

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Janine Domingos Vieira

**Estudo teórico-experimental do
comportamento de laje mista com perfis
incorporados de chapa dobrada**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências da Engenharia Civil da PUC-Rio. Área de Concentração: Estruturas.

Orientador: Sebastião A. L. de Andrade

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2003



Janine Domingos Vieira

**Estudo teórico-experimental do
comportamento de lajes mistas com perfis
incorporados de aço**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Sebastião Arthur L. de Andrade

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Pedro Colmar G. da Silva Vellasco

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Eduardo de Miranda Batista

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Giuseppe Barbosa Guimarães

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial

do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 24 de fevereiro de 2003

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Janine Domingos Vieira

Graduou-se em Engenharia Civil na UCG (Universidade Católica de Goiás) em 2000. Concluiu o mestrado em fevereiro de 2003, no Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, com ênfase em estruturas.

Ficha Catalográfica

Vieira, Janine Domingos

Estudo teórico-experimental do comportamento de laje mista com perfis incorporados de chapa dobrada / Janine Domingos Vieira; orientador: Sebastião A. L. de Andrade. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2003.

[18], 104 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Laje mista. 3. Perfil de chapa dobrada. 4. Momentos positivos. 5. Momentos negativos. 6. Momentos resistentes. 7. Séptos. 8. Modos de ruínas. I. Andrade, Sebastião A. L. de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Aos meus pais, Vanda e
Vieira, pelo suporte, carinho
e incentivo ao meu trabalho.

Agradecimentos

Ao meu irmão, Robson e minha cunhada, Tatiana, pelo incentivo e ajuda na realização deste trabalho.

A minha irmã, Janaina, pelo incentivo durante todo este trabalho.

Ao Evandro César, pelo amor e carinho.

Ao amigo, Luciano R. O. Lima, pelo incentivo e colaboração durante todo este trabalho.

Ao professor orientador Sebastião A. L. De Andrade, pela toda orientação durante este trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, principalmente a Ana Roxo, o Cristiano e o Lenílson, pela ajuda.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas e Materiais – PUC-Rio – Euclides, José Nilson, Evandro e Haroldo, pela colaboração na montagem e execução dos ensaios.

Ao ITUC, pelos serviços de confecção dos corpos de prova e realização dos ensaios de caracterização dos materiais.

Aos amigos Ivy Jean, Alexandre Galvão, Walter Menezes, Araken Dumont pela agradável companhia e pelo incentivo.

Aos amigos Rodrigo Amaral, André Muller, Fabiana Freitas, Fernanda Dantas, Pablo Furtado, Allyson Beltrão, Eduardo Pasqueti, pela companhia e pelas longas horas de estudos.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelo auxílio financeiro recebido durante o curso.

Resumo

Vieira, Janine Domingos, Andrade, Sebastião A.L. **Estudo Teórico-Experimental do Comportamento de Laje Mista com Perfis Incorporados de Chapa Dobrada.** Rio de Janeiro, 2003, 104p..Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação apresenta um novo tipo de laje mista com uso de perfil de chapa dobrada incorporada. O perfil substitui as barras de aço, a fôrma e as escoras. O sistema estrutural construído consistiu em uma laje mista com perfil “C” enrijecido preenchido com concreto estrutural. Foram realizados dez testes experimentais em que foram analisados os momentos positivos, os momentos negativos e a influência de séptos. Através da análise teórico-experimental, foi possível perceber a grande influência dos séptos na resistência das lajes mistas testadas.

Palavras chaves

Laje mista, perfil de chapa dobrada, momentos positivos, momentos negativos, momentos resistentes, séptos, modos de ruínas.

Abstract

Vieira, Janine Domingos, Andrade, Sebastião A.L (Advisor). **Theoretical-Experimental Behavior Study of Composite Deck-Slab with Incorporate Formed Steel Shape**. Rio de Janeiro, 2003, 104p..MSc.Dissertation – Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents a new type of composite deck-slab using incorporate formed steel profiles. The steel profile replaces the reinforcement bars, the form and charrý system. The structural system is built by one composite deck-slab with “C” stiffness steel profile, filed with reinforced concrete. It was performed ten tested and it was analyzed the positive moments, the negative moments and the influence of the diaphrag. Analizing the results it was possible to realize the great influence of the diaphragm over the resistance of composite deck slab tested.

Keywords

Composite deck slab, formed steel shape, positives moments, negatives moments, resistences moments, diaphragm.

Sumário

1. Introdução	19
1.1. Motivação	20
1.2. Objetivos	21
1.3. Escopo	22
2. Sistemas de Lajes.....	23
2.1. Considerações Gerais de Lajes Empregadas em Estrutura de Aço ..	23
2.1.1. Laje Maciça.....	23
2.1.2. Lajes Pré-fabricadas ou Pré-moldadas com Nervuras e Blocos	24
2.1.3. Lajes Trelaçadas	25
2.1.4. Lajes Protendidas	27
2.2. Lajes Mistas.....	29
2.2.1. Tipos de Lajes Mistas	31
2.2.1.1. Sistema Misto com Deck-Metálico (<i>Steel Deck</i>)	31
2.2.1.2. Sistema Proposto por Takey.....	34
2.2.2. Sistema de Laje Mista Proposto	35
3. Descrição dos Testes Experimentais.....	36
3.1. Considerações Iniciais	36
3.2. Descrição Geral dos Testes Experimentais	37
3.2.1. Preparação dos Testes.....	39
3.2.1.1. Fôrma de Contenção Lateral	39
3.2.1.2. Armadura de Pele Contra Fissuras de Superfície.....	41
3.2.1.3. Apoios.....	42
3.2.1.4. Concreto	44
3.2.1.5. Instrumentação	45
3.3. Testes Experimentais	47
3.3.1. Testes das Lajes BMP-1 e BMP-2.....	47
3.3.2. Teste da Laje BMN-1	50
3.3.3. Teste da Laje BMP-3	51
3.3.4. Testes das Lajes BMN-2 e BMN-3.....	52

3.3.5. Testes das Lajes BMP-4 e BMP-5	54
3.3.6. Testes das Lajes BMP-6 e BMP-7	55
4. Resultados Experimentais	59
4.1. Propriedades dos Materiais	59
4.1.1. Propriedades Mecânicas	59
4.2. Resultados dos Testes das Lajes Mistas com Perfil Tipo Bandeja	62
4.2.1. Teste da Laje BMP-1	63
4.2.2. Teste da Laje BMP-2	66
4.2.3. Teste da Laje BMN-1	69
4.2.4. Teste da Laje BMP-3	73
4.2.5. Teste da Laje BMN-2	75
4.2.6. Teste da Laje BMN-3	78
4.2.7. Teste da Laje BMP-4	81
4.2.8. Teste da Laje BMP-5	84
4.2.9. Teste da Laje BMP-6	86
4.2.10. Teste da Laje BMP-7	88
5. Análise dos Resultados	93
5.1. Cálculo do Momento de Inércia de uma Seção Mista.....	93
5.1.1. Momento Positivo	93
5.1.2. Momento Negativo	95
5.1.3. Momento Positivo para Três Bandejas	96
5.2. Cálculo da Resistência de Projeto das Lajes Mistas.....	97
5.2.1. Cálculo da Resistência de Projeto para Momento Positivo.....	98
5.2.2. Cálculo da Resistência de Projeto para Momento Negativo	101
5.2.3. Cálculo da Resistência de Projeto para Momento Positivo para Três Bandejas	104
5.3. Cálculo das Flechas das Lajes Mistas	112
6. Considerações Finais	117
6.1. Trabalhos Futuros.....	120
7. Referências Bibliográficas	121

Lista de Figuras

Figura 1.1	- Passarela construída com perfil “C”	21
Figura 1.2	- Escada construída com perfil “C”	21
Figura 2.1	- Detalhe das escoras e fôrmas para uma laje maciça	23
Figura 2.2	- Disposição dos elementos de uma laje pré-fabricada	24
Figura 2.3	- Concretagem de uma laje pré-moldada com blocos cerâmicos	25
Figura 2.4	- Modelo de treliça utilizada nas lajes	26
Figura 2.5	- Laje treliçada com enchimento de cerâmica.....	27
Figura 2.6	- Laje treliçada com enchimento de isopor	27
Figura 2.7	- Execução de uma laje protendida	28
Figura 2.8	- Execução da protensão de uma laje	29
Figura 2.9	- Lajes com fôrma de aço incorporado	30
Figura 2.10	- Geometria e fôrmas de aderência mecânica	32
Figura 2.11	- Modos de ruínas de lajes mistas	33
Figura 2.12	- Modos de ruínas	33
Figura 3.1	- Seção transversal do perfil “C” enrijecido	37
Figura 3.2	- Esquema da aplicação de carga	38
Figura 3.3	- Esquema de aplicação de carga para laje mista com uma bandeja.....	38
Figura 3.4	- Esquema de aplicação de carga para laje mista com três bandejas	39
Figura 3.5	- Modelo da seção transversal da laje mista	40
Figura 3.6	- Modelo da seção transversal da laje mista de três bandejas	40
Figura 3.7	- Forma de contenção lateral da laje mista.....	41
Figura 3.8	- Armadura de pele	42
Figura 3.9	- Apoio de primeiro gênero da laje mista	43
Figura 3.10	- Apoio de segundo gênero da laje mista	43
Figura 3.11	- Apoio de primeiro gênero da viga de distribuição	44
Figura 3.12	- Apoio de segundo gênero da viga de distribuição	44

Figura 3.13 - LVDT de 50 milímetros	46
Figura 3.14 - LVDT de 300 milímetros	47
Figura 3.15 - Relógio analógico	47
Figura 3.16 - Posicionamento dos LVDTs e do relógio na laje mista.....	48
Figura 3.17 - Detalhe do relógio	48
Figura 3.18 - Detalhe do LVDT	49
Figura 3.19 - Esquema do extensômetro no concreto na laje mista BMP-1	49
Figura 3.20 - Esquema do extensômetro no aço na laje mista BMP-2 ...	49
Figura 3.21 - Detalhe dos extensômetros no concreto na laje mista BMP-1	50
Figura 3.22 - Detalhe da laje BMN -1	50
Figura 3.23 - Detalhe da fôrma com séptos nas extremidades e a cada terço do vão	51
Figura 3.24 - Posicionamento dos LVDTs e do relógio na laje mista.....	52
Figura 3.25 - Detalhe das lajes BMN-2 e BMN-3	53
Figura 3.26 - Posicionamento dos LVDTs e do relógio nas lajes BMN-1 e BMN-2	53
Figura 3.27 - Detalhe da fôrma com séptos nas extremidades e em cada terço do vão	54
Figura 3.28 - Posicionamento do relógio e dos LVDTs nas lajes mistas....	55
Figura 3.29 - Detalhe das fôrmas soldadas	55
Figura 3.30 - Detalhe da solda nas fôrmas	56
Figura 3.31 - Detalhe da seção transversal das lajes BMP-6 e BMP-7 ..	56
Figura 3.32 - Detalhe dos espaçadores de vergalhões dobrados.....	57
Figura 3.33 - Detalhe dos vergalhões nos séptos.....	57
Figura 3.34 - Vista superior da laje	58
Figura 3.35 - Posicionamento dos relógios na laje mista.....	58
Figura 4.1 - Ensaio de Tração - Máquina Universal.....	59
Figura 4.2 - Detalhe do clip-gage de medição	60
Figura 4.3 - Posições dos corpos de prova.....	61
Figura 4.4 - Dimensões dos corpos de prova segundo ASTM69.....	61

Figura 4.5 - Gráfico de Carga x Deslocamento, a partir dos valores medidos pelo relógio analógico no centro do vão - BMP-1.....	64
Figura 4.6 - Gráfico de Carga x Deslocamento, a partir dos valores medidos pelos LVDTs, no centro e a cada terço do vão - BMP-1.....	64
Figura 4.7 - Gráfico de Carga x Deformação, a partir de valores medidos pelos extensômetros no centro do vão - BMP-1.....	65
Figura 4.8 - Configuração final da laje após a ruptura do concreto - BMP-1.....	65
Figura 4.9 - Detalhe da extremidade da laje - BMP-1.....	66
Figura 4.10 - Detalhe da flambagem distorsional - BMP-1.....	66
Figura 4.11 - Gráfico de Carga x Deslocamento, a partir dos valores medidos pelo relógio analógico no centro do vão - BMP-2.....	67
Figura 4.12 - Gráfico de Carga x Deslocamento, a partir dos valores medidos pelos LVDTs no centro e em cada terço do vão - BMP-2.....	67
Figura 4.13 - Gráfico de Carga x Deformação, a partir de valores medidos pelos extensômetros no centro do vão - BMP-2.....	68
Figura 4.14 - Detalhe da extremidade da laje - BMP-2.....	68
Figura 4.15 - Detalhe da flambagem distorsional - BMP-2.....	69
Figura 4.16 - Gráfico de Carga x Deslocamento, a partir de valores medidos pelo relógio analógico no centro do vão - BMN-1.....	70
Figura 4.17 - Gráfico de Carga x Deslocamento, a partir de valores medidos pelos LVDTs no centro e nos terços do vão - BMN-1.....	70
Figura 4.18 - Gráfico de Carga x Deformações, a partir de valores medidos pelos extensômetros no centro do vão - BMN-1.....	71
Figura 4.19 - Detalhes das fissuras - BMN-1.....	71

Figura 4.20 - Detalhe da ruptura dos extensômetros - BMN-1	72
Figura 4.21 - Vista da flecha da laje BMN-1	72
Figura 4.22 - Gráfico de Carga × Deslocamento, a partir de valores medidos pelo relógio analógico no centro do vão - BMP-3.....	73
Figura 4.23 - Gráfico de Carga × Deslocamento, a partir de valores medidos pelos LVDTs no centro e em cada terço do vão - BMP-3.....	74
Figura 4.24 - Detalhe da ruptura do concreto - BMP-3	74
Figura 4.25 - Detalhe da flambagem distorsional - BMP-3	75
Figura 4.26 - Vista da flecha da laje - BMP-3	75
Figura 4.27 - Gráfico de Carga × Deslocamento, a partir de valores medidos pelo relógio analógico no centro do vão - BMN-2	76
Figura 4.28 - Gráfico de Carga × Deslocamento, a partir de valores medidos pelos LVDTs no centro e em cada terço do vão - BMN-2	76
Figura 4.29 - Detalhe das fissuras da laje - BMN-2	77
Figura 4.30 - Foto mostrando a ausência de deslizamento do concreto - BMN-2	77
Figura 4.31 - Vista da flecha da laje - BMN-2	78
Figura 4.32 - Gráfico de Carga × Deslocamento, a partir de valores medidos pelo relógio analógico no centro do vão - BMN-3	79
Figura 4.33 - Gráfico de Carga × Deslocamento, a partir de valores medidos pelos LVDTs no centro e em cada terço do vão - BMN-3	79
Figura 4.34 - Detalhe da ruptura do concreto - BMN-3.....	80
Figura 4.35 - Foto mostrando a ausência de deslizamento do concreto - BMN-3	80
Figura 4.36 - Detalhe da flambagem distorsional da fôrma da laje - BMN-3	81

Figura 4.37 - Gráfico de Carga × Deslocamento, a partir de valores medidos pelo relógio analógico no centro do vão - BMP-4.....	82
Figura 4.38 - Gráfico de Carga × Deslocamento, a partir de valores medidos pelos LVDTs no centro e a cada terço do vão - BMP-4	82
Figura 4.39 - Foto da ruptura do concreto -BMP-4	83
Figura 4.40 - Detalhe da flambagem distorsional da aba da fôrma - BMP-4.....	83
Figura 4.41 - Vista da flecha da laje - BMP-4	84
Figura 4.42 - Gráfico de Carga × Deslocamento, a partir de valores medidos pelo relógio analógico no centro do vão - BMP-5.....	84
Figura 4.43 - Gráfico de Carga × Deslocamento, a partir de valores medidos pelos LVDTs no centro e em cada terço do vão - BMP-5.....	85
Figura 4.44 - Foto da ruptura do concreto - BMP-5	85
Figura 4.45 - Detalhe da flambagem distorsional - BMP-5	86
Figura 4.46 - Gráfico de Carga × Deslocamento, a partir de valores medidos pelo relógio analógico no centro e em cada terço do vão - BMP-6.....	87
Figura 4.47 - Foto 1 da ruptura do concreto - BMP-6	87
Figura 4.48 - Foto 2 da ruptura do concreto - BMP-6	88
Figura 4.49 - Foto 3 da ruptura do concreto - BMP-6	88
Figura 4.50 - Gráfico de Carga × Deslocamento, a partir de valores medidos pelo relógio analógico no centro e em cada terço do vão - BMP-7 (pré-teste)	89
Figura 4.51 - Gráfico de Carga × Deslocamento, a partir de valores medidos pelo relógio analógico no centro e em cada terço do vão - BMP-7.....	90
Figura 4.52 - Foto 1 da ruptura do concreto - BMP-7	90
Figura 4.53 - Foto 2 da ruptura do concreto - BMP-7	91
Figura 4.54 - Vista da flecha da laje - BMP-7	91

Figura 5.1 - Seção transversal da laje mista para momento positivo ...	93
Figura 5.2 - Seção transversal da laje mista para momento negativo ..	95
Figura 5.3 - Seção transversal da laje mista composta de três bandejas	96
Figura 5.4 - Seção transversal da laje mista para momento positivo	98
Figura 5.5 - Seção transversal da laje mista para momento negativo	102
Figura 5.6 - Seção transversal da laje mista para momento positivo composta de três bandejas	104
Figura 5.7 - Gráfico de Carga x Deslocamento das lajes mistas BMP-1 - BMP-5	115

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Valores de “a” para diversos tipos de blocos.....	24
Tabela 2.2 - Dimensões dos blocos de concreto	25
Tabela 2.3 - Especificação técnica das treliças	26
Tabela 3.1 - Dimensões das lajes mistas testadas	36
Tabela 3.2 - Resultados dos corpos de prova ensaiados	45
Tabela 3.3 - Características dos instrumentos utilizados.....	46
Tabela 4.1 - Dimensões dos corpos de prova do aço.....	61
Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas do aço utilizado	62
Tabela 4.3 - Características dos testes realizados	63
Tabela 4.4 - Resultados dos testes realizados	92
Tabela 5.1 - Dados da seção mista para momento positivo	94
Tabela 5.2 - Dados da seção mista para momento negativo.....	95

Tabela 5.3 - Dados da seção mista composta de três bandejas	96
Tabela 5.4 - Momentos de inércia calculados.....	97
Tabela 5.5 - Forças abaixo da linha neutra.....	100
Tabela 5.6 - Forças acima da linha neutra.....	100
Tabela 5.7 - Braços de alavanca para forças abaixo da linha neutra	100
Tabela 5.8 - Braços de alavanca para forças acima da linha neutra	101
Tabela 5.9 - Forças abaixo da linha neutra.....	103
Tabela 5.10 - Forças acima da linha neutra.....	103
Tabela 5.11 - Braços de alavanca para forças abaixo da linha neutra ...	103
Tabela 5.12 - Braços de alavanca para forças acima da linha neutra	104
Tabela 5.13 - Forças abaixo da linha neutra.....	105
Tabela 5.14 - Forças acima da linha neutra.....	106
Tabela 5.15 - Braços de alavanca para forças abaixo da linha neutra ...	106
Tabela 5.16 - Braços de alavanca para forças acima da linha neutra	107
Tabela 5.17 - Resultado dos momentos para a primeira situação.....	108
Tabela 5.18 - Resultado dos momentos para a segunda situação	109
Tabela 5.19 - Resultado dos momentos para a terceira situação.....	110
Tabela 5.20 - Comparação entre carga última e carga de serviço	111
Tabela 5.21 - Flechas calculadas para uma carga de serviço de 300 kg/m ²	114
Tabela 5.22 - Flechas calculadas para uma carga de serviço de 1.000 kg/m ²	114
Tabela 5.23 - Flechas medidas para uma carga de 9,5 kN	115

Lista de Símbolos

Letras Romanas Maiúsculas

A	Área da seção transversal
E	Braços de alavanca para forças abaixo da linha neutra
E _a	Módulo de elasticidade do aço

E_c	Módulo de elasticidade do concreto
F	Forças abaixo da linha neutra
F_a	Força aplicada
$F_{aço}$	Força de resistência do aço
F_{ck}	Resistência característica do concreto
$F_{concreto}$	Força de resistência do concreto
F_y	Tensão de escoamento do aço
I_{local}	Momento de inércia local de cada material
I_{sm}	Momento de inércia da seção mista
L	Comprimento do vão
M	Momento
M_r	Momento resistente
$M_{último}$	Momento último
P	Carga
Q	Carga de serviço
Y_c	Centróide da seção mista

Letras Romanas Minúsculas

b	Largura efetiva da laje mista
e	Braços de alavanca acima da linha neutra
f	Forças acima da linha neutra
l	Comprimento do $\frac{vão}{3}$
m	Número de forças acima da linha neutra
n	Número de forças abaixo da linha neutra
n	Fator de transformação do concreto/aço
q	Carga distribuída na laje mista
y	Centróide de cada material

Letras Gregas

ϕ	Coeficiente de resistência do aço
ϕ_c	Coeficiente de resistência do concreto
ρ	Relação entre momento medido e momento previsto

- χ Relação entre carga última e carga de serviço
 Δ Flecha da laje mista

Lista de Abreviaturas

BMP	Bandeja para momento positivo.
BMN	Bandeja para momento negativo.
LN	Linha neutra.
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials.</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transducer.</i>
CSA	<i>Canadian Standards Association.</i>
NBR	Norma Brasileira Registrada.
LEM-DEC	Laboratório de Estruturas e Materiais – Departamento de Engenharia Civil.
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.