



UFSM

Dissertação de Mestrado

**CÁLCULO DE DESLOCAMENTOS
EM LAJES NERVURADAS**

Gustavo da Costa Borowski

PPGEC

Santa Maria, RS, Brasil

2005

**CÁLCULO DE DESLOCAMENTOS EM LAJES
NERVURADAS**

por

Gustavo da Costa Borowski

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

PPGEC

Santa Maria, RS, Brasil

2005

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

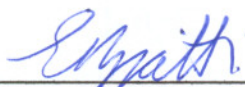
A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**CÁLCULO DE DESLOCAMENTOS
EM LAJES NERVURADAS**

elaborada por
Gustavo da Costa Borowski

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

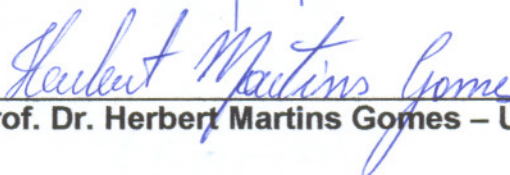
COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Eduardo Rizzatti
(Presidente/Orientador)



Prof^a. Dr^a. Maria Isabel Pimenta Lopes – UNIFRA



Prof. Dr. Herbert Martins Gomes – UFRGS

Santa Maria, 25 de Fevereiro de 2005

Dedico este trabalho à
minha noiva Jaqueline
e a meus pais
Vanderlei e Inara

AGRADECIMENTOS

À Jaqueline, minha noiva, pelo seu amor, carinho e compreensão durante a execução deste trabalho.

Em especial, aos meus pais, Vanderlei e Inara, e meus irmãos, Leandro e Luciana, pelo carinho e incentivo durante todos os meus estudos.

Ao Professor Eduardo Rizzatti, antes de tudo um grande amigo, pelo apoio e orientação na elaboração deste trabalho.

Com carinho, um agradecimento especial a Professora Maria Isabel Pimenta Lopes pelo incentivo, desde a minha graduação, ao desenvolvimento da pesquisa científica e pela orientação deste trabalho em sua fase inicial.

Ao Professor Herbert Martins Gomes pela idéia do tema deste trabalho.

E a todos os professores do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria que contribuíram com o meu aprendizado durante o meu curso de graduação e pós-graduação, o meu sincero muito obrigado.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE QUADROS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xv
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Estrutura do trabalho	1
1.2 Considerações iniciais	2
1.3 Justificativa	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo geral.....	5
1.4.2 Objetivos específicos	6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 Lajes de concreto armado: histórico	7
2.2 Lajes: definição e classificação	9
2.3 Lajes nervuradas cogumelo	10
2.4 NBR 6118(2003): Projeto de estruturas de concreto armado	15
2.5 Métodos para obtenção dos esforços em lajes nervuradas cogumelo	16
2.5.1 Método dos pórticos equivalentes	17
2.5.2 Método dos elementos finitos	21
2.5.2.1 Castem 2000	22
2.5.2.2 Método dos elementos finitos aplicado a lajes nervuradas	
cogumelo	23
2.6 Punção	26
3. METODOLOGIA	30
3.1 Introdução	30

3.2 Análise de resultados experimentais	30
3.2.1 Lajes nervuradas unidirecionais.....	30
3.2.2 Lajes nervuradas bi-direcionais	34
3.3 Método do material homogêneo equivalente	38
3.4 Análise de deslocamentos em lajes nervuradas unidirecionais	40
3.4.1 Material homogêneo equivalente	40
3.4.2 Cálculo de deslocamentos com o emprego de elementos finitos de barra	45
3.4.3 Cálculo de deslocamentos com o emprego de elementos finitos cúbicos	47
3.5 Análise de deslocamentos em lajes nervuradas bidirecionais..	49
3.5.1 Material homogêneo equivalente	50
3.5.2 Cálculo de deslocamentos com o emprego de elementos finitos de barra	57
4. RESULTADOS	59
4.1 Introdução	59
4.2 Método do material homogêneo equivalente	59
4.3 Resultados obtidos na laje nervurada unidirecional	61
4.3.1 Material homogêneo equivalente	61
4.3.2 Deslocamentos obtidos com o emprego de elementos finitos lineares	62
4.3.3 Deslocamentos obtidos com o emprego de elementos finitos cúbicos	65
4.4 Resultados na laje nervurada bidirecional	69
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	74
5.1 Introdução	74
5.2 Material homogêneo equivalente: Seção Te x Seção retangular equivalente	74
5.3 Material homogêneo equivalente: Seção A1x Seção A2	76
5.4 Análise de deslocamentos em lajes nervuradas unidirecionais	78

5.4.1 Elementos finitos Poutre: resultados numéricos x resultados experimentais	78
5.4.2 Elementos finitos Cu20: resultados numéricos x resultados experimentais	82
5.4.3 Elementos finitos Cu20: simulação A1 x simulação A2	84
5.4.4 Comparação entre os modelos com elementos finitos Cu20 e Poutre	85
5.5 Análise de deslocamentos em lajes nervuradas bidirecionais..	87
5.5.1 Análise de deslocamentos corrigidos no ponto de monitoramento D2.....	88
5.5.2 Análise de deslocamentos corrigidos no ponto de monitoramento D6.....	89
5.5.3 Análise de deslocamentos corrigidos no ponto de monitoramento D8.....	90
5.5.4 Análise de deslocamentos corrigidos no ponto de monitoramento D11	91
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	93
6.1 Conclusões	93
6.2 Sugestões para trabalhos futuros	95
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
8 ANEXO: Fluxograma adaptado para seção Te	103

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Deslocamento da laje pré-moldada com vigotas treliçadas	33
TABELA 2 – Deslocamentos verticais nos pontos D2, D6, D8 e D11....	35
TABELA 3 – Deslocamento nos pontos 1 e 2 da estrutura.....	64
TABELA 4 – Flechas nos pontos 1 e 2 da estrutura tridimensional	68
TABELA 5 – Deslocamentos verticais nos pontos D2, D6, D8 e D11....	73

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Características da laje pré-moldada do tipo treliçada.....	31
QUADRO 2 – Entrada de dados da seção Te	39
QUADRO 3 – Arames galvanizados utilizados na armação	50
QUADRO 4 – Configurações das seções na direção x.....	51
QUADRO 5 – Configurações das seções na direção y.....	51

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Experimento de Mailart em 1908 (Fürst & Marti, 1997)	8
FIGURA 2 – Laje nervurada (Souza & Cunha, 1998)	11
FIGURA 3 – Modelos de lajes nervuradas (Andrade, 1983)	12
FIGURA 4 – Tipos de lajes cogumelo (Souza e Cunha, 1998)	13
FIGURA 5 – Laje nervurada cogumelo (Vizotto, 2002)	13
FIGURA 6 – Delimitação dos pórticos nas duas direções (Souza e Cunha, 1998)	18
FIGURA 7 – Distribuição dos momentos positivos e negativos nas faixas do vão e do apoio de acordo com a NBR 6118 (Ramella, 1981)	19
FIGURA 8 - Rotina para definição de um modelo de cálculo para utilização com o sistema Castem 2000 (Bohar & Millard, 1992)	24
FIGURA 9 – Área sujeita ao puncionamento (NBR 6118, 2003)	27
FIGURA 10 – Cones de ruptura obtidos em ensaios de puncionamento (Menétry, 2001)	28
FIGURA 11 – Seção transversal da vigota treliçada	32
FIGURA 12 – Laje pré-moldada treliçada com escoramento e formas..	32
FIGURA 13 – Pontos de monitoramento dos deslocamentos	33
FIGURA 14 – Seção transversal do protótipo, em escala reduzida, de Selistre (2000)	34
FIGURA 15 – Geometria do protótipo, em escala reduzida, de Selistre (2000)	36
FIGURA 16 – Vista inferior da laje com o posicionamento dos deflectômetros (D) e clinômetros (C)	37
FIGURA 17 – Condicional adicionado ao fluxograma	39
FIGURA 18 – Seção transversal Te da laje nervurada	41
FIGURA 19 – Seção transversal retangular equivalente	41
FIGURA 20 – Diagrama tensão-deformação estimado para o concreto, conforme NBR 6118 (2003)	43

FIGURA 21 - Diagrama tensão-deformação estimado para o aço CA-60B, conforme NBR 6118 (2003)	43
FIGURA 22- Diagrama tensão-deformação do concreto empregado na laje pré-moldada treliçada	44
FIGURA 23 - Diagrama tensão-deformação do aço CA-60B ensaiado por Silva F°	45
FIGURA 24 – Viga com elementos de barra e carregamento uniformemente distribuído	47
FIGURA 25 – Seção transversal discretizada.....	48
FIGURA 26 – Viga Te tridimensional com carregamento uniformemente distribuído	49
FIGURA 27 – Armação positiva paralela à menor dimensão do protótipo (direção y)	52
FIGURA 28 – Armação positiva paralela à maior dimensão do protótipo (direção x).....	53
FIGURA 29 – Armação negativa sobre os pilares centrais, paralela à menor dimensão do protótipo (direção y)	54
FIGURA 30 - Armação negativa sobre os pilares centrais, paralela à maior dimensão do protótipo (direção x)	54
FIGURA 31 – Seções separadas em faixas na direção x	55
FIGURA 32 – Seções separadas em faixas na direção y	56
FIGURA 33 – Grelha em elementos finitos separados em faixas	57
FIGURA 34 – Grelha com carregamento aplicado.....	58
FIGURA 35 – Diagrama tensão-deformação para seção Te	60
FIGURA 36 – Diagrama tensão-deformação para seção retangular	60
FIGURA 37 - Diagrama tensão-deformação para seção A1	61
FIGURA 38 - Diagrama tensão-deformação para seção A2	62
FIGURA 39 - Diagrama tensão-deformação do material homogêneo equivalente corrigido	63
FIGURA 40 - Diagrama carga-deslocamento na posição 2, para configuração A1	63

FIGURA 41 – Diagrama carga-deslocamento na posição 2, para configuração A2.....	65
FIGURA 42 – Deformada da estrutura tridimensional.....	66
FIGURA 43 – Espectro de tensão com 50% da carga aplicada	66
FIGURA 44 – Espectro de tensão com 100% da carga aplicada	66
FIGURA 45 – Diagrama carga-deslocamento para o ponto 2 da estrutura tridimensional, com a configuração A1	67
FIGURA 46 -Diagrama carga-deslocamento para o ponto 2 da estrutura tridimensional, com a configuração A2.....	68
FIGURA 47 – Diagrama tensão-deformação da faixa 4, na direção x ..	69
FIGURA 48 - Diagrama tensão-deformação da faixa 4, na direção y	70
FIGURA 49 – Deformada da estrutura de Selistre.....	70
FIGURA 50 – Vista inferior da laje com o posicionamento dos deflectômetros (D) e clinômetros (C).....	71
FIGURA 51 – Gráfico carga-deslocamento para a posição D6	72
FIGURA 52 – Gráfico carga-deslocamento para a posição D8	72
FIGURA 53 – Diagrama tensão-deformação para seção Te e seção retangular equivalente	75
FIGURA 54 – Diagrama tensão-deformação das seções A1 e A2	77
FIGURA 55 – Diagrama carga-deslocamento para lajes A1, A2 e resultado experimental no ponto 2	78
FIGURA 56 – Diagrama carga-deformação corrigido para o ponto 2	80
FIGURA 57 – Diagrama carga-deformação corrigido para o ponto 1	81
FIGURA 58 – Diagrama carga-deformação para o ponto 2, com o emprego do elemento finito Cu20.....	82
FIGURA 59 – Diagrama carga-deformação para o ponto 1, com o emprego do elemento finito Cu20.....	83
FIGURA 60 – Comparação das flechas obtidas com materiais de características diferentes.....	84
FIGURA 61 – Diagrama carga-deslocamento, comparando o emprego de elementos finitos diferentes	86

FIGURA 62 – Diagrama carga-deslocamento para o ponto D2.....	88
FIGURA 63 – Diagrama carga-deslocamento para o ponto D6.....	89
FIGURA 64 – Diagrama carga-deslocamento para o ponto D8.....	91
FIGURA 65 – Diagrama carga-deslocamento para o ponto D11.....	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

MEF – Método dos Elementos Finitos

τ_{wd} – tensão tangencial de cálculo

V_d – esforço cortante de cálculo

u – perímetro de controle C' externo ao contorno C e deste distante $d/2$ no plano da laje

τ_{wu} – valor último da tensão tangencial de cálculo

EPS – Poliestireno Expandido

h_{eq} – altura equivalente

I – Momento de inércia

a_1 – largura da seção

b – largura da mesa

b_w – largura da nervura

h – altura da laje

h_f – espessura da capa

σ_c – tensão à compressão no concreto

f_{cm} - resistência média à compressão no concreto

ε_c – deformação específica no concreto

E_{ci} – Módulo de deformação tangente inicial do concreto

f_{ck} – resistência a compressão do concreto característica

f_{ct} – resistência do concreto à tração

A_s – área de seção transversal da armadura longitudinal de tração

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria

CÁLCULO DE DESLOCAMENTOS EM LAJES NERVURADAS

Autor: Gustavo da Costa Borowski

Orientador: Eduardo Rizzatti

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 25 de Fevereiro de 2005.

Este trabalho tem como objetivo principal contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia capaz de determinar através de simulações numéricas os deslocamentos verticais em lajes nervuradas, submetidas a carregamentos uniformemente distribuídos. Foi analisada uma laje nervurada unidirecional e outra bidirecional, aplicando-se o método do material homogêneo equivalente para a determinação do comportamento da seção transversal da nervura. Os materiais foram caracterizados a partir das recomendações da NBR 6118 e também pelos ensaios realizados pelos autores das lajes de referência, que servirão para a validação deste trabalho. Com o emprego de elementos finitos de barra e isoparamétricos com vinte nós, simulou-se a estrutura da laje nervurada unidirecional, obtendo como principal resultado, a flecha no centro do vão. Constatou-se que o modelo com elementos finitos cúbicos de vinte nós representou de forma satisfatória o comportamento da estrutura. Para os elementos finitos de barra, foram obtidas curvas com comportamento semelhantes a estrutura real, mas com valores de deslocamentos bem abaixo dos valores experimentais. Numa análise minuciosa, foi verificado que o elemento finito utilizado não considerava todas as características da seção Te. Então, identificou-se um fator de correção, resultante do quociente entre a largura da mesa e a largura da nervura, para ser aplicado aos valores obtidos, gerando um diagrama carga-deslocamento corrigido. Estes últimos resultados obtidos apresentaram valores compatíveis a estrutura real. Para a análise da laje nervurada bidirecional foi feita a opção pela utilização de ensaio realizado em modelo reduzido, aplicando o método com elementos finitos de barra, através de uma grelha. Na determinação do material homogêneo equivalente foram agrupadas as nervuras em faixas, de acordo com a similaridade da forma e da armadura, gerando um comportamento mecânico para cada faixa. Os resultados obtidos também foram corrigidos pelo fator de correção, aproximando-se dos valores experimentais, salvo nos bordos da laje em que a influência dos momentos fletores negativos é maior. Assim, contribuiu-se para o desenvolvimento de uma metodologia capaz de calcular as flechas nas lajes nervuradas.

ABSTRACT

Mastering Dissertation
Post-Graduate Program in Civil Engineering
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brazil

CÁLCULO DE DESLOCAMENTOS EM LAJES NERVURADAS (CALCULATION OF DISPLACEMENTS IN WAFFLES SLABS)

Author: Gustavo da Costa Borowski

Advisor: Eduardo Rizzatti

Date and Local of Defense: Santa Maria, February 25, 2005.

This work has as main objective to contribute for the development of a methodology capable to determine through numerical simulations the displacements in waffles slabs, submitted to uniformly distributed loading. It was analyzed a unidirectional waffle slab and another bidirectional, applying the method of the homogeneous equivalent material for the determination of the behavior of the transversal section of the ribbing. The materials had been characterized from the recommendations of NBR 6118 and also for the analyses carried through the authors of the reference slab, that will serve for the validation of this work. With the job of finite elements of bar and hexaedrals with twenty nodes, it was simulated the structure of the unidirectional waffle slab, getting as main result, the displacements at the center span. One evidenced that the model with hexaedrals finite elements of twenty we represented of satisfactory form the behavior of the structure. For the finite elements of bar, similar curves with behavior the actual structure, but with values of displacements below of the experimental values was obtained. On new analysis, it was verified that the used finite element did not consider all the characteristics of the T section, identified a correction factor, resultant of the ratio of the width table and the ribbing width, to be applied to the obtained values, generating a corrected load-displacement diagram. These last results had presented compatible values with the real structure. For the analysis of the bidirectional waffle slab, the option for the use of assay carried through in reduced model was made, applying the method with bar finite elements, through a grate. In the determination of the equivalent homogeneous material had been grouped the ribbings in bands, in accordance with the similarity of the form and the reinforcement, generating a mechanical behavior for each band. The results also had been corrected by the correction factor, coming close themselves to the experimental values, except in edges of the slab where the influence of the negative moments are bigger. Thus, it was contributed for the development of a methodology capable to calculate the displacements in the waffle slabs.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Estrutura do trabalho

Neste capítulo serão apresentadas as considerações iniciais, uma breve justificativa deste trabalho e os objetivos a serem atingidos.

No segundo capítulo será realizada a revisão bibliográfica, abordando o histórico das lajes de concreto, a definição e classificação deste elemento estrutural e também as recomendações da NBR 6118 (2003). Serão analisados os métodos existentes para a obtenção dos esforços nas lajes nervuradas cogumelos e diversos trabalhos pertinentes ao assunto, inclusive considerações sobre a punção neste tipo de estrutura.

No terceiro capítulo descrevem-se os resultados experimentais que servirão para a validação do trabalho, o método do material homogêneo equivalente e todas as características dos materiais empregados na simulação numérica. São abordados os critérios utilizados na discretização da estrutura para a aplicação do Método dos Elementos Finitos, tanto para as lajes nervuradas unidirecionais quanto para as bidirecionais.

No quarto capítulo serão apresentados os resultados obtidos na simulação numérica, representados através de deslocamentos verticais em pontos estratégicos da estrutura, além de deformadas gráficas e diagramas de isotensões de tensões.

No quinto capítulo é realizada a análise dos resultados, constando da comparação entre os resultados numéricos com os experimentais e entre resultados obtidos com discretização ou materiais diferentes na estrutura.

No sexto capítulo é realizado o fechamento do trabalho, através da conclusão, onde é apresentada a síntese dos principais resultados obtidos e também sugestões para trabalhos futuros.

1.2. Considerações iniciais

A maioria das estruturas empregadas nas edificações brasileiras é em concreto armado, sendo ainda predominante nas edificações corriqueiras à utilização da concepção estrutural clássica, composta de lajes, vigas e pilares.

Esta concepção, empregando lajes maciças ou pré-moldadas convencionais, restringe consideravelmente a flexibilidade do projeto arquitetônico, principalmente pela existência das vigas aparentes no forro e pela necessidade, em geral, de distribuir as maiores cargas oriundas da alvenaria sobre as vigas.

Para aumentar o grau de liberdade arquitetônica, está se difundindo a utilização das estruturas de concreto com lajes planas ou com lajes vencendo grandes vãos, admitindo a distribuição das alvenarias ao longo de toda a área da estrutura.

As lajes planas não apresentam vigas aparentes, podendo ser constituídas apenas de pilares e lajes, ou podem apresentar vigas com altura igual à laje, contidas neste elemento.

Nesta nova concepção estrutural, aumenta-se consideravelmente a espessura das lajes, em relação ao modelo clássico com vigas e lajes, podendo aumentar o volume de concreto empregado nas lajes.

Para compensar este aumento, substituiu-se parte do concreto das lajes por elementos inertes ou por espaços vazios, transformando as lajes planas em nervuradas.

Os processos construtivos para as lajes nervuradas empregavam formas plásticas, com custos elevados, que desestimulavam os construtores a utilizar este tipo de estrutura.

Com o desenvolvimento da industrialização na construção civil, surgiram alternativas para a execução das lajes nervuradas, utilizando-se bases pré-fabricadas para as nervuras, denominadas de vigotas treliçadas.

Estes elementos suportam as armaduras das nervuras fazendo parte da estrutura, servindo também de forma para a concretagem. Quando utilizados em uma única direção, apoiados sobre vigas, constituem as lajes nervuradas unidirecionais.

Quando as vigotas treliçadas forem empregadas em uma direção e na direção perpendicular também forem executadas nervuras, constituem as lajes nervuradas bidirecionais, sendo os principais elementos das estruturas com lajes planas.

A concepção estrutural empregando as lajes nervuradas unidirecionais cobriu a lacuna existente quando se desejava empregar lajes de vigotas pré-fabricadas para vãos maiores, da ordem de cinco a seis metros de comprimento.

Já a concepção estrutural utilizando as lajes nervuradas bidirecionais destaca-se na rapidez e facilidade de execução e no custo atraente quando se desenvolve um projeto arquitetônico que permita vão acima de seis metros.

Para o dimensionamento destas estruturas existem métodos preconizados por normas, auxiliados por programas computacionais, sendo satisfatórios nesta utilização.

Para a verificação do estado limite de serviço da estrutura é necessária a determinação dos deslocamentos verticais nas lajes nervuradas, sendo de extrema importância este procedimento para garantir que a estrutura não apresente patologias oriundas de deformações excessivas.

Os métodos existentes para o cálculo das flechas nas lajes nervuradas são complexos ou imprecisos, impedindo uma verificação rápida da situação de deformação a que a estrutura estará submetida.

Sendo assim, espera-se contribuir para o desenvolvimento de um modelo simples e preciso para a análise dos deslocamentos verticais nas lajes nervuradas, servindo de suporte para os projetistas deste tipo de estrutura.

1.3. Justificativa

No Laboratório de Materiais e Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) foi realizado um ensaio, por Silva F^o (2002), de uma laje nervurada com vigota treliçada, produzindo resultados experimentais para o desenvolvimento de um método numérico para a simulação desta estrutura. Silva F^o (2002) realizou análise numérica deste modelo e sugeriu a continuidade deste trabalho, visando a obtenção de um modelo numérico mais aproximado à realidade da estrutura.

Sarkis (2001) desenvolveu, também na Universidade Federal de Santa Maria, um método simplificado capaz de determinar as flechas em vigas com ou sem a aplicação de reforço estrutural, deixando aberto a idéia de aplicação desta metodologia a outros tipos de elementos estruturais.

Assim, a existência destes dois trabalhos justificou a iniciativa de utilizar o método de Sarkis (2001) para a análise dos deslocamentos verticais nas lajes nervuradas, utilizando-se os resultados de Silva F^o (2002) para validar a aplicação nas lajes unidirecionais.

A imposição da redução nos deslocamentos admissíveis para as estruturas de concreto armado, para se evitar manifestações patológicas

decorrentes de deformações excessivas, a existência de métodos com baixa precisão e a as poucas referências bibliográficas existentes sobre este assunto, também incentivaram este trabalho.

Além disso, a disponibilidade do programa de elementos finitos Castem 2000 para ser utilizado com ferramenta neste trabalho, justificou um trabalho numérico destinado, não só a propor uma solução a um problema estrutural, mas também para favorecer e incentivar a utilização deste instrumento nos cursos de graduação e pós-graduação da Universidade Federal de Santa Maria, servindo de material de apoio.

Sendo assim, espera-se que este trabalho contribua e sirva de ferramenta para os projetistas estruturais, que precisarem de uma análise mais rigorosa dos deslocamentos verticais nas lajes nervuradas e para a continuidade da utilização do método de elementos finitos nesta Universidade.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar e contribuir para o desenvolvimento de um método capaz de calcular o deslocamento vertical em lajes nervuradas unidirecionais e bidirecionais, submetidas a carregamento uniformemente distribuído.

1.4.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos que se pretende atingir com este trabalho são:

- Adaptação do fluxograma de Sarkis (2001) para a aplicação em seções transversais com forma em Te;
- Aplicação do princípio do material homogêneo equivalente na determinação de flechas em lajes nervuradas;
- Análise do elemento finito “Poutre”, do programa Castem 2000, para a simulação de estruturas com seções Te;
- Comparação no desempenho das lajes com materiais de comportamentos mecânicos diferentes;
- Verificação de deslocamentos verticais em lajes nervuradas cogumelos com mais de um pano.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Lajes de concreto armado: histórico

A descoberta do concreto como material de construção foi através dos romanos no ano de 27 a.C. e sua utilização perdurou até a queda do Império Romano do Ocidente em 1453. A partir da metade do século XIX, retornou a ser utilizado e teve o emprego em grande escala a partir da descoberta do cimento portland, em 1824 (Cassiminho, 1999).

Figueiredo F^o *et al.* (1996, p. 830) afirma que “durante séculos as construções foram executadas em “pedra” e madeira, onde os assoalhos recebiam as cargas que eram levadas às vigas transversais, destas às vigas mestras e daí aos pilares”.

Na França, em 1861, um jardineiro chamado Monier associou arames à argamassa de cimento e areia para a confecção de vasos, descobrindo o concreto armado (Cassiminho, 1999).

Então, as estruturas passaram a ser de concreto armado, mantendo o mesmo princípio já utilizado, ou seja, estruturas com lajes, vigas e pilares (Figueiredo F^o *et al.*, 1996).

No Brasil, os primeiros edifícios em concreto armado seguiam o arranjo tradicional, com lajes, vigas e pilares, como por exemplo o edifício projetado por Emílio Baumgart em 1931 (Merce & Oliveira, 2001).

A mudança desta concepção estrutural se deu com o pioneirismo de C. A. P. Turner, que em 1906 construiu o Bovey Building em Mineápolis utilizando um sistema patenteado de lajes apoiadas diretamente sob pilares denominado laje cogumelo. Entre 1906 e 1910, C. A. P. Turner construiu mais de trinta edificações utilizando lajes cogumelo. (Gasparini, 2002).

Em 1910, C. A. P. Turner adaptou seu sistema de lajes lisas para utilização em pontes, projetando quatro pontes. (Gasparini, 2002).

Na Europa, as primeiras construções em lajes cogumelo foram projetadas por Robert Maillart, utilizando um sistema próprio e patenteado que utilizava apenas armaduras ortogonais. Maillart se destacou pela utilização de experimentos para desenvolver a sua metodologia de projeto, como se pode ver na figura 5 (Fürst & Marti, 1997).

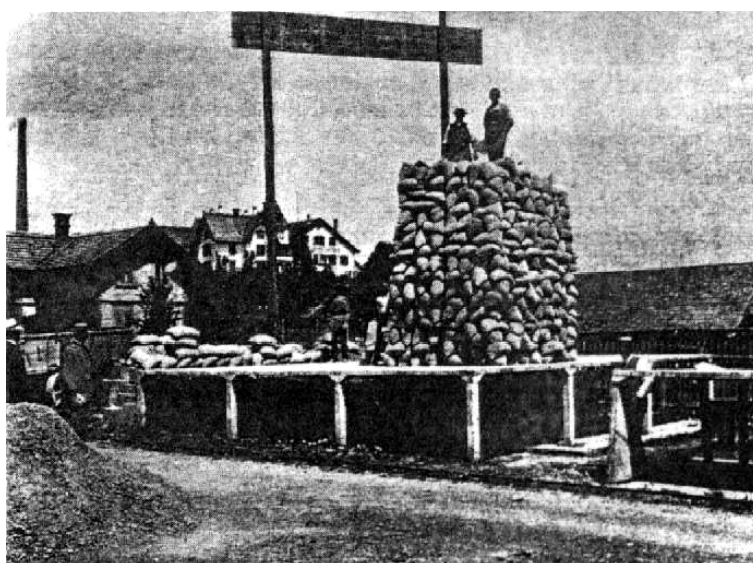


FIGURA 1 – Experimento de Maillart em 1908 (Fürst & Marti, 1997)

As lajes nervuradas somente surgiram na terceira década do século XX, como alternativa as lajes maciças, visando uma redução de custo (Silva F°, 2002).

A partir da década de 70, as alterações arquitetônicas no Brasil vêm impulsionando reformas nos sistemas estruturais, desaparecendo os diafragmas rígidos de alvenaria, fazendo com que as estruturas de concreto armado passassem a depender cada vez mais das lajes (Merce & Oliveira, 2001).

Atualmente, devido à necessidade de uma maior liberdade arquitetônica e de uma aceleração no processo construtivo, as lajes lisas

tornam-se uma alternativa cada vez mais freqüente nos projetos de construção civil (Trautwein *et al.*, 2001).

2.2. Lajes: definição e classificação

Lajes são elementos estruturais bidimensionais planos, na forma de uma placa, onde a espessura é menor que as demais dimensões, sofrendo a ação de carregamentos externos normais a ela.

Duas funções principais lhes são atribuídas (Guerrin):

- Função resistência: as lajes suportam seu peso próprio e as sobrecargas acidentais;
- Função isolamento: elas isolam térmica e acusticamente os diferentes andares.

As lajes podem ser classificadas em dois grandes grupos: as lajes moldadas in loco e as lajes pré-moldadas, podendo a pré-fabricação ser total ou parcial. Também podem ser classificadas quanto à forma, quanto a sua natureza, quanto ao tipo de apoio ou quanto ao tipo de armação.

Segundo Souza & Cunha (1998) as lajes podem ser classificadas quanto à natureza da seguinte forma:

- Lajes maciças: lajes de concreto armado ou protendido constituídas de uma placa maciça.
- Lajes nervuradas: são as lajes em que a zona de tração é constituída de nervuras, onde são dispostas as armaduras, e de uma mesa comprimida. Entre as nervuras, pode-se ou não inserir um material inerte, sem função estrutural.
- Lajes mistas: são lajes nervuradas com material cerâmico preenchendo o espaço entre as nervuras, participando na

resistência mecânica da laje, contribuindo na região comprimida da peça sujeita a flexão.

- Lajes em grelhas: são lajes nervuradas em que o espaçamento entre as nervuras é superior a um metro, sendo calculadas as nervuras como uma grelha de vigas e a mesa como uma laje independente.
- Lajes duplas: podem ser consideradas como um caso particular de lajes nervuradas, onde as nervuras ficam situadas entre dois painéis de lajes.

Quanto ao tipo de apoio, as lajes podem ser (Souza & Cunha, 1998):

- Apoiadas sobre alvenaria ou sobre vigas.
- Apoiadas sobre o solo.
- Apoiadas sobre pilares: são estruturas apoiadas sobre apoios discretos, conhecidas como lajes cogumelo, lajes lisas ou lajes planas.

Os elementos de estudo deste trabalho são as lajes nervuradas apoiadas diretamente sobre pilares, ou seja, lajes nervuradas cogumelos.

2.3. Lajes nervuradas cogumelo

Segundo a NBR6118 (1978) as lajes nervuradas são elementos planos horizontais cuja zona de tração é constituída por nervuras entre as quais podem ser postos materiais inertes, de modo a tornar plana a superfície externa.

Lajes nervuradas também podem ser definidas como elementos constituídos por uma série de vigas T, nas quais a distância entre

nervuras w é inferior ou, no máximo, igual a 100 cm e a sua espessura é no mínimo igual a $w/15$ ou 4 cm (LEONHARDT & MÖNNIG, 1977).

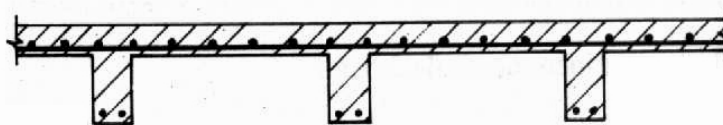


FIGURA 2 – Laje nervurada (Souza & Cunha, 1998)

A concepção das lajes nervuradas, segundo Selistre (2000), ocorreu em virtude da baixa resistência mecânica à tração do concreto, que na região tracionada somente tem a função de proteger a armadura e de ligá-la a zona comprimida. Desta forma, retira-se todo o excesso de concreto posicionando as armaduras em nervuras.

De acordo com Andrade (1983) a redução do concreto através do espaço vazado entre as nervuras ou a sua substituição por materiais mais leves, como blocos cerâmicos ou blocos de poliestireno expandido, reduz o consumo de concreto e o peso próprio da laje sem prejuízo da altura da seção resistente e conseqüentemente da rigidez.

Andrade (1983) também apresenta alguns tipos de lajes nervuradas, destacando o posicionamento da mesa na face inferior (Figura 3). Isto se faz necessário em balanços ou quando da continuidade entre os painéis de lajes, nas zonas de momento fletor negativo.

Atualmente, devido à dificuldade de execução das nervuras invertidas nas zonas de momento fletor negativo, costuma-se manter estas regiões totalmente preenchidas de concreto, como regiões de lajes maciças.

As principais vantagens das lajes nervuradas são (Albuquerque & Pinheiro, 1998):

- Utilização de poucos painéis de lajes para cobrir um pavimento devido a sua grande autonomia, pois atinge facilmente painéis de 80 m²;

- Facilidade de execução das formas;
- Reduzida interferência na arquitetura pelo reduzido número de vigas;

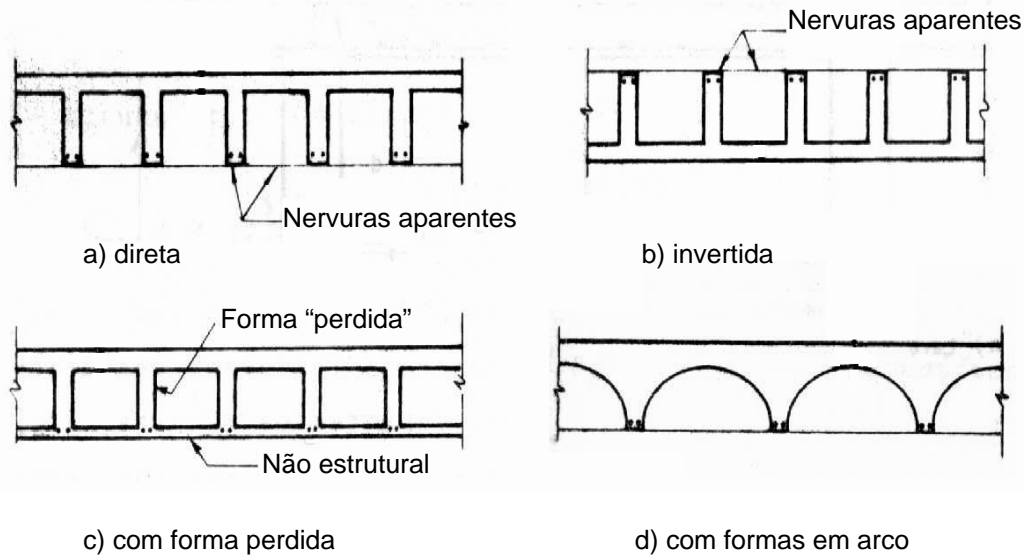


FIGURA 3 – Modelos de lajes nervuradas (Andrade, 1983)

Dependendo da existência ou não do material de enchimento e da sua natureza, as lajes nervuradas também podem apresentar isolamento térmico superiores ao concreto (Souza & Cunha, 1998).

As lajes cogumelo, estruturas laminares apoiadas diretamente sob os pilares, podem apresentar uma limitação de resistência devido a punção em torno dos pilares, devido a grande concentração de tensões decorrentes de cargas concentradas ou de reações de apoio, levando a ruptura da estrutura antes a punção do que a flexão. Para evitar este problema, aumenta-se a espessura da laje ou projetam-se capitéis nas zonas de puncionamento (Trautwein *et al.*, 2001). Então, pode-se classificar as lajes cogumelos em dois grandes grupos: com capitel (Figura 4.a) ou sem capitel (Figura 4.b).

Segundo Albuquerque & Pinheiro (1998) a tendência dos projetos estruturais é a utilização de lajes cogumelo sem capitéis, reduzindo o

volume total de concreto associando as lajes nervuradas à estrutura, ou seja, utilizando as lajes nervuradas cogumelo (Figura 5).

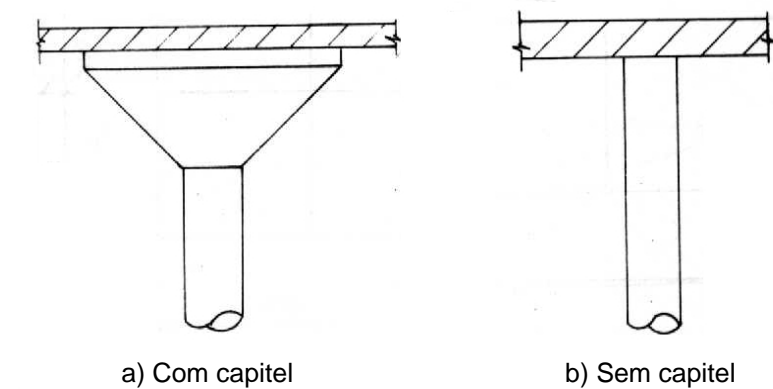


FIGURA 4 – Tipos de lajes cogumelo (Souza & Cunha, 1998)

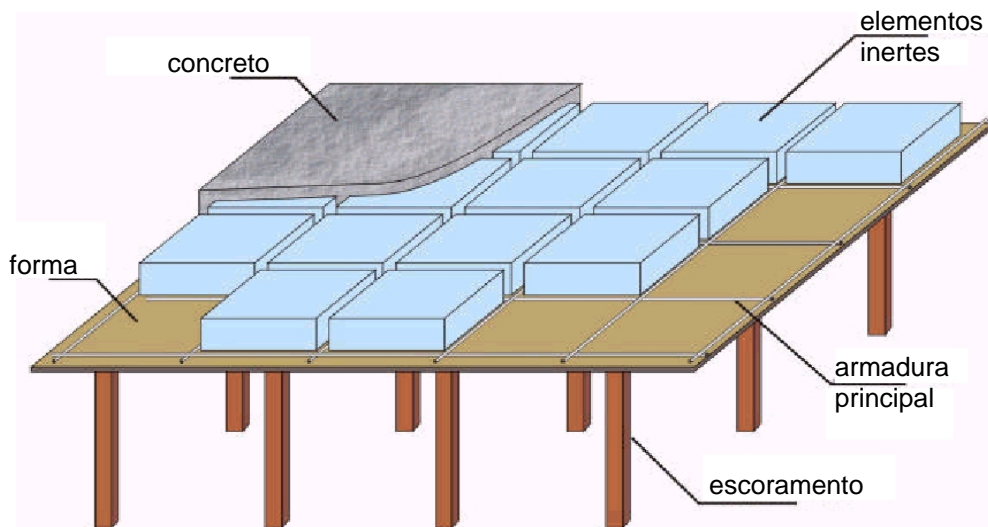


FIGURA 5 – Laje nervurada cogumelo (Vizotto, 2002)

Nestas lajes, para resistir à punção e aos momentos fletores negativos, executa-se as regiões circundantes aos pilares de forma maciça, funcionando como um capitel embutido no interior do elemento (Selistre, 2000).

As principais vantagens das lajes nervuradas lisas são (Albuquerque & Pinheiro, 1998):

- formas planas e contínuas, somente com recortes nos pilares, facilitando a execução e a sua retirada;
- menor consumo de madeira e menor incidência de mão-de-obra para a confecção das formas;
- facilidade na concretagem e melhor aproveitamento das formas;
- menor tempo de execução;
- maior versatilidade devida à ausência de vigas;
- economia nas instalações, pois ocorre a redução do número de curvas e elimina a perfuração em vigas.

Embora seja possível executar uma laje totalmente lisa, Souza & Cunha (1998) salientam que a inexistência de vigas nas bordas externas do pavimento provoca uma situação estrutural desfavorável. Com este mesmo pensamento, Albuquerque & Pinheiro (1998) apresentam as vantagens da utilização destas vigas:

- não prejudicam a arquitetura;
- formam pórticos para resistir a esforços laterais;
- impedem deformações excessivas nos bordos;
- contribuem para a formação de um diafragma rígido em todo o pavimento;
- eliminam a punção nos pilares externos.

Quanto ao dimensionamento das lajes nervuradas, Andrade (1983) sugere o dimensionamento das nervuras como vigas de seção T aplicando os critérios da NBR 6118 (1978), considerando a distância entre os eixos das nervuras como a dimensão da mesa.

Nas regiões de momento fletor negativo, se utilizadas regiões maciças, o dimensionamento deve ser feito como se procede para as lajes convencionais.

2.4. NBR 6118 (2003): Projeto de estruturas de concreto armado

A NBR 6118 (2003) estabelece para as lajes nervuradas as dimensões mínimas da espessura da mesa como sendo maior ou igual a um quinze avos da distância entre nervuras e não menor que 3 cm, quando não houver tubulações horizontais embutidas. Se necessário a inserção de tubulações embutidas, serão de diâmetro máximo de 12,5 mm e o valor mínimo absoluto para a espessura da mesa será de 4 cm. Para as nervuras, a NBR 6118 (2003) impõe a dimensão mínima de 5 cm.

Para o projeto das lajes nervuradas, esta norma estabelece três situações distintas:

1ª) Quando o espaçamento entre eixo das nervuras for menor ou igual a 60 cm, a laje nervurada poderá ser calculada como elemento de placa, dispensando a verificação da flexão da mesa e do cisalhamento da nervura;

2ª) Quando o espaçamento entre eixos das nervuras estiver entre 60 e 110 cm, necessita-se a verificação da flexão da mesa e do cisalhamento das nervuras, salvo quando o espaçamento entre eixos das nervuras for menor que 90 cm e a espessura média das nervuras for maior que 12 cm, quando é permitido a consideração como placa;

3ª) Quando o espaçamento entre eixos for maior que 110 cm, a mesa deverá ser projetada como laje maciça apoiada em uma grelha de vigas, respeitando os limites mínimos geométricos.

Para as lajes cogumelos, esta norma não impõe disposições geométricas independentes, fixando os limites mínimos de espessura aos da laje maciça, ou seja, 5 cm para lajes de cobertura não em balanço, 7 cm para lajes de piso e em balanços, 10 cm para lajes que suportem veículos com peso máximo de 30kN ou 12 cm para veículos acima de 30kN e 15 cm para lajes protendidas.

Quanto a determinação dos esforços nas lajes cogumelo, a norma se torna vaga, apenas citando modelos possíveis de se utilizar.

A análise estrutural das lajes lisas e cogumelo deve ser realizada mediante emprego de procedimento numérico adequado, por exemplo, diferenças finitas, elementos finitos e elementos de contorno (NBR6118, 2003, p. 74).

Para os casos em que os pilares estiverem em filas ortogonais e com vãos pouco diferentes, a norma permite o cálculo das lajes cogumelos pelo processo elástico aproximado dos pórticos múltiplos, com a redistribuição dos esforços.

2.5. Métodos para obtenção dos esforços em lajes nervuradas cogumelo

Para o cálculo dos esforços em lajes planas existem diversos métodos, entre os quais se destacam o Método dos Pórticos Equivalentes, recomendado pelas diversas normas internacionais, e o Método dos Elementos Finitos (MEF) pelas suas utilizações nos projetos estruturais.

Também existe um método, pouco conhecido no Brasil, mas muito referenciado no exterior, denominado Método da Largura Efetiva. O método consiste em se determinar larguras efetivas ao longo dos vãos em função da rigidez da laje, representando uma viga equivalente (Grossman, 1997).

Simplificando o método dos pórticos equivalentes, Rocha (1975) propôs um método baseado em vigas contínuas. A indicação para utilização deste método é para lajes sem capitéis, sem grandes cargas,

com vãos pequenos e com a estrutura suficientemente contraventada para ser indeslocável.

A NBR 6118 (2003) também sugere a utilização do método das diferenças finitas e dos elementos de contorno como alternativa para a determinação dos esforços nas lajes cogumelo. No entanto, estes métodos não têm sido utilizados para o projeto deste tipo de laje.

Para a análise das lajes nervuradas existe o Método da Analogia de Grelha, que consiste em discretizar o pavimento em um conjunto de vigas com seção T e analisa-las de forma elástica através da análise matricial ou do método dos elementos finitos.

Com a banalização de programas computacionais para a solução de pórticos e o desenvolvimento do método dos elementos finitos para computadores pessoais, os projetistas estruturais passaram a adotar o método dos pórticos equivalentes, o método dos elementos finitos e a analogia de grelha para o cálculo dos esforços nas lajes nervuradas cogumelo.

2.5.1. Método dos pórticos equivalentes

O método dos pórticos equivalentes ou pórticos múltiplos é um processo elástico simplificado recomendado pelas Normas Brasileiras para o cálculo das lajes cogumelo, quando existirem filas ortogonais de pilares e semelhança entre os vãos.

O método dos pórticos múltiplos consiste em se supor que a estrutura está dividida, em cada uma das direções, em uma série de pórticos múltiplos, constituídos por um conjunto de colunas e de barras horizontais, cujas inércias são iguais às da região da laje limitada pela metade da distância entre duas

linhas de pilares, como se observa na figura 6. Os pórticos múltiplos correspondentes a cada direção são calculados independentemente uns dos outros, com a carga total atuando e de acordo com hipóteses de arranjos de cargas, que levem à obtenção dos esforços mais desfavoráveis para a estrutura. O cálculo destes pórticos levará à obtenção de momentos positivos e negativos nas faixas (Souza & Cunha, 1998, p.233).

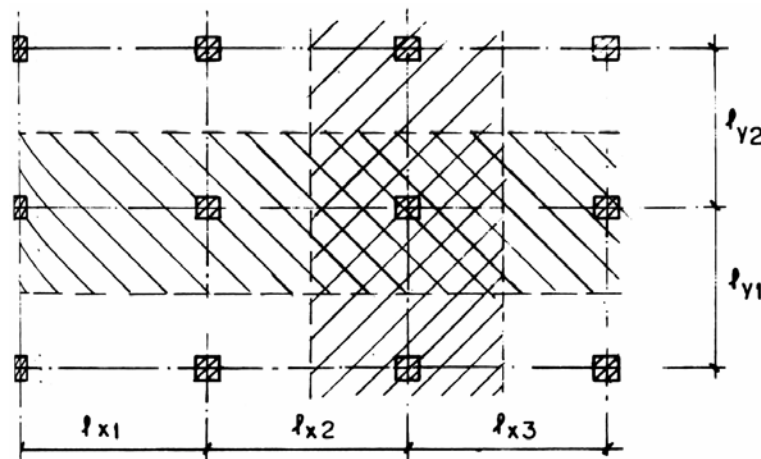


FIGURA 6 – Delimitação dos pórticos nas duas direções (Souza & Cunha, 1998)

No caso das lajes nervuradas cogumelo, deve-se considerar variações na inércia ao longo das vigas equivalente, diferenciando as regiões maciças próximas aos pilares das regiões nervuradas. Geralmente, os nós dos pórticos são considerados como engastes perfeitos (Cabral *et al.*, 1998).

Segundo a NBR 6118 (2003), os momentos obtidos na resolução dos pórticos são distribuídos na superfície da laje em quatro faixas, do seguinte modo (Figura 7):

- 45% dos momentos positivos para as duas faixas internas;
- 27,5% dos momentos positivos para cada uma das faixas externas;
- 25% dos momentos negativos para as duas faixas internas;

- 37,5% dos momentos negativos para cada uma das faixas externas.

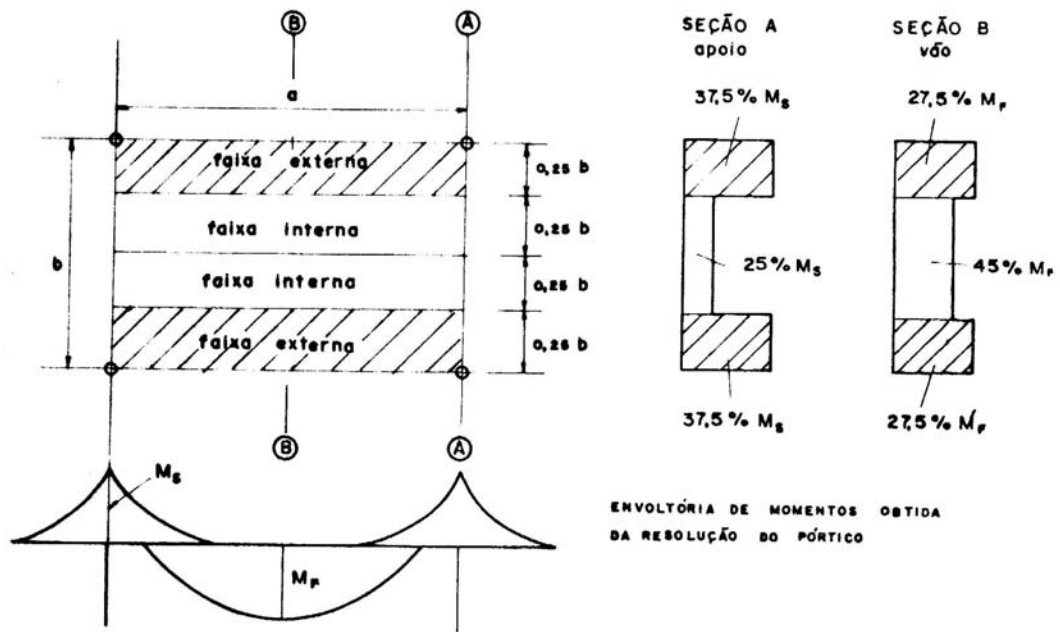


FIGURA 7 – Distribuição dos momentos positivos e negativos nas faixas do vão e do apoio de acordo com a NBR 6118 (Ramella, 1981)

O método dos pórticos equivalentes é muito criticado e estudado devido às restrições impostas (pilares ortogonais e vãos semelhantes) e a distribuição dos momentos em faixa.

Ramella (1981) comparou este método segundo três Normas: ACI 318-77, DIN 1045-72 e NBR 6118 (1978). A principal diferença observada entre as Normas são as faixas de distribuição dos momentos, que é diferente para os três casos. Calculando lajes cogumelo pelas três Normas e comparando com valores obtidos pela Teoria das Placas, Ramella observou que a diferença entre as faixas de distribuição das diferentes normas proporciona uma grande variação nos valores do momento fletor, atingindo valores até 30% maior e 50% menor que os valores obtidos pela Teoria das Placas.

Gilbert *et al.* (2000) avaliaram as indicações das normas BS 8110:1996 e ACI 318-95 quanto ao método dos pórticos equivalentes

comparando com resultados experimentais. A principal constatação na análise dos momentos fletores foi a superestimação dos valores negativos, próximos aos apoios e a subestimação dos momentos positivos.

Gomes (1994) avaliou os momentos fletores obtidos pelo método dos pórticos equivalentes com o MEF e constatou sensíveis diferenças quando não existe a semelhança entre vãos. Para alguns casos, o momento fletor obtido via método dos pórticos múltiplos na linha dos pilares é negativo e para o MEF é positivo, fato este comprovado experimentalmente.

Melo *et al.* (2000) também analisaram o método dos pórticos equivalentes comparando com resultados experimentais. Nas faixas internas, se observaram pequenas concentrações de momentos próximos aos pilares, em torno de 10% a 20%. Nas faixas externas, os momentos calculados estavam em torno de 40% a 60% menores que os experimentais.

Robertson (1997) comparou o método dos pórticos equivalentes com ensaios experimentais verificando a discrepância que ocorre entre os momentos fletores calculados e obtidos no experimento, principalmente quanto à distribuição destes ao longo da laje. Através das fissuras visualizadas no protótipo, pode-se definir as zonas de momento positivo e negativo. Observou-se que a região de momento negativo obtida através do método dos pórticos múltiplos não cobria toda a região fissurada no ensaio.

Cortivo *et al.* (1999) comparou o método dos pórticos equivalentes com o MEF no dimensionamento de um edifício protótipo. A principal constatação foi à diferença entre os momentos obtidos pelos pórticos equivalentes, chegando a valores 37% menores na faixa do pilar do que através do MEF.

2.5.2. Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos (MEF) consiste em dividir o contínuo em um número finito de pequenas regiões denominadas elementos finitos, discretizando o problema em questão em uma rede de elementos finitos. Para o domínio de cada elemento finito, busca-se uma função admissível que aproxime o problema estudado (Assan, 1999).

Conforme Brebbia & Ferrante (1975), a discretização do contínuo e a admissão de uma função aproximadora para cada elemento finito leva a uma solução aproximada. No entanto, refinando a malha, reduzindo os elementos a tamanhos infinitesimais, a solução do problema converge para o valor exato.

O MEF pode ser de quatro tipos, de acordo com o princípio empregado (Brebbia & Ferrante, 1975):

- Modelo compatível, dos deslocamentos ou da rigidez: os deslocamentos são descritos por funções aproximadoras e o princípio da mínima energia potencial é empregado. As incógnitas são os deslocamentos nodais.
- Modelo do equilíbrio, das forças ou da flexibilidade: as funções aproximadoras descrevem as tensões ou os esforços internos e o princípio utilizado é o da mínima energia complementar.
- Modelos híbridos.
- Modelos mistos.

A organização de um processo de cálculo por elementos finitos compreende três fases distintas (Cassiminho, 1999):

- Definição de um modelo matemático: Esta fase compreende a discretização geométrica do domínio em estudo, determinando as propriedades dos materiais envolvidos e as condições de contorno do problema.

- Resolução do problema discretizado: Nesta fase, calcula-se as matrizes de rigidez e de massa, associasse carregamentos externos e as condições de contorno, resolvendo o sistema de equações lineares de equilíbrio. Esta é a fase do processamento propriamente dito.
- Análise e pós-tratamento dos resultados: Nesta fase de pós-processamento, os resultados desejados são extraídos e avaliados, como por exemplo as análises de tensões, deslocamentos ou deformações.

Para este trabalho, a Universidade Federal de Santa Maria dispõem do programa de elementos finitos Castem 2000 desenvolvido pelo DEMA (Département des Etudes Mécaniques e Thermiques) do CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique), baseado no método da rigidez, que serve de importante ferramenta para o desenvolvimento dos trabalhos de pesquisa nesta instituição, por exemplo as simulações de Pereira (1999), Cassiminho (1999), Sarkis (2001) e Silva F^o (2002).

2.5.2.1. Castem 2000

O Castem 2000 é um programa de alto nível, com linguagem de programação operacional própria denominada Gibiane e apresenta as seguintes características (Cassiminho, 1999):

- É um sistema completo, composto de um pré-processador, um processador e um pós-processador;
- É flexível, permitindo a personalização para adapta-lo às exigências do problema em questão;

- Permite o tratamento de problemas estáticos e dinâmicos, tanto em regime linear quanto em domínio não-linear;
- O programa é adimensional, ou seja, permite-se que utilize as unidades dimensionais que forem desejadas, desde que se mantenha à coerência;
- Utiliza uma linguagem de alto nível que facilita a troca de informações com o programa.

De acordo com Bohar & Millard (1992) o modelo de cálculo do Castem 2000 é baseado no fluxograma da figura 8.

2.5.2.2. Método dos elementos finitos aplicado a lajes nervuradas cogumelo

O MEF permite a análise das lajes nervuradas cogumelo de concreto armado através de análise linear, utilizando a Teoria da Elasticidade, ou não-linear, segundo os princípios da Teoria da Plasticidade.

Conforme a forma de discretização, pode-se separar o estudo destas lajes em dois tipos: análise bidimensional ou tridimensional. Na análise bidimensional, a estrutura pode ser discretizada em elementos de placa e barras, enquanto que na análise tridimensional a laje é definida através de seu volume.

A análise bidimensional das lajes, através da discretização da estrutura em elementos de placa é bastante utilizada. Porém, existem alguns inconvenientes e incertezas a considerar (Melo *et al.*, 2000):

- Diferenças de espessura e inércia no plano da laje;
- definição dos apoios;
- excentricidades das nervuras;

- rigidez dos pilares;
- rigidez à torção.

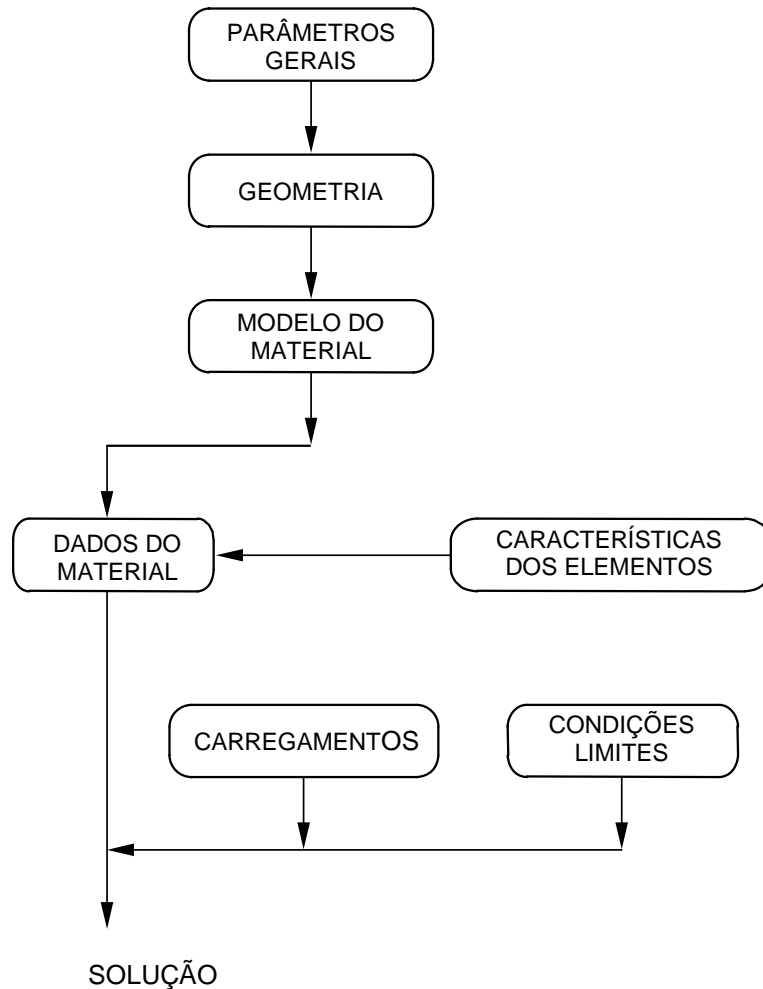


FIGURA 8 – Rotina para definição de um modelo de cálculo para utilização com o sistema Castem 2000 (Bohar & Millard, 1992)

Melo *et al.* (2000) analisaram e compararam algumas destas incógnitas, simulando uma laje lisa e uma nervurada. A principal constatação foi quanto à rigidez dos pilares que deve ser muito superior a da laje e quanto a forma de se considerar os apoios. As regiões dos pilares devem ser discretizadas como placas e não como apoios

puntiformes, pois se o apoio for considerado como um ponto, o momento nesta região tende ser infinito.

Melo *et al.* (2000) utilizaram representações apenas com elementos de placa e com elementos de placa associados a elementos de barra, representando as nervuras. A principal constatação quanto aos momentos fletores é que ocorrem grandes variações de acordo com o modelo utilizado, resultando em alguns casos concentrações de momentos negativos superiores aos experimentais e deficiências nos momentos positivos. Quanto aos deslocamentos, todos os modelos representam bem o comportamento da estrutura deformada, mas não conseguem determinar os valores experimentais, visto que este estudo é apenas em regime elástico.

Dias *et al.* (2002) estudaram as diferentes formas de se considerar a excentricidade das nervuras em relação a capa de concreto, mostrando que na análise elástica linear, a consideração da excentricidade proporciona um resultado mais flexível. No entanto, não atinge a deformabilidade da laje simulada como uma laje maciça equivalente, com espessura constante e inércia equivalente a nervurada.

Dias *et al.* (2001) também compararam resultados experimentais em escala reduzida com três modelos numéricos: analogia da grelha, laje maciça equivalente e associação de elementos de grelha para as nervuras e placas para os capitéis. A principal constatação foi a necessidade da inclusão de comportamento não-linear aos modelos, visando a determinação dos deslocamentos.

Cortivo *et al.* (1999) analisaram o método dos elementos finitos com a utilização de placas para a discretização de lajes cogumelos e compararam com o método dos pórticos equivalentes e com a analogia de grelha. Observou-se que o MEF se comportou com menos conservacionismo que o método dos pórticos equivalentes.

Cabral *et al.* (1998) e Selistre (2000) estudaram modelos reduzidos de lajes nervuradas cogumelo através da realização de experimentos e

mostraram que o MEF é eficiente no dimensionamento destas estruturas, mas se apresenta deficitário na determinação dos deslocamentos, devido a simulação em regime elástico.

Sendo assim, observa-se que o MEF utilizado em regime elástico linear produz resultados satisfatórios na obtenção dos esforços em lajes nervuradas cogumelo, mas deixa a desejar na avaliação das flechas, impondo a necessidade da consideração do comportamento plástico dos materiais. Também se nota a pouca ou quase inexistente análise tridimensional deste tipo de estrutura.

2.6. Punção

Nas lajes cogumelo, um dos possíveis modos de ruptura é por puncionamento, ocorrendo de forma localizada, frágil e brusca, entorno dos pilares ou de carregamentos concentrados (Carvalho & Gomes, 2001).

A importância da análise da ruptura por punção ganha importância devido à possibilidade de ocorrência de colapso progressivo, podendo levar toda a estrutura a ruína (Coelho & Melo, 1999).

Para a verificação da punção nas lajes cogumelos, a NBR 6118 (2003) apresenta um procedimento baseado na verificação da tensão presente no concreto e na necessidade ou não de armadura suplementar para resistir a este esforço.

A verificação da tensão no concreto é feita através da verificação da tensão tangencial uniformemente distribuída na área u.d (Figura 9) que deve ser inferior ao valor último da tensão tangencial de cálculo.

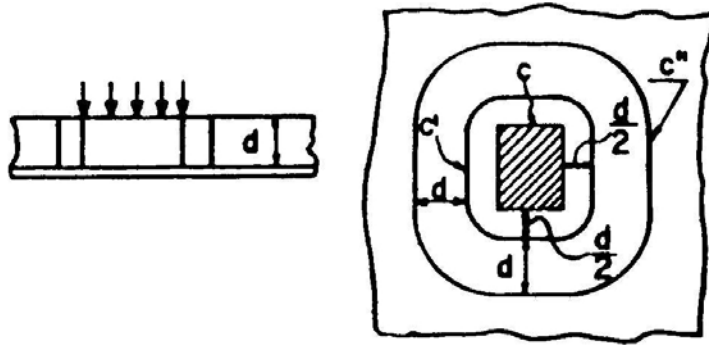


FIGURA 9 – Área sujeita ao puncionamento (NBR 6118, 2003)

$$\tau_{wd} = \frac{V_d}{u.d} \leq \tau_{wu} \quad (1)$$

onde:

τ_{wd} é a tensão tangencial de cálculo;

V_d é o esforço cortante de cálculo;

u é o perímetro de controle C' externo ao contorno C e deste distante $d/2$ no plano da laje;

d é a altura útil da laje;

$u.d$ é a área da seção crítica;

τ_{wu} é o valor último da tensão tangencial de cálculo;

A necessidade de armadura será definida em função da tensão atuante no concreto. Se este valor for superior a metade da tensão última de cálculo, a norma solicita a disposição de uma armadura específica capaz de absorver no mínimo 75% do valor de cálculo da força concentrada aplicada na laje.

Embora o mecanismo de ruptura à punção seja considerado essencialmente cisalhante, como sugere a Norma Brasileira, também ocorre a influência dos fenômenos de torção e flexão junto à ligação laje-pilar, produzindo um fenômeno um tanto quanto complexo (Farhey *et al.*, 1997).

Farhey *et al.* (1997) estudou as conexões laje-pilar desenvolvendo um modelo que idealizasse o mecanismo de ruptura considerando os efeitos simultâneos do corte, da flexão e da torção.

Cordovil (1997) afirma que é possível observar esta superposição de esforços através da visualização da fissuração antes do rompimento de uma laje à punção. Primeiro surgem tensões radiais e somente na ruptura da laje é que ocorre a formação do cone de ruptura (Figura 10), característica principal do efeito de corte.

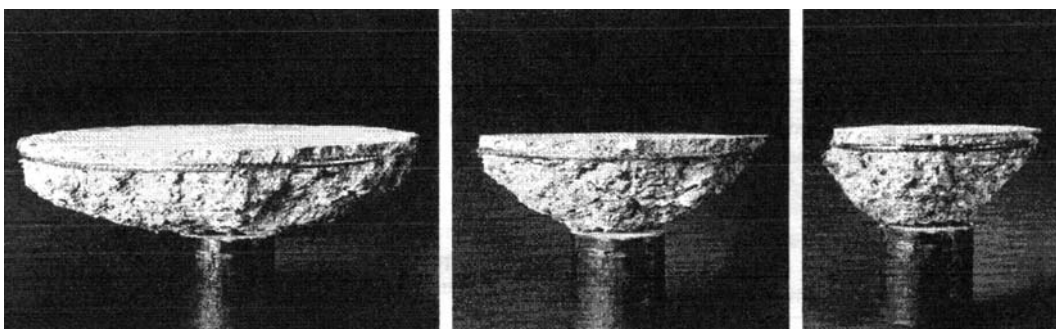


FIGURA 10 – Cones de ruptura obtidos em ensaios de punçionamento (Menétrey, 2001)

Menétrey (1998) estudou a relação entre a ruptura à flexão e à punção, estabelecendo que o aumento do momento na região do pilar com a conseqüente fissuração, reduzem progressivamente a capacidade de carga da estrutura. Desta forma, mostra a importância em se avaliar os momentos fletores que ocorrem nas regiões ao redor dos pilares.

Conhecidos os mecanismos de ruptura, Loo & Guan (1997) desenvolveram um elemento finito específico para análise elástica linear, considerando o efeito de punçionamento, em análise tridimensional.

Utilizando o método dos elementos finitos, em análise não-linear, Hallgren & Bjerke (2001) simularam os efeitos de punção, mostrando ser possível avaliar numericamente o fenômeno.

No Brasil, diversos trabalhos verificando a punção em lajes de concreto armado foram realizados, destacando-se a eficiência da utilização de armaduras para combater os esforços de puncionamento.

Por exemplo, Coelho & Melo (1999) e Trautwein *et al.* (2001) avaliaram o comportamento de lajes cogumelo com estribos inclinados ao puncionamento e mostraram a eficiência destas armaduras no aumento das cargas de ruptura das lajes.

Azevedo & Hanai (1999) mostraram a evolução dos estudos nas ligações laje-pilar utilizando armaduras transversais de pinos e fibras de aço para aumentar a resistência e a ductilidade destas estruturas.

Comparando os códigos e normas internacionais, Albrecht (2001) verificou os critérios de dimensionamento à punção, observando significativas diferenças nos valores da resistência ao puncionamento. No entanto, comparando os dimensionamentos obtidos com valores experimentais se observou que todas as situações estão a favor da segurança.

Carvalho *et al.* (2002) também avaliaram os métodos de cálculo sugeridos por diversas normas, entre elas a NBR 6118 (1978), ACI 318 e CEB-FIP, comparando os resultados teóricos com valores experimentais de diversos autores. A principal contribuição deste trabalho foi a verificação de que os resultados teóricos são bastante conservadores, estando sempre com valores menores que os experimentais.

Todos estes trabalhos mostram que é possível a utilização de lajes cogumelo com significativa segurança, através de verificações cuidadosas nas tensões de corte e com a utilização de armaduras específicas quando necessário.