

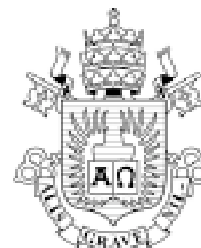
**Allyson José do Nascimento Beltrão**

**Comportamento Estrutural de Lajes-mistas com  
Corrugações na Alma de Perfis de Chapa Dobrada**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Sebastião Arthur Lopes de Andrade  
Co – Orientador: Prof. Pedro Colmar G. da S. Vellasco



**Allyson José do Nascimento Beltrão**

**Comportamento Estrutural de Lajes-mistas com  
Corrugações na Alma de Perfis de Chapa Dobrada**

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

**Prof. Sebastião Arthur Lopes de Andrade**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. Pedro Colmar G. da S. Vellasco**

Co – Orientador

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

**Prof. José Guilherme Santos da Silva**

Universidade do Estado 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, 26 de agosto de 2003

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

### **Allyson José do Nascimento Beltrão**

Graduou-se em Engenharia Civil na UNAMA (Universidade da Amazônia) em 2000. Na UNAMA, desenvolveu projeto de Iniciação Científica na área de Geotecnia ambiental. Na PUC-Rio desenvolveu seu trabalho de pesquisa com ênfase em Análise Experimental de Estruturas.

#### Ficha Catalográfica

Beltrão, Allyson José do Nascimento

Comportamento estrutural de lajes-mistas com corrugações na alma de perfis de chapa dobrada / Allyson José do Nascimento Beltrão; orientador: Sebastião Arthur Lopes de Andrade; co-orientador: Pedro Colmar G. da S. Vellasco. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2003.

[21], 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. Lajes mistas. 3. Perfil de chapa dobrada. 4. Corrugações. I. Andrade, Sebastião Arthur Lopes de. II. Vellasco, Pedro Colmar G. da S. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Aos meus pais Ana Lúcia e Arminio, pelo carinho, atenção, e incentivo ao meu trabalho.

## **Agradecimentos**

Ao meu irmão, Arminio Neto, pelo incentivo durante este trabalho.

A Allyne e Conceição pelo amor e carinho.

Ao meu tio Paulo, pelo apoio e incentivo.

Aos amigos Emanuel e Arlene pela colaboração e incentivo durante todo este trabalho.

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

Ao professor co-orientador Pedro Colmar G. da S. Vellasco, pela orientação durante todo este trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, principalmente a Ana Roxo, pelo apoio.

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, principalmente ao Marques, pelos serviços de confecção dos corpos de prova e realização dos ensaios de caracterização dos materiais.

Aos amigos André Muller, Fabiana Freitas, Eduardo Pasqueti, pela companhia, pelas longas horas de estudos e pelo incentivo.

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

A todos que contribuíram de alguma forma para que esse trabalho se realizasse.

## Resumo

Beltrão, Allyson José do Nascimento; Andrade, Sebastião Arthur Lopes de; Vellasco, Pedro Colmar G. da S. **Comportamento estrutural de lajes-mistas com corrugações na alma de perfis de chapa dobrada**. Rio de Janeiro, 2003. 125p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho apresenta um estudo de um sistema de laje mista com o uso de perfis metálicos de chapa dobrada com corrugações na alma e chapa de vedação lateral com mossas sequencialmente dispostos lado a lado e preenchidos com concreto armado. A principal motivação para este estudo foi o desenvolvimento de um eficiente sistema de laje de rápida construção. O sistema de laje desenvolvido maximiza o espaço livre útil da construção, eliminando a necessidade de formas e escoras tendo assim como consequência direta a minimização das perdas construtivas.

Este trabalho é iniciado com uma avaliação da forma ideal dos perfis de chapa dobrada de acordo com as suas características estáticas e dinâmicas. Variáveis como peso, altura, espessura, tensão de escoamento, vão máximo, e carga suportada foram estudadas. Além disso foi feito um estudo para confecção das ferramentas de fabricação das corrugações e mossas na alma do perfil e na chapa de vedação lateral de forma eficiente e econômica.

Após definição e otimização da seção do perfil metálico, foi efetuado um estudo experimental composto de uma série de três testes em escala real. O objetivo principal dos testes experimentais foi de comprovação dos resultados teóricos de resistência última da laje mista com perfis corrugados na alma e efetuar uma comparação com o sistema de laje previamente proposto por Takey. Os testes demonstraram a real aderência entre concreto e perfil metálico e sua influência nos estados limites últimos de flexão, cisalhamento e deslizamento.

Ensaio tipo “push-out” também foram executados para estabelecer a carga

ultima de deslizamento na interface aço/concreto. A fase final compreendeu a comparação dos resultados experimentais com as normas de projeto de laje mista e com o trabalho desenvolvido por Takey para validação e comparação de resultados do sistema de laje mista.

## **Palavras-chave**

Lajes mistas, perfil de chapa dobrada, corrugações.

## Abstract

Beltrão, Allyson José do Nascimento; Andrade, Sebastião Arthur Lopes de; Vellasco, Pedro Colmar G. da S. **Structural behaviour of composite slab with corrugations in the cold formed section profiles' web.** Rio de Janeiro, 2003. 125p. MSc. Dissertation – Civil Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents an investigation of a composite slab system made of cold formed section profiles with web corrugations and corrugated steel deck plates spanning between such profiles, both acting compositely with concrete slab cast in place. The main motivation for this work was the development of an efficient slab system associated with easy and fast erection procedures. The proposed slab system also maximises the construction usable space, eliminating the use of temporary propping and, consequently reducing the final construction cost.

This work initiates with an evaluation of the ideal cold-formed steel profile geometry according to its static and dynamical characteristics. Variables like weight, height, thickness, yield stress, and collapse load were considered. Additionally, a study of the more suitable fabrication tools to be used in the process of incorporating the corrugations to the profile webs and deck supporting plates was executed.

With the optimum steel profile in hand, an experimental investigation of three full scale composite slabs, spanning three meters, was conducted. The main objective of these tests was to access the ultimate limit states associated with the proposed composite slab system and compared it to a previously proposed solution, developed by Takey. The tests made possible the evaluation of the concrete versus steel slippage resistance when compare to the other ultimate limit states associated with flexion and shear. The adopted solution, despite the natural chemical bond present in the steel/concrete interface, enhances its performance due to the action of the web profile corrugations.



Push-out tests were also executed to enable the determination of the ultimate slippage load in the steel/concrete interface due to the presence of the proposed corrugations. The final stage of this investigation concerned the comparison of the experimental data to the current composite design standards, and to the previous system, developed by Takey, in order to validate its use.

### **Palavras-chave**

Composite deck slab, cold formed steel shape, experimental analysis.

# Sumário

1	Introdução	22
1.1.	Motivação	22
1.2.	Considerações Gerais	26
1.2.1.	Tipos de Lajes Estruturais	26
1.2.1.1.	Laje Maciça	26
1.2.1.2.	Laje Pré Moldada com Nervuras e Blocos	26
1.2.1.3.	Laje Mista	27
1.2.1.4.	Laje Nervurada	29
1.3.	Sistema de Laje Proposto	30
1.3.1.	Lajes com Fôrma de Aço Incorporado	30
1.4.	Objetivos	31
1.5.	Escopo	32
2	Sistema de Lajes com Forma de Aço Incorporado	34
2.1.	Generalidades	34
2.2.	Considerações Iniciais de Projeto	37
2.3.	Aplicações deste Sistema Construtivo	38
2.4.	Cargas Atuantes na Estrutura	39
2.4.1.	Carga Permanente	39
2.4.2.	Carga Acidental	39
3	Projeto do Perfil	40
3.1.	Introdução	40
3.1.1.	Influência do Trabalho a Frio nas Propriedades Mecânicas do Aço	40
3.1.2.	Flambagem Local e Comportamento Pós-crítico	42
3.1.3.	Método da Largura Efetiva	43
3.1.4.	Resistência à Flexão	45
3.2.	Princípios de Dimensionamento de Perfis de Chapa Dobrada	48
3.2.1.	Perfil de Chapa Dobrada	48

3.2.2. Tração e Compressão Uniforme	51
3.2.3. Dois Lados Enrijecidos	52
3.2.4. Enrijecedores	52
3.2.5. Elementos com um Lado Enrijecido e Outro com Enrijecedor	53
3.2.6. Flexo-compressão	55
3.3. Dimensionamento	58
3.3.1. Determinação da Resistência a Momentos Fletores	59
3.4. Determinação das Cargas após a Construção	61
3.5. Inércia da Seção Mista	62
4 Descrição dos Ensaio Experimentais	64
4.1. Parâmetros do Projeto	64
4.2. Característica Geométricas Finais de Projeto	65
4.2.1. Definição da Chapa de Vedação	68
4.3. Descrição dos Ensaio Experimentais da Laje	71
4.3.1. Preparação do Ensaio para Laje	73
4.3.1.1. Fôrma de Contenção em Chapa de Aço	73
4.3.1.2. Armadura de Pele Contra Fissurações de Superfície	74
4.3.1.3. Apoios	75
4.3.1.4. Concreto	75
4.3.1.5. Corpos de Prova de Concreto	76
4.3.1.6. Ensaio de Tração Simples	76
4.3.1.7. Instrumentação	77
4.3.1.8. Deformação	79
4.3.1.9. Sistema de Aplicação de Carga	80
4.3.2. Ensaio da Laje	81
4.3.2.1. Primeiro Ensaio da Laje	81
4.3.2.2. Segundo Ensaio da Laje	81
4.3.2.3. Terceiro Ensaio da Laje	82
4.4. Descrição dos Ensaio Experimentais Tipo “Push Out”	83
4.4.1. Preparação do Ensaio Tipo “Push Out”	85
4.4.1.1. Fôrma de Contenção	85

4.4.1.2. Concreto	86
4.4.1.3. Corpos de Prova de Concreto	86
4.4.1.4. Instrumentação	87
4.4.1.5. Sistema de Aplicação de Carga	88
4.4.1.6. Ensaio do Tipo “Push Out”	89
5 Resultados Experimentais	91
5.1. Laje Mista com Corrugações na Alma	91
5.1.1. Ensaio com Corrugação de Alma do Perfil Espaçados a cada 50mm	91
5.1.1.1. Primeiro Ensaio	91
5.1.1.2. Segundo Ensaio	97
5.1.2. Ensaio com Corrugações na Alma do Perfil Espaçados a cada 100mm	102
5.1.2.1. Terceiro Ensaio	102
5.2. Ensaio do Tipo “Push Out”	109
5.3. Comparação com os Resultados Obtidos por Takey [1]	113
5.4. Dinâmica (Impacto e Vibrações)	116
5.4.1. Considerações da NBR8800/1986 [8]	117
5.4.2. Obtenção da Frequência Fundamental da Estrutura Segundo a NBR 8800/1986 [8]	119
6 Considerações Finais	122
6.1. Introdução	122
6.2. Conclusões	123
6.3. Sugestões para Trabalhos Futuros	124
7 Referências Bibliográficas	125

## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Disposição dos elementos estruturas de lajes pré - moldadas [6].	27
Figura 1.2 – Fôrma trapezoidal [6].	28
Figura 1.3 – Fôrma reentrante [6].	28
Figura 1.4 – Representação da laje nervurada [9].	29
Figura 1.5 – Sistema com perfil metálico e isopor [1].	31
Figura 2.1 – Alguns tipos de fôrmas de chapa dobradas para laje mista [4].	34
Figura 2.2 – Formato do perfil com mossas e cantos reentrantes.	35
Figura 2.3 – Seções críticas.	36
Figura 3.1 - Aumento da resistência ao escoamento e da resistência à ruptura, num perfil formado a frio por perfiladeira.	40
Figura 3.2 - Aumento da resistência ao escoamento e da resistência à ruptura, num perfil formado a frio por prensa dobradeira.	41
Figura 3.3 - Gráfico tensão versus deformação após conformação a frio [4].	42
Figura 3.4 - Placa esbelta comprimida.	43
Figura 3.5 – Distribuição de tensões ao longo de uma placa sob compressão uniforme antes da carga crítica.	44
Figura 3.6 – Distribuição de tensões ao longo de uma placa sob compressão após ser exercida a carga crítica.	44
Figura 3.7 – Distribuição não-linear de tensões ao longo da largura $b$ da placa original.	45
Figura 3.8 – Nomenclatura das dimensões da seção do perfil metálico.	46
Figura 3.9 – Dimensões da seção do perfil metálico.	47
Figura 3.10 – Largura efetiva [1].	50
Figura 3.11 – Largura efetiva na compressão e tração em elementos não enrijecidos.	51
Figura 3.12 – Largura efetiva na compressão e tração em elementos enrijecidos.	51

Figura 3.13 – Elemento com um lado enrijecido.	53
Figura 3.14 – Alma inclinada sujeita a tração e compressão.	57
Figura 3.15 – Dimensões do perfil metálico.	59
Figura 3.16 – Configuração da seção para calculo da inércia transformada.	63
Figura 4.1 – Configuração perfil metálico e as duas chapas laterais.	64
Figura 4.2 – Peças usadas nos ensaios tipo “Push out”.	65
Figura 4.3 - Sistema de Laje Pré-Moldada utilizando Perfis Metálicos e Isopor [1].	65
Figura 4.4 – Sistema proposto com perfil metálico e chapas laterais.	66
Figura 4.5 – Dimensões do perfil metálico ensaiado.	66
Figura 4.6 – Ferramenta tipo macho e fêmea para execução das mossas.	67
Figura 4.7 – Ferramenta para estampar mossas boleadas.	67
Figura 4.8 – Ensaio carga deslocamento.	68
Figura 4.9 – Gráfico carga deslocamento.	69
Figura 4.10 – Peça metálica corrugada.	70
Figura 4.11 – Ferramenta para estampar corrugações na chapa lateral.	70
Figura 4.12 – Configuração da aplicação de carga.	72
Figura 4.13 – Configuração da aplicação de carga, vista global.	72
Figura 4.14 – Fôrma de contenção lateral temporária.	73
Figura 4.15 – Armadura de pele contra fissuração.	74
Figura 4.16 – Apoio do sistema de laje.	75
Figura 4.17 - Dimensões dos corpos de prova de aço.	77
Figura 4.18 – Configuração global da instrumentação.	78
Figura 4.19 – Localização dos LVTD's e do relógio na extremidade.	79
Figura 4.20 – Localização dos extensômetros.	79
Figura 4.21 – Sistema de aplicação de carga.	80
Figura 4.22 – Dimensões do corpo de prova do tipo “push out”.	83
Figura 4.23 - Configuração do “Push out”.	85
Figura 4.24 – Fôrma e caixa de divisão “push out”.	86
Figura 4.25 – Instrumentação do “push out” – vista da face superior.	88
Figura 4.26 – Posição do Macaco hidráulico no ensaio “push out”.	89

Figura 5.1 – Carga versus deslocamento no meio do vão com corrugações a cada 50mm (LVDT L3).	93
Figura 5.2 – Carga versus deslocamento no meio do vão com corrugações a cada 50mm (LVDT L3).	93
Figura 5.3 – Carga versus deslizamento aço/concreto da laje com corrugações a cada 50mm.	94
Figura 5.4 – Carga versus deslocamento no terço do vão com corrugações a cada 50mm (LVDT's L2 e L4).	95
Figura 5.5 – Carga versus deslocamentos laterais da laje com corrugações a cada 50mm (LVDT's L6 e L7).	95
Figura 5.6 – Carga versus deformações do perfil metálico da laje com corrugações a cada 50mm.	96
Figura 5.7 - Fissuras na laje do primeiro ensaio.	96
Figura 5.8 – Carga versus deslocamento no meio do vão com corrugações a cada 50mm do segundo ensaio ( LVDT L3).	98
Figura 5.9 – Carga versus deslizamento na extremidade da laje do segundo ensaio (LVDT L1).	98
Figura 5.10 – Carga versus deslocamento no terço do vão do segundo ensaio (LVDT's L2 e L4).	99
Figura 5.11 – Carga versus deslocamento lateral do segundo ensaio (LVDT's L6 e L7).	99
Figura 5.12 – Carga versus deformações do perfil metálico no segundo ensaio.	100
Figura 5.13 – Configuração das fissuras do segundo ensaio.	100
Figura 5.14 – Visualização da descolamento do concreto do aço, segundo ensaio.	101
Figura 5.15 – Configuração típica de colapso por deslizamento do concreto/aço, segundo ensaio.	101
Figura 5.16 – Carga versus deslocamento no meio do vão com corrugações a cada 100mm (LVDT L3).	103
Figura 5.17 – Carga versus deslocamento no meio do vão com corrugações a cada 100mm (LVDT L3).	103

Figura 5.18 – Carga versus deslizamento aço/concreto no terceiro ensaio.	104
Figura 5.19 – Carga versus deslocamento a 1/3 do vão, terceiro ensaio (LVDT's L2 e L4).	104
Figura 5.20 – Carga versus deslocamento lateral da laje, terceiro ensaio ( LVDT's L6 e L7).	105
Figura 5.21 – Deformações do perfil metálico do terceiro ensaio.	105
Figura 5.22 – Carga versus deslocamento para as lajes ensaiadas.	107
Figura 5.23 – Carga versus deformação para todos os ensaios.	107
Figura 5.24 – Configuração das fissuras do terceiro ensaio.	108
Figura 5.25 – Descolamento do concreto, terceiro ensaio.	109
Figura 5.26 – Visualização do deslizamento típico na extremidade do vão das lajes mistas.	109
Figura 5.27 – Configuração de colapso do “push out”.	111
Figura 5.28 – Fissura do ensaio tipo “push out”.	112
Figura 5.29 – Visualização do descolamento do concreto do perfil metálico.	112
Figura 5.30 – Comparação real dos ensaios deste trabalho com os do Takey.	113
Figura 5.31 – Comparação com redução de 50% da carga aplicada no trabalho de Takey.	114
Figura 5.32 - Comparação com redução de 19,1% da carga do trabalho Takey.	115
Figura 5.33 - Limites de desconforto causado por vibrações em pisos de edificações residenciais, escolares e comerciais, devido ao caminhar de seres humanos.	117
Figura 5.34 – Frequência por unidade de comprimento variando de 2 a 4,5m.	120



## Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Resultados dos corpos de prova ensaiados para lajes.	76
Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas do aço utilizado.	77
Tabela 4.3 – Resultados dos corpos de prova do “push out”.	87
Tabela 5.1 – Rigidez e carga de colapso para as lajes ensaiadas.	108
Tabela 5.2 – Carga e tensão última do ensaio tipo “push out”.	110
Tabela 5.3 - Rigidez e carga de colapso para todos os ensaios.	116

## Lista de Símbolos

### Letras Romanas Maiúsculas

$A_g$	Área bruta do perfil
$A_{s1}$	Área do aço
$A_t$	Área total
$B$	Comprimento efetivo
$B$	Largura efetiva de um perfil
$C_1$	Tensão de compressão inicial
$C_2$	Tensão de compressão na área comprimida
$D_A$	Somatório dos ângulos de dobra do perfil dividido por 90o
$D_1$	Dimensão da alma inclinada
$D_2$	Dimensão da alma menor
$E, E_s$	Módulo de elasticidade longitudinal do aço
$E_{max}$	Deformação máxima
$F_u$	Tensão limite de ruptura do aço
$F_y$	Tensão limite de escoamento do aço
$F_y'$	Tensão de escoamento (peças sem flambagem local)
$CG$	Centro de gravidade
$I_{xc}$	Inércia efetiva corrigida do lado analisado
$I_a$	Valor limite para a rigidez do enrijecedor
$I_r$	Inércia do enrijecedor
$I_s$	Inércia do enrijecedor
$I_{tr}$	Momento de inércia da seção transformada (concreto transformado em aço)

$L$	Comprimento da peça analisada
$L_c$	Dimensão do comprimento efetivo dos cantos perfil
$L_v$	Comprimento do trecho da laje com cisalhamento máximo
$L_1$	Largura plana do enrijedor descontando os cantos
$L_{f1}$	Largura plana da mesa principal descontando os cantos
$L_{f2}$	Largura plana da mesa menor descontando os cantos
$L_{W1}$	Largura plana da alma maior descontando os cantos
$L_{W2}$	Largura da alma menor descontando os cantos
$L_t$	Comprimento total
$M_{rt}$	Momento resistente positivo do perfil metálico
$P$	Perímetro
$R$	raio de curvatura
$W$	Esbeltez
$W_{lim}$	Esbeltez limite
$W_{lim1}$	Constante limite
$W_{lim2}$	Constante limite
$W^*$	Perímetro da seção transversal

### **Letras Romanas Minúsculas**

$b_e$	Largura efetiva corrigida do lado analisado
$b_1$	Dimensão da mesa maior
$b_1$	Valor de largura efetiva
$b_2$	Dimensão da mesa menor
$b_2$	Valor de largura efetiva
$b_{w \text{ vert.}}$	Largura efetiva da mesa maior

$c$	Posição do centro de gravidade dos cantos
$d$	Distancia do centro de gravidade ao lado analisado até o lado neutro.
$d_1$	Dimensão do enrijecedor
$f$	Tensão de compressão máxima
$f_1$	Tensão de tração
$f_{01}$	Frequência natural da estrutura
$f_{02}$	Segunda frequência natural da estrutura
$f_2$	Tensão de compressão
$f_{\max}$	Tensão de compressão máxima
$g$	Aceleração da gravidade
$h$	Altura do perfil metálico
$k$	Constante que varia caso a caso
$m$	Massa da seção considerada
$n$	Constante
$t$	Espessura da chapa
$y_c$	Altura calculada
$w$	Largura da placa

### **Letras Gregas**

$\varphi$	Constante
$\gamma_a$	Peso específico da água
$\gamma_{alv}$	Peso específico da alvenaria
$\gamma_c$	Peso específico do concreto armado
$\gamma_s$	Peso específico do aço

$\sigma_y$	Tensão de escoamento
$\theta$	Ângulo dado em graus

### **Lista de Abreviaturas**

LN	Linha neutra.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
LVDT	Linear Variable Differential Transducer.
CSA	Canadian Standards Association.
NBR	Norma Brasileira Registrada.
LEM-DEC	Laboratório de Estruturas e Materiais – Departamento de Engenharia Civil.
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.