 16	9,99	563,39	56,41
7 x 8	1,80	2 ø 12,5	2,22	2 ø 12,5	8,38	246,58	29,44
7 x 9	1,78	2 ø 12,5	2,63	2 ø 12,5	8,55	298,60	34,94
7 x 10	1,74	2 ø 10	3,00	2 ø 16	9,58	447,80	46,76
7 x 11	1,68	2 ø 10	3,33	2 ø 16	10,62	520,39	49,01
7 x 12	1,60	2 ø 10	3,61	2 ø 16	11,66	599,30	51,40
8 x 9	2,36	2 ø 12,5	2,84	2 ø 16	9,75	451,17	46,26
8 x 10	N	N	N	N	N	N	N
8 x 11	N	N	N	N	N	N	N
8 x 12	N	N	N	N	N	N	N
9 x 10	N	N	N	N	N	N	N
9 x 11	N	N	N	N	N	N	N
9 x 12	N	N	N	N	N	N	N
10 x 11	N	N	N	N	N	N	N
10 x 12	N	N	N	N	N	N	N
11 x 12	N	N	N	N	N	N	N

Quadro 19: consumo de materiais para lajes retangulares nervuradas (RO 900) apoiadas

6.2.2 Lajes nervuradas engastadas

As lajes nervuradas engastadas possuem momentos fletores negativos junto aos bordos, sendo necessário, portanto, dimensionar as armaduras para as duas direções tanto no centro da laje quanto nos bordos.

6.2.2.1 Lajes nervuradas moldadas a partir da cubeta RO 180

As lajes moldadas a partir da cubeta RO 180 possuem as características já citadas no item 6.2.1.1 e mostradas na figura 8. O dimensionamento das armaduras e o consumo de concreto e aço estão mostrados nos quadros 20 e 21, para as lajes quadradas e retangulares, respectivamente.

Lajes Quadradas Nervuradas RO 180 (60 x 60 x 18) - Engastadas											
Ly x Lx (m x m)	Asx (cm ² /m)	Aço x /nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y /nerv (vão)	Asx' (cm ² /m)	Aço x /nerv (eng)	Asy' (cm ² /m)	Aço y /nerv (eng)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 2	0,08	2 ø 5	0,08	2 ø 5	1,46	2 ø 8	1,46	2 ø 8	0,56	11,24	20,05
3 x 3	0,17	2 ø 5	0,17	2 ø 5	3,32	3 ø 10	3,32	3 ø 10	1,07	44,39	41,47
4 x 4	0,31	2 ø 5	0,31	2 ø 5	6,01	3 ø 12,5	6,01	3 ø 12,5	2,24	98,17	43,90
5 x 5	0,49	2 ø 5	0,49	2 ø 5	9,65	3 ø 16	9,65	3 ø 16	3,17	240,79	75,85
6 x 6	0,70	2 ø 6,3	0,70	2 ø 6,3	14,39	3 ø 20	14,39	3 ø 20	4,23	552,83	130,59
7 x 7	0,95	2 ø 6,3	0,95	2 ø 6,3	20,54	4 ø 20	20,54	4 ø 20	6,34	910,73	143,59
8 x 8	1,25	2 ø 8	1,25	2 ø 8	28,68	4 ø 25	28,68	4 ø 25	7,76	1902,84	245,28
9 x 9	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
10 x 10	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
11 x 11	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
12 x 12	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

Quadro 20: consumo de materiais para lajes quadradas nervuradas (RO 180) engastadas

Lajes Retangulares Nervuradas RO 180 (60 x 60 x 18) - Engastadas											
Ly x Lx (mxm)	Asx (cm ² /m)	Aço x /nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y /nerv (vão)	Asx' (cm ² /m)	Aço x /nerv (eng)	Asy' (cm ² /m)	Aço y / nerv (eng)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 3	0,06	2 ø 5	0,13	2 ø 5	1,61	2 ø 8	2,15	3 ø 8	0,78	21,82	27,95
2 x 4	0,04	2 ø 5	0,15	2 ø 5	1,60	2 ø 8	2,37	3 ø 8	1,12	30,82	27,51
3 x 4	0,16	2 ø 5	0,27	2 ø 5	3,67	3 ø 10	4,57	3 ø 12,5	1,56	71,28	45,75
3 x 5	0,12	2 ø 5	0,32	2 ø 5	3,66	3 ø 10	5,16	3 ø 12,5	1,85	101,08	54,74
3 x 6	0,10	2 ø 5	0,34	2 ø 5	3,65	3 ø 10	5,45	3 ø 12,5	2,13	137,89	64,61
4 x 5	0,29	2 ø 5	0,44	2 ø 5	6,59	2 ø 16	7,88	4 ø 12,5	2,67	153,38	57,40
4 x 6	0,25	2 ø 5	0,53	2 ø 5	6,69	2 ø 16	9,01	3 ø 16	3,11	229,40	73,88
4 x 7	0,20	2 ø 5	0,57	2 ø 5	6,64	2 ø 16	9,62	3 ø 16	3,78	277,55	73,42
4 x 8	0,17	2 ø 5	0,60	2 ø 5	6,62	2 ø 16	10,00	3 ø 16	4,21	352,47	83,65
5 x 6	0,47	2 ø 5	0,66	2 ø 5	10,50	4 ø 16	12,19	4 ø 16	3,67	384,56	104,78
5 x 7	0,42	2 ø 5	0,78	2 ø 6,3	10,79	4 ø 16	14,07	3 ø 20	4,49	507,70	113,17
5 x 8	0,36	2 ø 5	0,86	2 ø 6,3	10,72	4 ø 16	15,17	3 ø 20	4,99	624,97	125,37
5 x 9	0,31	2 ø 5	0,91	2 ø 6,3	10,67	4 ø 16	15,89	2 ø 25	5,48	781,18	142,58
5 x 10	0,27	2 ø 5	0,94	2 ø 6,3	10,65	4 ø 16	16,40	3 ø 25	6,25	1221,57	195,30
6 x 7	0,68	2 ø 6,3	0,91	2 ø 6,3	15,59	2 ø 25	17,75	3 ø 25	5,18	813,15	156,90
6 x 8	0,62	2 ø 5	1,07	2 ø 8	16,09	2 ø 25	20,62	3 ø 25	5,74	1010,29	175,94
6 x 9	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
6 x 10	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
6 x 11	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
6 x 12	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
7 x 8	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
7 x 9	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
7 x 10	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
7 x 11	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
7 x 12	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
8 x 9	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
8 x 10	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
8 x 11	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
8 x 12	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
9 x 10	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
9 x 11	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
9 x 12	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
10 x 11	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
10 x 12	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
11 x 12	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

Quadro 21: consumo de materiais para lajes retangulares nervuradas (RO 180) engastadas

6.2.2.2 Lajes nervuradas moldadas a partir da cubeta RO 210

As lajes moldadas a partir da cubeta RO 210 possuem as características já citadas no item 6.2.1.2 e mostradas na figura 9. O dimensionamento das armaduras e o consumo de concreto e aço estão mostrados nos quadros 22 e 23, para as lajes quadradas e retangulares, respectivamente.

Lajes Quadradas Nervuradas RO 210 (65 x 65 x 21) - Engastadas											
Ly x Lx (mxm)	Asx (cm ² /m)	Aço x /nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y /nerv (vão)	Asx' (cm ² /m)	Aço x /nerv (eng)	Asy' (cm ² /m)	Aço y / nerv (eng)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 2	0,07	2 ø 5	0,07	2 ø 5	1,30	2 ø 10	1,30	2 ø 10	0,53	14,80	28,07
3 x 3	0,16	2 ø 5	0,16	2 ø 5	2,96	3 ø 10	2,96	3 ø 10	1,43	36,99	25,92
4 x 4	0,28	2 ø 5	0,28	2 ø 5	5,34	3 ø 12,5	5,34	3 ø 12,5	2,10	98,17	46,68
5 x 5	0,43	2 ø 5	0,43	2 ø 5	8,51	3 ø 16	8,51	3 ø 16	3,69	214,03	58,00
6 x 6	0,63	2 ø 6,3	0,63	2 ø 6,3	12,58	3 ø 20	12,58	3 ø 20	4,70	502,57	107,01
7 x 7	0,85	2 ø 6,3	0,85	2 ø 6,3	17,71	3 ø 25	17,71	3 ø 25	6,94	965,37	139,13
8 x 8	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
9 x 9	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
10 x 10	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
11 x 11	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
12 x 12	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

Quadro 22: consumo de materiais para lajes quadradas nervuradas (RO 210) engastadas

Lajes Retangulares Nervuradas RO 210 (65 x 65 x 21) - Engastadas											
Ly x Lx (mxm)	Asx (cm ² /m)	Aço x /nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y /nerv (vão)	Asx' (cm ² /m)	Aço x /nerv (eng)	Asy' (cm ² /m)	Aço y / nerv (eng)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 3	0,06	2 ø 5	0,12	2 ø 5	1,44	2 ø 8	1,92	2 ø 10	0,88	19,49	22,25
2 x 4	0,04	2 ø 5	0,13	2 ø 5	1,43	2 ø 8	2,12	2 ø 10	1,05	31,51	29,90
3 x 4	0,14	2 ø 5	0,24	2 ø 5	3,28	3 ø 10	4,07	3 ø 12,5	1,75	67,58	38,65
3 x 5	0,11	2 ø 5	0,28	2 ø 5	3,26	3 ø 10	4,59	3 ø 12,5	2,30	88,62	38,55
3 x 6	0,09	2 ø 5	0,30	2 ø 5	3,25	3 ø 10	4,84	3 ø 12,5	2,62	123,68	47,20
4 x 5	0,26	2 ø 5	0,40	2 ø 5	5,85	2 ø 16	6,98	4 ø 12,5	2,80	142,20	50,84
4 x 6	0,22	2 ø 5	0,47	2 ø 5	5,94	2 ø 16	7,97	3 ø 16	3,15	213,34	67,80
4 x 7	0,18	2 ø 5	0,51	2 ø 5	5,89	2 ø 16	8,49	3 ø 16	3,84	258,83	67,40
4 x 8	0,16	2 ø 5	0,54	2 ø 5	5,87	2 ø 16	8,83	3 ø 16	4,19	331,06	79,02
5 x 6	0,42	2 ø 5	0,59	2 ø 5	9,25	3 ø 16	10,71	4 ø 16	4,18	314,89	75,29
5 x 7	0,37	2 ø 5	0,70	2 ø 6,3	9,50	2 ø 20	12,32	4 ø 16	5,08	391,68	77,17
5 x 8	0,32	2 ø 5	0,77	2 ø 6,3	9,44	2 ø 20	13,25	3 ø 20	5,56	546,52	98,29
5 x 9	0,28	2 ø 5	0,81	2 ø 6,3	9,40	2 ø 20	13,85	3 ø 20	6,45	638,66	99,00
5 x 10	0,24	2 ø 5	0,85	2 ø 6,3	9,38	2 ø 20	14,28	3 ø 20	6,94	781,06	112,57
6 x 7	0,61	2 ø 6,3	0,81	2 ø 6,3	13,60	3 ø 20	15,41	3 ø 25	5,72	733,97	128,41
6 x 8	0,56	2 ø 5	0,96	2 ø 8	14,02	3 ø 20	17,78	3 ø 25	6,23	923,53	148,25
6 x 9	0,50	2 ø 5	1,07	2 ø 8	14,07	3 ø 20	19,30	3 ø 25	7,26	1068,03	147,11
6 x 10	0,44	2 ø 5	1,14	2 ø 8	13,96	3 ø 20	20,32	3 ø 25	7,77	1291,36	166,21
6 x 11	0,39	2 ø 5	1,18	2 ø 8	13,94	3 ø 20	20,98	3 ø 25	8,80	1468,70	166,97
6 x 12	0,35	2 ø 5	1,22	2 ø 8	13,91	3 ø 20	21,60	3 ø 25	9,30	1738,01	186,89
7 x 8	0,84	2 ø 6,3	1,08	2 ø 8	19,06	3 ø 25	21,31	3 ø 25	7,60	1165,80	153,45
7 x 9	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
7 x 10	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
7 x 11	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
7 x 12	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
8 x 9	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
8 x 10	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
8 x 11	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
8 x 12	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
9 x 10	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
9 x 11	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
9 x 12	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
10 x 11	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
10 x 12	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
11 x 12	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

Quadro 23: consumo de materiais para lajes retangulares nervuradas (RO 210) engastadas

6.2.2.3 Lajes nervuradas moldadas a partir da cubeta RO 800

As lajes moldadas com a cubeta RO 800 e com a altura livre de 350 mm possuem as características já citadas no item 6.2.1.3 e mostradas na figura 10. O dimensionamento das armaduras e o consumo de concreto e aço estão mostrados nos quadros 24 e 25, para as lajes quadradas e retangulares, respectivamente.

Lajes Quadradas Nervuradas RO 800 (80 x 80 x 35) - Engastadas											
Ly x Lx (mxm)	Asx (cm ² /m)	Aço x /nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y /nerv (vão)	Asx' (cm ² /m)	Aço x /nerv (eng)	Asy' (cm ² /m)	Aço y /nerv (eng)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 2	0,05	2 ø 5	0,05	2 ø 5	0,77	2 ø 6,3	0,77	2 ø 6,3	1,04	6,63	6,36
3 x 3	0,12	2 ø 5	0,12	2 ø 5	1,75	2 ø 10	1,75	2 ø 10	2,35	22,19	9,46
4 x 4	0,22	2 ø 5	0,22	2 ø 5	3,13	3 ø 12,5	3,13	3 ø 12,5	2,92	84,15	28,85
5 x 5	0,34	2 ø 5	0,34	2 ø 5	4,92	2 ø 16	4,92	2 ø 16	4,98	132,05	26,50
6 x 6	0,49	2 ø 5	0,49	2 ø 5	7,14	3 ø 16	7,14	3 ø 16	7,56	256,84	33,97
7 x 7	0,67	2 ø 6,3	0,67	2 ø 6,3	9,82	4 ø 16	9,82	4 ø 16	10,65	459,35	43,13
8 x 8	0,87	2 ø 8	0,87	2 ø 8	12,99	4 ø 20	12,99	4 ø 20	11,58	1006,85	86,95
9 x 9	1,10	2 ø 8	1,10	2 ø 8	16,69	3 ø 25	16,69	3 ø 25	15,41	1418,77	92,06
10 x 10	1,36	2 ø 10	1,36	2 ø 10	20,96	4 ø 25	20,96	4 ø 25	19,70	2324,05	117,97
11 x 11	1,65	2 ø 10	1,65	2 ø 10	25,89	5 ø 25	25,89	5 ø 25	24,50	3346,45	136,61
12 x 12	1,97	2 ø 10	1,97	2 ø 10	31,55	6 ø 25	31,55	6 ø 25	25,72	4911,95	190,99

Quadro 24: consumo de materiais para lajes quadradas nervuradas (RO 800 e altura livre da fôrma de 350 mm) engastadas

Lajes Retangulares Nervuradas RO 800 (80 x 80 x 35) - Engastadas												
Ly x Lx (mxm)	Asx (cm ² /m)	Aço x /nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y /nerv (vão)	Asx' (cm ² /m)	Aço x /nerv (eng)	Asy' (cm ² /m)	Aço y /nerv (eng)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)	
2 x 3	0,04	2 ø 5	0,09	2 ø 5	0,86	2 ø 8	1,14	2 ø 8	1,56	12,65	8,08	
2 x 4	0,03	2 ø 5	0,11	2 ø 5	0,85	2 ø 8	1,25	2 ø 8	1,81	21,08	11,66	
3 x 4	0,11	2 ø 5	0,19	2 ø 5	1,93	2 ø 10	2,40	3 ø 10	2,71	40,69	15,01	
3 x 5	0,09	2 ø 5	0,22	2 ø 5	1,93	2 ø 10	2,69	3 ø 10	3,49	54,25	15,53	
3 x 6	0,07	2 ø 5	0,24	2 ø 5	1,92	2 ø 10	2,84	3 ø 10	4,27	70,28	16,44	
4 x 5	0,20	2 ø 5	0,31	2 ø 5	3,42	4 ø 10	4,06	3 ø 12,5	3,82	98,34	25,74	
4 x 6	0,17	2 ø 5	0,37	2 ø 5	3,47	4 ø 10	4,61	4 ø 12,5	4,72	144,25	30,56	
4 x 7	0,14	2 ø 5	0,40	2 ø 5	3,44	4 ø 10	4,91	4 ø 12,5	5,62	177,77	31,63	
4 x 8	0,12	2 ø 5	0,42	2 ø 5	3,43	4 ø 10	5,09	4 ø 12,5	5,82	233,64	40,11	
5 x 6	0,33	2 ø 5	0,46	2 ø 5	5,33	4 ø 12,5	6,13	4 ø 12,5	6,14	185,48	30,20	
5 x 7	0,29	2 ø 5	0,55	2 ø 6,3	5,47	4 ø 12,5	7,00	3 ø 16	7,30	258,18	35,37	
5 x 8	0,25	2 ø 5	0,60	2 ø 6,3	5,43	4 ø 12,5	7,50	3 ø 16	7,62	329,59	43,24	
5 x 9	0,22	2 ø 5	0,63	2 ø 6,3	5,41	4 ø 12,5	7,82	4 ø 16	8,77	471,94	53,80	
5 x 10	0,19	2 ø 5	0,66	2 ø 6,3	5,40	4 ø 12,5	8,05	4 ø 16	9,93	552,14	55,62	
6 x 7	0,48	2 ø 5	0,63	2 ø 6,3	7,68	3 ø 20	8,64	4 ø 16	8,97	422,01	47,06	
6 x 8	0,44	2 ø 5	0,75	2 ø 6,3	7,91	3 ø 20	9,86	4 ø 16	9,41	513,15	54,53	
6 x 9	0,39	2 ø 5	0,83	2 ø 8	7,94	3 ø 20	10,62	3 ø 20	10,82	677,02	62,59	
6 x 10	0,34	2 ø 5	0,89	2 ø 8	7,88	3 ø 20	11,13	3 ø 20	12,23	775,75	63,42	
6 x 11	0,31	2 ø 5	0,92	2 ø 8	7,86	3 ø 20	11,46	3 ø 20	13,65	883,46	64,74	
6 x 12	0,27	2 ø 5	0,95	2 ø 8	7,85	3 ø 20	11,76	3 ø 20	14,08	1054,00	74,86	
7 x 8	0,66	2 ø 6,3	0,84	2 ø 8	10,51	3 ø 20	11,62	3 ø 20	11,20	658,78	58,80	
7 x 9	0,61	2 ø 6,3	0,98	2 ø 8	10,82	3 ø 20	13,20	4 ø 20	12,86	881,69	68,54	
7 x 10	0,56	2 ø 6,3	1,09	2 ø 8	10,97	3 ø 20	14,30	4 ø 20	14,54	1007,55	69,31	
7 x 11	0,51	2 ø 6,3	1,17	2 ø 8	10,89	3 ø 20	15,03	4 ø 20	16,21	1144,84	70,64	
7 x 12	0,45	2 ø 5	1,22	2 ø 8	10,84	3 ø 20	15,56	4 ø 20	16,76	1350,82	80,61	
8 x 9	0,86	2 ø 8	1,07	2 ø 8	13,83	4 ø 20	15,10	4 ø 20	13,38	1121,26	83,82	
8 x 10	0,81	2 ø 8	1,24	2 ø 8	14,26	4 ø 20	17,08	3 ø 25	15,16	1357,31	89,55	
8 x 11	0,76	2 ø 6,3	1,38	2 ø 10	14,47	4 ø 20	18,54	5 ø 20	16,94	1616,27	95,44	
8 x 12	0,70	2 ø 6,3	1,48	2 ø 10	14,48	4 ø 20	19,57	5 ø 20	17,32	1897,37	109,54	
9 x 10	1,10	2 ø 8	1,33	2 ø 10	17,71	3 ø 25	19,13	5 ø 20	17,45	1671,06	95,76	
9 x 11	1,04	2 ø 8	1,53	2 ø 10	18,24	3 ø 25	21,52	4 ø 25	19,47	2085,94	107,14	
9 x 12	0,98	2 ø 8	1,69	2 ø 10	18,56	5 ø 20	23,43	4 ø 25	19,96	2467,22	123,58	
10 x 11	1,36	2 ø 10	1,62	2 ø 10	22,17	4 ø 25	23,79	4 ø 25	22,01	2538,58	115,36	
10 x 12	1,31	2 ø 10	1,84	2 ø 10	22,85	4 ø 25	26,61	5 ø 25	22,58	3248,12	143,84	
11 x 12	1,66	2 ø 10	1,94	2 ø 10	27,30	5 ø 25	29,16	5 ø 25	25,23	3759,32	148,99	

Quadro 25: consumo de materiais para lajes retangulares nervuradas (RO 800 e altura livre da fôrma de 350 mm) engastadas

As lajes moldadas com a cubeta RO 800 e com a altura livre de 400 mm possuem as características já citadas no item 6.2.1.3 e mostradas na figura 10. O dimensionamento das armaduras e o consumo de concreto e aço estão mostrados nos quadros 26 e 27, para as lajes quadradas e retangulares, respectivamente.

Lajes Quadradas Nervuradas RO 800 (80 x 80 x 40) - Engastadas											
Ly x Lx (mxm)	Asx (cm ² /m)	Aço x /nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y /nerv (vão)	Asx' (cm ² /m)	Aço x /nerv (eng)	Asy' (cm ² /m)	Aço y /nerv (eng)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 2	0,05	2 ø 5	0,05	2 ø 5	0,72	2 ø 6,3	0,72	2 ø 6,3	1,18	6,63	5,62
3 x 3	0,12	2 ø 5	0,12	2 ø 5	1,62	2 ø 10	1,62	2 ø 10	2,65	22,19	8,36
4 x 4	0,21	2 ø 5	0,21	2 ø 5	2,90	3 ø 10	2,90	3 ø 10	3,32	59,18	17,81
5 x 5	0,32	2 ø 5	0,32	2 ø 5	4,55	3 ø 12,5	4,55	3 ø 12,5	5,66	122,71	21,67
6 x 6	0,47	2 ø 5	0,47	2 ø 5	6,60	3 ø 16	6,60	3 ø 16	8,58	256,84	29,92
7 x 7	0,64	2 ø 6,3	0,64	2 ø 6,3	9,06	4 ø 16	9,06	4 ø 16	12,09	459,35	38,00
8 x 8	0,83	2 ø 8	0,83	2 ø 8	11,95	4 ø 20	11,95	4 ø 20	13,20	1006,85	76,30
9 x 9	1,05	2 ø 8	1,05	2 ø 8	15,30	4 ø 20	15,30	4 ø 20	17,57	1235,68	70,34
10 x 10	1,30	2 ø 10	1,30	2 ø 10	19,15	4 ø 25	19,15	4 ø 25	22,42	2324,05	103,66
11 x 11	1,58	2 ø 10	1,58	2 ø 10	23,54	4 ø 25	23,54	4 ø 25	27,95	2753,11	98,52
12 x 12	1,88	2 ø 10	1,88	2 ø 10	28,53	5 ø 25	28,53	5 ø 25	29,45	4172,19	141,68

Quadro 26: consumo de materiais para lajes quadradas nervuradas (RO 800 e altura livre da fôrma de 400 mm) engastadas

Lajes Retangulares Nervuradas RO 800 (80 x 80 x 40) - Engastadas											
Ly x Lx (mxm)	Asx (cm ² /m)	Aço x /nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y /nerv (vão)	Asx' (cm ² /m)	Aço x /nerv (eng)	Asy' (cm ² /m)	Aço y /nerv (eng)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 3	0,04	2 ø 5	0,09	2 ø 5	0,86	2 ø 8	1,14	2 ø 8	1,77	12,65	7,15
2 x 4	0,03	2 ø 5	0,11	2 ø 5	0,85	2 ø 8	1,25	2 ø 8	2,05	21,08	10,29
3 x 4	0,11	2 ø 5	0,19	2 ø 5	1,93	2 ø 10	2,40	4 ø 8	3,07	37,43	12,18
3 x 5	0,09	2 ø 5	0,22	2 ø 5	1,93	2 ø 10	2,69	3 ø 10	3,96	54,25	13,71
3 x 6	0,07	2 ø 5	0,24	2 ø 5	1,92	2 ø 10	2,84	3 ø 10	4,84	70,28	14,52
4 x 5	0,20	2 ø 5	0,31	2 ø 5	3,42	4 ø 10	4,06	3 ø 12,5	4,34	98,34	22,63
4 x 6	0,17	2 ø 5	0,37	2 ø 5	3,47	4 ø 10	4,61	4 ø 12,5	5,37	144,25	26,89
4 x 7	0,14	2 ø 5	0,40	2 ø 5	3,44	4 ø 10	4,91	4 ø 12,5	6,39	177,77	27,83
4 x 8	0,12	2 ø 5	0,42	2 ø 5	3,43	4 ø 10	5,09	4 ø 12,5	6,63	233,64	35,23
5 x 6	0,33	2 ø 5	0,46	2 ø 5	5,33	4 ø 12,5	6,13	4 ø 12,5	6,98	185,48	26,59
5 x 7	0,29	2 ø 5	0,55	2 ø 6,3	5,47	4 ø 12,5	7,00	3 ø 16	8,29	258,18	31,15
5 x 8	0,25	2 ø 5	0,60	2 ø 6,3	5,43	4 ø 12,5	7,50	3 ø 16	8,67	329,59	38,00
5 x 9	0,22	2 ø 5	0,63	2 ø 6,3	5,41	4 ø 12,5	7,82	4 ø 16	9,98	471,94	47,31
5 x 10	0,19	2 ø 5	0,66	2 ø 6,3	5,40	4 ø 12,5	8,05	4 ø 16	11,29	552,14	48,92
6 x 7	0,48	2 ø 5	0,63	2 ø 6,3	7,68	4 ø 16	8,64	4 ø 16	10,18	395,97	38,88
6 x 8	0,44	2 ø 5	0,75	2 ø 6,3	7,91	4 ø 16	9,86	4 ø 16	10,71	487,11	45,50
6 x 9	0,39	2 ø 5	0,83	2 ø 8	7,94	4 ø 16	10,62	3 ø 20	12,30	650,98	52,92
6 x 10	0,34	2 ø 5	0,89	2 ø 8	7,88	4 ø 16	11,13	3 ø 20	13,91	749,71	53,92
6 x 11	0,31	2 ø 5	0,92	2 ø 8	7,86	4 ø 16	11,46	3 ø 20	15,51	857,42	55,29
6 x 12	0,27	2 ø 5	0,95	2 ø 8	7,85	4 ø 16	11,76	3 ø 20	16,02	1027,96	64,17
7 x 8	0,66	2 ø 6,3	0,84	2 ø 8	10,51	3 ø 20	11,62	3 ø 20	12,74	658,78	51,73
7 x 9	0,61	2 ø 6,3	0,98	2 ø 8	10,82	3 ø 20	13,20	4 ø 20	14,62	881,69	60,31
7 x 10	0,56	2 ø 6,3	1,09	2 ø 8	10,97	3 ø 20	14,30	4 ø 20	16,52	1007,55	61,01
7 x 11	0,51	2 ø 6,3	1,17	2 ø 8	10,89	3 ø 20	15,03	4 ø 20	18,41	1144,84	62,19
7 x 12	0,45	2 ø 5	1,22	2 ø 8	10,84	3 ø 20	15,56	4 ø 20	19,06	1350,82	70,88
8 x 9	0,86	2 ø 8	1,07	2 ø 8	13,83	4 ø 20	15,10	4 ø 20	15,23	1121,26	73,60
8 x 10	0,81	2 ø 8	1,24	2 ø 8	14,26	4 ø 20	17,08	3 ø 25	17,26	1357,31	78,65
8 x 11	0,76	2 ø 6,3	1,38	2 ø 10	14,47	4 ø 20	18,54	5 ø 20	19,28	1616,27	83,85
8 x 12	0,70	2 ø 6,3	1,48	2 ø 10	14,48	4 ø 20	19,57	5 ø 20	19,75	1897,37	96,09
9 x 10	1,10	2 ø 8	1,33	2 ø 10	17,71	3 ø 25	19,13	5 ø 20	19,86	1671,06	84,14
9 x 11	1,04	2 ø 8	1,53	2 ø 10	18,24	3 ø 25	21,52	4 ø 25	22,15	2085,94	94,15
9 x 12	0,98	2 ø 8	1,69	2 ø 10	18,56	5 ø 20	23,43	4 ø 25	22,75	2467,22	108,44
10 x 11	1,36	2 ø 10	1,62	2 ø 10	22,17	4 ø 25	23,79	4 ø 25	25,04	2538,58	101,40
10 x 12	1,31	2 ø 10	1,84	2 ø 10	22,85	4 ø 25	26,61	5 ø 25	25,73	3248,12	126,24
11 x 12	1,66	2 ø 10	1,94	2 ø 10	27,30	5 ø 25	29,16	5 ø 25	28,74	3759,32	130,79

Quadro 27: consumo de materiais para lajes retangulares nervuradas (RO 800 e altura livre da fôrma de 400 mm) engastadas

6.2.2.4 Lajes nervuradas moldadas a partir da cubeta RO 900

As lajes moldadas com a cubeta RO 900 possuem as características já citadas no item 6.2.1.4 e mostradas na figura 11. O dimensionamento das armaduras e o consumo de concreto e aço estão mostrados nos quadros 28 e 29, para as lajes quadradas e retangulares, respectivamente.

Lajes Quadradas Nervuradas RO 900 (90 x 90 x 22,5) - Engastadas											
Ly x Lx (mxm)	Asx (cm ² /m)	Aço x /nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y /nerv (vão)	Asx' (cm ² /m)	Aço x /nerv (eng)	Asy' (cm ² /m)	Aço y / nerv (eng)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 2	0,06	2 ø 5	0,06	2 ø 5	1,01	2 ø 8	1,01	2 ø 8	0,60	8,43	14,07
3 x 3	0,14	2 ø 5	0,14	2 ø 5	2,29	3 ø 10	2,29	3 ø 10	1,35	29,59	21,96
4 x 4	0,26	2 ø 5	0,26	2 ø 5	4,11	4 ø 12,5	4,11	4 ø 12,5	2,39	89,39	37,39
5 x 5	0,40	2 ø 5	0,40	2 ø 5	6,51	3 ø 16	6,51	3 ø 16	3,73	160,53	43,01
6 x 6	0,58	2 ø 6,3	0,58	2 ø 6,3	9,55	3 ø 20	9,55	3 ø 20	5,36	351,80	65,64
7 x 7	0,79	2 ø 8	0,79	2 ø 8	13,29	4 ø 20	13,29	4 ø 20	7,27	640,72	88,08
8 x 8	1,03	2 ø 8	1,03	2 ø 8	17,86	4 ø 25	17,86	4 ø 25	9,45	1223,25	129,42
9 x 9	1,31	2 ø 10	1,31	2 ø 10	23,41	5 ø 25	23,41	5 ø 25	9,51	2151,29	226,15
10 x 10	1,62	2 ø 10	1,62	2 ø 10	30,24	6 ø 25	30,24	6 ø 25	12,00	3069,97	255,87
11 x 11	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
12 x 12	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

Quadro 28: consumo de materiais para lajes quadradas nervuradas (RO 900) engastadas

Lajes Retangulares Nervuradas RO 900 (90 x 90 x 22,5) - Engastadas												
Ly x Lx (mxm)	Asx (cm ² /m)	Aço x /nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y /nerv (vão)	Asx' (cm ² /m)	Aço x /nerv (eng)	Asy' (cm ² /m)	Aço y / nerv (eng)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)	
2 x 3	0,05	2 ø 5	0,11	2 ø 5	1,12	2 ø 10	1,49	2 ø 10	0,90	16,64	18,52	
2 x 4	0,04	2 ø 5	0,12	2 ø 5	1,11	2 ø 10	1,64	2 ø 10	1,20	24,04	20,07	
3 x 4	0,13	2 ø 5	0,22	2 ø 5	2,53	3 ø 10	3,14	4 ø 10	1,80	45,62	25,41	
3 x 5	0,10	2 ø 5	0,26	2 ø 5	2,52	3 ø 10	3,54	3 ø 12,5	2,24	67,39	30,04	
3 x 6	0,08	2 ø 5	0,28	2 ø 5	2,51	3 ø 10	3,73	3 ø 12,5	2,69	88,42	32,86	
4 x 5	0,24	2 ø 5	0,37	2 ø 5	4,50	4 ø 12,5	5,36	4 ø 12,5	2,99	111,73	37,39	
4 x 6	0,21	2 ø 5	0,44	2 ø 6,3	4,57	4 ø 12,5	6,10	3 ø 16	3,58	164,67	45,97	
4 x 7	0,17	2 ø 5	0,48	2 ø 6,3	4,53	4 ø 12,5	6,50	3 ø 16	4,18	204,66	48,99	
4 x 8	0,14	2 ø 5	0,50	2 ø 6,3	4,52	4 ø 12,5	6,75	4 ø 16	4,76	307,18	64,47	
5 x 6	0,39	2 ø 5	0,54	2 ø 6,3	7,07	4 ø 16	8,16	4 ø 16	4,47	257,05	57,50	
5 x 7	0,34	2 ø 5	0,65	2 ø 6,3	7,26	4 ø 16	9,35	3 ø 20	5,21	338,47	64,95	
5 x 8	0,30	2 ø 5	0,71	2 ø 8	7,21	4 ø 16	10,04	3 ø 20	5,95	427,06	71,77	
5 x 9	0,26	2 ø 5	0,75	2 ø 8	7,18	4 ø 16	10,49	4 ø 20	6,05	670,29	110,87	
5 x 10	0,22	2 ø 5	0,78	2 ø 8	7,17	4 ø 16	10,80	4 ø 20	6,78	790,42	116,57	
6 x 7	0,57	2 ø 6,3	0,75	2 ø 8	10,30	3 ø 20	11,62	4 ø 20	6,24	496,26	79,51	
6 x 8	0,52	2 ø 6,3	0,89	2 ø 8	10,61	4 ø 20	13,34	4 ø 20	7,12	639,58	89,77	
6 x 9	0,47	2 ø 6,3	0,99	2 ø 8	10,65	4 ø 20	14,43	3 ø 25	7,25	877,95	121,18	
6 x 10	0,41	2 ø 5	1,05	2 ø 8	10,57	4 ø 20	15,15	3 ø 25	8,13	1008,28	124,03	
6 x 11	0,36	2 ø 5	1,09	2 ø 8	10,55	4 ø 20	15,63	3 ø 25	9,01	1159,35	128,66	
6 x 12	0,32	2 ø 5	1,13	2 ø 10	10,53	4 ø 20	16,06	3 ø 25	9,88	1398,13	141,49	
7 x 8	0,78	2 ø 8	1,00	2 ø 8	14,26	3 ø 25	15,85	3 ø 25	8,30	840,75	101,30	
7 x 9	0,72	2 ø 8	1,17	2 ø 10	14,71	3 ø 25	18,16	4 ø 25	8,42	1252,76	148,72	
7 x 10	0,67	2 ø 6,3	1,30	2 ø 10	14,92	3 ø 25	19,80	4 ø 25	9,45	1423,68	150,61	
7 x 11	0,60	2 ø 6,3	1,39	2 ø 10	14,81	3 ø 25	20,88	4 ø 25	10,48	1629,27	155,50	
7 x 12	0,54	2 ø 6,3	1,45	2 ø 10	14,74	3 ø 25	21,69	4 ø 25	11,50	1852,74	161,11	
8 x 9	1,03	2 ø 8	1,28	2 ø 10	19,10	4 ø 25	20,99	4 ø 25	9,62	1496,55	155,58	
8 x 10	0,97	2 ø 8	1,47	2 ø 10	19,73	4 ø 25	24,02	5 ø 25	10,77	1915,44	177,91	
8 x 11	0,90	2 ø 8	1,64	2 ø 10	20,05	4 ø 25	26,30	5 ø 25	11,94	2165,33	181,42	
8 x 12	0,83	2 ø 8	1,76	2 ø 12,5	20,05	4 ø 25	27,96	6 ø 25	13,05	2877,11	220,54	
9 x 10	1,31	2 ø 10	1,59	2 ø 10	25,00	5 ø 25	27,25	5 ø 25	10,71	2379,45	222,17	
9 x 11	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	
9 x 12	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	
10 x 11	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	
10 x 12	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	
11 x 12	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	

Quadro 29: consumo de materiais para lajes retangulares nervuradas (RO 900) engastadas

6.3 CÁLCULO PELO SAP2000

Os resultados obtidos através do programa de cálculo estrutural SAP2000 apresentaram os momentos fletores e deslocamentos muito semelhante aos obtidos através das tabela de lajes. A diferença entre eles foi menor que 5% em todos os casos analisados.

A figura 12 mostra um exemplo de uma laje maciça calculada pelo SAP2000 com o vão entre apoios de 6 m x 6 m e com a altura de 8 cm, na qual se pode verificar os momentos máximos

no centro do vão e nos bordos para, posteriormente, compará-los com os valores obtidos por tabela de lajes.

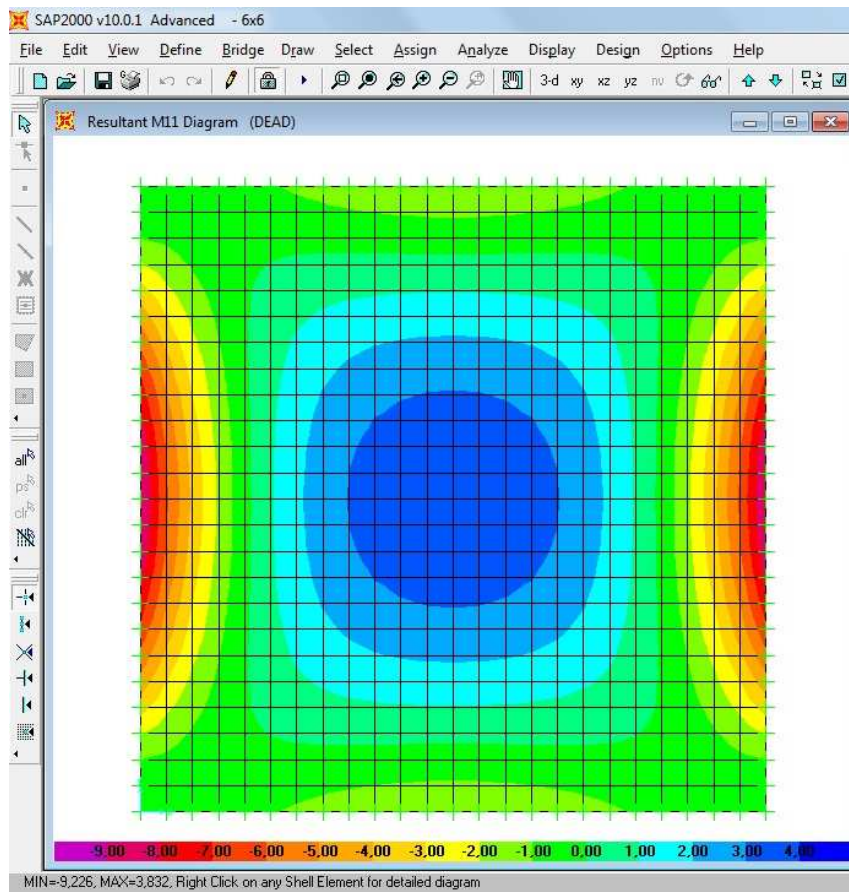


Figura 12: exemplo de cálculo de momentos fletores de uma laje quadrada maciça de 6m pelo SAP2000

Pode-se verificar que os valores encontrados para os momentos são $M=3,832$ kNm (momento fletor positivo no centro da laje) e $M'=-9,226$ kNm (momento fletor negativo no engaste), valores que se aproximam bastante dos encontrados pelo cálculo por tabela de lajes, que foram $M=3,80$ kNm e $M'=-9,20$ kNm.

O cálculo pelo SAP2000 é feito definindo-se os vãos entre apoios, o tipo de contorno, as características do concreto, a dimensão da laje e o tipo de carregamento. O processo de cálculo das lajes maciças é feito dessa forma simples. Para o cálculo das lajes nervuradas, basta desconsiderar o peso próprio do concreto que contribui através da espessura da laje e acrescentar esse carregamento junto ao carregamento vertical, sendo esse peso próprio função

do tipo de laje nervurada escolhida. Foram utilizadas as configurações da biblioteca do SAP2000 para o cálculo de lajes pelo modo *Plate Thin*.

A flecha da laje também foi verificada através do SAP2000 e os resultados também se aproximaram dos resultados obtidos por tabela de lajes, como se observa na figura 13, onde a mesma laje maciça de vãos 6 m x 6 m foi calculada, resultando no deslocamento no centro da laje $W=-0,007$ m, muito próximo ao deslocamento obtido por tabela de lajes ($W=-0,0078$ m).

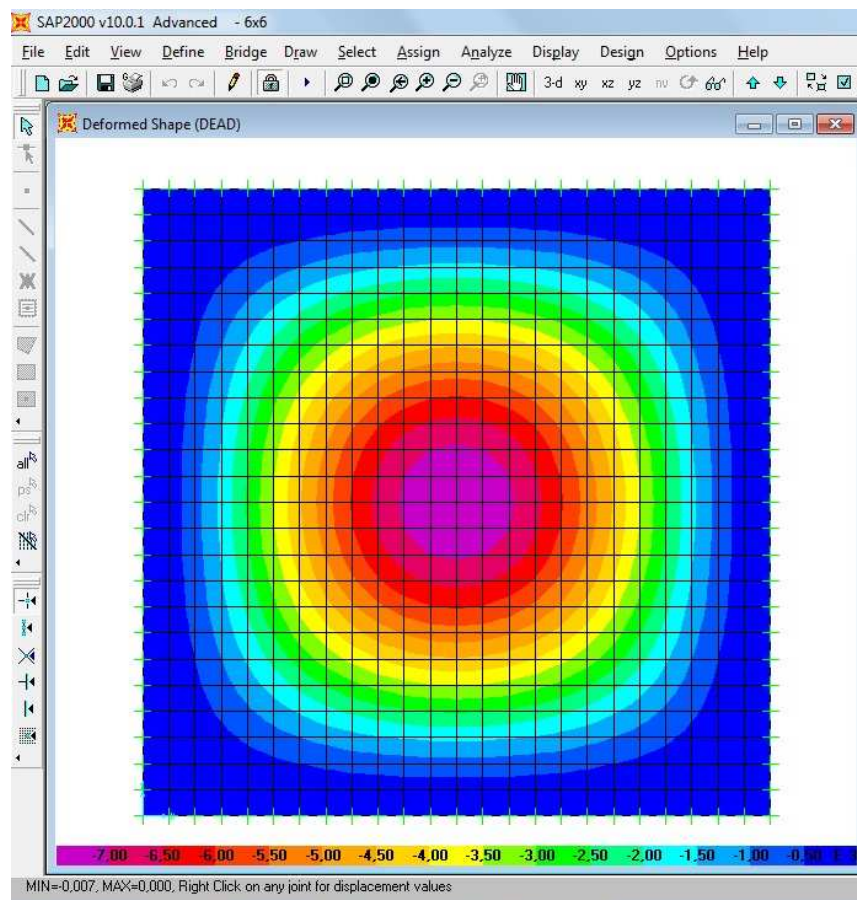


Figura 13: exemplo de cálculo da flecha de uma laje quadrada maciça de 6m pelo SAP2000

7 COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS

Para uma melhor análise dos resultados, são apresentados quadros indicando o volume de concreto e a quantidade de aço, tanto para as lajes maciças quanto para as diferentes opções de lajes nervuradas. São apresentados, também, gráficos relacionando tais valores em função dos vãos entre apoios com o intuito de mostrar o consumo desses materiais para os casos estudados.

7.1 COMPARAÇÃO DO VOLUME DE CONCRETO

Para possibilitar a comparação do consumo de materiais, deve-se analisar o volume de concreto necessário para os diferentes tipos de lajes nervuradas através dos quadros com o consumo calculado ou dos gráficos comparativos, tendo-se, assim, a escolha de qual delas consome menos concreto para as diferentes combinações de vãos entre apoios. Feita a escolha, compara-se o volume de concreto da melhor solução das lajes nervuradas com o da maciça correspondente, determinando-se, para cada vão, qual das lajes conduz a um menor consumo.

7.1.1 Volume de concreto para as lajes apoiadas

Para as lajes simplesmente apoiadas nos quatro bordos, a flecha é maior se comparada à das lajes engastadas. Isso faz com que sejam necessárias maiores alturas para aumentar o momento de inércia e diminuir a flecha.

Os quadros 30 e 31 mostram a comparação do consumo de concreto para a situação em que se tem como condição de contorno apoios nos quatro bordos. A comparação é feita entre a laje maciça e os cinco tipos de lajes nervuradas analisadas. No quadro 30, é mostrado o consumo para as lajes quadradas, enquanto que o quadro 31 se refere às retangulares.

Lajes Quadradas Apoiadas - Volume de Concreto (m ³)						
Ly x Lx (mxm)	Maciça	RO 180 (60x60x18)	RO 210 (65x65x21)	RO 800 (80x80x35)	RO 800 (80x80x40)	RO 900 (90x90x22,5)
2 x 2	0,32	0,56	0,53	1,04	1,18	0,60
3 x 3	0,72	1,07	1,43	2,35	2,66	1,35
4 x 4	1,27	2,25	2,11	2,93	3,33	2,40
5 x 5	2,24	3,20	3,71	4,99	5,67	3,75
6 x 6	4,30	4,29	4,75	7,58	8,61	5,39
7 x 7	7,31	6,43	7,04	10,69	12,13	7,33
8 x 8	12,10	N	N	11,68	13,30	9,57
9 x 9	18,55	N	N	15,54	17,67	N
10 x 10	26,88	N	N	N	22,65	N
11 x 11	38,56	N	N	N	28,22	N
12 x 12	53,06	N	N	N	N	N

Quadro 30: comparação do volume de concreto para as lajes quadradas apoiadas

Lajes Retangulares Apoiadas - Volume de Concreto (m ³)						
Ly x Lx (mxm)	Maciça	RO 180 (60x60x18)	RO 210 (65x65x21)	RO 800 (80x80x35)	RO 800 (80x80x40)	RO 900 (90x90x22,5)
2 x 3	0,48	0,78	0,88	1,57	1,77	0,90
2 x 4	0,64	1,12	1,06	1,81	2,05	1,20
3 x 4	0,96	1,57	1,76	2,71	3,08	1,80
3 x 5	1,20	1,86	2,31	3,50	3,96	2,25
3 x 6	1,43	2,15	2,63	4,28	4,85	2,70
4 x 5	1,59	2,69	2,81	3,83	4,35	3,00
4 x 6	1,91	3,13	3,17	4,73	5,38	3,60
4 x 7	2,22	3,81	3,86	5,64	6,40	4,19
4 x 8	2,86	4,25	4,22	5,84	6,65	4,79
5 x 6	2,98	3,71	4,21	6,16	6,99	4,49
5 x 7	3,47	4,53	5,11	7,32	8,31	5,24
5 x 8	4,37	5,04	5,61	7,65	8,70	5,99
5 x 9	5,37	5,55	6,51	8,81	10,02	6,10
5 x 10	5,96	6,38	7,01	9,98	11,34	6,85
6 x 7	5,01	5,27	5,79	9,01	10,22	6,29
6 x 8	6,20	5,85	6,32	9,46	10,75	7,18
6 x 9	7,51	6,41	7,37	10,88	12,36	7,33
6 x 10	8,95	N	7,89	12,29	13,96	8,22
6 x 11	9,84	N	8,93	13,72	15,57	9,09
6 x 12	11,46	N	9,46	14,16	16,10	9,99
7 x 8	8,91	N	7,72	11,26	12,80	8,38
7 x 9	10,65	N	N	12,94	14,70	8,55
7 x 10	12,53	N	N	14,62	16,60	9,58
7 x 11	14,56	N	N	16,31	18,51	10,62
7 x 12	15,88	N	N	16,87	19,17	11,66
8 x 9	13,61	N	N	13,48	15,34	9,75
8 x 10	16,72	N	N	15,28	17,38	N
8 x 11	19,27	N	N	17,09	19,43	N
8 x 12	21,97	N	N	N	19,90	N
9 x 10	20,60	N	N	N	20,01	N
9 x 11	24,63	N	N	N	22,33	N
9 x 12	27,94	N	N	N	22,96	N
10 x 11	29,56	N	N	N	25,26	N
10 x 12	34,64	N	N	N	26,04	N
11 x 12	42,04	N	N	N	29,08	N

Quadro 31: comparação do volume de concreto para as lajes retangulares apoiadas

A partir dos quadros com os valores do consumo de concreto, avalia-se qual das lajes nervuradas requer menos concreto, para posteriormente compará-lo com a laje maciça correspondente ao mesmo vão entre apoios. Essa análise entre lajes nervuradas apoiadas pode ser observada no gráfico mostrado na figura 14.

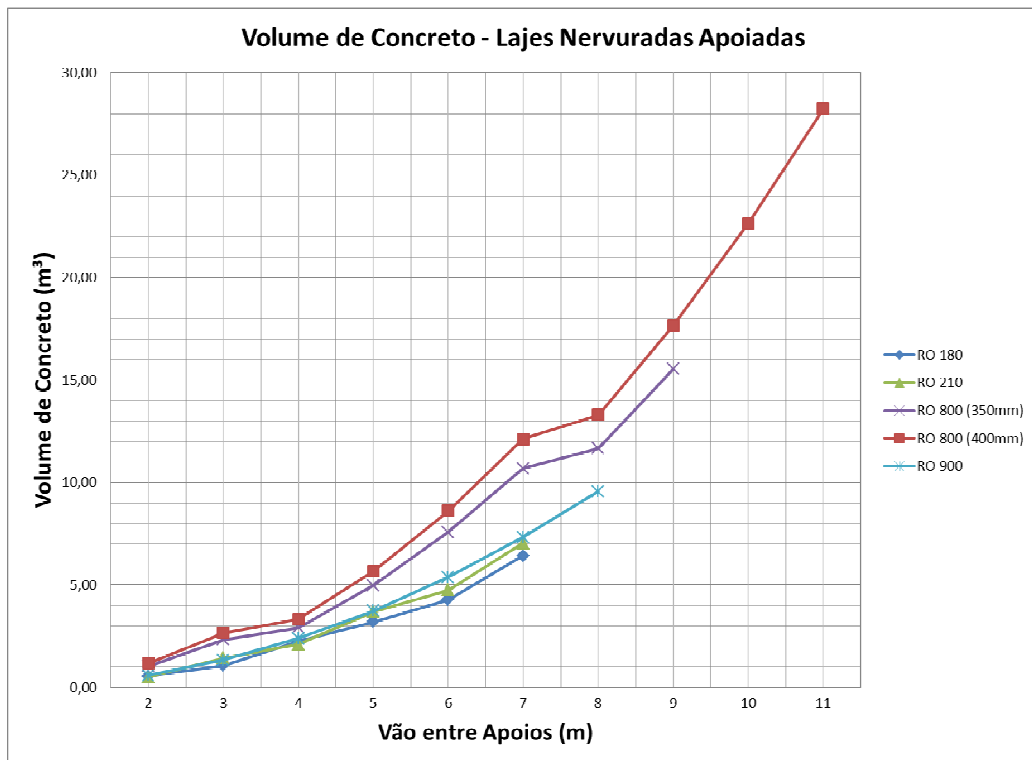


Figura 14: comparação do volume de concreto entre lajes nervuradas quadradas apoiadas

Escolhendo-se para cada vão o tipo de fôrma que possui o menor consumo de concreto, tem-se o consumo ideal de concreto para cada combinação de vãos entre apoios, variando-se apenas as dimensões da laje nervurada a partir das cubetas. Observa-se que algumas lajes nervuradas apresentam a flecha superior à máxima determinada nesse estudo, ou possuem uma taxa de aço superior à máxima permitida, impedindo o seu uso e limitando a escolha para determinados vãos. Também observa-se que nenhum dos cinco tipos de laje nervurada estudados serviria para o vão de 12 m x 12 m.

O menor valor referente ao consumo de concreto das lajes nervuradas apoiadas para cada vão, é comparado com o valor correspondente para as lajes maciças, resultando no gráfico representado na figura 15.

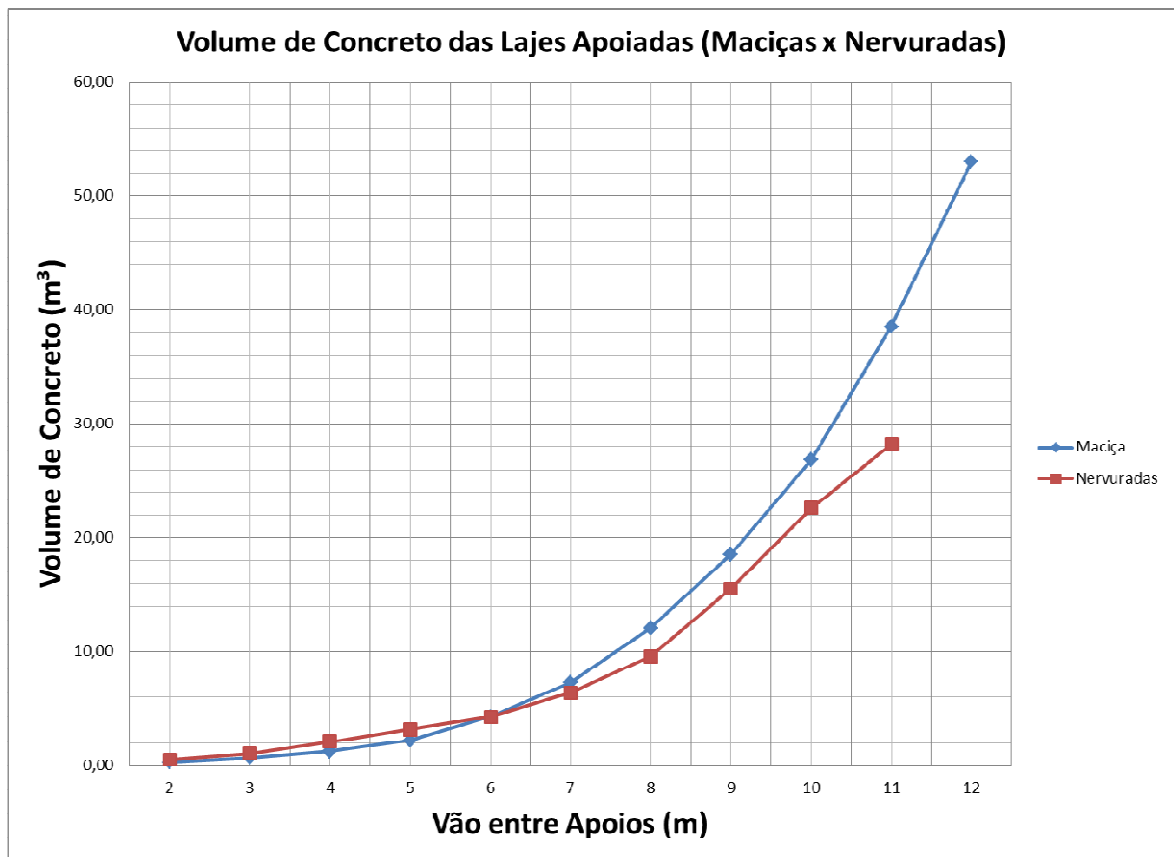


Figura 15: comparação do volume de concreto entre lajes nervuradas e maciças quadradas apoiadas

7.1.2 Volume de concreto para as lajes engastadas

Para as lajes engastadas a flecha é menor se comparada a das apoiadas. Isso faz com que a altura das lajes maciças seja um pouco menor do que quando ela está simplesmente apoiada.

Os quadros 32 e 33 mostram a comparação do consumo de concreto para a situação em que se tem como condição de contorno lajes engastadas nos quatro bordos. A comparação é feita entre a laje maciça e os cinco tipos de lajes nervuradas analisadas. No quadro 32 é mostrado o consumo para as lajes quadradas, enquanto que o quadro 33 se refere às retangulares.

Lajes Quadradas Engastadas - Volume de Concreto (m ³)						
Ly x Lx (mxm)	Maciça	RO 180 (60x60x18)	RO 210 (65x65x21)	RO 800 (80x80x35)	RO 800 (80x80x40)	RO 900 (90x90x22,5)
2 x 2	0,32	0,56	0,53	1,04	1,18	0,60
3 x 3	0,72	1,07	1,43	2,35	2,65	1,35
4 x 4	1,27	2,24	2,10	2,92	3,32	2,39
5 x 5	1,98	3,17	3,69	4,98	5,66	3,73
6 x 6	2,84	4,23	4,70	7,56	8,58	5,36
7 x 7	4,84	6,34	6,94	10,65	12,09	7,27
8 x 8	7,60	7,76	N	11,58	13,20	9,45
9 x 9	11,22	N	N	15,41	17,57	9,51
10 x 10	16,84	N	N	19,70	22,42	12,00
11 x 11	23,98	N	N	24,50	27,95	N
12 x 12	32,82	N	N	25,72	29,45	N

Quadro 32: comparação do volume de concreto para as lajes quadradas engastadas

Lajes Retangulares Engastadas - Volume de Concreto (m ³)						
Ly x Lx (mxm)	Maciça	RO 180 (60x60x18)	RO 210 (65x65x21)	RO 800 (80x80x35)	RO 800 (80x80x40)	RO 900 (90x90x22,5)
2 x 3	0,48	0,78	0,88	1,56	1,77	0,90
2 x 4	0,64	1,12	1,05	1,81	2,05	1,20
3 x 4	0,96	1,56	1,75	2,71	3,07	1,80
3 x 5	1,19	1,85	2,30	3,49	3,96	2,24
3 x 6	1,43	2,13	2,62	4,27	4,84	2,69
4 x 5	1,59	2,67	2,80	3,82	4,34	2,99
4 x 6	1,91	3,11	3,15	4,72	5,37	3,58
4 x 7	2,22	3,78	3,84	5,62	6,39	4,18
4 x 8	2,54	4,21	4,19	5,82	6,63	4,76
5 x 6	2,38	3,67	4,18	6,14	6,98	4,47
5 x 7	2,77	4,49	5,08	7,30	8,29	5,21
5 x 8	3,16	4,99	5,56	7,62	8,67	5,95
5 x 9	3,56	5,48	6,45	8,77	9,98	6,05
5 x 10	3,95	6,25	6,94	9,93	11,29	6,78
6 x 7	3,73	5,18	5,72	8,97	10,18	6,24
6 x 8	4,26	5,74	6,23	9,41	10,71	7,12
6 x 9	4,79	N	7,26	10,82	12,30	7,25
6 x 10	5,93	N	7,77	12,23	13,91	8,13
6 x 11	6,53	N	8,80	13,65	15,51	9,01
6 x 12	7,12	N	9,30	14,08	16,02	9,88
7 x 8	6,09	N	7,60	11,20	12,74	8,30
7 x 9	6,85	N	N	12,86	14,62	8,42
7 x 10	8,31	N	N	14,54	16,52	9,45
7 x 11	9,14	N	N	16,21	18,41	10,48
7 x 12	9,97	N	N	16,76	19,06	11,50
8 x 9	9,26	N	N	13,38	15,23	9,62
8 x 10	11,08	N	N	15,16	17,26	10,77
8 x 11	12,18	N	N	16,94	19,28	11,94
8 x 12	14,26	N	N	17,32	19,75	13,05
9 x 10	13,35	N	N	17,45	19,86	10,71
9 x 11	15,68	N	N	19,47	22,15	N
9 x 12	18,18	N	N	19,96	22,75	N
10 x 11	19,60	N	N	22,01	25,04	N
10 x 12	22,58	N	N	22,58	25,73	N
11 x 12	27,46	N	N	25,23	28,74	N

Quadro 33: comparação do volume de concreto para as lajes retangulares engastadas

A partir dos quadros com os valores do consumo de concreto, avalia-se qual das lajes nervuradas requer menos concreto, para posteriormente compará-lo com a laje maciça correspondente ao mesmo vão entre apoios. Essa análise entre lajes nervuradas engastadas pode ser observada no gráfico da figura 16.

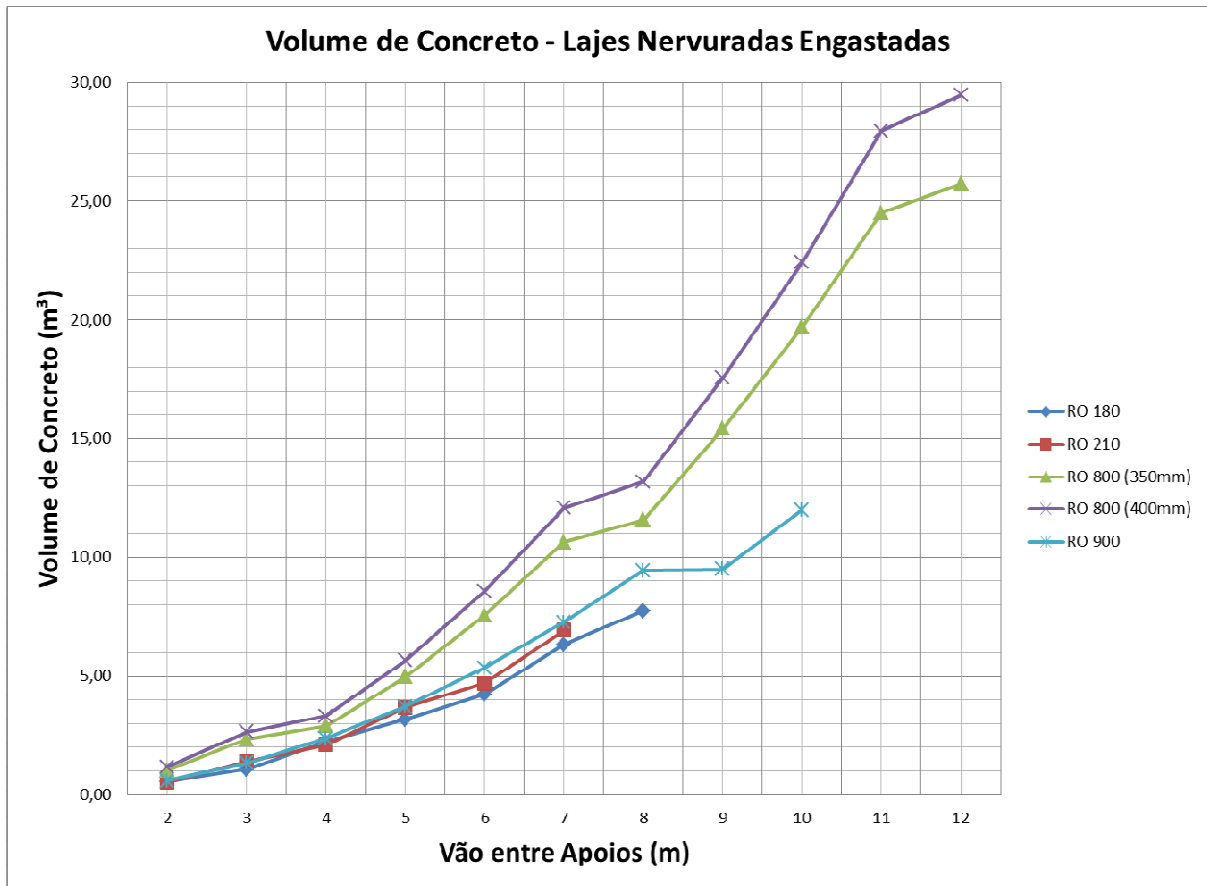


Figura 16: comparação do volume de concreto entre lajes nervuradas quadradas engastadas

Escolhendo-se para cada vão o tipo de fôrma que possui o menor consumo de concreto, tem-se o consumo ideal de concreto para cada vão entre apoios. A mesma comparação entre o menor consumo de concreto das lajes nervuradas para cada combinação de vãos e a utilização de concreto para lajes maciças que foi feito para a situação na qual os bordos estão apoiados é feito agora para a situação de engaste, resultando no gráfico mostrado na figura 17.

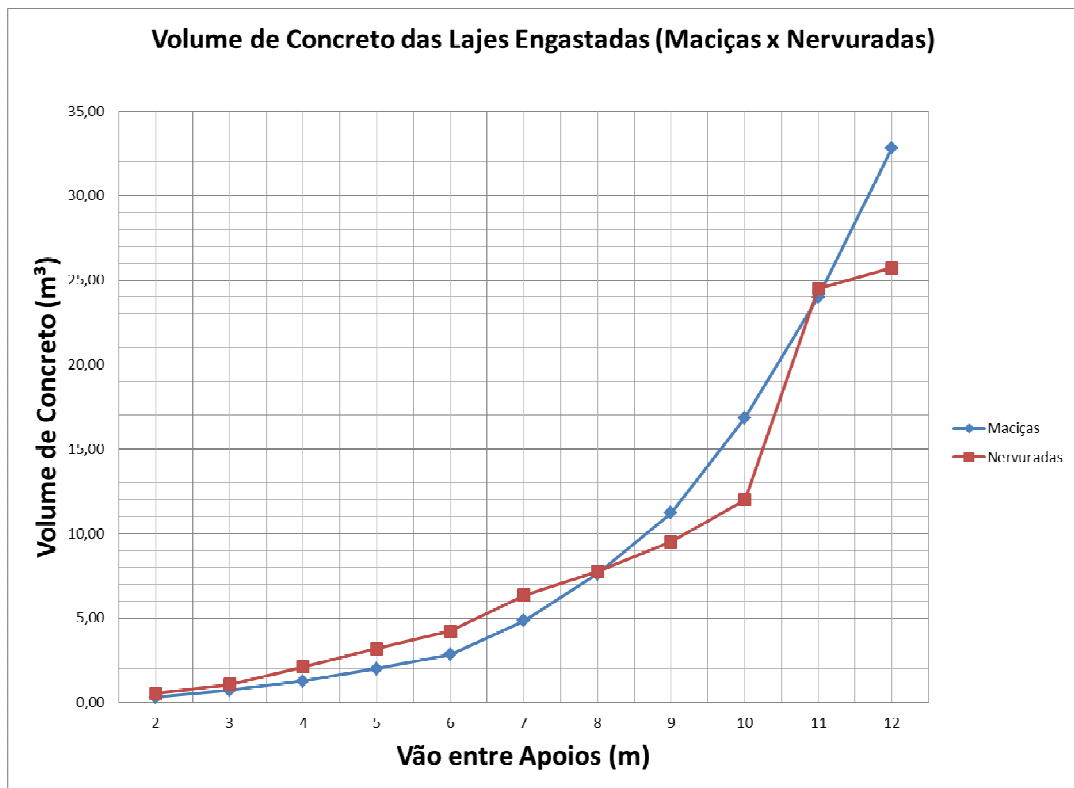


Figura 17: comparação do volume de concreto entre lajes nervuradas e maciças quadradas engastadas

Observa-se no gráfico um pico no consumo de concreto para o vão de 11 m. Isso se deve ao fato de que, para esse vão, a fôrma utilizada para moldar a laje nervurada foi a RO 800, cuja distância entre nervuras é de 80 cm. Para preencher o espaço de 11 m, foram utilizadas 13 cubetas, sobrando, portanto, 60 cm em cada direção, fazendo com que nesse trecho se tenha um maciço de concreto com a altura total da laje, conseqüentemente aumentando seu volume.

7.2 COMPARAÇÃO DA QUANTIDADE DE AÇO

A quantidade de aço em quilos, também é comparada entre os diferentes tipos de lajes nervuradas e, posteriormente, entre nervuradas e maciças. Neste trabalho, priorizou-se a escolha pela laje que consome o menor volume de concreto, e analisou-se o consumo de aço para as lajes escolhidas. A seguir, será analisado e comparado o consumo de aço em quadros e gráficos que ajudarão a verificar as escolhas feitas.

7.2.1 Quantidade de aço para as lajes apoiadas

Primeiramente, deve-se observar que os cálculos para as lajes mostraram que elas estão no domínio 2 ou 3. Se as lajes estiverem no domínio 2, o concreto poderia ser melhor aproveitado e o aço, de maneira contrária, está trabalhando da melhor forma possível. Se estiverem no domínio 3, então tanto aço quanto concreto estão sendo bem requisitados, não havendo desperdícios.

Porém, em função das limitações de dimensões e flechas admitidas, nem sempre é possível se ter o melhor aproveitamento dos materiais, como acontece com o concreto na maioria dos casos estudados neste trabalho, que está trabalhando no domínio 2. Logo, o consumo de concreto será fundamental para a determinação da laje que terá o melhor aproveitamento dos materiais. Então, no gráfico mostrado na figura 18, pode-se ver a quantidade de aço para as lajes nervuradas apoiadas em função dos vãos entre apoios.

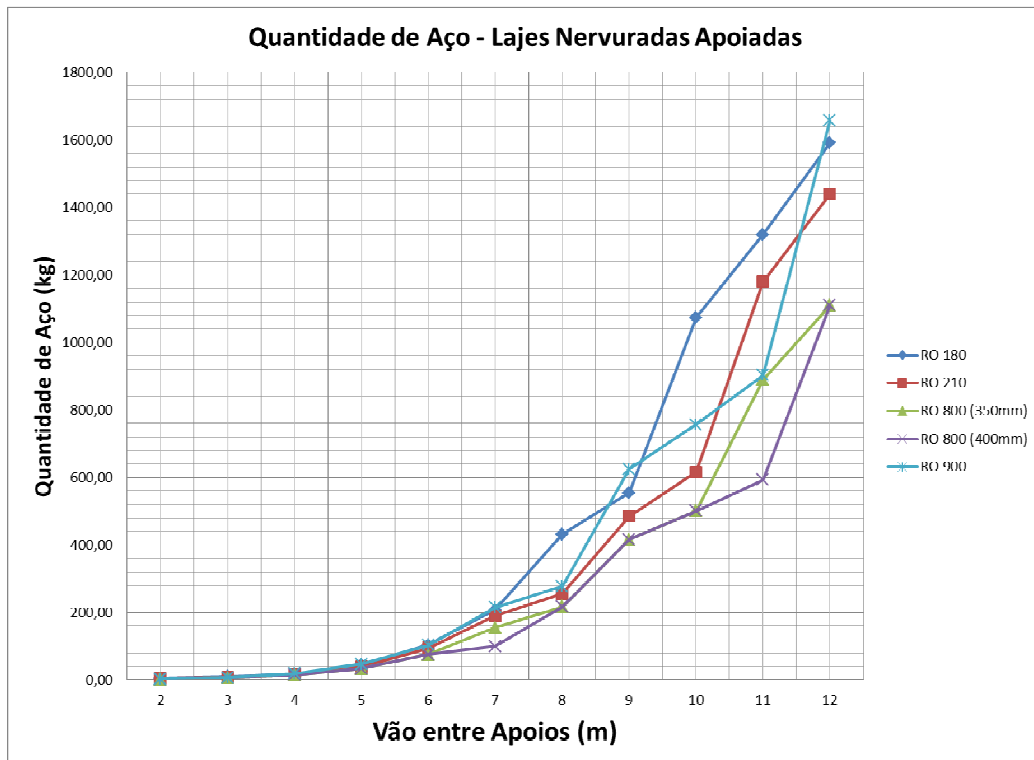


Figura 18: comparação da quantidade de aço entre lajes nervuradas quadradas apoiadas

A partir da determinação do tipo de fôrma para a laje nervurada escolhida nos vãos estudados, pode ser feita a comparação da quantidade de aço necessário para as lajes maciças e nervuradas, mostradas no gráfico da figura 19.

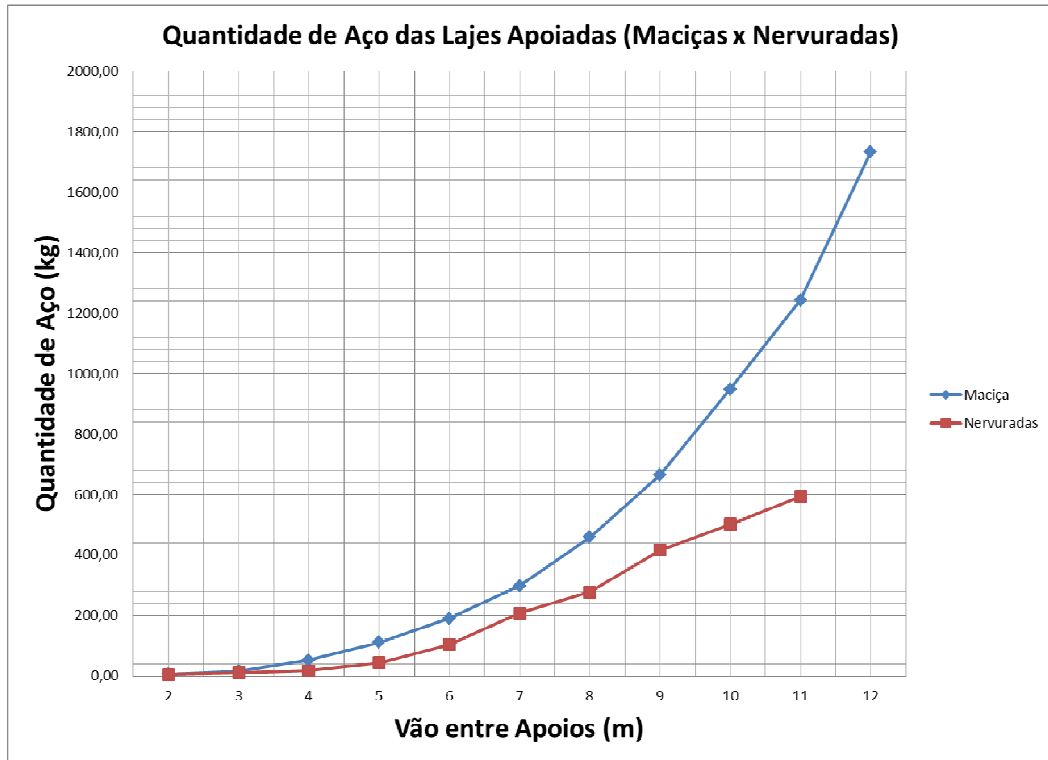


Figura 19: comparação da quantidade de aço entre lajes nervuradas e maciças apoiadas

O consumo de aço para as lajes maciças apoiadas e os diferentes tipos de nervuradas pode ser verificado nos quadros 34 e 35, para as lajes quadradas e retangulares, respectivamente.

Lajes Quadradas Apoiadas - Quantidade de Aço (kg)						
Ly x Lx (mxm)	Maciça	RO 180 (60x60x18)	RO 210 (65x65x21)	RO 800 (80x80x35)	RO 800 (80x80x40)	RO 900 (90x90x22,5)
2 x 2	6,16	4,93	4,93	3,70	3,70	3,70
3 x 3	16,32	11,10	9,25	7,40	7,40	7,40
4 x 4	52,20	17,26	17,26	14,80	14,80	19,57
5 x 5	111,21	44,04	39,15	34,25	34,25	47,34
6 x 6	189,38	104,16	94,69	75,75	75,75	103,57
7 x 7	297,42	207,13	189,87	155,35	99,42	215,76
8 x 8	459,09	N	N	216,99	216,99	277,41
9 x 9	665,78	N	N	416,11	416,11	N
10 x 10	948,40	N	N	N	500,87	N
11 x 11	1243,19	N	N	N	593,34	N
12 x 12	1733,79	N	N	N	N	N

Quadro 34: comparação do consumo de aço para as lajes quadradas apoiadas

Lajes Retangulares Apoiadas - Quantidade de Aço (kg)						
Ly x Lx (mxm)	Maciça	RO 180 (60x60x18)	RO 210 (65x65x21)	RO 800 (80x80x35)	RO 800 (80x80x40)	RO 900 (90x90x22,5)
2 x 3	9,25	8,01	7,09	5,55	5,55	5,55
2 x 4	13,42	11,10	11,10	9,25	9,25	8,01
3 x 4	27,69	14,18	13,25	11,10	11,10	13,49
3 x 5	38,38	27,57	24,20	20,83	20,83	18,38
3 x 6	50,57	37,84	33,98	27,19	27,19	36,84
4 x 5	79,04	30,65	28,20	24,52	24,52	33,46
4 x 6	109,54	60,71	55,97	45,27	45,27	42,93
4 x 7	139,66	74,91	69,39	57,11	57,11	78,83
4 x 8	152,71	97,01	90,69	76,84	76,84	98,56
5 x 6	145,71	74,10	66,92	55,00	55,00	75,45
5 x 7	196,90	125,59	80,33	66,84	66,84	92,72
5 x 8	224,02	160,11	147,80	125,62	125,62	112,44
5 x 9	242,19	199,56	174,92	150,28	150,28	214,39
5 x 10	277,45	231,62	216,84	177,41	177,41	254,84
6 x 7	261,11	155,64	142,28	115,55	115,55	120,83
6 x 8	303,30	190,17	175,57	146,37	146,37	190,49
6 x 9	357,89	329,49	202,69	171,03	171,03	242,50
6 x 10	386,53	N	355,57	288,31	288,31	282,95
6 x 11	437,19	N	407,59	334,55	334,55	503,13
6 x 12	495,71	N	486,57	407,75	407,75	563,39
7 x 8	370,81	N	223,16	186,17	186,17	246,58
7 x 9	436,45	N	N	285,73	285,73	298,60
7 x 10	516,06	N	N	328,11	328,11	447,80
7 x 11	585,43	N	N	374,34	374,34	520,39
7 x 12	665,70	N	N	447,55	447,55	599,30
8 x 9	575,28	N	N	316,55	316,55	451,17
8 x 10	642,38	N	N	358,93	358,93	N
8 x 11	741,39	N	N	405,17	405,17	N
8 x 12	829,35	N	N	N	714,50	N
9 x 10	796,65	N	N	N	458,49	N
9 x 11	936,25	N	N	N	694,12	N
9 x 12	1066,28	N	N	N	814,06	N
10 x 11	1138,08	N	N	N	736,50	N
10 x 12	1291,45	N	N	N	856,44	N
11 x 12	1534,41	N	N	N	1092,07	N

Quadro 35: comparação do consumo de aço para as lajes retangulares apoiadas

7.2.2 Quantidade de aço para as lajes engastadas

Para as lajes engastadas a flecha é menor se comparado a das apoiadas. Porém, devido ao fato de que junto aos bordos das lajes nervuradas tem-se a compressão da parte inferior (nervuras), onde a área é menor, a armadura negativa necessária junto aos bordos é muito grande, tornando a escolha dessas lajes um tanto restritiva.

No gráfico da figura 20, podemos ver a quantidade de aço para as lajes nervuradas engastadas em função dos vãos entre apoios.

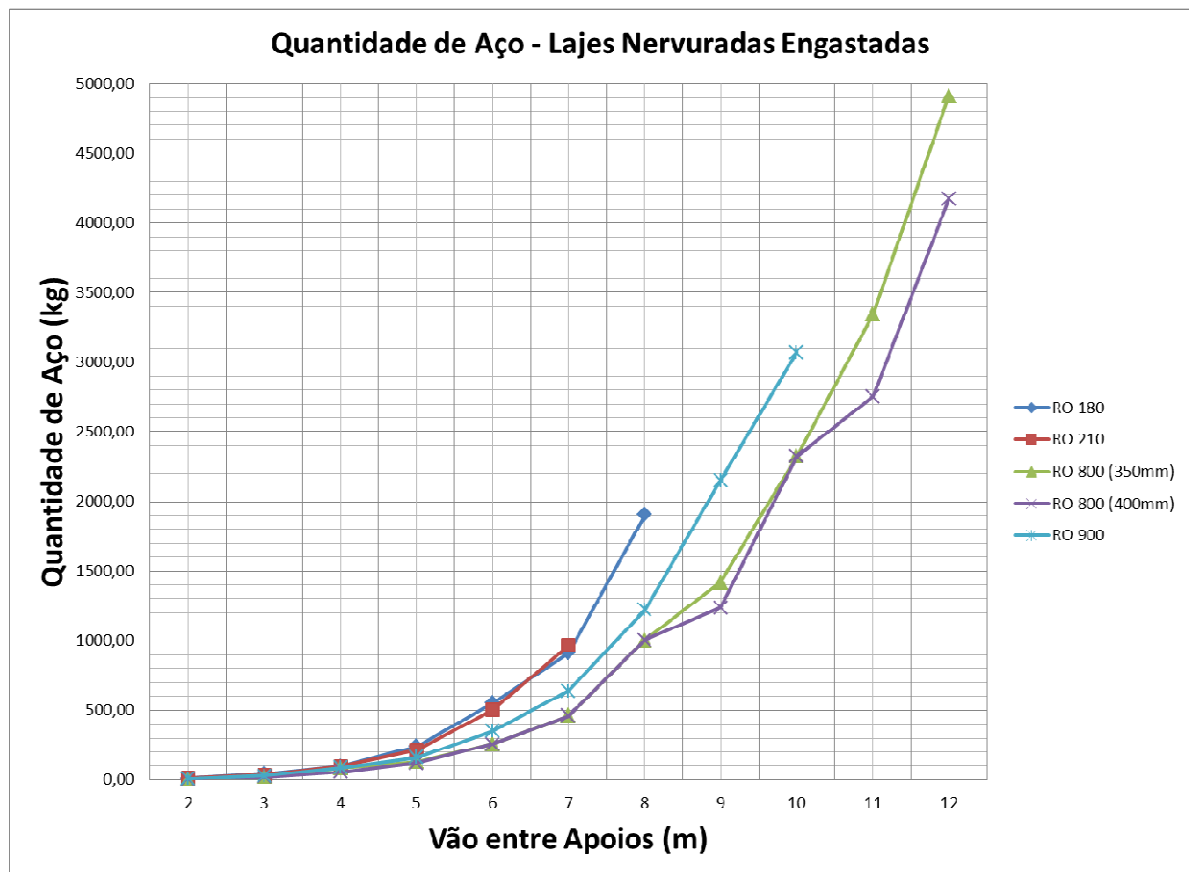


Figura 20: comparação da quantidade de aço entre lajes nervuradas engastadas

A partir da determinação do tipo de fôrma para a laje nervurada escolhida nos vãos estudados, pode ser feita a comparação da quantidade de aço necessário para as lajes maciças e nervuradas, representada no gráfico da figura 21.

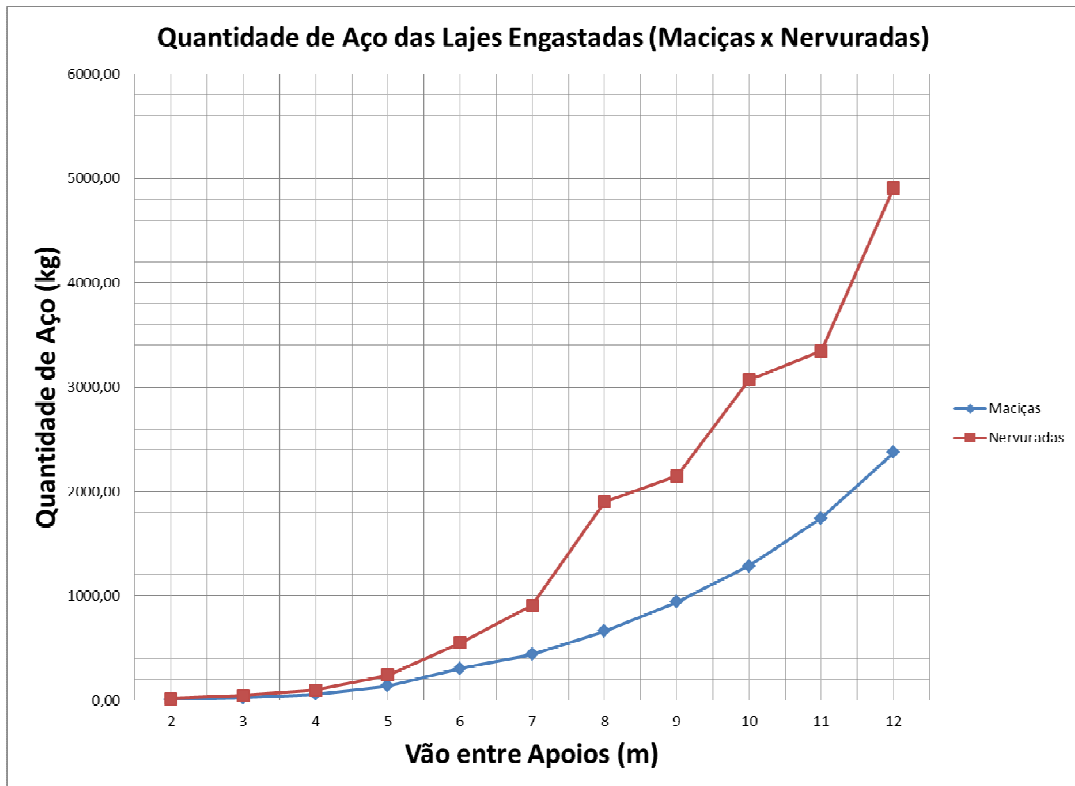


Figura 21: comparação da quantidade de aço entre lajes nervuradas e maciças engastadas

O consumo de aço das lajes engastadas pode ser verificado nos quadros 36 e 37, para as lajes quadradas e retangulares, respectivamente.

Lajes Quadradas Engastadas - Quantidade de Aço (kg)						
Ly x Lx (mxm)	Maciça	RO 180 (60x60x18)	RO 210 (65x65x21)	RO 800 (80x80x35)	RO 800 (80x80x40)	RO 900 (90x90x22,5)
2 x 2	9,49	11,24	14,80	6,63	6,63	8,43
3 x 3	23,61	44,39	36,99	22,19	22,19	29,59
4 x 4	57,48	98,17	98,17	84,15	59,18	89,39
5 x 5	138,80	240,79	214,03	132,05	122,71	160,53
6 x 6	303,83	552,83	502,57	256,84	256,84	351,80
7 x 7	441,37	910,73	965,37	459,35	459,35	640,72
8 x 8	661,84	1902,84	N	1006,85	1006,85	1223,25
9 x 9	942,72	N	N	1418,77	1235,68	2151,29
10 x 10	1287,41	N	N	2324,05	2324,05	3069,97
11 x 11	1744,76	N	N	3346,45	2753,11	N
12 x 12	2375,43	N	N	4911,95	4172,19	N

Quadro 36: comparação do consumo de aço para as lajes quadradas engastadas

Lajes Retangulares Engastadas - Quantidade de Aço (kg)						
Ly x Lx (mxm)	Maciça	RO 180 (60x60x18)	RO 210 (65x65x21)	RO 800 (80x80x35)	RO 800 (80x80x40)	RO 900 (90x90x22,5)
2 x 3	14,18	21,82	19,49	12,65	12,65	16,64
2 x 4	18,86	30,82	31,51	21,08	21,08	24,04
3 x 4	35,22	71,28	67,58	40,69	37,43	45,62
3 x 5	45,47	101,08	88,62	54,25	54,25	67,39
3 x 6	58,48	137,89	123,68	70,28	70,28	88,42
4 x 5	84,50	153,38	142,20	98,34	98,34	111,73
4 x 6	113,37	229,40	213,34	144,25	144,25	164,67
4 x 7	135,42	277,55	258,83	177,77	177,77	204,66
4 x 8	155,89	352,47	331,06	233,64	233,64	307,18
5 x 6	191,57	384,56	314,89	185,48	185,48	257,05
5 x 7	255,60	507,70	391,68	258,18	258,18	338,47
5 x 8	292,49	624,97	546,52	329,59	329,59	427,06
5 x 9	330,91	781,18	638,66	471,94	471,94	670,29
5 x 10	379,62	1221,57	781,06	552,14	552,14	790,42
6 x 7	358,40	813,15	733,97	422,01	395,97	496,26
6 x 8	444,60	1010,29	923,53	513,15	487,11	639,58
6 x 9	523,47	N	1068,03	677,02	650,98	877,95
6 x 10	510,75	N	1291,36	775,75	749,71	1008,28
6 x 11	579,03	N	1468,70	883,46	857,42	1159,35
6 x 12	625,25	N	1738,01	1054,00	1027,96	1398,13
7 x 8	517,83	N	1165,80	658,78	658,78	840,75
7 x 9	643,49	N	N	881,69	881,69	1252,76
7 x 10	704,32	N	N	1007,55	1007,55	1423,68
7 x 11	800,38	N	N	1144,84	1144,84	1629,27
7 x 12	878,49	N	N	1350,82	1350,82	1852,74
8 x 9	774,79	N	N	1121,26	1121,26	1496,55
8 x 10	930,03	N	N	1357,31	1357,31	1915,44
8 x 11	1066,04	N	N	1616,27	1616,27	2165,33
8 x 12	1128,29	N	N	1897,37	1897,37	2877,11
9 x 10	1156,13	N	N	1671,06	1671,06	2379,45
9 x 11	1288,85	N	N	2085,94	2085,94	N
9 x 12	1397,45	N	N	2467,22	2467,22	N
10 x 11	1537,53	N	N	2538,58	2538,58	N
10 x 12	1688,01	N	N	3248,12	3248,12	N
11 x 12	2006,42	N	N	3759,32	3759,32	N

Quadro 37: comparação do consumo de aço para as lajes retangulares engastadas

8 CONCLUSÃO

Com base nos gráficos e tabelas obtidos para o consumo de concreto e aço das lajes maciças e nervuradas, pode-se confirmar que, para as condições estudadas neste trabalho, as lajes nervuradas são mais indicadas para maiores vãos, enquanto as lajes maciças são mais adequadas para vãos menores.

Observa-se que para as lajes simplesmente apoiadas, nas quais não há momento negativo nos bordos, as lajes nervuradas têm uma excelente resposta relativa à resistência aos momentos de flexão, já que sua altura útil maior comparada às lajes maciças faz com que o consumo de concreto e aço diminua. Porém, também é observado que para as lajes engastadas nos quatro bordos, as lajes nervuradas não apresentam um comportamento tão adequado quando são analisados os momentos negativos nos bordos. Isso porque nos bordos, invertem-se os locais de compressão e tração da seção transversal da laje nervurada, já que a mesa (possui uma maior área de compressão) agora é tracionada, enquanto que a nervura (possui menor área se comparada à mesa) agora está comprimida. Isso leva a uma armadura negativa relativamente elevada para as lajes nervuradas junto aos bordos engastados, aumentando o consumo de aço, e tornando menos adequado esse tipo de laje.

Para contornar esse problema, pode-se fazer com que se tenha uma parte maciça, com a altura total da laje nervurada, perto dos apoios, aumentando a área comprimida do concreto e diminuindo, assim, a armadura negativa junto aos bordos, mas em contrapartida, essa solução também irá aumentar consideravelmente o peso da laje e o consumo de concreto, por isso esta não é uma solução usada.

Define-se, então, os intervalos em que as lajes maciças possuem um menor consumo de materiais, assim como aquele em que as lajes nervuradas são as mais indicadas, verificando-se um ponto de transição. A transição da escolha relativa às lajes simplesmente apoiadas acontece para vãos de, aproximadamente, 6 m, isto é, para os vãos entre apoios menores que esse valor, as lajes maciças apresentam um menor consumo de materiais para as condições estudadas, enquanto que para vãos maiores, as lajes nervuradas são as mais indicadas. Porém, observa-se também que quando o vão aproxima-se dos 12 m, as lajes nervuradas começam a

apresentar resultados insatisfatórios, como o consumo elevado de materiais e flecha acentuada. Portanto, seria interessante analisar-se a utilização de lajes protendidas para vãos maiores que 12 m.

Essa análise também pode ser feita para as lajes engastadas, onde as maciças apresentaram resultados mais satisfatórios na comparação com as nervuradas para vãos menores que 8 m. Porém, para vãos acima desse valor, as lajes nervuradas apresentaram um desempenho superior para as condições estudadas.

Na prática, ambas as condições de apoio estudadas não existem, pois não há um engastamento perfeito nem uma laje totalmente apoiada. O que há, de fato, são estágios de engastamento, no qual se pode plastificar o apoio controlando esses estágios de forma a equilibrar as armaduras positivas e negativas, para que não se tenha excessos nem junto aos bordos nem no centro do vão da laje.

Algumas irregularidades são observadas nos gráficos para os consumos, tanto de concreto quanto de aço. Para o volume de concreto, isso pode ser explicado pelo arranjo das fôrmas para os diferentes vãos, já que para uma determinada dimensão, irá sobrar um espaço maior ou menor, dependendo da fôrma utilizada, resultando em uma parte maciça de laje, aumentando o volume de concreto. Em relação ao aço, a explicação é referente à utilização de bitolas diferentes, onde para grandes áreas que irão resistir aos momentos fletores, uma armadura a mais por nervura irá resultar em um grande acréscimo da quantidade de aço.

A análise dos resultados para se escolher a laje mais indicada para cada vão se deu em função do consumo de materiais. Porém, em alguns casos, determinada laje apresentava um menor consumo de concreto, porém um maior consumo de aço que outra. Nesses casos, a opção da laje mais indicada para estes vãos foi em função do consumo de concreto, já que essa variável também implica em aumentar a altura da laje, algo que nem sempre é possível frente a um determinado projeto arquitetônico.

O custo dos materiais e das fôrmas, que não foi analisado neste trabalho, também deve ser fundamental na escolha da laje mais indicada para os vãos estudados aqui, já que estes custos são muito variáveis, e em termos econômicos, poderia definir o tipo de laje mais econômica.

Seria aconselhável o desenvolvimento de um estudo complementar a este trabalho no qual a análise das lajes protendidas também fosse considerada, pois os resultados aqui encontrados

mostraram que as nervuradas possuem um limite de vãos além do qual a laje começa a apresentar resultados insatisfatórios econômicos e estruturais, fazendo com que as protendidas passem a ser a escolha ideal.

Com base nos resultados encontrados e nas análises feitas, foi construída uma tabela com a laje ideal para todos os vãos estudados em função do seu consumo de materiais, tanto para as lajes simplesmente apoiadas quanto para as lajes engastadas nos quatro bordos, indicando também suas dimensões (para as lajes maciças) ou o tipo de fôrma utilizada (para as lajes nervuradas), a flecha, seu consumo de concreto e a quantidade de armadura para resistir aos momentos fletores positivos e negativos.

Para as lajes simplesmente apoiadas nos quatro bordos, a solução mais indicada para cada caso está mostrada nos quadros 38 e 39, para lajes quadradas e retangulares, respectivamente.

Lajes Quadradas Ideais - Apoiada										
Ly x Lx (mxm)	Tipo de laje	altura (cm) ou tipo nerv	Asx (cm ² /m)	Aço x dist. ou por nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y dist. ou por nerv (vão)	W (cm)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 2	Maciça	8	0,48	ø 5 c/20	0,48	ø 5 c/20	0,03	0,32	6,16	200,76
3 x 3	Maciça	8	1,10	ø 5 c/17	1,10	ø 5 c/17	0,16	0,72	16,32	104,97
4 x 4	Maciça	8	1,99	ø 6,3 c/15	1,99	ø 6,3 c/15	0,49	1,27	52,20	106,24
5 x 5	Maciça	9	2,83	ø 6,3 c/11	2,83	ø 6,3 c/11	0,88	2,24	111,21	125,73
6 x 6	Nervurada	RO 180	1,47	2 ø 8	1,47	2 ø 8	0,52	4,29	104,16	199,65
7 x 7	Nervurada	RO 180	2,01	2 ø 10	2,01	2 ø 10	0,97	6,43	207,13	214,31
8 x 8	Nervurada	RO 900	2,32	2 ø 12,5	2,32	2 ø 12,5	0,77	9,57	277,41	362,10
9 x 9	Nervurada	RO 800 (35)	2,32	2 ø 12,5	2,32	2 ø 12,5	0,94	15,54	416,11	444,50
10 x 10	Nervurada	RO 800 (40)	2,53	2 ø 12,5	2,53	2 ø 12,5	0,55	22,65	500,87	909,58
11 x 11	Nervurada	RO 800 (40)	3,07	2 ø 12,5	3,07	2 ø 12,5	0,81	28,22	593,34	735,95
12 x 12	Maciça	37	7,40	ø 12,5 c/16	7,40	ø 12,5 c/16	0,99	53,06	1733,79	1759,30

Quadro 38: definição do tipo e características da laje com o menor consumo de materiais para as lajes quadradas apoiadas

Lajes Retangulares Ideais - Apoiada										
Ly x Lx (mxm)	Tipo de laje	altura (cm) ou tipo nerv	Asx (cm ² /m)	Aço x dist. ou por nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y dist. ou por nerv (vão)	W (cm)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ²)
2 x 3	Maciça	8	0,46	ø 5 c/20	0,86	ø 5 c/20	0,05	0,48	9,25	186,48
2 x 4	Maciça	8	0,40	ø 5 c/20	1,10	ø 5 c/17	0,07	0,64	13,42	206,03
3 x 4	Maciça	8	1,10	ø 5 c/17	1,72	ø 5 c/11	0,22	0,96	27,69	128,53
3 x 5	Maciça	8	1,01	ø 5 c/19	2,22	ø 6,3 c/14	0,28	1,20	38,38	136,34
3 x 6	Maciça	8	0,91	ø 5 c/20	2,57	ø 6,3 c/12	0,33	1,43	50,57	153,40
4 x 5	Maciça	8	2,01	ø 6,3 c/15	2,89	ø 8 c/17	0,62	1,59	79,04	127,43
4 x 6	Maciça	8	1,92	ø 6,3 c/16	3,69	ø 8 c/13	0,79	1,91	109,54	138,07
4 x 7	Maciça	8	1,78	ø 5 c/11	4,34	ø 8 c/11	0,93	2,22	139,66	149,75
4 x 8	Maciça	9	1,46	ø 5 c/13	4,23	ø 8 c/11	0,77	2,86	152,71	198,74
5 x 6	Maciça	10	2,60	ø 6,3 c/12	3,50	ø 8 c/14	0,80	2,98	145,71	181,92
5 x 7	Maciça	10	2,53	ø 6,3 c/12	4,36	ø 8 c/11	1,00	3,47	196,90	196,72
5 x 8	Maciça	11	2,21	ø 6,3 c/14	4,65	ø 10 c/16	0,92	4,37	224,02	243,11
5 x 9	Maciça	12	1,94	ø 6,3 c/16	4,81	ø 10 c/16	0,83	5,37	242,19	291,71
5 x 10	Maciça	12	1,82	ø 6,3 c/17	5,22	ø 10 c/15	0,90	5,96	277,45	306,75
6 x 7	Maciça	12	3,28	ø 8 c/15	4,21	ø 8 c/11	1,00	5,01	261,11	260,76
6 x 8	Nervurada	RO 180	1,47	2 ø 8	2,29	2 ø 10	0,85	5,85	190,17	223,56
6 x 9	Nervurada	RO 180	1,42	2 ø 8	2,64	2 ø 12,5	0,99	6,41	329,49	332,44
6 x 10	Nervurada	RO 210	1,21	2 ø 8	2,61	2 ø 12,5	0,77	7,89	355,57	459,04
6 x 11	Nervurada	RO 210	1,16	2 ø 8	2,81	2 ø 12,5	0,84	8,93	407,59	485,23
6 x 12	Nervurada	RO 210	1,09	2 ø 8	3,02	2 ø 12,5	0,91	9,46	486,57	536,38
7 x 8	Nervurada	RO 210	1,83	2 ø 10	2,25	2 ø 10	0,87	7,72	223,16	257,19
7 x 9	Nervurada	RO 900	1,78	2 ø 12,5	2,63	2 ø 12,5	0,70	8,55	298,60	429,03
7 x 10	Nervurada	RO 900	1,74	2 ø 10	3,00	2 ø 16	0,80	9,58	447,80	557,64
7 x 11	Nervurada	RO 900	1,68	2 ø 10	3,33	2 ø 16	0,90	10,62	520,39	578,43
7 x 12	Nervurada	RO 900	1,60	2 ø 10	3,61	2 ø 16	0,98	11,66	599,30	609,23
8 x 9	Nervurada	RO 900	2,36	2 ø 12,5	2,84	2 ø 16	0,96	9,75	451,17	469,65
8 x 10	Nervurada	RO 800 (35)	1,85	2 ø 10	2,60	2 ø 12,5	0,87	15,28	358,93	413,52
8 x 11	Nervurada	RO 800 (35)	1,82	2 ø 10	2,95	2 ø 12,5	0,99	17,09	405,17	407,28
8 x 12	Nervurada	RO 800 (40)	1,77	2 ø 10	3,26	2 ø 16	0,43	19,90	714,50	1667,40
9 x 10	Nervurada	RO 800 (40)	2,36	2 ø 12,5	2,78	2 ø 12,5	0,44	20,01	458,49	1034,59
9 x 11	Nervurada	RO 800 (40)	2,35	2 ø 12,5	3,20	2 ø 16	0,52	22,33	694,12	1337,93
9 x 12	Nervurada	RO 800 (40)	2,32	2 ø 12,5	3,60	2 ø 16	0,59	22,96	814,06	1381,87
10 x 11	Nervurada	RO 800 (40)	2,92	2 ø 12,5	3,38	2 ø 16	0,66	25,26	736,50	1109,43
10 x 12	Nervurada	RO 800 (40)	2,91	2 ø 12,5	3,87	2 ø 16	0,77	26,04	856,44	1114,97
11 x 12	Nervurada	RO 800 (40)	3,54	2 ø 16	4,05	2 ø 16	0,96	29,08	1092,07	1140,17

Quadro 39: definição do tipo e características da laje com o menor consumo de materiais para as lajes retangulares apoiadas

Para as lajes engastadas nos quatro bordos, a solução mais indicada para cada caso está mostrada nos quadros 40 e 41, para lajes quadradas e retangulares, respectivamente.

Lajes Quadradas Ideais - Engastada														
Ly x Lx (mxm)	Tipo de laje	altura (cm) ou tipo nerv	Asx (cm ² /m)	Aço x dist. ou por nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y dist. ou por nerv (vão)	Asx' (cm ² /m)	Aço x dist. ou por nerv (eng)	Asy' (cm ² /m)	Aço y dist. ou por nerv (eng)	W (cm)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ²)
2 x 2	Maciça	8	0,23	ø 5 c/20	0,23	ø 5 c/20	0,56	ø 5 c/20	0,56	ø 5 c/20	0,01	0,32	9,49	988,38
3 x 3	Maciça	8	0,52	ø 5 c/20	0,52	ø 5 c/20	1,27	ø 5 c/15	1,27	ø 5 c/15	0,05	0,72	23,61	485,56
4 x 4	Maciça	8	0,93	ø 5 c/20	0,93	ø 5 c/20	2,32	ø 8 c/20	2,32	ø 8 c/20	0,15	1,27	57,48	374,05
5 x 5	Maciça	8	1,47	ø 5 c/13	1,47	ø 5 c/13	3,77	ø 10 c/20	3,77	ø 10 c/20	0,38	1,98	138,80	369,93
6 x 6	Maciça	8	2,15	ø 6,3 c/14	2,15	ø 6,3 c/14	5,72	ø 12,5 c/20	5,72	ø 12,5 c/20	0,78	2,84	303,83	390,53
7 x 7	Maciça	10	2,39	ø 6,3 c/13	2,39	ø 6,3 c/13	6,24	ø 12,5 c/19	6,24	ø 12,5 c/19	0,81	4,84	441,37	543,71
8 x 8	Maciça	12	2,71	ø 6,3 c/11	2,71	ø 6,3 c/11	7,03	ø 12,5 c/17	7,03	ø 12,5 c/17	0,87	7,60	661,84	757,02
9 x 9	Nervurada	RO 900	1,31	2 ø 10	1,31	2 ø 10	23,41	5 ø 25	23,41	5 ø 25	0,38	9,51	2151,29	5604,34
10 x 10	Nervurada	RO 900	1,62	2 ø 10	1,62	2 ø 10	30,24	6 ø 25	30,24	6 ø 25	0,59	12,00	3069,97	5247,22
11 x 11	Nervurada	RO 800 (35)	1,65	2 ø 10	1,65	2 ø 10	25,89	5 ø 25	25,89	5 ø 25	0,65	24,50	3346,45	5121,12
12 x 12	Nervurada	RO 800 (35)	1,97	2 ø 10	1,97	2 ø 10	31,55	6 ø 25	31,55	6 ø 25	0,93	25,72	4911,95	5307,38

Quadro 40: definição do tipo e características da laje com o menor consumo de materiais para as lajes quadradas engastadas

Lajes Retangulares Ideais - Engastada														
Ly x Lx (mxm)	Tipo de laje	altura (cm) ou tipo nerv	Asx (cm ² /m)	Aço x dist. ou por nerv (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y dist. ou por nerv (vão)	Asx' (cm ² /m)	Aço x dist. ou por nerv (eng)	Asy' (cm ² /m)	Aço y dist. ou por nerv (eng)	W (cm)	Concreto (m ³)	Aço (kg)	Taxa de aço (kg/m ³)
2 x 3	Maciça	8	0,18	ø 5 c/20	0,39	ø 5 c/20	0,62	ø 5 c/20	0,82	ø 5 c/20	0,02	0,48	14,18	861,28
2 x 4	Maciça	8	0,13	ø 5 c/20	0,44	ø 5 c/20	0,61	ø 5 c/20	0,91	ø 5 c/20	0,02	0,64	18,86	993,70
3 x 4	Maciça	8	0,46	ø 5 c/20	0,80	ø 5 c/20	1,41	ø 6,3 c/20	1,76	ø 6,3 c/17	0,08	0,96	35,22	466,99
3 x 5	Maciça	8	0,36	ø 5 c/20	0,94	ø 5 c/20	1,40	ø 6,3 c/20	1,99	ø 6,3 c/15	0,09	1,19	45,47	505,38
3 x 6	Maciça	8	0,29	ø 5 c/20	1,01	ø 5 c/19	1,40	ø 6,3 c/20	2,10	ø 8 c/20	0,10	1,43	58,48	608,47
4 x 5	Maciça	8	0,86	ø 5 c/20	1,33	ø 5 c/14	2,55	ø 8 c/19	3,06	ø 8 c/16	0,22	1,59	84,50	379,52
4 x 6	Maciça	8	0,74	ø 5 c/20	1,60	ø 5 c/12	2,59	ø 8 c/19	3,51	ø 10 c/20	0,26	1,91	113,37	430,40
4 x 7	Maciça	8	0,61	ø 5 c/20	1,75	ø 5 c/11	2,57	ø 8 c/19	3,76	ø 10 c/20	0,29	2,22	135,42	464,90
4 x 8	Maciça	8	0,51	ø 5 c/20	1,84	ø 6,3 c/17	2,56	ø 8 c/19	3,91	ø 10 c/20	0,30	2,54	155,89	513,26
5 x 6	Maciça	8	1,40	ø 5 c/14	2,01	ø 6,3 c/15	4,11	ø 10 c/19	4,80	ø 10 c/16	0,52	2,38	191,57	371,24
5 x 7	Maciça	8	1,25	ø 5 c/15	2,41	ø 6,3 c/12	4,23	ø 10 c/18	5,59	ø 12,5 c/20	0,61	2,77	255,60	420,87
5 x 8	Maciça	8	1,08	ø 5 c/18	2,68	ø 6,3 c/11	4,20	ø 10 c/18	6,05	ø 12,5 c/20	0,68	3,16	292,49	433,28
5 x 9	Maciça	8	0,92	ø 5 c/20	2,84	ø 6,3 c/11	4,18	ø 10 c/18	6,35	ø 12,5 c/19	0,72	3,56	330,91	459,27
5 x 10	Maciça	8	0,81	ø 5 c/20	2,95	ø 8 c/17	4,17	ø 10 c/18	6,57	ø 12,5 c/18	0,74	3,95	379,62	511,94
6 x 7	Maciça	9	1,86	ø 6,3 c/16	2,51	ø 6,3 c/12	5,36	ø 12,5 c/20	6,10	ø 12,5 c/20	0,76	3,73	358,40	472,22
6 x 8	Maciça	9	1,69	ø 5 c/11	2,99	ø 8 c/16	5,53	ø 12,5 c/20	7,10	ø 12,5 c/17	0,89	4,26	444,60	499,57
6 x 9	Maciça	9	1,52	ø 5 c/12	3,34	ø 8 c/15	5,55	ø 12,5 c/20	7,74	ø 12,5 c/15	0,98	4,79	523,47	532,33
6 x 10	Maciça	10	1,21	ø 5 c/16	3,23	ø 8 c/15	4,91	ø 10 c/16	7,17	ø 12,5 c/17	0,81	5,93	510,75	629,93
6 x 11	Maciça	10	1,07	ø 5 c/18	3,36	ø 8 c/14	4,90	ø 10 c/16	7,41	ø 12,5 c/16	0,85	6,53	579,03	685,00
6 x 12	Maciça	10	0,96	ø 5 c/20	3,48	ø 8 c/14	4,89	ø 10 c/16	7,62	ø 12,5 c/16	0,87	7,12	625,25	722,00
7 x 8	Maciça	11	2,17	ø 6,3 c/14	2,81	ø 6,3 c/11	6,08	ø 12,5 c/20	6,78	ø 12,5 c/18	0,82	6,09	517,83	632,76
7 x 9	Maciça	11	2,01	ø 6,3 c/15	3,30	ø 8 c/15	6,28	ø 12,5 c/19	7,80	ø 12,5 c/15	0,95	6,85	643,49	675,37
7 x 10	Maciça	12	1,73	ø 5 c/11	3,44	ø 8 c/14	5,87	ø 12,5 c/20	7,79	ø 12,5 c/15	0,84	8,31	704,32	835,12
7 x 11	Maciça	12	1,56	ø 5 c/12	3,69	ø 8 c/13	5,83	ø 12,5 c/20	8,22	ø 12,5 c/14	0,91	9,14	800,38	879,40
7 x 12	Maciça	12	1,38	ø 5 c/14	3,88	ø 8 c/12	5,80	ø 12,5 c/20	8,53	ø 12,5 c/14	0,96	9,97	878,49	913,43
8 x 9	Maciça	13	2,54	ø 6,3 c/12	3,17	ø 8 c/15	6,98	ø 12,5 c/17	7,66	ø 12,5 c/16	0,90	9,26	774,79	863,37
8 x 10	Nervurada	RO 900	0,97	2 ø 8	1,47	2 ø 10	19,73	4 ø 25	24,02	5 ø 25	0,35	10,77	1915,44	5516,83
8 x 11	Nervurada	RO 900	0,90	2 ø 8	1,64	2 ø 10	20,05	4 ø 25	26,30	5 ø 25	0,38	11,94	2165,33	5668,09
8 x 12	Nervurada	RO 900	0,83	2 ø 8	1,76	2 ø 12,5	20,05	4 ø 25	27,96	6 ø 25	0,41	13,05	2877,11	7004,94
9 x 10	Nervurada	RO 900	1,31	2 ø 10	1,59	2 ø 10	25,00	5 ø 25	27,25	5 ø 25	0,47	10,71	2379,45	5046,41
9 x 11	Nervurada	RO 800 (35)	1,04	2 ø 8	1,53	2 ø 10	18,24	3 ø 25	21,52	4 ø 25	0,41	19,47	2085,94	5056,55
9 x 12	Nervurada	RO 800 (35)	0,98	2 ø 8	1,69	2 ø 10	18,56	5 ø 20	23,43	4 ø 25	0,45	19,96	2467,22	5431,58
10 x 11	Nervurada	RO 800 (35)	1,36	2 ø 10	1,62	2 ø 10	22,17	4 ø 25	23,79	4 ø 25	0,54	22,01	2538,58	4707,24
10 x 12	Nervurada	RO 800 (35)	1,31	2 ø 10	1,84	2 ø 10	22,85	4 ø 25	26,61	5 ø 25	0,61	22,58	3248,12	5291,49
11 x 12	Nervurada	RO 800 (35)	1,66	2 ø 10	1,94	2 ø 10	27,30	5 ø 25	29,16	5 ø 25	0,78	25,23	3759,32	4827,91

Quadro 41: definição do tipo e características da laje com o menor consumo de materiais para as lajes retangulares engastadas

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, J. M. **Curso de concreto armado**. 2. ed. Rio Grande: Dunas, 2003a. v.2.

_____. **Curso de concreto armado**. 2. ed. Rio Grande: Dunas, 2003b. v.4.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

_____. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

CARVALHO, R. C.; PINHEIRO, L. M. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. São Paulo: Pini, 2009. v.2.

RO-FORMAS CONSTRUTORA, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS LTDA. **Formas Plásticas**: catálogo eletrônico. Disponível em: <http://www.romanio.com.br/catalogo/RO-Formas.pdf>. Acesso em: 10 out. 2010.

**APÊNDICE A – Processo de cálculo das áreas de aço para as lajes
quadradas maciças e nervuradas**

MACIÇAS APOIADAS			
LAJE	Wc	Mx	My
	4,06	44,2	44,2
2 x 2	0,031	0,884	0,884
3 x 3	0,155	1,989	1,989
4 x 4	0,491	3,536	3,536
5 x 5	0,885	5,801	5,801
6 x 6	0,884	9,547	9,547
7 x 7	0,944	14,619	14,619
8 x 8	0,909	21,923	21,923
9 x 9	0,927	31,327	31,327
10 x 10	0,973	43,095	43,095
11 x 11	0,966	58,830	58,830
12 x 12	0,986	77,969	77,969

MOMENTO POSITIVO								
Altura (cm)	d (cm)	D (kNm)	x (cm)	x_{23} (cm)	x_{34} (cm)	Dom	y (cm)	A_{sy} (cm ² /m)
8	6	10,578	0,172	1,554	3,768	2	0,137	0,48
8	6	10,578	0,392	1,554	3,768	2	0,314	1,10
8	6	10,578	0,713	1,554	3,768	2	0,571	1,99
9	7	15,061	1,014	1,813	4,396	2	0,811	2,83
12	10	35,700	1,154	2,590	6,280	2	0,923	3,22
15	13	69,727	1,353	3,367	8,164	2	1,082	3,78
19	17	141,705	1,543	4,403	10,676	2	1,234	4,31
23	21	251,367	1,780	5,439	13,188	2	1,424	4,97
27	25	406,645	2,055	6,475	15,700	2	1,644	5,74
32	30	676,978	2,334	7,770	18,840	2	1,867	6,52
37	35	1046,477	2,649	9,065	21,980	2	2,119	7,40

Quadro APA-1: processo de cálculo das áreas de aço para lajes quadradas maciças apoiadas

MACIÇAS ENGASTADAS					
LAJE	Wc	Mxe	Mye	Mx	My
		1,27	-51,1	-51,1	21,1
2 x 2	0,01	-1,02	-1,02	0,42	0,42
3 x 3	0,05	-2,3	-2,3	0,95	0,95
4 x 4	0,15	-4,09	-4,09	1,69	1,69
5 x 5	0,38	-6,39	-6,39	2,64	2,64
6 x 6	0,78	-9,2	-9,2	3,8	3,8
7 x 7	0,81	-13,77	-13,77	5,69	5,69
8 x 8	0,87	-19,62	-19,62	8,1	8,1
9 x 9	0,96	-26,9	-26,9	11,11	11,11
10 x 10	0,91	-37,05	-37,05	15,3	15,3
11 x 11	0,9	-49,46	-49,46	20,42	20,42
12 x 12	0,92	-64,39	-64,39	26,59	26,59

LAJE	MOMENTO POSITIVO								
	Altura (cm)	d (cm)	D (kNm)	x (cm)	x ₂₃ (cm)	x ₃₄ (cm)	Dom	y (cm)	Asy (cm ² /m)
2 x 2	8	6	10,578	0,082	1,554	3,768	2	0,065	0,23
3 x 3	8	6	10,578	0,185	1,554	3,768	2	0,148	0,52
4 x 4	8	6	10,578	0,332	1,554	3,768	2	0,265	0,93
5 x 5	8	6	10,578	0,525	1,554	3,768	2	0,420	1,47
6 x 6	8	6	10,578	0,769	1,554	3,768	2	0,615	2,15
7 x 7	10	8	20,660	0,856	2,072	5,024	2	0,685	2,39
8 x 8	12	10	35,700	0,972	2,590	6,280	2	0,778	2,72
9 x 9	14	12	56,690	1,108	3,108	7,536	2	0,887	3,10
10 x 10	17	15	101,501	1,215	3,885	9,420	2	0,972	3,39
11 x 11	20	18	165,278	1,349	4,662	11,304	2	1,079	3,77
12 x 12	23	21	251,367	1,503	5,439	13,188	2	1,202	4,20

LAJE	MOMENTO NEGATIVO							
	d (cm)	d' (cm)	x (cm)	x ₂₃ (cm)	x ₃₄ (cm)	Dom	y (cm)	Asy' (cm ² /m)
2 x 2	6	2	0,199	1,554	3,768	2	0,159	0,56
3 x 3	6	2	0,456	1,554	3,768	2	0,365	1,27
4 x 4	6	2	0,832	1,554	3,768	2	0,665	2,32
5 x 5	6	2	1,349	1,554	3,768	2	1,079	3,77
6 x 6	6	2	2,047	1,554	3,768	3	1,637	5,72
7 x 7	8	2	2,234	2,072	5,024	3	1,787	6,24
8 x 8	10	2	2,515	2,590	6,280	2	2,012	7,03
9 x 9	12	2	2,857	3,108	7,536	2	2,286	7,98
10 x 10	15	2	3,105	3,885	9,420	2	2,484	8,67
11 x 11	18	2	3,430	4,662	11,304	2	2,744	9,58
12 x 12	21	2	3,812	5,439	13,188	2	3,049	10,65

Quadro APA-2: processo de cálculo das áreas de aço para lajes quadradas maciças engastadas

RO 180 APOIADAS			
LAJE	Wc	Mx	My
	4,06	44,2	44,2
2 x 2	0,006	1,057	1,057
3 x 3	0,033	2,379	2,379
4 x 4	0,103	4,229	4,229
5 x 5	0,252	6,608	6,608
6 x 6	0,522	9,515	9,515
7 x 7	0,966	12,951	12,951
8 x 8	1,649	16,916	16,916
9 x 9	2,641	21,410	21,410
10 x 10	4,025	26,432	26,432
11 x 11	5,894	31,982	31,982
12 x 12	8,347	38,062	38,062

LAJE	MOMENTO POSITIVO									
	Altura (cm)	peso (kN/m ²)	d (cm)	D (kNm)	x (cm)	x _{zz} (cm)	x _{yy} (cm)	Dom	y (cm)	Asy (cm ² /m)
2 x 2	23	2,98	21	60,315	0,058	5,439	13,188	2	0,046	0,16
3 x 3	23	2,98	21	60,315	0,131	5,439	13,188	2	0,105	0,37
4 x 4	23	2,98	21	60,315	0,233	5,439	13,188	2	0,187	0,65
5 x 5	23	2,98	21	60,315	0,365	5,439	13,188	2	0,292	1,02
6 x 6	23	2,98	21	60,315	0,528	5,439	13,188	2	0,422	1,47
7 x 7	23	2,98	21	60,315	0,721	5,439	13,188	2	0,577	2,01
8 x 8	23	2,98	21	60,315	0,946	5,439	13,188	2	0,757	2,64
9 x 9	23	2,98	21	60,315	1,203	5,439	13,188	2	0,962	3,36
10 x 10	23	2,98	21	60,315	1,494	5,439	13,188	2	1,195	4,17
11 x 11	23	2,98	21	60,315	1,819	5,439	13,188	2	1,455	5,08
12 x 12	23	2,98	21	60,315	2,180	5,439	13,188	2	1,744	6,09

Quadro APA-3: processo de cálculo das áreas de aço para lajes quadradas nervuradas (moldadas a partir da fôrma RO 180) apoiadas

RO 180 ENGASTADAS							
LAJE			Wc	Mxe	Mye	Mx	My
			1,27	-51,1	-51,1	21,1	21,1
2	x	2	0,002	-1,222	-1,222	0,505	0,505
3	x	3	0,010	-2,750	-2,750	1,136	1,136
4	x	4	0,032	-4,889	-4,889	2,019	2,019
5	x	5	0,079	-7,639	-7,639	3,154	3,154
6	x	6	0,163	-11,001	-11,001	4,542	4,542
7	x	7	0,302	-14,973	-14,973	6,183	6,183
8	x	8	0,516	-19,557	-19,557	8,075	8,075
9	x	9	0,826	-24,752	-24,752	10,220	10,220
10	x	10	1,259	-30,558	-30,558	12,618	12,618
11	x	11	1,844	-36,975	-36,975	15,268	15,268
12	x	12	2,611	-44,003	-44,003	18,170	18,170

LAJE	MOMENTO POSITIVO											
	Altura (cm)	peso (kN/m ²)	d (cm)	D (kNm)	x (cm)	x ₂₃ (cm)	x ₃₄ (cm)	Dom	y (cm)	Asy (cm ² /m)		
2	x	2	23	2,98	21	60,315	0,028	5,439	13,188	2	0,022	0,08
3	x	3	23	2,98	21	60,315	0,062	5,439	13,188	2	0,050	0,17
4	x	4	23	2,98	21	60,315	0,111	5,439	13,188	2	0,089	0,31
5	x	5	23	2,98	21	60,315	0,174	5,439	13,188	2	0,139	0,49
6	x	6	23	2,98	21	60,315	0,251	5,439	13,188	2	0,200	0,70
7	x	7	23	2,98	21	60,315	0,342	5,439	13,188	2	0,273	0,95
8	x	8	23	2,98	21	60,315	0,447	5,439	13,188	2	0,358	1,25
9	x	9	23	2,98	21	60,315	0,567	5,439	13,188	2	0,454	1,58
10	x	10	23	2,98	21	60,315	0,702	5,439	13,188	2	0,562	1,96
11	x	11	23	2,98	21	60,315	0,852	5,439	13,188	2	0,682	2,38
12	x	12	23	2,98	21	60,315	1,017	5,439	13,188	2	0,814	2,84

LAJE	MOMENTO NEGATIVO									
	d (cm)	d' (cm)	x (cm)	x ₂₃ (cm)	x ₃₄ (cm)	Dom	y (cm)	Asy' (cm ² /m)		
2	x	2	21	2	0,521	5,439	13,188	2	0,417	1,46
3	x	3	21	2	1,188	5,439	13,188	2	0,951	3,32
4	x	4	21	2	2,153	5,439	13,188	2	1,723	6,01
5	x	5	21	2	3,453	5,439	13,188	2	2,763	9,65
6	x	6	21	2	5,151	5,439	13,188	2	4,121	14,39
7	x	7	21	2	7,354	5,439	13,188	3	5,883	20,54
8	x	8	21	2	10,267	5,439	13,188	3	8,214	28,68
9	x	9	21	2	14,407	5,439	13,188	4	11,525	40,24
10	x	10	21	2	22,853	5,439	13,188	4	18,283	63,83
11	x	11	21	2	-	5,439	13,188	-	-	-
12	x	12	21	2	-	5,439	13,188	-	-	-

Quadro APA-4: processo de cálculo das áreas de aço para lajes quadradas nervuradas (moldadas a partir da fôrma RO 180) engastadas

RO 210 APOIADAS			
LAJE	Wc		
	Mx	My	
2 x 2	0,004	1,084	1,084
3 x 3	0,023	2,439	2,439
4 x 4	0,072	4,335	4,335
5 x 5	0,175	6,774	6,774
6 x 6	0,364	9,754	9,754
7 x 7	0,674	13,276	13,276
8 x 8	1,149	17,341	17,341
9 x 9	1,841	21,947	21,947
10 x 10	2,805	27,095	27,095
11 x 11	4,107	32,784	32,784
12 x 12	5,817	39,016	39,016

LAJE	MOMENTO POSITIVO									
	Altura (cm)	peso (kN/m ²)	d (cm)	D (kNm)	x (cm)	x ₂₂ (cm)	x ₂₄ (cm)	Dom	γ (cm)	A _{sy} (cm ² /m)
2 x 2	26	3,13	24	88,715	0,052	6,216	15,072	2	0,042	0,15
3 x 3	26	3,13	24	88,715	0,117	6,216	15,072	2	0,094	0,33
4 x 4	26	3,13	24	88,715	0,209	6,216	15,072	2	0,167	0,58
5 x 5	26	3,13	24	88,715	0,327	6,216	15,072	2	0,262	0,91
6 x 6	26	3,13	24	88,715	0,472	6,216	15,072	2	0,378	1,32
7 x 7	26	3,13	24	88,715	0,645	6,216	15,072	2	0,516	1,80
8 x 8	26	3,13	24	88,715	0,845	6,216	15,072	2	0,676	2,36
9 x 9	26	3,13	24	88,715	1,074	6,216	15,072	2	0,859	3,00
10 x 10	26	3,13	24	88,715	1,331	6,216	15,072	2	1,065	3,72
11 x 11	26	3,13	24	88,715	1,619	6,216	15,072	2	1,295	4,52
12 x 12	26	3,13	24	88,715	1,937	6,216	15,072	2	1,549	5,41

Quadro APA-5: processo de cálculo das áreas de aço para lajes quadradas nervuradas (moldadas a partir da fôrma RO 210) apoiadas

RO 210 ENGASTADAS							
LAJE			Wc	Mxe	Mye	Mx	My
			1,27	-51,1	-51,1	21,1	21,1
2	x	2	0,001	-1,253	-1,253	0,517	0,517
3	x	3	0,007	-2,819	-2,819	1,164	1,164
4	x	4	0,022	-5,012	-5,012	2,069	2,069
5	x	5	0,055	-7,831	-7,831	3,234	3,234
6	x	6	0,114	-11,277	-11,277	4,656	4,656
7	x	7	0,211	-15,349	-15,349	6,338	6,338
8	x	8	0,359	-20,048	-20,048	8,278	8,278
9	x	9	0,576	-25,373	-25,373	10,477	10,477
10	x	10	0,878	-31,324	-31,324	12,934	12,934
11	x	11	1,285	-37,902	-37,902	15,651	15,651
12	x	12	1,820	-45,107	-45,107	18,625	18,625

LAJE	MOMENTO POSITIVO											
	Altura (cm)	peso (kN/m ²)	d (cm)	D (kNm)	x (cm)	x ₂₂ (cm)	x ₂₄ (cm)	Dom	y (cm)	Asy (cm ² /m)		
2	x	2	26	3,13	24	88,715	0,025	6,216	15,072	2	0,020	0,07
3	x	3	26	3,13	24	88,715	0,056	6,216	15,072	2	0,045	0,16
4	x	4	26	3,13	24	88,715	0,100	6,216	15,072	2	0,080	0,28
5	x	5	26	3,13	24	88,715	0,156	6,216	15,072	2	0,125	0,43
6	x	6	26	3,13	24	88,715	0,225	6,216	15,072	2	0,180	0,63
7	x	7	26	3,13	24	88,715	0,306	6,216	15,072	2	0,245	0,85
8	x	8	26	3,13	24	88,715	0,400	6,216	15,072	2	0,320	1,12
9	x	9	26	3,13	24	88,715	0,508	6,216	15,072	2	0,406	1,42
10	x	10	26	3,13	24	88,715	0,628	6,216	15,072	2	0,502	1,75
11	x	11	26	3,13	24	88,715	0,762	6,216	15,072	2	0,609	2,13
12	x	12	26	3,13	24	88,715	0,909	6,216	15,072	2	0,727	2,54

LAJE	MOMENTO NEGATIVO									
	d (cm)	d' (cm)	x (cm)	x ₂₃ (cm)	x ₃₄ (cm)	Dom	y (cm)	Asy' (cm ² /m)		
2	x	2	24	2	0,467	6,216	15,072	2	0,373	1,30
3	x	3	24	2	1,061	6,216	15,072	2	0,848	2,96
4	x	4	24	2	1,913	6,216	15,072	2	1,530	5,34
5	x	5	24	2	3,049	6,216	15,072	2	2,439	8,51
6	x	6	24	2	4,505	6,216	15,072	2	3,604	12,58
7	x	7	24	2	6,342	6,216	15,072	3	5,074	17,71
8	x	8	24	2	8,657	6,216	15,072	3	6,926	24,18
9	x	9	24	2	11,631	6,216	15,072	3	9,304	32,48
10	x	10	24	2	15,665	6,216	15,072	4	12,532	43,75
11	x	11	24	2	22,278	6,216	15,072	4	17,822	62,22
12	x	12	24	2	-	6,216	15,072	-	-	-

Quadro APA-6: processo de cálculo das áreas de aço para lajes quadradas nervuradas (moldadas a partir da fôrma RO 210) engastadas

RO 800 (350) APOIADAS					
LAJE			Wc	Mx	My
			4,06	44,2	44,2
2	x	2	0,002	1,340	1,340
3	x	3	0,012	3,015	3,015
4	x	4	0,037	5,361	5,361
5	x	5	0,089	8,376	8,376
6	x	6	0,185	12,061	12,061
7	x	7	0,343	16,417	16,417
8	x	8	0,584	21,442	21,442
9	x	9	0,936	27,138	27,138
10	x	10	1,427	33,504	33,504
11	x	11	2,089	40,539	40,539
12	x	12	2,959	48,245	48,245

LAJE	MOMENTO POSITIVO											
	Altura (cm)	peso (kN/m ²)	d (cm)	D (kNm)	x (cm)	x ₂₂ (cm)	x ₃₃ (cm)	Dom	y (cm)	Asy (cm ² /m)		
2	x	2	40	4,58	38	215,687	0,041	9,842	23,864	2	0,033	0,11
3	x	3	40	4,58	38	215,687	0,092	9,842	23,864	2	0,073	0,26
4	x	4	40	4,58	38	215,687	0,163	9,842	23,864	2	0,130	0,46
5	x	5	40	4,58	38	215,687	0,255	9,842	23,864	2	0,204	0,71
6	x	6	40	4,58	38	215,687	0,367	9,842	23,864	2	0,294	1,03
7	x	7	40	4,58	38	215,687	0,501	9,842	23,864	2	0,401	1,40
8	x	8	40	4,58	38	215,687	0,655	9,842	23,864	2	0,524	1,83
9	x	9	40	4,58	38	215,687	0,831	9,842	23,864	2	0,665	2,32
10	x	10	40	4,58	38	215,687	1,028	9,842	23,864	2	0,822	2,87
11	x	11	40	4,58	38	215,687	1,246	9,842	23,864	2	0,997	3,48
12	x	12	40	4,58	38	215,687	1,487	9,842	23,864	2	1,190	4,15

Quadro APA-7: processo de cálculo das áreas de aço para lajes quadradas nervuradas (moldadas a partir da fôrma RO 800 com altura livre de 350 mm) apoiadas

RO 800 (350) ENGASTADAS							
LAJE			Wc	Mxe	Mye	Mx	My
			1,27	-51,1	-51,1	21,1	21,1
2	x	2	0,001	-1,549	-1,549	0,640	0,640
3	x	3	0,004	-3,486	-3,486	1,439	1,439
4	x	4	0,011	-6,197	-6,197	2,559	2,559
5	x	5	0,028	-9,683	-9,683	3,998	3,998
6	x	6	0,058	-13,944	-13,944	5,758	5,758
7	x	7	0,107	-18,980	-18,980	7,837	7,837
8	x	8	0,183	-24,790	-24,790	10,236	10,236
9	x	9	0,293	-31,374	-31,374	12,955	12,955
10	x	10	0,446	-38,734	-38,734	15,994	15,994
11	x	11	0,653	-46,868	-46,868	19,352	19,352
12	x	12	0,925	-55,777	-55,777	23,031	23,031

LAJE	MOMENTO POSITIVO											
	Altura (cm)	peso (kN/m ²)	d (cm)	D (kNm)	x (cm)	x ₂₃ (cm)	x ₃₄ (cm)	Dom	y (cm)	Asy (cm ² /m)		
2	x	2	40	4,58	38	215,687	0,019	9,842	23,864	2	0,016	0,05
3	x	3	40	4,58	38	215,687	0,044	9,842	23,864	2	0,035	0,12
4	x	4	40	4,58	38	215,687	0,078	9,842	23,864	2	0,062	0,22
5	x	5	40	4,58	38	215,687	0,121	9,842	23,864	2	0,097	0,34
6	x	6	40	4,58	38	215,687	0,175	9,842	23,864	2	0,140	0,49
7	x	7	40	4,58	38	215,687	0,238	9,842	23,864	2	0,191	0,67
8	x	8	40	4,58	38	215,687	0,312	9,842	23,864	2	0,249	0,87
9	x	9	40	4,58	38	215,687	0,395	9,842	23,864	2	0,316	1,10
10	x	10	40	4,58	38	215,687	0,488	9,842	23,864	2	0,390	1,36
11	x	11	40	4,58	38	215,687	0,591	9,842	23,864	2	0,473	1,65
12	x	12	40	4,58	38	215,687	0,704	9,842	23,864	2	0,563	1,97

LAJE	MOMENTO NEGATIVO									
	d (cm)	d' (cm)	x (cm)	x ₂₃ (cm)	x ₃₄ (cm)	Dom	y (cm)	Asy' (cm ² /m)		
2	x	2	38	2	0,277	9,842	23,864	2	0,222	0,77
3	x	3	38	2	0,626	9,842	23,864	2	0,501	1,75
4	x	4	38	2	1,119	9,842	23,864	2	0,895	3,13
5	x	5	38	2	1,761	9,842	23,864	2	1,409	4,92
6	x	6	38	2	2,558	9,842	23,864	2	2,046	7,14
7	x	7	38	2	3,518	9,842	23,864	2	2,814	9,82
8	x	8	38	2	4,652	9,842	23,864	2	3,722	12,99
9	x	9	38	2	5,975	9,842	23,864	2	4,780	16,69
10	x	10	38	2	7,506	9,842	23,864	2	6,005	20,96
11	x	11	38	2	9,269	9,842	23,864	2	7,415	25,89
12	x	12	38	2	11,298	9,842	23,864	3	9,039	31,55

Quadro APA-8: processo de cálculo das áreas de aço para lajes quadradas nervuradas (moldadas a partir da fôrma RO 800 com altura livre de 350 mm) engastadas

RO 800 (400) APOIADAS					
LAJE		Wc	Mx	My	
		4,06	44,2	44,2	
2	x	2	0,001	1,340	1,340
3	x	3	0,004	3,015	3,015
4	x	4	0,014	5,361	5,361
5	x	5	0,034	8,376	8,376
6	x	6	0,071	12,061	12,061
7	x	7	0,132	16,417	16,417
8	x	8	0,226	21,442	21,442
9	x	9	0,361	27,138	27,138
10	x	10	0,551	33,504	33,504
11	x	11	0,806	40,539	40,539
12	x	12	1,142	48,245	48,245

LAJE	MOMENTO POSITIVO											
	Altura (cm)	peso (kN/m ²)	d (cm)	D (kNm)	x (cm)	x ₂₂ (cm)	x ₂₄ (cm)	Dom	y (cm)	Asy (cm ² /m)		
2	x	2	45	4,58	43	558,866	0,036	11,137	27,004	2	0,029	0,10
3	x	3	45	4,58	43	558,866	0,081	11,137	27,004	2	0,065	0,23
4	x	4	45	4,58	43	558,866	0,144	11,137	27,004	2	0,115	0,40
5	x	5	45	4,58	43	558,866	0,225	11,137	27,004	2	0,180	0,63
6	x	6	45	4,58	43	558,866	0,324	11,137	27,004	2	0,259	0,91
7	x	7	45	4,58	43	558,866	0,442	11,137	27,004	2	0,354	1,23
8	x	8	45	4,58	43	558,866	0,578	11,137	27,004	2	0,462	1,61
9	x	9	45	4,58	43	558,866	0,733	11,137	27,004	2	0,586	2,05
10	x	10	45	4,58	43	558,866	0,906	11,137	27,004	2	0,725	2,53
11	x	11	45	4,58	43	558,866	1,098	11,137	27,004	2	0,879	3,07
12	x	12	45	4,58	43	558,866	1,310	11,137	27,004	2	1,048	3,66

Quadro APA-9: processo de cálculo das áreas de aço para lajes quadradas nervuradas (moldadas a partir da fôrma RO 800 com altura livre de 400 mm) apoiadas

RO 800 (400) ENGASTADAS							
LAJE			Wc	Mxe	Mye	Mx	My
			1,27	-51,1	-51,1	21,1	21,1
2 x 2			0,000	-1,676	-1,676	0,692	0,692
3 x 3			0,002	-3,771	-3,771	1,557	1,557
4 x 4			0,005	-6,704	-6,704	2,768	2,768
5 x 5			0,012	-10,476	-10,476	4,326	4,326
6 x 6			0,024	-15,085	-15,085	6,229	6,229
7 x 7			0,045	-20,532	-20,532	8,478	8,478
8 x 8			0,076	-26,817	-26,817	11,073	11,073
9 x 9			0,122	-33,941	-33,941	14,015	14,015
10 x 10			0,186	-41,902	-41,902	17,302	17,302
11 x 11			0,273	-50,701	-50,701	20,935	20,935
12 x 12			0,386	-60,339	-60,339	24,915	24,915

LAJE	MOMENTO POSITIVO									
	Altura (cm)	peso (kN/m ²)	d (cm)	D (kNm)	x (cm)	x ₂₃ (cm)	x ₃₄ (cm)	Dom	y (cm)	Asy (cm ² /m)
2 x 2	45	5,2	43	558,866	0,019	11,137	27,004	2	0,015	0,05
3 x 3	45	5,2	43	558,866	0,042	11,137	27,004	2	0,033	0,12
4 x 4	45	5,2	43	558,866	0,074	11,137	27,004	2	0,059	0,21
5 x 5	45	5,2	43	558,866	0,116	11,137	27,004	2	0,093	0,32
6 x 6	45	5,2	43	558,866	0,167	11,137	27,004	2	0,134	0,47
7 x 7	45	5,2	43	558,866	0,228	11,137	27,004	2	0,182	0,64
8 x 8	45	5,2	43	558,866	0,298	11,137	27,004	2	0,238	0,83
9 x 9	45	5,2	43	558,866	0,377	11,137	27,004	2	0,302	1,05
10 x 10	45	5,2	43	558,866	0,466	11,137	27,004	2	0,373	1,30
11 x 11	45	5,2	43	558,866	0,564	11,137	27,004	2	0,451	1,58
12 x 12	45	5,2	43	558,866	0,672	11,137	27,004	2	0,538	1,88

LAJE	MOMENTO NEGATIVO								
	d (cm)	d' (cm)	x (cm)	x ₂₃ (cm)	x ₃₄ (cm)	Dom	y (cm)	Asy' (cm ² /m)	
2 x 2	43	2	0,257	11,137	27,004	2	0,206	0,72	
3 x 3	43	2	0,581	11,137	27,004	2	0,465	1,62	
4 x 4	43	2	1,037	11,137	27,004	2	0,830	2,90	
5 x 5	43	2	1,630	11,137	27,004	2	1,304	4,55	
6 x 6	43	2	2,363	11,137	27,004	2	1,891	6,60	
7 x 7	43	2	3,244	11,137	27,004	2	2,595	9,06	
8 x 8	43	2	4,279	11,137	27,004	2	3,423	11,95	
9 x 9	43	2	5,480	11,137	27,004	2	4,384	15,30	
10 x 10	43	2	6,857	11,137	27,004	2	5,486	19,15	
11 x 11	43	2	8,429	11,137	27,004	2	6,743	23,54	
12 x 12	43	2	10,216	11,137	27,004	2	8,172	28,53	

Quadro APA-10: processo de cálculo das áreas de aço para lajes quadradas nervuradas (moldadas a partir da fôrma RO 800 com altura livre de 400 mm) engastadas

RO 900 APOIADAS					
LAJE			Wc	Mx	My
			4,06	44,2	44,2
2	x	2	0,003	1,066	1,066
3	x	3	0,015	2,399	2,399
4	x	4	0,048	4,264	4,264
5	x	5	0,117	6,663	6,663
6	x	6	0,242	9,595	9,595
7	x	7	0,449	13,060	13,060
8	x	8	0,766	17,058	17,058
9	x	9	1,227	21,589	21,589
10	x	10	1,870	26,653	26,653
11	x	11	2,738	32,250	32,250
12	x	12	3,878	38,380	38,380

LAJE	MOMENTO POSITIVO									
	Altura (cm)	peso (kN/m ²)	d (cm)	D (kNm)	x (cm)	x ₂₂ (cm)	x ₂₄ (cm)	Dom	γ (cm)	Asy (cm ² /m)
2 x 2	26	3,03	24	130,893	0,051	6,216	15,072	2	0,041	0,14
3 x 3	26	3,03	24	130,893	0,115	6,216	15,072	2	0,092	0,32
4 x 4	26	3,03	24	130,893	0,206	6,216	15,072	2	0,164	0,57
5 x 5	26	3,03	24	130,893	0,322	6,216	15,072	2	0,257	0,90
6 x 6	26	3,03	24	130,893	0,465	6,216	15,072	2	0,372	1,30
7 x 7	26	3,03	24	130,893	0,634	6,216	15,072	2	0,507	1,77
8 x 8	26	3,03	24	130,893	0,831	6,216	15,072	2	0,665	2,32
9 x 9	26	3,03	24	130,893	1,056	6,216	15,072	2	0,845	2,95
10 x 10	26	3,03	24	130,893	1,309	6,216	15,072	2	1,047	3,66
11 x 11	26	3,03	24	130,893	1,591	6,216	15,072	2	1,273	4,44
12 x 12	26	3,03	24	130,893	1,904	6,216	15,072	2	1,523	5,32

Quadro APA-11: processo de cálculo das áreas de aço para lajes quadradas nervuradas (moldadas a partir da fôrma RO 900) apoiadas

RO 900 ENGASTADAS						
LAJE	Wc	Mxe	Mye	Mx	My	
	1,27	-51,1	-51,1	21,1	21,1	
2 x 2	0,001	-1,233	-1,233	0,509	0,509	
3 x 3	0,005	-2,773	-2,773	1,145	1,145	
4 x 4	0,015	-4,930	-4,930	2,036	2,036	
5 x 5	0,037	-7,703	-7,703	3,181	3,181	
6 x 6	0,076	-11,093	-11,093	4,580	4,580	
7 x 7	0,140	-15,099	-15,099	6,234	6,234	
8 x 8	0,240	-19,721	-19,721	8,143	8,143	
9 x 9	0,384	-24,959	-24,959	10,306	10,306	
10 x 10	0,585	-30,813	-30,813	12,723	12,723	
11 x 11	0,857	-37,284	-37,284	15,395	15,395	
12 x 12	1,213	-44,371	-44,371	18,322	18,322	

LAJE	MOMENTO POSITIVO									
	Altura (cm)	peso (kN/m ²)	d (cm)	D (kNm)	x (cm)	x ₂₃ (cm)	x ₃₄ (cm)	Dom	y (cm)	Asy (cm ² /m)
2 x 2	27,5	3,03	25,5	130,893	0,023	6,605	16,014	2	0,018	0,06
3 x 3	27,5	3,03	25,5	130,893	0,052	6,605	16,014	2	0,041	0,14
4 x 4	27,5	3,03	25,5	130,893	0,092	6,605	16,014	2	0,074	0,26
5 x 5	27,5	3,03	25,5	130,893	0,144	6,605	16,014	2	0,115	0,40
6 x 6	27,5	3,03	25,5	130,893	0,208	6,605	16,014	2	0,166	0,58
7 x 7	27,5	3,03	25,5	130,893	0,283	6,605	16,014	2	0,227	0,79
8 x 8	27,5	3,03	25,5	130,893	0,370	6,605	16,014	2	0,296	1,03
9 x 9	27,5	3,03	25,5	130,893	0,469	6,605	16,014	2	0,376	1,31
10 x 10	27,5	3,03	25,5	130,893	0,581	6,605	16,014	2	0,464	1,62
11 x 11	27,5	3,03	25,5	130,893	0,704	6,605	16,014	2	0,563	1,97
12 x 12	27,5	3,03	25,5	130,893	0,839	6,605	16,014	2	0,672	2,34

LAJE	MOMENTO NEGATIVO								
	d (cm)	d' (cm)	x (cm)	x ₂₃ (cm)	x ₃₄ (cm)	Dom	y (cm)	Asy' (cm ² /m)	
2 x 2	25,5	2	0,362	6,605	16,014	2	0,289	1,01	
3 x 3	25,5	2	0,819	6,605	16,014	2	0,656	2,29	
4 x 4	25,5	2	1,472	6,605	16,014	2	1,178	4,11	
5 x 5	25,5	2	2,332	6,605	16,014	2	1,866	6,51	
6 x 6	25,5	2	3,419	6,605	16,014	2	2,735	9,55	
7 x 7	25,5	2	4,760	6,605	16,014	2	3,808	13,29	
8 x 8	25,5	2	6,394	6,605	16,014	2	5,115	17,86	
9 x 9	25,5	2	8,383	6,605	16,014	3	6,706	23,41	
10 x 10	25,5	2	10,827	6,605	16,014	3	8,662	30,24	
11 x 11	25,5	2	13,912	6,605	16,014	3	11,129	38,85	
12 x 12	25,5	2	18,058	6,605	16,014	4	14,447	50,43	

Quadro APA-12: processo de cálculo das áreas de aço para lajes quadradas nervuradas (moldadas a partir da fôrma RO 900) engastadas