

**INFLUÊNCIA DAS DEFORMAÇÕES AXIAIS DOS PILARES E DAS
ETAPAS DE CONSTRUÇÃO E CARREGAMENTO NA ANÁLISE
ESTRUTURAL DE EDIFÍCIOS ALTOS COM LAJES LISAS**

Flávio Márcio Mateus

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"INFLUÊNCIA DAS DEFORMAÇÕES AXIAIS DOS PILARES E
DAS ETAPAS DE CONSTRUÇÃO E CARREGAMENTO NA
ANÁLISE ESTRUTURAL DE EDIFÍCIOS ALTOS COM LAJES
LISAS"**

Flávio Márcio Mateus

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Alcebíades de Vasconcellos Filho
DEES - UFMG - (Orientador)

Prof. Dr. Fernando Amorim de Paula
DEES - UFMG

Prof. Dr. Francisco Antônio Romero Gesualdo
UFU

Belo Horizonte, 26 de setembro de 2003

À minha mãe Conceição.
A companheira de todas as jornadas.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Alcebíades de Vasconcellos Filho pela paciência e pelos conhecimentos transmitidos.

A todos os demais professores que direta ou indiretamente deram contribuições que permitiram a elaboração deste trabalho.

À amiga e colega Cristiane Barbosa Costa que sempre me incentivou nos momentos difíceis.

A todos os colegas do DEES e, em especial, aos amigos Ricardo Teixeira, Sirvane Aparecida, Sílvia Santos, Bruno, Édson, Adriana de Oliveira, Cynara Brener e Fernando Queiroz.

Aos funcionários do DEES pela ajuda em todos os momentos.

A todos aqueles que conviveram comigo nos últimos anos.

A Deus.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	x
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
4 ESTRUTURA A SER ANALISADA	14
5 MODELO LAJE-MOL	17
5.1 Descrição.....	17
5.2 Carregamento.....	21
5.3 Análise dos Resultados.....	23
6 MODELO LAJE-SDA	48
6.1 Descrição.....	48
6.2 Carregamento.....	52
6.3 Análise dos Resultados.....	52
7 MODELO LAJE-CDA	70
7.1 Descrição.....	70
7.2 Carregamento.....	73
7.3 Análise dos Resultados.....	73
8 MODELO LAJE-EVOL	99
8.1 Descrição.....	99
8.2 Carregamento.....	105
8.3 Análise dos Resultados.....	105
9 COMPARAÇÕES ENTRE OS MODELOS LAJE-SDA, LAJE-CDA E LAJE-EVOL	132
9.1 Objetivo.....	132
9.2 Momento fletor M_x no centróide do elemento A.....	133

9.3 Momentos fletores M_x e M_y no centróide do elemento B.....	138
9.4 Momentos fletores M_x e M_y no centróide do elemento C.....	143
9.5 Recalques diferenciais nos pilares.....	153
9.6 Reações de apoio das lajes nos pilares.....	163
9.7 Reações verticais de apoio dos pilares na fundação.....	178
10 CONCLUSÕES.....	182
BIBLIOGRAFIA.....	185

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 4.1 - Esquema do andar tipo da estrutura.....	15
FIGURA 4.2 - Corte A-A da estrutura.....	16
FIGURA 5.1 - Modelo LAJE-MOL.....	19
FIGURA 5.2 - Malha dos nós e elementos finitos da laje tipo.....	20
FIGURA 5.3 - Reações de apoio na laje tipo.....	31
FIGURA 5.4 - Gráfico do momento fletor M_x – Nó 6.....	35
FIGURA 5.5 - Gráfico dos momentos fletores M_x e M_y – Nó 111.....	37
FIGURA 5.6 - Gráfico do momento fletor M_x – Nó 116.....	40
FIGURA 5.7 - Gráfico do momento fletor M_y – Nó 116.....	40
FIGURA 5.8 - Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P2.....	43
FIGURA 5.9 - Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P1.....	44
FIGURA 5.10 - Gráfico das reações de apoio no pilar P1.....	46
FIGURA 5.11 - Gráfico das reações de apoio no pilar P2.....	47
FIGURA 5.12 - Gráfico das reações de apoio no pilar P5.....	48
FIGURA 6.1 - Modelo LAJE-SDA	50
FIGURA 6.2 - Malha dos nós e elementos finitos da laje tipo.....	51
FIGURA 6.3 - Gráfico do momento fletor M_x – Elemento A.....	56
FIGURA 6.4 - Gráfico dos momentos fletores M_x e M_y – Elemento B.....	59
FIGURA 6.5 - Gráfico do momento fletor M_x – Elemento C.....	62
FIGURA 6.6 - Gráfico do momento fletor M_y – Elemento C.....	62
FIGURA 6.7 - Gráfico das reações de apoio no pilar P1.....	66
FIGURA 6.8 - Gráfico das reações de apoio no pilar P2.....	66
FIGURA 6.9 - Gráfico das reações de apoio no pilar P5.....	67
FIGURA 6.10 - Gráfico das reações verticais de apoio R_{F1} na fundação.....	68
FIGURA 6.11 - Gráfico das reações verticais de apoio R_{F2} na fundação.....	69
FIGURA 6.12 - Gráfico das reações verticais de apoio R_{F5} na fundação.....	69
FIGURA 7.1 - Modelo LAJE-CDA	72
FIGURA 7.2 - Gráfico do momento fletor M_x – Elemento A.....	77
FIGURA 7.3 - Gráfico dos momentos fletores M_x e M_y – Elemento B.....	81

FIGURA 7.4 - Gráfico do momento fletor M_x – Elemento C.....	85
FIGURA 7.5 - Gráfico do momento fletor M_y – Elemento C.....	85
FIGURA 7.6 - Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P2.....	89
FIGURA 7.7 - Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P1.....	89
FIGURA 7.8 - Gráfico das reações de apoio no pilar P1.....	93
FIGURA 7.9 - Gráfico das reações de apoio no pilar P2.....	94
FIGURA 7.10 - Gráfico das reações de apoio no pilar P5.....	95
FIGURA 7.11 - Gráfico das reações verticais de apoio R_{F1} na fundação.....	97
FIGURA 7.12 - Gráfico das reações verticais de apoio R_{F2} na fundação.....	97
FIGURA 7.13 - Gráfico das reações verticais de apoio R_{F5} na fundação.....	98
FIGURA 8.1 - Estrutura 1 do Modelo LAJE-EVOL.....	100
FIGURA 8.2 - Estrutura 2 do Modelo LAJE-EVOL.....	101
FIGURA 8.3 - Estrutura 3 do Modelo LAJE-EVOL.....	102
FIGURA 8.4 - Estrutura 39 do Modelo LAJE-EVOL.....	103
FIGURA 8.5 - Estrutura 40 do Modelo LAJE-EVOL.....	104
FIGURA 8.6 - Gráfico do momento fletor M_x – Elemento A.....	111
FIGURA 8.7 - Gráfico dos momentos fletores M_x e M_y – Elemento B.....	115
FIGURA 8.8 - Gráfico do momento fletor M_x – Elemento C.....	118
FIGURA 8.9 - Gráfico do momento fletor M_y – Elemento C.....	119
FIGURA 8.10 - Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P2.....	122
FIGURA 8.11 - Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P1.....	123
FIGURA 8.12 - Gráfico das reações de apoio no pilar P1.....	127
FIGURA 8.13 - Gráfico das reações de apoio no pilar P2.....	128
FIGURA 8.14 - Gráfico das reações de apoio no pilar P5.....	129
FIGURA 8.15 - Gráfico das reações verticais de apoio R_{F1} na fundação.....	130
FIGURA 8.16 - Gráfico das reações verticais de apoio R_{F2} na fundação.....	131
FIGURA 8.17 - Gráfico das reações verticais de apoio R_{F5} na fundação.....	131
FIGURA 9.1 - Gráfico do momento fletor M_x na laje de 15 centímetros–Elemento A	134
FIGURA 9.2 - Gráfico do momento fletor M_x na laje de 20 centímetros–Elemento A	135
FIGURA 9.3 - Gráfico do momento fletor M_x na laje de 25 centímetros–Elemento A	136
FIGURA 9.4 - Gráfico do momento fletor M_x na laje de 30 centímetros–Elemento A	137

FIGURA 9.5 - Gráfico dos momentos fletores M_x e M_y na laje de 15 centímetros – Elemento B.....	139
FIGURA 9.6 - Gráfico dos momentos fletores M_x e M_y na laje de 20 centímetros – Elemento B.....	140
FIGURA 9.7 - Gráfico dos momentos fletores M_x e M_y na laje de 25 centímetros – Elemento B.....	141
FIGURA 9.8 - Gráfico dos momentos fletores M_x e M_y na laje de 30 centímetros – Elemento B.....	142
FIGURA 9.9 - Gráfico do momento fletor M_x na laje de 15 centímetros–Elemento C	144
FIGURA 9.10 - Gráfico do momento fletor M_x na laje de 20 centímetros–Elemento C	145
FIGURA 9.11 - Gráfico do momento fletor M_x na laje de 25 centímetros–Elemento C	146
FIGURA 9.12 - Gráfico do momento fletor M_x na laje de 30 centímetros–Elemento C	147
FIGURA 9.13 - Gráfico do momento fletor M_y na laje de 15 centímetros–Elemento C	149
FIGURA 9.14 - Gráfico do momento fletor M_y na laje de 20 centímetros–Elemento C	150
FIGURA 9.15 - Gráfico do momento fletor M_y na laje de 25 centímetros–Elemento C	151
FIGURA 9.16 - Gráfico do momento fletor M_y na laje de 30 centímetros–Elemento C	152
FIGURA 9.17 - Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P2 com laje de 15 centímetros.....	154
FIGURA 9.18 - Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P2 com laje de 20 centímetros.....	155
FIGURA 9.19 - Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P2 com laje de 25 centímetros.....	156
FIGURA 9.20 - Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P2 com laje de 30 centímetros.....	157
FIGURA 9.21 - Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P1 com laje de 15 centímetros.....	159
FIGURA 9.22 - Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P1 com laje de 20 centímetros.....	160
FIGURA 9.23 - Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P1 com laje de 25 centímetros.....	161
FIGURA 9.24 - Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P1 com laje de	

30 centímetros.....	162
FIGURA 9.25 - Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P1 com laje de 15 centímetros.....	164
FIGURA 9.26 - Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P1 com laje de 20 centímetros.....	165
FIGURA 9.27 - Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P1 com laje de 25 centímetros.....	166
FIGURA 9.28 - Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P1 com laje de 30 centímetros.....	167
FIGURA 9.29 - Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P2 com laje de 15 centímetros.....	169
FIGURA 9.30 - Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P2 com laje de 20 centímetros.....	170
FIGURA 9.31 - Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P2 com laje de 25 centímetros.....	171
FIGURA 9.32 - Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P2 com laje de 30 centímetros.....	172
FIGURA 9.33 - Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P5 com laje de 15 centímetros.....	174
FIGURA 9.34 - Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P5 com laje de 20 centímetros.....	175
FIGURA 9.35 - Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P5 com laje de 25 centímetros.....	176
FIGURA 9.36 - Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P5 com laje de 30 centímetros.....	177
FIGURA 9.37 - Gráfico das reações verticais de apoio R_{F1} na fundação.....	179
FIGURA 9.38 - Gráfico das reações verticais de apoio R_{F2} na fundação.....	180
FIGURA 9.39 - Gráfico das reações verticais de apoio R_{F5} na fundação.....	181

LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1 –	Forças Concentradas Acumuladas nos Pilares.....	22
TABELA 5.2 –	Esforços no nó 6 na laje de 15 centímetros.....	23
TABELA 5.3 –	Esforços no nó 111 na laje de 15 centímetros.....	26
TABELA 5.4 –	Esforços no nó 116 na laje de 15 centímetros.....	27
TABELA 5.5 –	Recalques diferenciais nos pilares com laje de 15 centímetros.....	29
TABELA 5.6 –	Reações de apoio nos pilares com laje de 15 centímetros.....	30
TABELA 5.7 –	Esforços no nó 6 na laje de 20 centímetros.....	33
TABELA 5.8 –	Esforços no nó 6 na laje de 25 centímetros.....	33
TABELA 5.9 –	Esforços no nó 6 na laje de 30 centímetros.....	34
TABELA 5.10 –	Esforços no nó 111 na laje de 20 centímetros.....	35
TABELA 5.11 –	Esforços no nó 111 na laje de 25 centímetros.....	36
TABELA 5.12 –	Esforços no nó 111 na laje de 30 centímetros.....	36
TABELA 5.13 –	Esforços no nó 116 na laje de 20 centímetros.....	38
TABELA 5.14 –	Esforços no nó 116 na laje de 25 centímetros.....	38
TABELA 5.15 –	Esforços no nó 116 na laje de 30 centímetros.....	39
TABELA 5.16 –	Recalques diferenciais nos pilares com laje de 20 centímetros.....	41
TABELA 5.17 –	Recalques diferenciais nos pilares com laje de 25 centímetros.....	41
TABELA 5.18 –	Recalques diferenciais nos pilares com laje de 30 centímetros.....	42
TABELA 5.19 –	Reações de apoio nos pilares com laje de 20 centímetros.....	44
TABELA 5.20 –	Reações de apoio nos pilares com laje de 25 centímetros.....	45
TABELA 5.21 –	Reações de apoio nos pilares com laje de 30 centímetros.....	45
TABELA 6.1 –	Esforços no centróide do elemento A na laje de 15 centímetros.....	53
TABELA 6.2 –	Esforços no centróide do elemento A na laje de 20 centímetros.....	54
TABELA 6.3 –	Esforços no centróide do elemento A na laje de 25 centímetros.....	54
TABELA 6.4 –	Esforços no centróide do elemento A na laje de 30 centímetros.....	55
TABELA 6.5 –	Esforços no centróide do elemento B na laje de 15 centímetros.....	57
TABELA 6.6 –	Esforços no centróide do elemento B na laje de 20 centímetros.....	57
TABELA 6.7 –	Esforços no centróide do elemento B na laje de 25 centímetros.....	58
TABELA 6.8 –	Esforços no centróide do elemento B na laje de 30 centímetros.....	58

TABELA 6.9 –	Esforços no centróide do elemento C na laje de 15 centímetros.....	60
TABELA 6.10 –	Esforços no centróide do elemento C na laje de 20 centímetros.....	60
TABELA 6.11 –	Esforços no centróide do elemento C na laje de 25 centímetros.....	61
TABELA 6.12 –	Esforços no centróide do elemento C na laje de 30 centímetros.....	61
TABELA 6.13 –	Reações de apoio nos pilares com laje de 15 centímetros.....	63
TABELA 6.14 –	Reações de apoio nos pilares com laje de 20 centímetros.....	64
TABELA 6.15 –	Reações de apoio nos pilares com laje de 25 centímetros.....	64
TABELA 6.16 –	Reações de apoio nos pilares com laje de 30 centímetros.....	65
TABELA 6.17 –	Reações verticais de apoio na fundação.....	67
TABELA 7.1 –	Esforços no centróide do elemento A na laje de 15 centímetros.....	73
TABELA 7.2 –	Esforços no centróide do elemento A na laje de 20 centímetros.....	75
TABELA 7.3 –	Esforços no centróide do elemento A na laje de 25 centímetros.....	76
TABELA 7.4 –	Esforços no centróide do elemento A na laje de 30 centímetros.....	76
TABELA 7.5 –	Esforços no centróide do elemento B na laje de 15 centímetros.....	78
TABELA 7.6 –	Esforços no centróide do elemento B na laje de 20 centímetros.....	79
TABELA 7.7 –	Esforços no centróide do elemento B na laje de 25 centímetros.....	80
TABELA 7.8 –	Esforços no centróide do elemento B na laje de 30 centímetros.....	80
TABELA 7.9 –	Esforços no centróide do elemento C na laje de 15 centímetros.....	82
TABELA 7.10 –	Esforços no centróide do elemento C na laje de 20 centímetros.....	83
TABELA 7.11 –	Esforços no centróide do elemento C na laje de 25 centímetros.....	84
TABELA 7.12 –	Esforços no centróide do elemento C na laje de 30 centímetros.....	84
TABELA 7.13 –	Recalques diferenciais nos pilares com laje de 15 centímetros.....	86
TABELA 7.14 –	Recalques diferenciais nos pilares com laje de 20 centímetros.....	87
TABELA 7.15 –	Recalques diferenciais nos pilares com laje de 25 centímetros.....	88
TABELA 7.16 –	Recalques diferenciais nos pilares com laje de 30 centímetros.....	88
TABELA 7.17 –	Reações de apoio nos pilares com laje de 15 centímetros.....	90
TABELA 7.18 –	Reações de apoio nos pilares com laje de 20 centímetros.....	91
TABELA 7.19 –	Reações de apoio nos pilares com laje de 25 centímetros.....	92
TABELA 7.20 –	Reações de apoio nos pilares com laje de 30 centímetros.....	92
TABELA 7.21 –	Reações verticais de apoio na fundação.....	95
TABELA 8.1 –	Esforços no centróide do elemento A na laje de 20 centímetros do	

4 ^o andar.....	106
TABELA 8.2 – Esforços no centróide do elemento A na laje de 15 centímetros.....	108
TABELA 8.3 – Esforços no centróide do elemento A na laje de 20 centímetros.....	110
TABELA 8.4 – Esforços no centróide do elemento A na laje de 25 centímetros.....	110
TABELA 8.5 – Esforços no centróide do elemento A na laje de 30 centímetros.....	111
TABELA 8.6 – Esforços no centróide do elemento B na laje de 15 centímetros.....	112
TABELA 8.7 – Esforços no centróide do elemento B na laje de 20 centímetros.....	113
TABELA 8.8 – Esforços no centróide do elemento B na laje de 25 centímetros.....	114
TABELA 8.9 – Esforços no centróide do elemento B na laje de 30 centímetros.....	114
TABELA 8.10 – Esforços no centróide do elemento C na laje de 15 centímetros.....	115
TABELA 8.11 – Esforços no centróide do elemento C na laje de 20 centímetros.....	117
TABELA 8.12 – Esforços no centróide do elemento C na laje de 25 centímetros.....	117
TABELA 8.13 – Esforços no centróide do elemento C na laje de 30 centímetros.....	118
TABELA 8.14 – Recalques diferenciais nos pilares com laje de 15 centímetros.....	119
TABELA 8.15 – Recalques diferenciais nos pilares com laje de 20 centímetros.....	121
TABELA 8.16 – Recalques diferenciais nos pilares com laje de 25 centímetros.....	121
TABELA 8.17 – Recalques diferenciais nos pilares com laje de 30 centímetros.....	122
TABELA 8.18 – Reações de apoio nos pilares com laje de 15 centímetros.....	123
TABELA 8.19 – Reações de apoio nos pilares com laje de 20 centímetros.....	125
TABELA 8.20 – Reações de apoio nos pilares com laje de 25 centímetros.....	125
TABELA 8.21 – Reações de apoio nos pilares com laje de 30 centímetros.....	126
TABELA 8.22 – Reações verticais de apoio na fundação.....	129
TABELA 9.1 – Momento fletor M_x no centróide do elemento A na laje de 15 centímetros.....	134
TABELA 9.2 – Momento fletor M_x no centróide do elemento A na laje de 20 centímetros.....	135
TABELA 9.3 – Momento fletor M_x no centróide do elemento A na laje de 25 centímetros.....	136
TABELA 9.4 – Momento fletor M_x no centróide do elemento A na laje de 30 centímetros.....	137
TABELA 9.5 – Momentos fletores M_x e M_y no centróide do elemento B na laje de	

	15 centímetros.....	139
TABELA 9.6 –	Momentos fletores M_x e M_y no centróide do elemento B na laje de 20 centímetros.....	140
TABELA 9.7 –	Momentos fletores M_x e M_y no centróide do elemento B na laje de 25 centímetros.....	141
TABELA 9.8 –	Momentos fletores M_x e M_y no centróide do elemento B na laje de 30 centímetros.....	142
TABELA 9.9 –	Momento fletor M_x no centróide do elemento C na laje de 15 centímetros.....	144
TABELA 9.10 –	Momento fletor M_x no centróide do elemento C na laje de 20 centímetros.....	145
TABELA 9.11 –	Momento fletor M_x no centróide do elemento C na laje de 25 centímetros.....	146
TABELA 9.12 –	Momento fletor M_x no centróide do elemento C na laje de 30 centímetros.....	147
TABELA 9.13 –	Momento fletor M_y no centróide do elemento C na laje de 15 centímetros.....	149
TABELA 9.14 –	Momento fletor M_y no centróide do elemento C na laje de 20 centímetros.....	150
TABELA 9.15 –	Momento fletor M_y no centróide do elemento C na laje de 25 centímetros.....	151
TABELA 9.16 –	Momento fletor M_y no centróide do elemento C na laje de 30 centímetros.....	152
TABELA 9.17 –	Recalque diferencial entre os pilares P5 e P2 com laje de 15 centímetros.....	154
TABELA 9.18 –	Recalque diferencial entre os pilares P5 e P2 com laje de 20 centímetros.....	155
TABELA 9.19 –	Recalque diferencial entre os pilares P5 e P2 com laje de 25 centímetros.....	156
TABELA 9.20 –	Recalque diferencial entre os pilares P5 e P2 com laje de 30 centímetros.....	157

TABELA 9.21 – Recalque diferencial entre os pilares P5 e P1 com laje de 15 centímetros.....	159
TABELA 9.22 – Recalque diferencial entre os pilares P5 e P1 com laje de 20 centímetros.....	160
TABELA 9.23 – Recalque diferencial entre os pilares P5 e P1 com laje de 25 centímetros.....	161
TABELA 9.24 – Recalque diferencial entre os pilares P5 e P1 com laje de 30 centímetros.....	162
TABELA 9.25 – Reações de apoio no pilar P1 com laje de 15 centímetros.....	164
TABELA 9.26 – Reações de apoio no pilar P1 com laje de 20 centímetros.....	165
TABELA 9.27 – Reações de apoio no pilar P1 com laje de 25 centímetros.....	166
TABELA 9.28 – Reações de apoio no pilar P1 com laje de 30 centímetros.....	167
TABELA 9.29 – Reações de apoio no pilar P2 com laje de 15 centímetros.....	169
TABELA 9.30 – Reações de apoio no pilar P2 com laje de 20 centímetros.....	170
TABELA 9.31 – Reações de apoio no pilar P2 com laje de 25 centímetros.....	171
TABELA 9.32 – Reações de apoio no pilar P2 com laje de 30 centímetros.....	172
TABELA 9.33 – Reações de apoio no pilar P5 com laje de 15 centímetros.....	174
TABELA 9.34 – Reações de apoio no pilar P5 com laje de 20 centímetros.....	175
TABELA 9.35 – Reações de apoio no pilar P5 com laje de 25 centímetros.....	176
TABELA 9.36 – Reações de apoio no pilar P5 com laje de 30 centímetros.....	177
TABELA 9.37 – Reações verticais de apoio na fundação do pilar P1.....	179
TABELA 9.38 – Reações verticais de apoio na fundação do pilar P2.....	180
TABELA 9.39 – Reações verticais de apoio na fundação do pilar P5.....	181

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANSYS - Analysis Systems Inc.

ACI - American Concrete Institute

ASCE - American Society Of Civil Engineers

CDA - com deformação axial

COPPE - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia

d - espessura da laje tipo

DEES – Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG

E - módulo de elasticidade longitudinal

EVOL - evolutivo

F_{ji} - força vertical acumulada aplicada ao pilar j no andar i

h_i - comprimento do pilar no andar i

i - número do andar tipo

IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto

M - momentos na laje tipo com apoios elásticos

M_0 - momentos na laje tipo com apoios rígidos

M_x - momento fletor na laje tipo, por unidade de comprimento, atuando em faces verticais paralelas ao eixo y

M_{xy} - momento de torção na laje tipo, por unidade de comprimento, atuando em faces verticais paralelas aos eixos x ou y

M_y - momento fletor na laje tipo, por unidade de comprimento, atuando em faces verticais paralelas ao eixo x

MOL - mola

NIST - National Institute of Standards and Technology

P_i - pilar no. i

q - carga superficial uniformemente distribuída

R_{Fi} - reações verticais de apoio na fundação do pilar i

R_i - reação de apoio vertical em pilares no. i com rigidez axial infinita

R₀ - reação de apoio vertical no andar de referência (0°)

R_P - reação de apoio vertical em pilares

R_{Pi} - reação de apoio vertical no pilar P_i

SDA - sem deformação axial

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

U_{Pi} - deslocamento vertical no pilar P_i

USP – Universidade de São Paulo

□_{P5/P1} - recalque diferencial entre pilares P5 e P1

□_{P5/P2} - recalque diferencial entre pilares P5 e P2

□% - diferenças percentuais

□ - coeficiente de Poisson

2D - bidimensional

3D - tridimensional

|a| - valor absoluto de a

RESUMO

A escolha do modelo estrutural adequado na análise de edifícios é muito importante. Quando se trata de um edifício alto essa questão se torna ainda mais relevante. A adoção de modelos simplificados, que desconsideram as deformações axiais dos pilares e as etapas de construção e carregamento, pode levar o profissional da área a erros bastante graves. Muitos estudos modernos evidenciam a importância de considerar-se os recalques diferenciais nos pilares bem como as etapas de construção e carregamento, o que inviabiliza a hipótese de que os esforços solicitantes nas lajes-tipo são constantes ao longo da altura do edifício. Com o objetivo de mostrar a necessidade de levar em consideração as deformações axiais nos pilares e as etapas de construção e carregamento são desenvolvidos neste trabalho quatro modelos distintos de cálculo estrutural. Um primeiro modelo, no qual os pilares são simulados por molas translacionais, é desenvolvido para mostrar a importância das deformações axiais nos pilares. Dois modelos clássicos (com e sem deformação axial dos pilares) nos quais a estrutura é suposta pronta e carregada simultaneamente são também apresentados e comparados com um quarto modelo que leva em consideração as etapas de construção e carregamento. Uma estrutura espacial de 40 andares, sem vigamento, é então calculada através dos quatro modelos. Com o primeiro modelo mostra-se que os esforços nas lajes podem variar ao longo da altura do edifício, o que sugere não ser adequado o uso de uma mesma armação em concreto armado para as diversas lajes-tipo. Os outros três modelos são comparados entre si com o objetivo de mostrar que o quarto modelo é superior aos demais. Em todos os modelos é também pesquisada a influência da espessura da laje-tipo na redistribuição das cargas verticais nos pilares e, conseqüentemente, nos esforços solicitantes nas lajes-tipo.

Palavras-chave: cálculo evolutivo; deformações axiais em pilares; edifícios altos; edifícios de andares múltiplos; etapas de carregamento; etapas de construção; lajes lisas.

ABSTRACT

The choice of the appropriated structural model in the analysis of buildings is very important. For tall buildings, this issue is even more relevant. The use of simplified structural models which do not consider axial deformations of columns and the stages of construction and loading may lead engineers to serious errors. Many recent studies have shown the importance of considering not only the differential displacements of columns but also the stages of construction and loading. These findings go against the hypothesis that the stresses in typical slabs are constant along the height of the building. In the present study, four different structural models are developed with the objective of showing evidence to the previous findings. In the first model, the columns are simulated by translational springs to show the importance of axial deformations of columns. Two classic models (with and without axial deformations of columns) in which the structure is assumed to be constructed and loaded simultaneously are also presented and compared to a fourth model that considers the stages of both construction and loading. A tri-dimensional 40-story structure with no beams is designed and analyzed according to each of the four models presented. The analysis of the structure through the use of the first model shows that the stresses in the slabs can vary along the height of the building. Consequently, it is not appropriate to use the same reinforcement in reinforced concrete for all typical slabs of the structure. The other three models are compared among themselves with the objective to show that the fourth model is better than the other two. In addition, the influence of the typical slab thickness in the vertical loads of columns and, consequently, in the typical slab stresses is also studied.

KEYWORDS: sequential analysis, axial deformations in columns, tall buildings, multi-story buildings, stages of construction, stages of loading, flat slabs.

1

INTRODUÇÃO

Mesmo com a contínua evolução tecnológica das ferramentas de cálculo estrutural de edifícios, o ato de “calcular” uma estrutura continua questão bastante polêmica e motivadora de discussões. Isto porque muitas das simplificações feitas no passado, devido à ausência de ferramentas ágeis de computação de dados, continuam presentes na maioria dos escritórios de cálculo, ainda hoje. Até profissionais que utilizam modernos softwares do mercado costumam adotar modelos estruturais que não condizem com o real comportamento da estrutura. A questão sempre será saber até que ponto o fato de se afastar do real comportamento levará a estruturas antieconômicas, mal dimensionadas ou instáveis (VASCONCELLOS FILHO, 1981).

O cálculo que obedeça totalmente o real comportamento da estrutura, levando-se em consideração o maior número de variáveis possíveis, ainda é peça extremamente complexa de ser concebida, porque sempre será difícil para o profissional da área controlar todas as variáveis envolvidas na modelagem da estrutura. Sendo assim, o mais importante será adotar um modelo de cálculo teórico que se aproxime o máximo possível do comportamento real da estrutura (VASCONCELLOS FILHO, 1981).

Atualmente o modelo de Cálculo Evolutivo vem sendo altamente difundido porque, conforme diversas pesquisas feitas, ele é o que melhor descreve o comportamento de uma estrutura. Nele são consideradas as etapas de construção e carregamento, inclusive cargas de montagem. A análise teórica da estrutura no modelo evolutivo é feita simulando a maneira como ela realmente será construída. No caso de edifícios de andares múltiplos, as diversas lajes são calculadas piso a piso, com os carregamentos sendo aplicados na medida em que realmente ocorrem. Os modelos tradicionais de cálculo consideram a aplicação total dos diversos carregamentos já com a estrutura totalmente pronta, omitindo o fato de que eles na realidade ocorrem na medida em que ela vai sendo construída (CHOI, 1985).

No caso particular de edifícios de andares múltiplos em estruturas de concreto armado, onde muitas vezes as cargas de montagem e peso próprio atuam muito antes do material atingir a resistência máxima prevista no projeto, omitir o real comportamento da estrutura pode levar a distorções graves (PRADO, 1999).

2

OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é analisar um edifício de andares múltiplos com lajes lisas, sem vigamento, através de quatro modelos distintos de cálculo estrutural.

Pretende-se com isso mostrar, usando sempre a mesma estrutura, o quanto os resultados calculados podem divergir de modelo para modelo.

Pelos motivos descritos no capítulo 1, a ênfase deste trabalho será voltada no sentido de mostrar o quanto o resultado dos outros modelos se afastam do modelo de cálculo evolutivo.

No capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica mostrando sobretudo a evolução do assunto nos principais meios acadêmicos.

A estrutura a ser analisada, que será comum a todos os modelos, é apresentada com maiores detalhes no capítulo 4.

No capítulo 5 será analisado um modelo bem simples, com o objetivo único de mostrar a necessidade de se fazer análises cuidadosas em edifícios de andares múltiplos. Será mostrado que apesar de todos os pavimentos serem geometricamente iguais, os esforços

solicitantes e os deslocamentos em um mesmo ponto variam bastante ao longo dos vários andares. O modelo que evidenciará este problema será chamado de LAJE-MOL.

No capítulo 6 o modelo a ser analisado será o LAJE-SDA. Neste modelo, todos os pilares ao longo dos vários pavimentos são impedidos de se deslocarem verticalmente, ou seja, são considerados axialmente indeformáveis. Este fato fará com que todos os esforços em um mesmo ponto da laje tipo, pouco ou nada varie. Este modelo terá o objetivo de nos mostrar os graves equívocos que são cometidos ao se ignorar os recalques diferenciais nos pilares.

No capítulo 7 será analisado o modelo que será chamado de LAJE-CDA. Neste modelo todos os pilares sofrem deformação axial e todas as lajes da estrutura são carregadas simultaneamente. Será mostrado que os esforços solicitantes das lajes podem variar bastante, dependendo da altura do edifício e dos recalques diferenciais nos pilares. Se verá que em muitos casos este modelo pode levar a uma conclusão incorreta daquilo que realmente ocorre na estrutura.

No capítulo 8 será mostrado um modelo de cálculo evolutivo. Será mostrado que os esforços em um mesmo ponto de uma laje tipo realmente variam ao longo dos vários andares. Ao final concluir-se-á que este modelo, por se aproximar mais daquilo que de fato acontece com a estrutura real, produz resultados mais realistas que os dois modelos anteriores. O nome deste modelo será LAJE-EVOL.

No capítulo 9 serão feitas comparações entre os modelos LAJE-SDA, LAJE-CDA e LAJE-EVOL, quando ficarão evidentes as várias diferenças entre os modelos e a importância da escolha correta.

Nestes modelos serão consideradas apenas as cargas verticais e não será abordada a questão da estabilidade lateral do edifício. Nas análises feitas pretende-se observar:

- a) a variação dos esforços solicitantes nas lajes de acordo com a variação da sua espessura;
- b) a variação dos esforços solicitantes nas lajes de acordo com a posição da mesma no edifício;
- c) a variação das reações de apoio das lajes nos pilares de acordo com a variação da sua espessura;
- d) a variação das reações de apoio das lajes nos pilares de acordo com a sua posição no edifício;
- e) a variação dos recalques diferenciais nos pilares de cada andar de acordo com a variação da espessura da laje;
- f) a variação dos recalques diferenciais nos pilares de cada andar de acordo com a sua posição no edifício;
- g) a variação das cargas verticais na fundação de acordo com a variação da espessura da laje.

Finalmente, as conclusões obtidas com este trabalho serão apresentadas no capítulo 10.

3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A busca do modelo ideal que melhor descreva o comportamento estrutural de um edifício alto tem sido uma preocupação constante dos projetistas de estrutura. A partir do início do século XX, com a crescente popularização das estruturas em aço e em concreto armado, foi possível viabilizar a construção de edifícios de andares múltiplos para fins comerciais e residenciais. Como consequência, inúmeros trabalhos e livros foram escritos a respeito do assunto.

A grande dificuldade no passado em utilizar modelos estruturais sofisticados se dava basicamente pela inexistência de ferramentas de cálculo que facilitassem a manipulação da complexidade matemática gerada. Por isso, até a década de 60, os modelos estruturais em geral eram simplificados buscando a maior simplicidade matemática possível.

A partir da década de 60, com o advento do computador, foi possível ir melhorando os modelos de análise à medida que se foram modernizando os equipamentos e os softwares. A seguir são apresentados, em ordem cronológica, alguns trabalhos publicados após 1960 e que abordam questões relativas a modelos estruturais.

GRUNDY e KABAILA (1963) apresentaram um trabalho onde mostram a importância de considerar corretamente os carregamentos aplicados na estrutura durante as etapas de construção. Analisaram um pórtico de dois pilares para um edifício em concreto armado, onde variaram durante os cálculos o número de andares com escoramento, chegando a colocar de 2 a 4 andares escorados de uma só vez. Também fizeram dois tipos de análises, uma considerando o módulo de elasticidade constante e outra variável, onde constataram que não havia uma diferença excessiva entre as duas análises. Ao final, compararam os resultados obtidos com os carregamentos de construção e com os carregamentos usuais (sobrecarga e revestimento). Concluíram que os carregamentos de construção podem superar os carregamentos usuais de serviço por uma margem considerável não podendo, então, serem desprezados. Este trabalho, publicado em 1963, foi um dos primeiros a levantar o problema dos carregamentos de construção devidos ao escoramento de lajes e ainda hoje é uma referência no assunto.

SELVARAJ e SHARMA (1974) afirmaram que negligenciar as seqüências de construção nas análises elásticas pode levar a erros significativos nas tensões de vigas e pilares. Neste trabalho três pórticos de 14 andares foram analisados através de dois modelos que consideravam a seqüência construtiva e dois modelos clássicos de cálculo. Entre os modelos que consideravam a seqüência construtiva, um foi calculado sem considerar o escoramento e o outro considerando o escoramento dos andares. Um dos dois modelos clássicos utilizados foi calculado sem considerar as deformações axiais dos pilares e o outro considerando as deformações axiais nos pilares. Os resultados encontrados para os modelos que consideravam a seqüência construtiva ficaram bem próximos, no entanto, quando comparados com os modelos clássicos, os resultados foram bastante discrepantes.

VASCONCELLOS FILHO (1981) concluiu que as etapas de construção e carregamento são importantes na modelagem de um edifício alto não podendo ser negligenciadas. Dois pórticos, um de 16 e outro de 26 andares, foram analisados e três modelos distintos foram utilizados para fazer à análise. No modelo que inclui as etapas de construção, os carregamentos foram aplicados como se simulassem o cronograma de construção de um edifício real. Inicialmente foi aplicado o peso próprio dos elementos estruturais mais o peso

dos andares escorados, calculados seqüencialmente; depois entraram os carregamentos devidos às alvenarias, revestimentos e sobrecarga. Este modelo mais realista foi então comparado com dois modelos clássicos (um com deformação axial dos pilares e outro sem). Os modelos clássicos acabaram por não apresentar bons resultados para as duas estruturas calculadas. As maiores diferenças aconteceram para o pórtico de 26 andares, o que deixa claro a influência da altura do edifício na análise.

LIU, CHEN e BOWMAN (1985) desenvolveram um modelo tri-dimensional para se avaliar o efeito provocado pelos escoramentos e as cargas de construção nas lajes. Os resultados obtidos foram comparados com um modelo 2-D refinado e com o modelo 2-D simplificado apresentado por GRUNDY e KABAILA (1963). O modelo 3-D foi calculado com distribuição uniforme dos escoramentos e com distribuição não uniforme. As lajes tinham as extremidades fixas sendo analisadas ora com a rotação livre, ora com a rotação impedida. Concluíram que os resultados apresentados pelos três modelos foram muito próximos; os deslocamentos nas lajes devido aos recalques diferenciais nos pilares são mais afetados do que os esforços; a distribuição não uniforme da rigidez dos escoramentos pode acarretar em acréscimo da carga dos mesmos nas lajes sendo, portanto, recomendados mais estudos e análises estatísticas a respeito desta questão.

CHOI e KIM (1985) apresentaram um trabalho onde foram calculados dois pórticos de andares múltiplos sob a ação de cargas verticais. Dois modelos foram usados para se fazer as análises, um considerando o pórtico com o carregamento completo e outro, conforme expressão usada pelos próprios autores, considerando-se “uma subestrutura de cada vez”. Os vários andares do edifício foram calculados seqüencialmente, andar por andar, de cima para baixo. Duas estruturas diferentes foram analisadas, uma com 60 andares em aço e outra com 10 andares em concreto armado. Os resultados obtidos pelo modelo seqüencial proposto foram comparados com os resultados obtidos da estrutura calculada com o carregamento completo. Em ambos os modelos os pilares puderam sofrer deformação axial. A estrutura de concreto armado de 10 andares foi ainda analisada de duas formas, com e sem parede estrutural. Com os resultados pode-se constatar que as diferenças entre os modelos foram bastante significativas no pórtico de 60 andares. O modelo clássico de

cálculo, que considera o carregamento completo, apresentou valores elevados nos momentos fletores no topo do edifício, enquanto que o modelo “uma subestrutura de cada vez” apresentou valores bem menores no topo. Na estrutura em concreto armado, as diferenças foram mais acentuadas no pórtico com parede estrutural. Para ambos os casos, os autores afirmam que não se pode negligenciar tais diferenças, considerando fundamental a análise seqüencial construtiva para edifícios altos.

FONTE e SORIANO (1989) publicaram um trabalho estudando o efeito construtivo incremental em edifícios altos. Os autores utilizaram dois processos de cálculo incremental conhecidos, um que analisa a estrutura de cima para baixo (CHOI e KIM, 1985) e outro de baixo para cima (VASCONCELLOS FILHO, 1981). Ambos os processos foram rerepresentados com notação matricial. As estruturas utilizadas em VASCONCELLOS FILHO (1981) são novamente analisadas, desta vez para modelos clássicos, incrementais e clássicos modificados. Basicamente dois modelos clássicos foram utilizados, um com deformação axial e outro sem deformação axial. Ambos foram comparados com o modelo incremental. Foram sugeridos outros quatro tipos de modelos clássicos com modificações particulares na rigidez axial dos pilares, visando melhorar os resultados para uma comparação com os modelos incrementais. Os resultados mostraram que os dois modelos clássicos foram inadequados para a análise, devido às discrepâncias em relação aos modelos incrementais. Tanto a análise incremental de “baixo para cima” quanto a de “cima para baixo” apresentaram valores próximos e são as mais recomendadas para a análise de edifícios altos. Os autores afirmam que a análise de baixo para cima é mais realista e deve ser utilizada com seqüências simplificadas de carregamento, enquanto a análise de cima para baixo é mais fácil de ser implementada no computador devido à não consideração dos carregamentos isolados de alvenarias, revestimentos e sobrecarga. Quanto aos modelos modificados os resultados obtidos foram bons e os autores sugerem novas pesquisas para essa linha de modelagem.

KRIPKA (1990) procurou descrever novas maneiras de simular a seqüência construtiva, inclusive, desenvolvendo um software para cálculo de pórticos planos usando a análise incremental e convencional (carregamento completo). Em seu software o autor permite a

análise não apenas dos esforços finais, mas também dos esforços intermediários em qualquer ponto da estrutura. Quatro pórticos foram utilizados como exemplo e foram feitos cálculos incrementais e clássicos para comparação. Com base nos resultados, constata-se a necessidade da utilização de análise incremental para a correta avaliação dos esforços solicitantes. Em todas as comparações feitas, observou-se diferença de resultados obtidos por intermédio da análise incremental construtiva com os gerados pelo procedimento convencional.

STIVAROS e HALVORSEN (1991) publicaram um artigo onde avaliam as falhas ocorridas durante a construção da estrutura de concreto armado do Condomínio Harbour Cay que entrou em colapso em 1981. A estrutura de 5 andares entrou em colapso em um ponto do 5º andar durante seu processo de cura, ou seja, quando ainda se encontrava escorada. Os autores utilizaram o Método do Pórtico Equivalente (MPE) para avaliar as cargas de construção utilizadas no processo de construção deste edifício e compararam os resultados com os gerados pelo modelo de elementos finitos do National Institute of Standards and Technology (NIST), órgão encarregado de investigar as causas do colapso, e também compararam com o método simplificado proposto por GRUNDY e KABAILA (1963). A intenção dos autores era mostrar que o MPE produz resultados satisfatórios na análise das cargas de construção. Dois pórticos planos equivalentes foram gerados para comparações, um completo incorporando toda a extensão longitudinal da estrutura e outro incorporando apenas dois pilares. Os resultados obtidos com o MPE para o pórtico plano completo foram satisfatórios porque se aproximaram bastante dos obtidos pelo modelo de elementos finitos gerado pelo NIST. Também os resultados do pórtico plano de dois pilares mostraram-se próximos do modelo simplificado proposto por GRUNDY e KABAILA (1963). Ao final concluíram que as causas do colapso provavelmente foram devidas à não consideração em projeto das tensões de cisalhamento geradas durante a construção na junção laje-pilar. O MPE mostrou-se eficiente para a avaliação destas tensões.

SMITH e COULL (1991) em seu livro afirmam que a ação de carregamentos tais como sobrecarga (utilização final do edifício), ação de vento e terremotos independem das etapas de construção, dependendo apenas da forma e do tamanho do edifício e das condições geográficas da região. Já os carregamentos permanentes (peso próprio, alvenaria e

revestimento) e os de construção só podem ser corretamente avaliados em edifícios altos se forem considerados no cálculo seqüencial da estrutura. Consideram que os carregamentos de construção podem exceder bastante os carregamentos usuais, isto porque essas cargas dependem da velocidade e seqüência de construção, bem como do tempo de maturidade do concreto armado. Recalques diferenciais importantes podem ocorrer nos pilares durante a construção, o que prejudica o funcionamento final previsto para a estrutura.

PRADO, RAMALHO e CORRÊA (1998) afirmam que toda a estrutura passa por diversas fases durante seu processo construtivo. Mostram que os valores obtidos através da análise da seqüência construtiva diferem dos obtidos pela análise do edifício com carregamento completo. Descrevem a necessidade de se avaliar corretamente as cargas de construção, de obter-se uma avaliação precisa das características do concreto armado ao longo do tempo, bem como das propriedades à compressão da madeira que servirá como escoramento. Além disso, propõem a realização de uma maior quantidade de estudos, para se avaliar quais são os processos construtivos mais utilizados em nosso país, abrangendo tipos de fôrmas com escoras e reescoras, número de andares escorados, quantidade e posicionamento dos pontaletes, cronograma de construção, tempo de desforma; enfim tudo que diz respeito ao sistema temporário de suporte dos andares. Estudos deste tipo, caracterizados pela objetividade e com embasamentos estatísticos, forçariam a adoção nas normas de novas combinações de ações que englobariam os esforços solicitantes e resistências que ocorrem durante o processo de construção. Concluem ao final, que as ações construtivas muitas vezes ocorrem antes do concreto atingir sua total maturidade e que nos últimos 25 anos ocorreram, somente nos Estados Unidos, mais de 85 colapsos de estruturas durante a construção.

RAMALHO, PRADO e CORRÊA (1998) escreveram um artigo em que descrevem o processo de cálculo seqüencial para análise estrutural de edifícios altos de concreto armado. Definem um modelo estrutural 3D (usando o método dos elementos finitos) para avaliar as cargas de construção. Fazem uma análise seqüencial de uma estrutura espacial de 4 andares considerando os escoramentos e a variação ao longo do tempo de propriedades do concreto armado, tais como, módulo de elasticidade e resistência característica. Concluem que o

processamento seqüencial utilizado produz resultados mais exatos e mesmo para um edifício de apenas 4 andares são encontradas diferenças entre este processamento e o processamento usual considerando a estrutura com carregamento completo. Destacam também que é grande o número de processamentos (12 ao todo) necessários para se obterem os resultados finais dos esforços na estrutura. Todavia, isto não é um problema desde que sejam desenvolvidos softwares para análises seqüenciais.

PRADO (1999) afirma que as ações presentes durante a construção de um edifício de concreto armado dependem do processo construtivo adotado e podem ultrapassar sensivelmente a capacidade resistente definida no projeto estrutural. Com isso, sugere um novo método para determinação da distribuição das ações de construção entre o sistema de escoramento e os pavimentos interligados. Além disso, propõe uma nova metodologia para as normas para verificação dos estados limites considerando as etapas de construção. Ao final conclui que levar em conta as ações permanentes de forma incremental gera resultados mais exatos. Portanto, é importante levar-se em conta todos os carregamentos que ocorrem durante o processo construtivo, mesmo aqueles que não sejam permanentes.

COELHO (2003) procura mostrar que podem existir divergências de resultado entre o modelo estrutural usando cálculo evolutivo (etapas de construção e carregamento) e o modelo que considera a estrutura pronta e carregada de uma única vez. Para isso foram analisados três pórticos planos diferentes, um com 16 andares e dois com 26 andares (um com e outro sem variação das seções transversais de vigas e pilares). Três modelos distintos foram utilizados para se calcular as estruturas. O modelo de cálculo evolutivo foi desenvolvido tendo como base o mesmo esquema de carregamento apresentado por VASCONCELLOS FILHO (1981). Os outros dois modelos desenvolvidos seguiram a linha clássica, ou seja, consideraram a estrutura pronta e totalmente carregada, sendo que a distinção entre eles estava na ausência ou não de deformação axial dos pilares. Com os resultados obtidos para os três modelos foram feitas comparações, onde constatou-se as discrepâncias entre eles. Para facilitar as análises comparativas foi desenvolvido o software PORTEVOL que permite fazer o cálculo evolutivo de pórticos planos. COELHO também mostrou que as discrepâncias entre os modelos aumentam com a altura do edifício. Além

disto, as discrepâncias entre os modelos também aumentam com o enrijecimento à flexão do vigamento. Por outro lado as discrepâncias entre os modelos diminuem à medida que as tensões normais médias em todos os pilares de cada andar tendem a uniformizar-se.

4

ESTRUTURA A SER ANALISADA

Com o intuito de facilitar a análise e tornar as comparações mais realistas, todos os modelos mencionados no capítulo 2 terão a mesma estrutura geométrica, composta apenas de lajes e pilares. O exame das figuras 4.1 e 4.2 mostra que:

- A estrutura tem 40 andares tipo e 120 metros de altura;
- não existem pilotis e subsolo (para simplificar a análise);
- todos os pilares são engastados na fundação;
- a estrutura possui dois planos verticais de simetria;
- os nove pilares possuem a mesma dimensão 110cm x 110cm;
- as lajes são lisas com a mesma espessura em todos os andares; nas análises a seguir serão consideradas as espessuras de 15, 20, 25 e 30 centímetros;
- em cada andar tem-se uma laje lisa com quatro painéis.

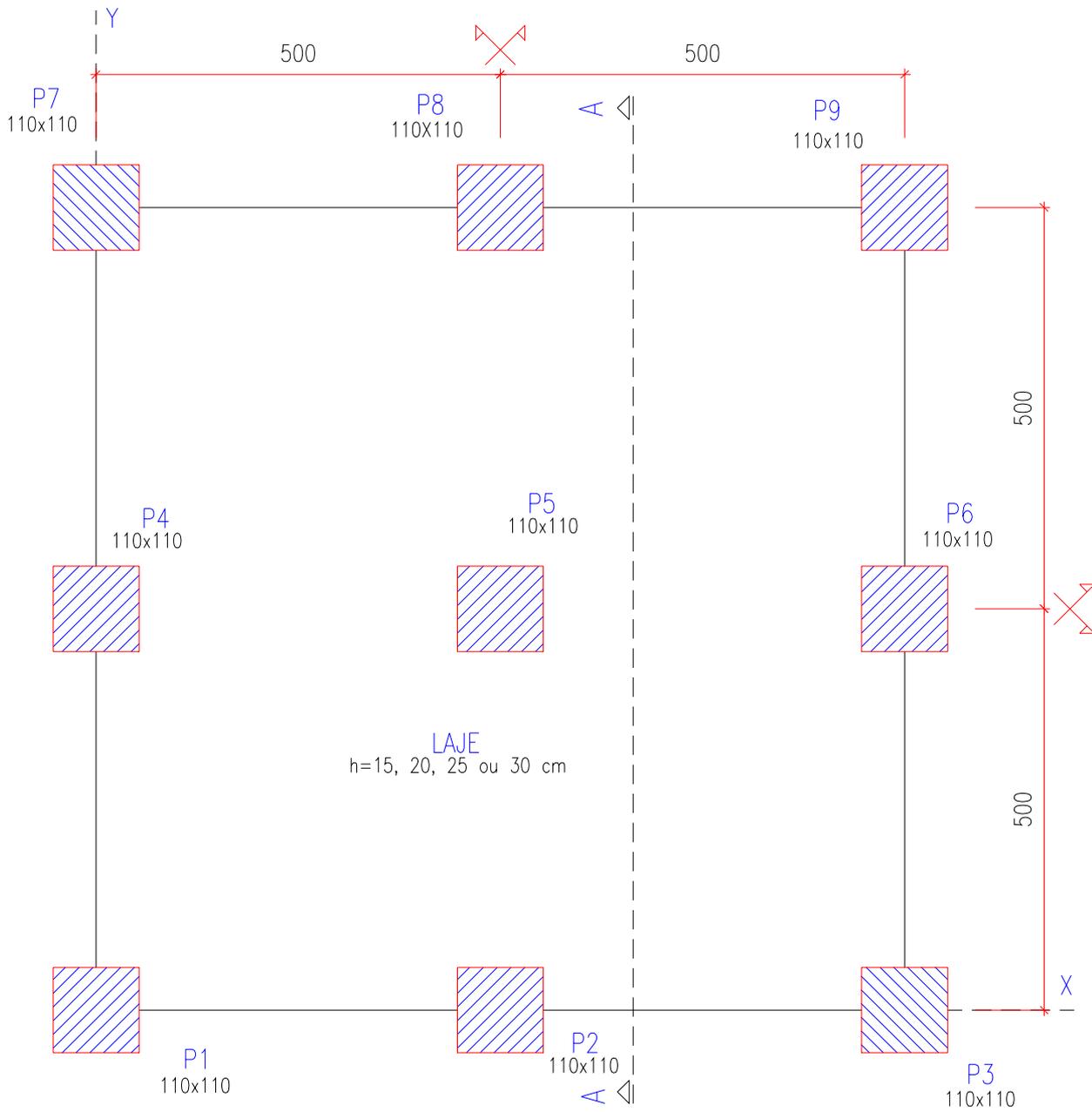


FIGURA 4.1 – Esquema do andar tipo da estrutura (cotas e dimensões em centímetros)

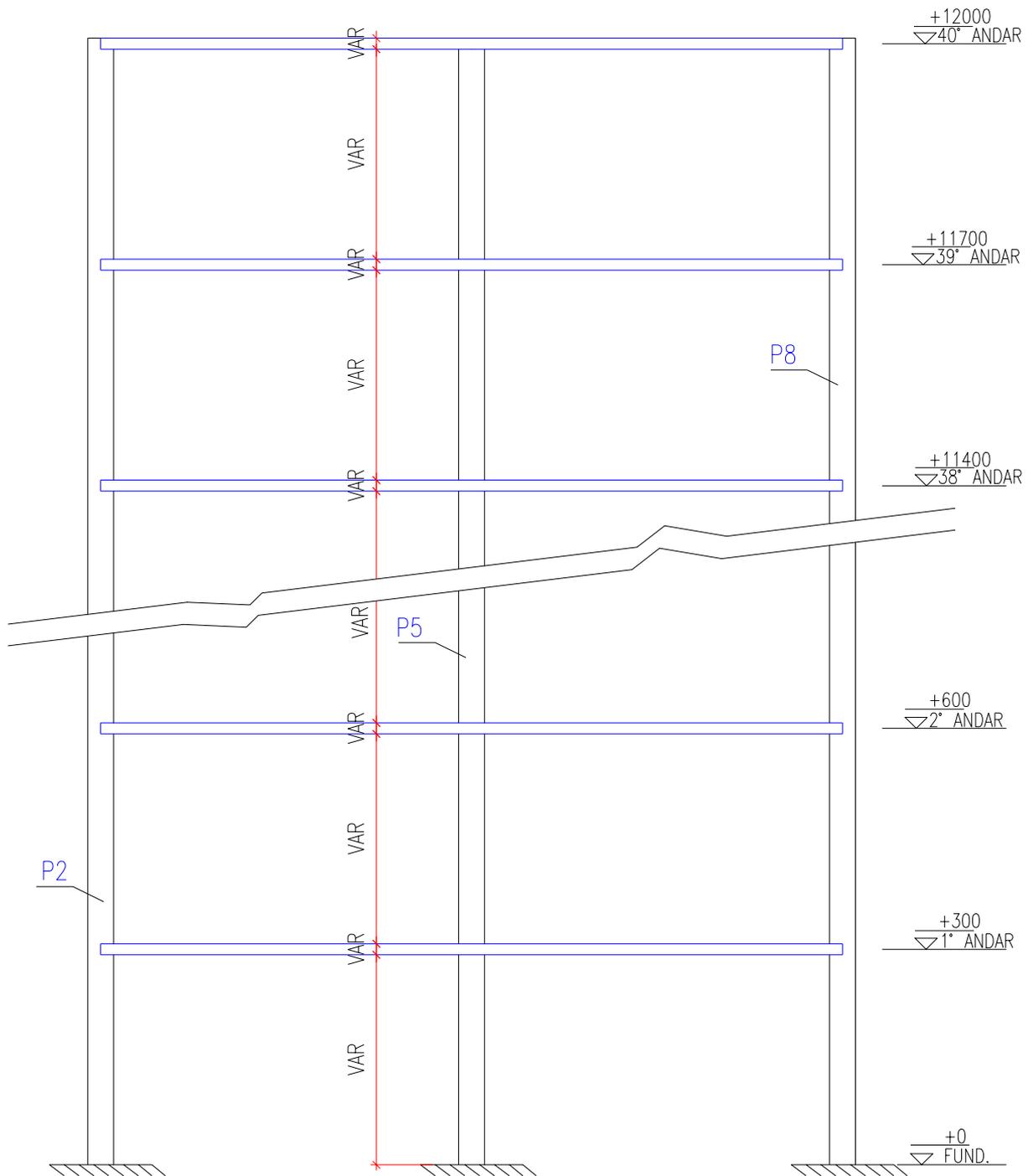


FIGURA 4.2 – Corte A-A da estrutura (níveis em centímetros)

5

MODELO LAJE-MOL

5.1 - DESCRIÇÃO

O objetivo deste modelo é evidenciar que o cálculo de edifícios altos utilizando a noção de “empilhar lajes”, ou seja, a noção de considerar que todas as lajes do edifício possuem o mesmo comportamento mecânico e que todos os pilares são indeformáveis, pode levar a resultados muito discrepantes dos obtidos com modelos mais realistas.

O modelo utilizado neste capítulo consiste em calcular uma laje tipo no lugar em que ela realmente ocupa no edifício, considerando-se todo o peso do edifício acima dela, a ser construído, concentrado nos pilares que a suportam e não considerando o peso das lajes abaixo dela, já construídas. Dessa forma teremos na laje tipo um efeito mecânico mais próximo da realidade a que ela está submetida.

Na figura 5.1 representa-se um esquema do modelo estrutural analisado. Este modelo é composto exclusivamente da laje do andar tipo e dos pilares P1, P2,...,P9, que a suportam. A seguir são dadas informações adicionais sobre o modelo:

- o andar tipo i pode variar de 1 a 40;
- cada laje tipo será calculada na posição que realmente ocupa no edifício;
- os pilares que suportam a laje tipo têm comprimento $h_i = 3 \times i$ metros, onde i é o número do andar tipo;
- todos os pilares são engastados na fundação;
- a laje é suposta simplesmente apoiada nos pilares;
- a laje está submetida a uma carga q superficial uniformemente distribuída;
- os pilares estão submetidos em cada andar tipo a forças concentradas equivalentes ao peso do edifício acima do andar tipo;
- o material utilizado nas lajes e pilares é homogêneo, isotrópico e tem comportamento elástico-linear com módulo de elasticidade longitudinal $E = 30 \times 10^6$ kN/m² e coeficiente de poisson $\nu = 0,2$;

Na figura 5.2 é mostrada a malha de elementos finitos de placa utilizada na análise da laje tipo. Seu exame mostra que:

- a malha é composta de 400 elementos finitos de placa com dimensões 50 cm x 50 cm;
- nesta malha existem 441 nós;
- os nós assinalados com quadrados representam os pilares (P1, P2,...,P9);
- para o estudo do comportamento mecânico da laje da estrutura foram destacados os nós 6, 111 e 116.

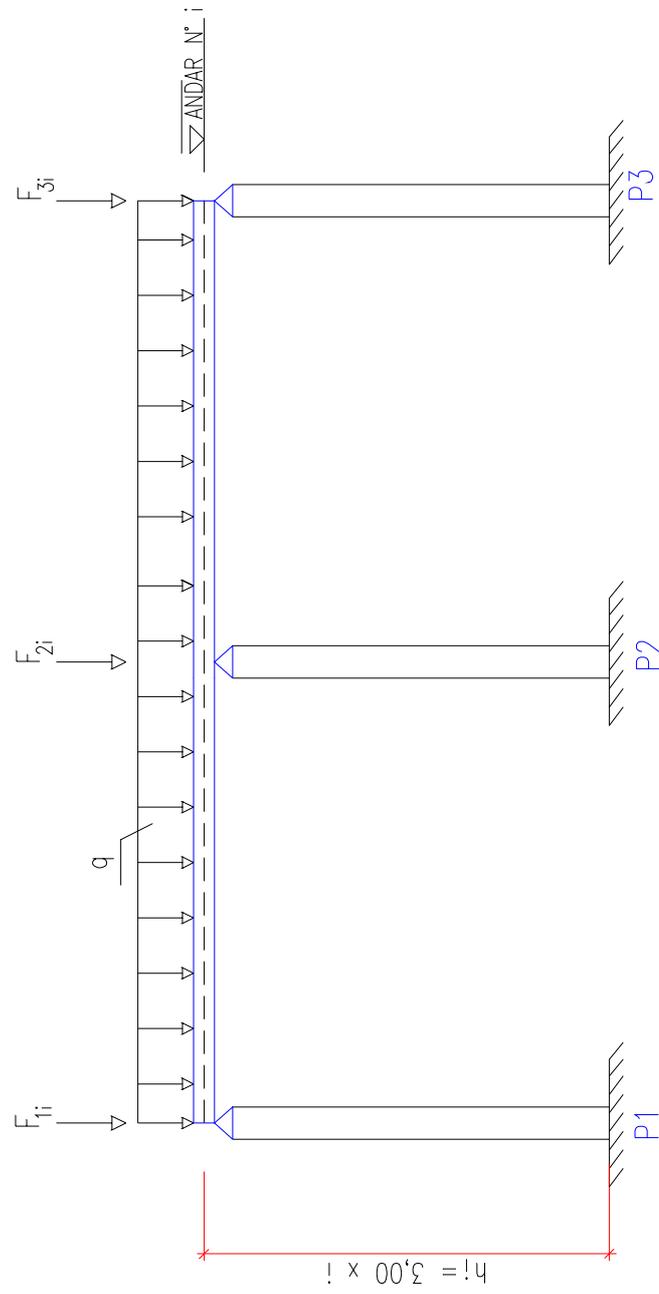


FIGURA 5.1 – Modelo LAJE-MOL

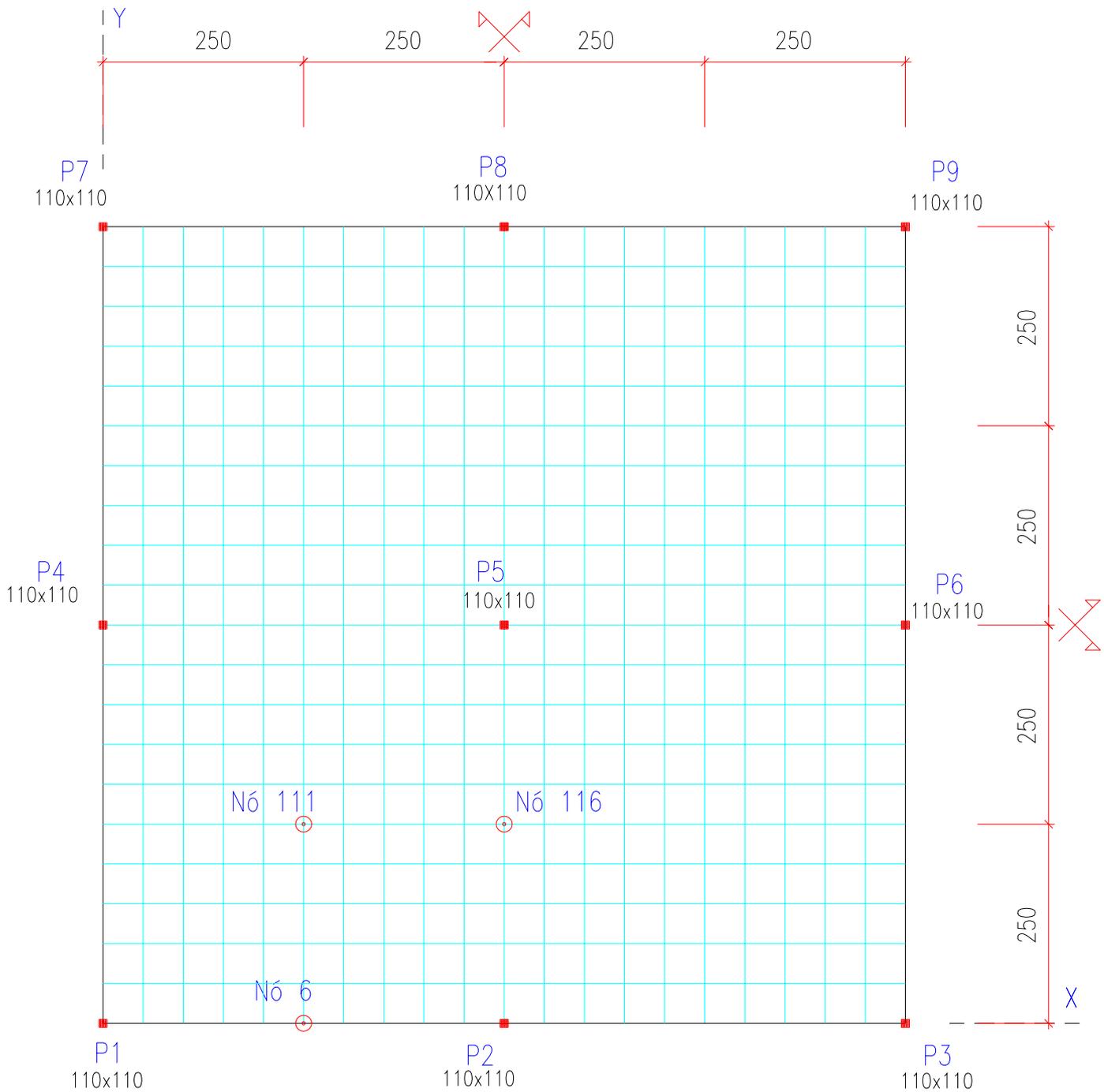


FIGURA 5.2 – Malha dos nós e elementos finitos da laje tipo (cotas e medidas em centímetros)

5.2 - CARREGAMENTO

O carregamento do modelo LAJE-MOL possui as seguintes características:

- a laje tipo está submetida a uma carga superficial padrão $q = 15 \text{ kN/m}^2$ uniformemente distribuída;
- mesmo com a variação da espessura da laje, a carga $q = 15 \text{ kN/m}^2$ permanece inalterada;
- todos os pilares são carregados com uma força concentrada no nível do andar tipo;
- as forças concentradas nos pilares representam o peso do edifício acima do pavimento tipo que está sendo calculado.

O cálculo destas forças concentradas obedeceu ao seguinte procedimento:

- inicialmente foram calculadas as reações de apoio da laje tipo, supondo que os pilares fossem infinitamente rígidos;
- essas reações foram denominadas $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8$ e R_9 , que correspondem aos pilares P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8 e P9 respectivamente;
- os valores destas reações são:

$$R_1 = R_3 = R_7 = R_9 = 58,73 \text{ kN},$$

$$R_2 = R_4 = R_6 = R_8 = 170,82 \text{ kN e}$$

$$R_5 = 581,80 \text{ kN};$$

- essas reações foram acumuladas de cima para baixo a partir do 40º andar até o andar imediatamente superior ao andar tipo que está sendo analisado;
- as forças acumuladas aplicadas aos pilares foram denominadas $F_{1i}, F_{2i}, F_{3i}, F_{4i}, F_{5i}, F_{6i}, F_{7i}, F_{8i}$ e F_{9i} , onde i é o número do andar tipo a ser analisado; elas correspondem, respectivamente, aos pilares P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8 e P9;
- seus valores, para cada andar tipo i , foram obtidos a partir das seguintes expressões:

$$F_{1i} = (40 - i) \times R_1$$

$$F_{2i} = (40 - i) \times R_2$$

$$F_{3i} = (40 - i) \times R_3 \quad (5.1)$$

$$F_{4i} = (40 - i) \times R_4$$

$$F_{5i} = (40 - i) \times R_5$$

$$F_{6i} = (40 - i) \times R_6$$

$$F_{7i} = (40 - i) \times R_7$$

$$F_{8i} = (40 - i) \times R_8$$

$$F_{9i} = (40 - i) \times R_9;$$

- pela simetria do edifício pode-se dizer que:

$$F_{1i} = F_{3i} = F_{7i} = F_{9i} \text{ e}$$

$$F_{2i} = F_{4i} = F_{6i} = F_{8i}.$$

Neste trabalho a laje tipo foi analisada nos seguintes andares: 4°, 8°, 12°, 16°, 20°, 24°, 28°, 32°, 36° e 40° .

Na tabela abaixo são mostradas as forças concentradas acumuladas, em todos os pilares, nos andares tipos analisados:

TABELA 5.1 – Forças Concentradas Acumuladas nos Pilares

Andar tipo (i)	$F_{1i}=F_{3i}=F_{7i}=F_{9i}$ (kN)	$F_{2i}=F_{4i}=F_{6i}=F_{8i}$ (kN)	F_{5i} (kN)
4	2114,28	6149,52	20944,80
8	1879,36	5466,24	18617,60
12	1644,44	4782,96	16290,40
16	1409,52	4099,68	13963,20
20	1174,60	3416,40	11636,00
24	939,68	2733,12	9308,80
28	704,76	2049,84	6981,60
32	469,84	1366,56	4654,40
36	234,92	683,28	2327,20
40	0,00	0,00	0,00

5.3 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item, foram feitas análises comparativas dos resultados obtidos através dos processamentos realizados. Os nós destacados na figura 5.2 foram os nós escolhidos para se observar a variação dos esforços, deslocamentos e reações de apoio da laje tipo. Os processamentos foram feitos usando o programa PLENOR (PITANGUEIRA e VASCONCELLOS FILHO, 1999).

Para efeito de comparação foram calculados valores de:

- momentos fletores M_x e M_y ;
- momento de torção M_{xy} ;
- recalques diferenciais entre os pilares;
- reações verticais de apoio.

TABELA 5.2 – Esforços no nó 6 na laje de 15 centímetros

1 Andar	2 M_x (kN.m/m)	3 M_y (kN.m/m)	4 M_{xy} (kN.m/m)	5 $\Delta\%M_x$	6 $\Delta\%M_y$	7 $\Delta\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	31,81	0	3,85	0,0	0	0,0
4 ^o .	33,81	0	5,05	6,3	0	31,2
8 ^o .	35,37	0	5,98	11,2	0	55,3
12 ^o .	36,49	0	6,64	14,7	0	72,5
16 ^o .	37,18	0	7,04	16,9	0	82,9
20 ^o .	37,44	0	7,18	17,7	0	86,5
24 ^o .	37,27	0	7,07	17,2	0	83,6
28 ^o .	36,66	0	6,70	15,2	0	74,0
32 ^o .	35,65	0	6,10	12,1	0	58,4
36 ^o .	34,19	0	5,24	7,5	0	36,1
40 ^o .	32,34	0	4,15	1,7	0	7,8

(*) – Valores de referência: não existe laje no andar 0^o do edifício; todavia, uma laje “virtual” foi colocada no andar 0^o, com apoios infinitamente rígidos, a qual foi calculada para que se pudesse fazer comparações com a laje tipo posicionada nos diversos andares do edifício.

Na tabela 5.2 pode-se ver os esforços obtidos no nó 6 da malha representada na figura 5.2. A espessura da laje utilizada foi de 15 cm. A coluna um da tabela 5.2 mostra a posição da laje tipo no edifício. As colunas dois, três e quatro mostram, respectivamente, os valores de M_x , M_y e M_{xy} .

Nas três últimas colunas, têm-se as diferenças percentuais entre momentos fletores e de torção obtidos calculando-se a laje tipo com apoios elásticos e rígidos. Os valores das diferenças percentuais ($\Delta\%$) foram obtidos através da expressão:

$$\Delta\% = \frac{M - M_o}{|M_o|} \quad (5.2)$$

onde:

- M representa M_x , M_y ou M_{xy} calculados na laje tipo com apoios elásticos (andar $\neq 0^o$);
- M_o representa M_x , M_y ou M_{xy} calculados na laje tipo com apoios rígidos (andar $= 0^o$).

Na coluna 2 da tabela 5.2, tem-se o momento fletor M_x . Nela pode-se ver que M_x cresce gradualmente da fundação (0^o andar) até o 20^o andar, quando atinge um valor máximo de 37,44 kN.m/m. Depois, M_x decresce com o aumento do número de andares até atingir o valor de 32,34 kN.m/m no 40^o andar, que é bem próximo de seu valor inicial na fundação.

Na coluna 3 tem-se o momento fletor M_y . Ao longo da borda onde se localiza o nó 6, os valores obtidos do momento fletor M_y são bem próximos de zero, podendo ser considerados nulos.

Na coluna 4 tem-se o momento torsor M_{xy} . Nesta coluna pode-se ver que o momento torsor cresce ao longo da altura do edifício de modo similar ao momento fletor M_x na coluna 2, isto é, cresce gradualmente quando a laje tipo está entre o 0^o e o 20^o andar e depois

decrece quando ela está entre o 20^o. e o 40^o. andar. O valor máximo de 7,18 kN.m/m é alcançado no 20^o. andar.

Na coluna 5 da tabela 5.2, pode-se ver a diferença percentual do momento fletor M_x . Nela observa-se que a diferença percentual aumenta gradativamente da fundação ao 20^o. andar, chegando ao valor máximo de 17,7%. A partir do 20^o. andar a diferença percentual vai diminuindo até o 40^o. andar, quando se tem uma pequena diferença de 1,7%.

A diferença máxima $\Delta\%M_x$ encontrada de 17,7%, apesar de importante, não chega a ser alarmante. Serve, todavia, como uma informação sobre o comportamento da laje.

Na coluna 6 têm-se as diferenças percentuais $\Delta\%M_y$. Nela considera-se que os valores das diferenças percentuais são nulos, porque os valores de M_y computados são bem próximos de zero.

Na coluna 7, onde se têm as diferenças percentuais do momento torsor M_{xy} , pode-se ver que a variação das diferenças percentuais é similar à variação de $\Delta\%M_x$, ou seja, os valores aumentam até o 20^o. andar e depois diminuem. O que se deve levar em conta no caso de $\Delta\%M_{xy}$ é que, apesar das diferenças serem muito maiores que as encontradas em $\Delta\%M_x$, as mesmas acabam não sendo muito representativas. Isto porque os valores de M_{xy} que servem como base para o cálculo de $\Delta\%M_{xy}$ são pequenos e, por isso mesmo, acabam não afetando muito o comportamento da laje.

TABELA 5.3 – Esforços no nó 111 na laje de 15 centímetros

1 Andar	2 M_x (kN.m/m)	3 M_y (kN.m/m)	4 M_{xy} (kN.m/m)	5 $\Delta\%M_x$	6 $\Delta\%M_y$	7 $\Delta\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	21,28	21,28	-1,56	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	23,30	23,30	-0,11	9,5	9,5	92,9
8 ^o .	24,87	24,87	1,01	16,9	16,9	164,7
12 ^o .	25,99	25,99	1,81	22,1	22,1	216,0
16 ^o .	26,69	26,69	2,30	25,4	25,4	247,4
20 ^o .	26,95	26,95	2,47	26,6	26,6	258,3
24 ^o .	26,77	26,77	2,34	25,8	25,8	250,0
28 ^o .	26,16	26,16	1,90	22,9	22,9	221,8
32 ^o .	25,14	25,14	1,17	18,1	18,1	175,0
36 ^o .	23,67	23,67	0,13	11,2	11,2	108,3
40 ^o .	21,81	21,81	-1,19	2,5	2,5	23,7

(*) – Valores de referência.

A tabela 5.3 é análoga à tabela 5.2 e refere-se ao nó 111.

Na coluna 2 da tabela 5.3, tem-se o momento fletor M_x . Nela pode-se ver que M_x cresce gradualmente até o 20^o andar. Tem-se um valor de 21,28 kN.m/m na fundação e de 26,95 kN.m/m no 20^o andar. Depois M_x decresce até o 40^o andar, atingindo um valor de 21,81 kN.m/m.

Na coluna 3 têm-se que os valores de M_y são os mesmos de M_x , devido ao fato do nó 111 se localizar sobre um eixo de simetria diagonal.

Na coluna 4 têm-se os valores de M_{xy} . Neste ponto da laje, o momento torsor varia ao longo dos andares da mesma forma que os momentos fletores, atingindo um valor máximo de 2,47 kN.m/m no 20^o andar.

Analisando as diferenças percentuais nos momentos M_x e M_y nas colunas 5 e 6 da tabela 5.3, vê-se que o mesmo comportamento encontrado no nó 6 também é encontrado no nó 111. Isto é, a diferença percentual é máxima quando a laje tipo é posicionada no 20^o andar .

No caso do nó 111, as diferenças percentuais $\Delta\%M_x$ e $\Delta\%M_y$ são iguais devido à simetria e chegam à um valor máximo de 26,6%.

As diferenças percentuais no nó 111 devem ser analisadas com cuidado. A diferença máxima encontrada $\Delta\%M_x = \Delta\%M_y = 26,6\%$ é um valor que pode ser considerado ligeiramente alto e não deve ser ignorado.

As mesmas ponderações feitas para o nó 6, a respeito do momento torsor M_{xy} , podem ser feitas novamente para o nó 111. Os valores de M_{xy} são ainda menores e não afetam muito, portanto, a análise da laje.

TABELA 5.4 – Esforços no nó 116 na laje de 15 centímetros

1 Andar	2 M_x (kN.m/m)	3 M_y (kN.m/m)	4 M_{xy} (kN.m/m)	5 $\Delta\%M_x$	6 $\Delta\%M_y$	7 $\Delta\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	-11,92	31,46	0	0,0	0,0	0
4 ^o .	-8,28	33,65	0	30,5	7,0	0
8 ^o .	-5,44	35,35	0	54,4	12,4	0
12 ^o .	-3,40	36,58	0	71,5	16,3	0
16 ^o .	-2,15	37,33	0	82,0	18,7	0
20 ^o .	-1,68	37,61	0	85,9	19,5	0
24 ^o .	-1,99	37,42	0	83,3	18,9	0
28 ^o .	-3,11	36,75	0	73,9	16,8	0
32 ^o .	-4,94	35,65	0	58,6	13,3	0
36 ^o .	-7,60	34,05	0	36,2	8,2	0
40 ^o .	-10,96	32,03	0	8,1	1,8	0

(*) – Valores de referência.

A tabela 5.4 é análoga às tabelas 5.2 e 5.3 e refere-se ao nó 116.

Na coluna 2 da tabela 5.4 têm-se os valores de M_x . Na fundação (0^o andar) tem-se o valor mínimo de -11,92 kN.m/m e no 20^o andar tem-se o valor máximo de -1,68 kN.m/m.

Na coluna 3, onde se têm os valores de M_y , pode-se ver novamente que quando a laje tipo está posicionada no 20^o andar o valor de M_y é máximo e atinge o valor de 37,61 kN.m/m.

Os valores obtidos de M_{xy} na coluna 4 são muito pequenos, tendo valores bem próximos de zero e por isso foram considerados nulos. Na verdade, serão nulos todos os valores de M_{xy} ao longo do alinhamento P2:P8, onde se localiza o nó 116, devido à simetria da laje tipo.

Na coluna 5, pode-se ver que as diferenças percentuais $\Delta\%M_x$ são muito grandes, ocorrendo variações percentuais que chegam a atingir na altura do 20º andar o valor máximo de 85,9%. Essas variações percentuais mostram que é preciso dar atenção especial aos valores de M_x neste ponto da laje; como se verá, em certos casos é possível que este momento troque de sinal.

Na coluna 6 pode-se ver que as diferenças percentuais $\Delta\%M_y$ não são tão grandes quanto as $\Delta\%M_x$. Os valores de M_y atingem um máximo de variação percentual no 20º andar de 19,5%. Como os valores de M_y são altos deve-se, todavia, ficar atento a eles.

Na coluna 7 têm-se as diferenças percentuais $\Delta\%M_{xy}$. Como os valores de M_{xy} da coluna 4 que servem de base de cálculo para as diferenças percentuais são nulos, considera-se que todos os valores $\Delta\%M_{xy}$ também são nulos.

TABELA 5.5 – Recalques diferenciais nos pilares com laje de 15 centímetros

1 Andar	2 U_{P1} (mm)	3 U_{P2} (mm)	4 U_{P5} (mm)	5 $\Delta_{P5/P2}$ (mm)	6 $\Delta_{P5/P1}$ (mm)
0 ^o . (*)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 ^o .	0,72	2,11	7,16	5,05	6,44
8 ^o .	1,29	3,77	12,76	8,99	11,47
12 ^o .	1,70	4,97	16,79	11,82	15,09
16 ^o .	1,96	5,72	19,27	13,55	17,32
20 ^o .	2,06	6,02	20,21	14,19	18,15
24 ^o .	2,00	5,85	19,60	13,75	17,60
28 ^o .	1,78	5,21	17,40	12,19	15,63
32 ^o .	1,41	4,14	13,79	9,65	12,39
36 ^o .	0,87	2,57	8,54	5,97	7,67
40 ^o .	0,18	0,51	1,71	1,20	1,53

(*) – Valores de referência.

Na coluna 1 da tabela 5.5 têm-se a posição da laje tipo no edifício. Nas colunas 2, 3 e 4 têm-se os deslocamentos verticais U_{P1} , U_{P2} e U_{P5} (positivos para baixo) nos pilares P1, P2 e P5 respectivamente; nas colunas 5 e 6 têm-se os recalques diferenciais de P2 e P1 em relação a P5. Estes recalques diferenciais foram calculados da seguinte maneira:

- $\Delta_{P5/P2} = U_{P5} - U_{P2}$, onde U_{P5} é o deslocamento vertical no pilar P5 e U_{P2} é o deslocamento vertical no pilar P2;
- $\Delta_{P5/P1} = U_{P5} - U_{P1}$, onde U_{P5} é o deslocamento vertical no pilar P5 e U_{P1} é o deslocamento vertical no pilar P1.

Nas colunas 2, 3 e 4 pode-se ver que o comportamento dos três pilares é semelhante quando a laje tipo varia seu posicionamento ao longo da altura do edifício. Na fundação tem-se um deslocamento vertical igual a zero em todos os pilares porque, neste caso, os apoios são considerados infinitamente rígidos. Entre o 4^o. andar até o 20^o. andar os deslocamentos crescem gradualmente até atingirem um máximo no 20^o. andar e, em seguida, passam a decrescer até o 40^o. andar.

Apesar de terem o mesmo comportamento descrito acima, os três pilares não possuem os mesmos deslocamentos. O pilar P5, que absorve mais carga, acaba se deslocando mais que o pilar P2 que, por sua vez, desloca-se mais que o pilar P1.

Nas colunas 5 e 6 têm-se os recalques diferenciais dos pilares P2 e P1 em relação ao pilar P5. Nota-se que os recalques diferenciais são significativos chegando a alcançar o valor de 18,15 mm entre P1 e P5 no 20^o andar.

TABELA 5.6 – Reações de apoio nos pilares com laje de 15 centímetros

1 Andar	2 R _{P1} (kN)	3 R _{P2} (kN)	4 R _{P5} (kN)	5 $\Delta\%R_{P1}$	6 $\Delta\%R_{P2}$	7 $\Delta\%R_{P5}$
0 ^o . (*)	58,73	170,82	581,80	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	58,54	179,33	548,51	-0,3	5,0	-5,7
8 ^o .	58,40	185,95	522,60	-0,6	8,9	-10,2
12 ^o .	58,31	190,68	504,01	-0,7	11,6	-13,4
16 ^o .	58,28	193,56	492,65	-0,8	13,3	-15,3
20 ^o .	58,28	194,60	488,47	-0,8	13,9	-16,0
24 ^o .	58,32	193,83	491,41	-0,7	13,5	-15,5
28 ^o .	58,38	191,20	501,67	-0,6	11,9	-13,8
32 ^o .	58,47	186,93	518,38	-0,4	9,4	-10,9
36 ^o .	58,58	180,77	542,59	-0,3	5,8	-6,7
40 ^o .	58,70	173,02	573,10	-0,1	1,3	-1,5

(*) – Valores de referência.

Na tabela 5.6, a posição da laje tipo ao longo do edifício é mostrada na coluna 1. As reações de apoio R_{P1}, R_{P2} e R_{P5}, nos pilares P1, P2 e P5, são mostradas nas colunas 2, 3 e 4, respectivamente. Devido à simetria, as reações de apoio nos pilares P3, P7 e P9 são iguais às reações em P1 e as reações de apoio nos pilares P4, P6 e P8 são iguais às reações em P2.

Deve ser enfatizado aqui, que as reações de apoio R_{Pi} mostradas na tabela 5.6 e na figura 5.3 são iguais e opostas às cargas aplicadas nos pilares pela laje tipo.

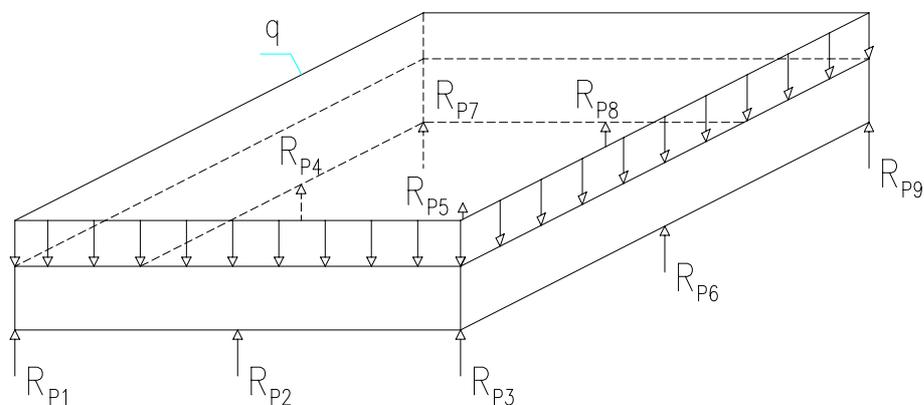


FIGURA 5.3 – Reações de apoio na laje tipo

Nas colunas 5, 6 e 7 têm-se as diferenças percentuais $\Delta\%R_{P1}$, $\Delta\%R_{P2}$ e $\Delta\%R_{P5}$ respectivamente.

As diferenças percentuais nos pilares foram obtidas tendo como base a expressão abaixo, semelhante àquela descrita anteriormente para os momentos fletores e momento de torção,

$$\Delta\% = \frac{R_P - R_o}{|R_o|} \quad (5.3)$$

onde:

- R_P representa a reação de apoio em P1, P2 ou P5 calculada na laje tipo com apoios elásticos (andar $\neq 0^\circ$);
- R_o representa a reação de apoio em P1, P2 ou P5 calculada na laje tipo com apoios rígidos (andar = 0°).

Na coluna 2 tem-se a reação de apoio no pilar P1, onde os valores encontrados se mantiveram quase constantes ao longo da altura do edifício. Houve uma pequena

diminuição dos valores das reações entre a fundação e o 20^o andar e depois os valores aumentam até o topo do edifício.

A reação de apoio no pilar P2 é mostrada na coluna 3. Na laje tipo com apoios infinitamente rígidos (0^o andar), a reação em P2 é de 170,82 kN e quando ela está no 20^o andar, P2 reage com 194,60 kN, sendo que a reação de apoio aumenta gradualmente até o 20^o andar. A partir daí ela diminui atingindo, no 40^o andar, o valor de 173,02 kN.

Na coluna 4, o comportamento das reações de apoio no pilar P5 é contrário ao do pilar P2. As reações diminuem gradualmente da fundação até o 20^o andar e, em seguida, elas passam a crescer até a altura do 40^o andar.

Os módulos das diferenças percentuais das reações nos pilares (colunas 5, 6 e 7) também obedecem ao mesmo comportamento observado nos momentos fletores da laje tipo, isto é, sofrem um aumento gradativo que vai da fundação até o 20^o andar, quando se tem uma máxima variação percentual. Depois, na medida em que aumenta a altura, diminui o módulo da diferença percentual.

A variação do módulo da diferença percentual no pilar P1 é muito pequena, chegando a um máximo de $|-0,8|\%$. Já nos pilares P2 e P5, a variação da diferença percentual é bem mais significativa e possui os valores respectivos de 13,9% e $|-16,0|\%$.

TABELA 5.7 - Esforços no nó 6 na laje de 20 centímetros

1 Andar	2 M_x (kN.m/m)	3 M_y (kN.m/m)	4 M_{xy} (kN.m/m)	5 $\Delta\%M_x$	6 $\Delta\%M_y$	7 $\Delta\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	31,81	0	3,85	0,0	0	0,0
4 ^o .	36,53	0	6,67	14,8	0	73,2
8 ^o .	40,20	0	8,83	26,4	0	129,4
12 ^o .	42,83	0	10,33	34,6	0	168,3
16 ^o .	44,43	0	11,21	39,7	0	191,2
20 ^o .	45,01	0	11,48	41,5	0	198,2
24 ^o .	44,59	0	11,17	40,2	0	190,1
28 ^o .	43,14	0	10,29	35,6	0	167,3
32 ^o .	40,77	0	8,89	28,2	0	130,9
36 ^o .	37,35	0	6,94	17,4	0	80,3
40 ^o .	33,04	0	4,53	3,9	0	17,7

(*) – Valores de referência.

TABELA 5.8 - Esforços no nó 6 na laje de 25 centímetros

1 Andar	2 M_x (kN.m/m)	3 M_y (kN.m/m)	4 M_{xy} (kN.m/m)	5 $\Delta\%M_x$	6 $\Delta\%M_y$	7 $\Delta\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	31,81	0	3,85	0,0	0	0,0
4 ^o .	41,00	0	9,30	28,9	0	141,6
8 ^o .	48,08	0	13,35	51,1	0	246,8
12 ^o .	53,12	0	16,07	67,0	0	317,4
16 ^o .	56,14	0	17,57	76,5	0	356,4
20 ^o .	57,19	0	17,93	79,8	0	365,7
24 ^o .	56,31	0	17,21	77,0	0	347,0
28 ^o .	53,46	0	15,47	68,1	0	301,8
32 ^o .	48,89	0	12,86	53,7	0	234,0
36 ^o .	42,34	0	9,32	33,1	0	142,1
40 ^o .	34,14	0	5,04	7,3	0	30,9

(*) – Valores de referência.

TABELA 5.9 - Esforços no nó 6 na laje de 30 centímetros

1 Andar	2 M_x (kN.m/m)	3 M_y (kN.m/m)	4 M_{xy} (kN.m/m)	5 $\Delta\%M_x$	6 $\Delta\%M_y$	7 $\Delta\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	31,81	0	3,85	0,0	0	0,0
4 ^o .	47,60	0	13,11	49,6	0	240,5
8 ^o .	59,65	0	19,71	87,5	0	411,9
12 ^o .	68,10	0	23,92	114,1	0	521,3
16 ^o .	73,08	0	26,02	129,7	0	575,8
20 ^o .	74,68	0	26,22	134,8	0	581,0
24 ^o .	73,03	0	24,75	129,6	0	542,9
28 ^o .	68,10	0	21,75	114,1	0	464,9
32 ^o .	60,33	0	17,52	89,7	0	355,1
36 ^o .	49,34	0	12,03	55,1	0	212,5
40 ^o .	35,68	0	5,6	12,2	0	45,5

(*) – Valores de referência.

Nas tabelas 5.7, 5.8 e 5.9 têm-se os momentos fletores e de torção no nó 6. Estas tabelas são análogas à tabela 5.2 mas, agora, as espessuras da laje tipo são de 20, 25 e 30 centímetros.

Note-se que os valores de M_x e M_{xy} , bem como de $\Delta\%M_x$ e $\Delta\%M_{xy}$, aumentam na medida em que se aumenta a espessura da laje. Provavelmente, isto ocorre em função da maior capacidade que a laje tem de redistribuir as cargas nos pilares, devido ao aumento da sua espessura. No mais, o mesmo comportamento observado em M_x , M_{xy} , $\Delta\%M_x$ e $\Delta\%M_{xy}$ na tabela 5.2 é observado nas tabelas 5.7, 5.8 e 5.9, isto é, os valores dos esforços e das diferenças percentuais crescem da fundação até um valor máximo no 20^o andar e depois decrescem até o 40^o andar.

O gráfico da figura 5.4 refere-se ao momento fletor M_x no nó 6 ao longo dos andares do edifício e foi gerado a partir de valores que se encontram nas tabelas 5.2, 5.7, 5.8 e 5.9.

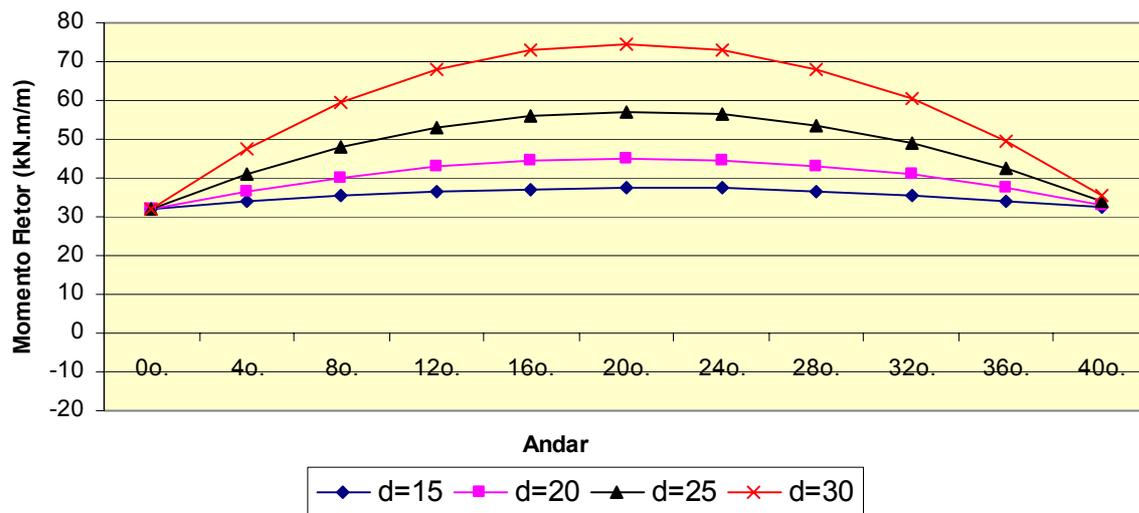


FIGURA 5.4 – Gráfico do momento fletor M_x – Nó 6 (*)

(*) – ver coluna 2 das tabelas 5.2, 5.7, 5.8 5.9.

TABELA 5.10 - Esforços no nó 111 na laje de 20 centímetros

1 Andar	2 M_x (kN.m/m)	3 M_y (kN.m/m)	4 M_{xy} (kN.m/m)	5 $\Delta\%M_x$	6 $\Delta\%M_y$	7 $\Delta\%M_{xy}$
0 ^{o.} (*)	21,28	21,28	-1,56	0,0	0,0	0,0
4 ^{o.}	26,04	26,04	1,85	22,4	22,4	218,6
8 ^{o.}	29,73	29,73	4,46	39,7	39,7	385,9
12 ^{o.}	32,36	32,36	6,29	52,1	52,1	503,2
16 ^{o.}	33,96	33,96	7,38	59,6	59,6	573,1
20 ^{o.}	34,53	34,53	7,73	62,3	62,3	595,5
24 ^{o.}	34,09	34,09	7,38	60,2	60,2	573,1
28 ^{o.}	32,62	32,62	6,31	53,3	53,3	504,5
32 ^{o.}	30,24	30,24	4,63	42,1	42,1	396,8
36 ^{o.}	26,81	26,81	2,24	26,0	26,0	243,6
40 ^{o.}	22,51	22,51	-0,72	5,8	5,8	53,8

(*) – Valores de referência.

TABELA 5.11 - Esforços no nó 111 na laje de 25 centímetros

1 Andar	2 M_x (kN.m/m)	3 M_y (kN.m/m)	4 M_{xy} (kN.m/m)	5 $\Delta\%M_x$	6 $\Delta\%M_y$	7 $\Delta\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	21,28	21,28	-1,56	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	30,53	30,53	5,03	43,5	43,5	422,4
8 ^o .	37,63	37,63	9,97	76,8	76,8	739,1
12 ^o .	42,63	42,63	13,35	100,3	100,3	955,8
16 ^o .	45,61	45,61	15,25	114,3	114,3	1077,6
20 ^o .	46,60	46,60	15,77	119,0	119,0	1110,9
24 ^o .	45,67	45,67	14,96	114,6	114,6	1059,0
28 ^o .	42,79	42,79	12,87	101,1	101,1	925,0
32 ^o .	38,21	38,21	9,69	79,6	79,6	721,2
36 ^o .	31,70	31,70	5,30	49,0	49,0	439,7
40 ^o .	23,58	23,58	-0,06	10,8	10,8	96,2

(*) – Valores de referência.

TABELA 5.12 - esforços no nó 111 na laje de 30 centímetros

1 Andar	2 M_x (kN.m/m)	3 M_y (kN.m/m)	4 M_{xy} (kN.m/m)	5 $\Delta\%M_x$	6 $\Delta\%M_y$	7 $\Delta\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	21,28	21,28	-1,56	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	37,15	37,15	9,67	74,6	74,6	719,9
8 ^o .	49,16	49,16	17,82	131,0	131,0	1242,3
12 ^o .	57,47	57,47	23,16	170,1	170,1	1584,6
16 ^o .	62,28	62,28	25,96	192,7	192,7	1764,1
20 ^o .	63,72	63,72	26,45	199,4	199,4	1795,5
24 ^o .	61,94	61,94	24,83	191,1	191,1	1691,7
28 ^o .	56,96	56,96	21,22	167,7	167,7	1460,3
32 ^o .	49,22	49,22	15,99	131,3	131,3	1125,0
36 ^o .	38,40	38,40	9,03	80,5	80,5	678,8
40 ^o .	25,05	25,05	0,73	17,7	17,7	146,8

(*) – Valores de referência.

As tabelas 5.10, 5.11 e 5.12 são análogas à tabela 5.3 e referem-se ao nó 111 mas, agora, as espessuras da laje tipo são de 20, 25 e 30 centímetros, respectivamente.

Os mesmos comentários feitos em relação à tabela 5.3 podem ser repetidos para as tabelas 5.10, 5.11 e 5.12. Deve-se destacar, contudo, que nas tabelas 5.10, 5.11 e 5.12 os valores de M_x , M_y , M_{xy} , $\Delta\%M_x$, $\Delta\%M_y$ e $\Delta\%M_{xy}$ são superiores aos da tabela 5.3.

O gráfico da figura 5.5 foi gerado a partir de valores que se encontram nas tabelas 5.3, 5.10, 5.11 e 5.12. Nele mostra-se a variação dos momentos fletores M_x e M_y do nó 111 ao longo dos andares do edifício.

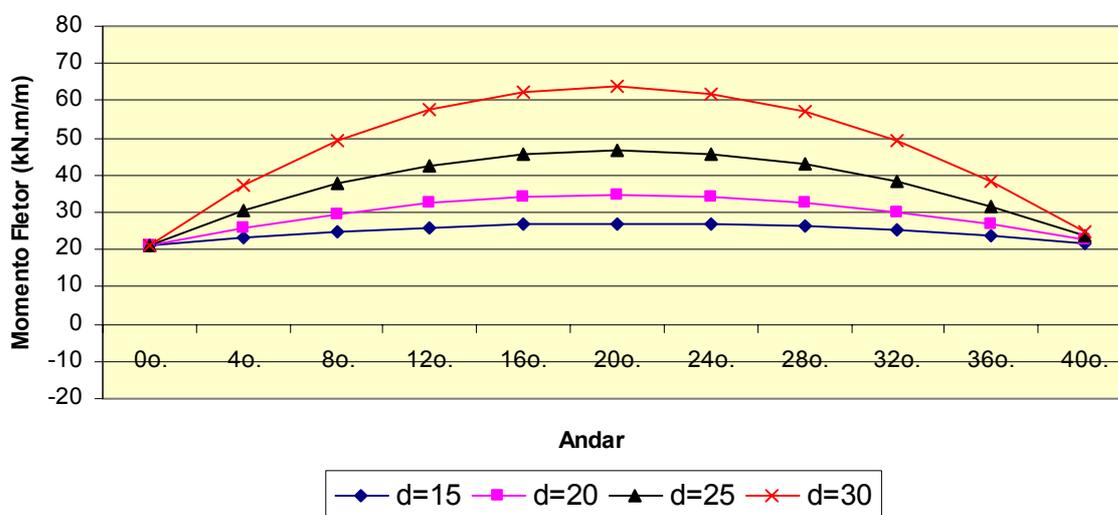


FIGURA 5.5 – Gráfico dos momentos fletores M_x e M_y – Nó 111 (*)

(*) – ver colunas 2 e 3 das tabelas 5.3, 5.10, 5.11 e 5.12.

TABELA 5.13 - Esforços no nó 116 na laje de 20 centímetros

1 Andar	2 M_x (kN.m/m)	3 M_y (kN.m/m)	4 M_{xy} (kN.m/m)	5 $\Delta\%M_x$	6 $\Delta\%M_y$	7 $\Delta\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	-11,92	31,46	0	0,0	0,0	0
4 ^o .	-3,32	36,63	0	72,1	16,4	0
8 ^o .	3,34	40,63	0	128,0	29,1	0
12 ^o .	8,10	43,48	0	168,0	38,2	0
16 ^o .	10,98	45,19	0	192,1	43,6	0
20 ^o .	12,01	45,80	0	200,8	45,6	0
24 ^o .	11,22	45,31	0	194,1	44,0	0
28 ^o .	8,56	43,71	0	171,8	38,9	0
32 ^o .	4,26	41,13	0	135,7	30,7	0
36 ^o .	-1,93	37,43	0	83,8	19,0	0
40 ^o .	-9,71	32,78	0	18,5	4,2	0

(*) – Valores de referência.

TABELA 5.14 - Esforços no nó 116 na laje de 25 centímetros

1 Andar	2 M_x (kN.m/m)	3 M_y (kN.m/m)	4 M_{xy} (kN.m/m)	5 $\Delta\%M_x$	6 $\Delta\%M_y$	7 $\Delta\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	-11,92	31,46	0	0,0	0,0	0
4 ^o .	4,80	41,50	0	140,3	31,9	0
8 ^o .	17,61	49,17	0	247,7	56,3	0
12 ^o .	26,65	54,56	0	323,6	73,4	0
16 ^o .	32,01	57,73	0	368,5	83,5	0
20 ^o .	33,79	58,75	0	383,5	86,7	0
24 ^o .	32,09	57,70	0	369,2	83,4	0
28 ^o .	26,88	54,56	0	325,5	73,4	0
32 ^o .	18,61	49,61	0	256,1	57,7	0
36 ^o .	6,86	42,61	0	157,6	35,4	0
40 ^o .	-7,77	33,91	0	34,8	7,8	0

(*) – Valores de referência.

TABELA 5.15 - Esforços no nó 116 na laje de 30 centímetros

1 Andar	2 M_x (kN.m/m)	3 M_y (kN.m/m)	4 M_{xy} (kN.m/m)	5 $\Delta\%M_x$	6 $\Delta\%M_y$	7 $\Delta\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	-11,92	31,46	0	0,0	0,0	0
4 ^o .	16,77	48,67	0	240,7	54,7	0
8 ^o .	38,43	61,59	0	422,4	95,8	0
12 ^o .	53,41	70,46	0	548,1	124,0	0
16 ^o .	62,04	75,50	0	620,5	140,0	0
20 ^o .	64,59	76,91	0	641,9	144,5	0
24 ^o .	61,34	74,87	0	614,6	138,0	0
28 ^o .	52,34	69,45	0	539,1	120,8	0
32 ^o .	38,38	61,13	0	422,0	94,3	0
36 ^o .	18,89	49,59	0	258,5	57,6	0
40 ^o .	-5,15	35,43	0	56,8	12,6	0

(*) – Valores de referência.

As tabelas 5.13, 5.14 e 5.15 são análogas à tabela 5.4 e referem-se ao nó 116 mas, agora, as espessuras da laje tipo são de 20, 25 e 30 centímetros, respectivamente.

Os mesmos comentários feitos em relação à tabela 5.4 podem ser repetidos para as tabelas 5.13, 5.14 e 5.15. Deve-se destacar, contudo, que nas tabelas 5.13, 5.14 e 5.15 os valores de M_x , M_y , $\Delta\%M_x$ e $\Delta\%M_y$ são superiores aos da tabela 5.4.

Os gráficos das figuras 5.6 e 5.7 foram gerados a partir de valores que se encontram nas tabelas 5.4, 5.13, 5.14 e 5.15. Neles são mostradas a variação dos momentos fletores M_x e M_y do nó 116 ao longo dos andares do edifício.

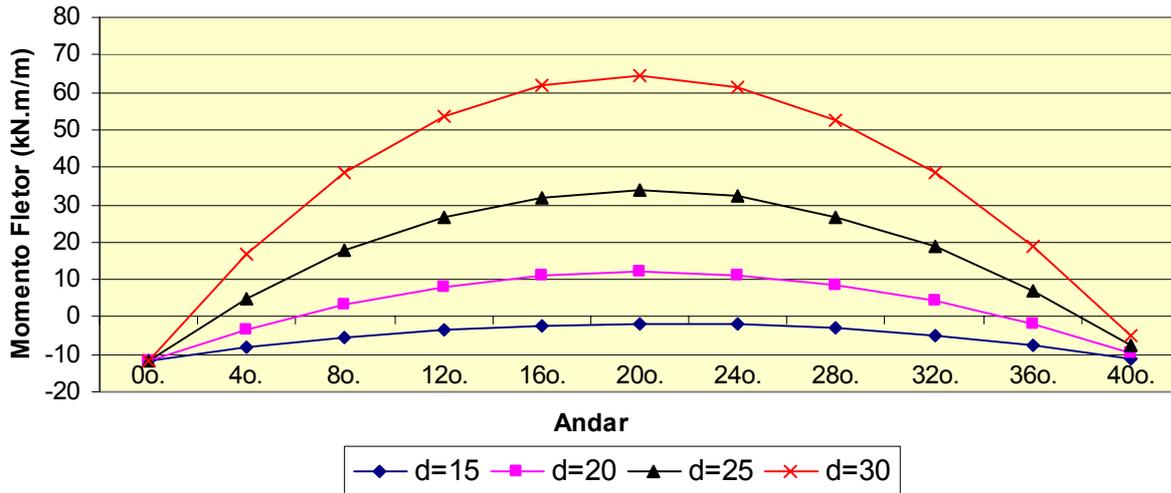


FIGURA 5.6 – Gráfico do momento fletor M_x – Nó 116 (*)

(*) – ver coluna 2 das tabelas 5. 4, 5.13, 5.14 e 5.15.

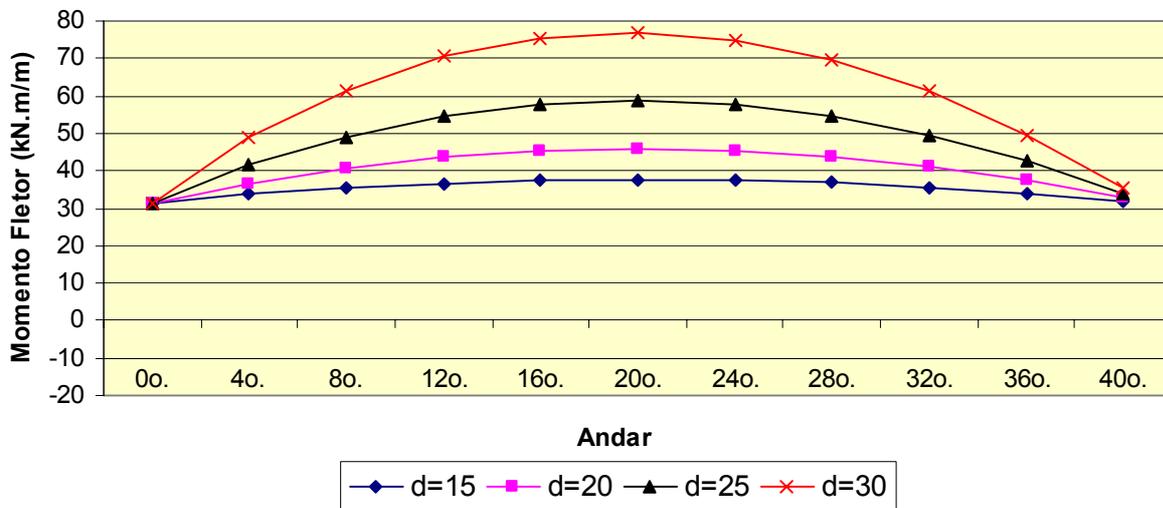


FIGURA 5.7 – Gráfico do momento fletor M_y – Nó 116 (*)

(*) – ver coluna 3 das tabelas 5. 4, 5.13, 5.14 e 5.15.

TABELA 5.16 – Recalques diferenciais nos pilares com laje de 20 centímetros

1 Andar	2 U_{P1} (mm)	3 U_{P2} (mm)	4 U_{P5} (mm)	5 $\Delta_{P5/P2}$ (mm)	6 $\Delta_{P5/P1}$ (mm)
0 ^o . (*)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 ^o .	0,72	2,11	7,15	5,04	6,43
8 ^o .	1,29	3,78	12,71	8,93	11,42
12 ^o .	1,70	5,00	16,69	11,19	14,99
16 ^o .	1,96	5,76	19,12	13,36	17,16
20 ^o .	2,05	6,07	20,00	13,93	17,95
24 ^o .	2,00	5,91	19,36	13,45	17,37
28 ^o .	1,78	5,27	17,16	11,89	15,39
32 ^o .	1,41	4,20	13,58	9,38	12,17
36 ^o .	0,87	2,61	8,39	5,78	7,52
40 ^o .	0,18	0,52	1,68	1,16	1,50

(*) – Valores de referência.

TABELA 5.17 – Recalques diferenciais nos pilares com laje de 25 centímetros

1 Andar	2 U_{P1} (mm)	3 U_{P2} (mm)	4 U_{P5} (mm)	5 $\Delta_{P5/P2}$ (mm)	6 $\Delta_{P5/P1}$ (mm)
0 ^o . (*)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 ^o .	0,72	2,12	7,13	5,01	6,40
8 ^o .	1,29	3,80	12,62	8,82	11,33
12 ^o .	1,70	5,04	16,52	11,48	14,82
16 ^o .	1,96	5,83	18,87	13,04	16,91
20 ^o .	2,06	6,15	19,68	13,53	17,63
24 ^o .	2,00	6,00	19,00	13,00	17,00
28 ^o .	1,78	5,36	16,79	11,43	15,01
32 ^o .	1,41	4,28	13,24	8,96	11,83
36 ^o .	0,88	2,66	8,17	5,51	7,29
40 ^o .	0,18	0,53	1,63	1,10	1,46

(*) – Valores de referência.

TABELA 5.18 – Recalques diferenciais nos pilares com laje de 30 centímetros

1 Andar	2 U_{P1} (mm)	3 U_{P2} (mm)	4 U_{P5} (mm)	5 $\Delta_{P5/P2}$ (mm)	6 $\Delta_{P5/P1}$ (mm)
0 ^o . (*)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 ^o .	0,72	2,13	7,09	4,96	6,37
8 ^o .	1,29	3,83	12,50	8,67	11,21
12 ^o .	1,70	5,10	16,29	11,19	14,58
16 ^o .	1,96	5,91	18,52	12,61	16,56
20 ^o .	2,06	6,26	19,24	12,98	17,18
24 ^o .	2,00	6,12	18,50	12,38	16,49
28 ^o .	1,79	5,48	16,29	10,81	14,50
32 ^o .	1,42	4,38	12,80	8,42	11,38
36 ^o .	0,88	2,73	7,87	5,14	6,99
40 ^o .	0,18	0,55	1,57	1,02	1,40

(*) – Valores de referência.

As tabelas 5.16, 5.17 e 5.18 são análogas à tabela 5.5 tendo como diferença as espessuras da laje tipo, agora de 20, 25 e 30 centímetros, respectivamente.

Analisando a coluna 2 das quatro tabelas de recalques diferenciais, nota-se que o deslocamento vertical do pilar P1 se manteve praticamente constante com o aumento da espessura da laje.

Na coluna 3, o pilar P2 teve um pequeno aumento no seu deslocamento vertical, com o aumento da espessura da laje. Na altura do 20^o andar, o deslocamento U_{P2} para as espessuras da laje tipo de 15, 20, 25 e 30 centímetros foram, respectivamente, de 6,02, 6,07, 6,15 e 6,26 milímetros.

Na coluna 4, o pilar P5 teve seu deslocamento vertical U_{P5} diminuído com o aumento da espessura da laje tipo. Na altura do 20^o andar, o deslocamento U_{P5} para as espessuras da laje tipo de 15, 20, 25 e 30 centímetros foram respectivamente de 20,21, 20,00, 19,68 e 19,24 milímetros.

Nas colunas 5 e 6, os recalques diferenciais $\Delta_{P5/P2}$ e $\Delta_{P5/P1}$ tiveram comportamento semelhante com o aumento da espessura da laje tipo. Tanto o recalque diferencial entre o pilar P5 e P2 como o entre P5 e P1 tiveram uma tendência de queda, com o aumento da espessura. Essa tendência de queda se deve ao fato de que a laje tipo, tendo sua rigidez aumentada, tende a uniformizar os deslocamentos verticais dos pilares diminuindo, assim, os recalques diferenciais.

Os gráficos das figuras 5.8 e 5.9 foram gerados a partir de valores que se encontram nas tabelas 5.5, 5.16, 5.17 e 5.18. Neles são mostrados a variação dos recalques diferenciais dos pilares ao longo dos andares do edifício.

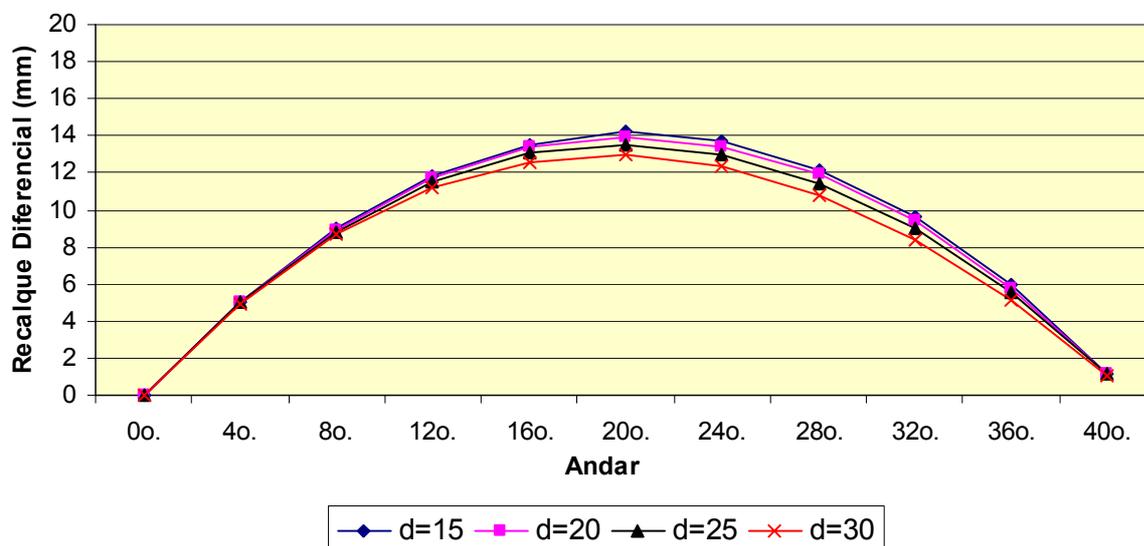


FIGURA 5.8 – Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P2 (*)

(*) – ver coluna 5 das tabelas 5.5, 5.16, 5.17 e 5.18.

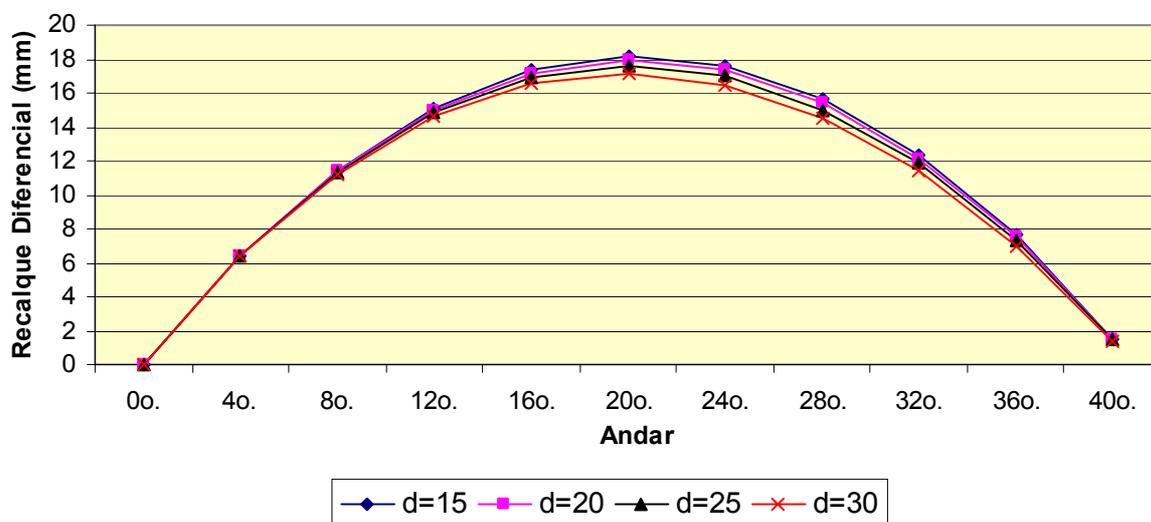


FIGURA 5.9 – Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P1 (*)

(*) – ver coluna 6 das tabelas 5.5, 5.16, 5.17 e 5.18.

TABELA 5.19 – Reações de apoio nos pilares com laje de 20 centímetros

1 Andar	2 R_{P1} (kN)	3 R_{P2} (kN)	4 R_{P5} (kN)	5 $\Delta\%R_{P1}$	6 $\Delta\%R_{P2}$	7 $\Delta\%R_{P5}$
0 ^{o.} (*)	58,73	170,82	581,80	0,0	0,0	0,0
4 ^{o.}	58,30	190,89	503,23	-0,7	11,7	-13,5
8 ^{o.}	58,05	206,29	442,64	-1,2	20,8	-23,9
12 ^{o.}	57,94	217,14	399,66	-1,3	27,1	-31,3
16 ^{o.}	57,95	223,57	373,92	-1,3	30,9	-35,7
20 ^{o.}	58,05	225,69	365,05	-1,2	32,1	-37,3
24 ^{o.}	58,20	223,63	372,70	-0,9	30,9	-35,9
28 ^{o.}	58,37	217,36	397,12	-0,6	27,2	-31,7
32 ^{o.}	58,53	207,42	436,21	-0,3	21,4	-25,0
36 ^{o.}	58,66	193,32	492,10	-0,1	13,2	-15,4
40 ^{o.}	58,73	175,78	561,98	0,0	2,9	-3,4

(*) – Valores de referência.

TABELA 5.20 – Reações de apoio nos pilares com laje de 25 centímetros

1 Andar	2 R _{P1} (kN)	3 R _{P2} (kN)	4 R _{P5} (kN)	5 $\Delta\%R_{P1}$	6 $\Delta\%R_{P2}$	7 $\Delta\%R_{P5}$
0 ^o . (*)	58,73	170,82	581,80	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	57,98	209,68	429,38	-1,3	22,7	-26,2
8 ^o .	57,72	238,87	313,65	-1,7	39,8	-46,1
12 ^o .	57,81	258,91	233,12	-1,6	51,6	-59,9
16 ^o .	58,14	270,27	186,36	-1,0	58,2	-68,0
20 ^o .	58,58	273,41	172,04	-0,3	60,1	-70,4
24 ^o .	59,03	268,75	188,89	0,5	57,3	-67,5
28 ^o .	59,37	256,44	236,77	1,1	50,1	-59,3
32 ^o .	59,53	237,61	311,42	1,4	39,1	-46,5
36 ^o .	59,39	211,59	416,08	1,1	23,9	-28,5
40 ^o .	58,92	179,74	545,38	0,3	5,2	-6,3

(*) – Valores de referência.

TABELA 5.21 – Reações de apoio nos pilares com laje de 30 centímetros

1 Andar	2 R _{P1} (kN)	3 R _{P2} (kN)	4 R _{P5} (kN)	5 $\Delta\%R_{P1}$	6 $\Delta\%R_{P2}$	7 $\Delta\%R_{P5}$
0 ^o . (*)	58,73	170,82	581,80	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	57,66	237,07	321,06	-1,8	38,8	-44,8
8 ^o .	57,77	285,35	127,51	-1,6	67,0	-78,1
12 ^o .	58,63	317,23	-3,48	-0,2	85,7	-100,6
16 ^o .	59,89	334,13	-76,1	2,0	95,6	-113,1
20 ^o .	61,21	337,33	-94,16	4,2	97,5	-116,2
24 ^o .	62,29	327,98	-61,09	6,1	92,0	-110,5
28 ^o .	62,84	306,77	21,57	7,0	79,6	-96,3
32 ^o .	62,74	275,73	146,14	6,8	61,4	-74,9
36 ^o .	61,61	234,24	316,57	4,9	37,1	-45,6
40 ^o .	59,46	184,56	523,92	1,2	8,0	-9,9

(*) – Valores de referência.

As tabelas 5.19, 5.20 e 5.21 são análogas à tabela 5.6 tendo como diferença as espessuras da laje tipo que são de 20, 25 e 30 centímetros, respectivamente.

Na coluna 2 das quatro tabelas de reações de apoio na laje tipo têm-se os valores de R_{P1}.

Pode-se ver que para as quatro espessuras da laje tipo, os valores de R_{P1} variam pouco.

Na coluna 3, as reações R_{P2} do pilar P2 têm um aumento significativo com o aumento da espessura da laje tipo. No 20º andar, para as espessuras de 15, 20, 25 e 30 centímetros, R_{P2} têm os valores de 194,60, 225,69, 273,41 e 337,33 kN, respectivamente.

Na coluna 4, as reações R_{P5} do pilar P5 têm um comportamento contrário às do pilar P2. As reações R_{P5} têm seus valores diminuídos com o aumento da espessura da laje tipo. Na altura do 20º andar, para as espessuras de 15, 20, 25 e 30 centímetros, R_{P5} têm os valores de 488,47, 365,05, 172,04 e -94,16 kN, respectivamente.

As diferenças percentuais das reações de apoio $\Delta\%R_{P1}$, $\Delta\%R_{P2}$ e ΔR_{P5} , nas colunas 5, 6 e 7 quantificam, de maneira mais objetiva, os comentários feitos nos parágrafos anteriores.

Os gráficos das figuras 5.10, 5.11 e 5.12 foram gerados a partir de valores que se encontram nas tabelas 5.6, 5.19, 5.20 e 5.21. Neles são mostradas as variações das reações de apoio dos pilares ao longo dos andares do edifício.

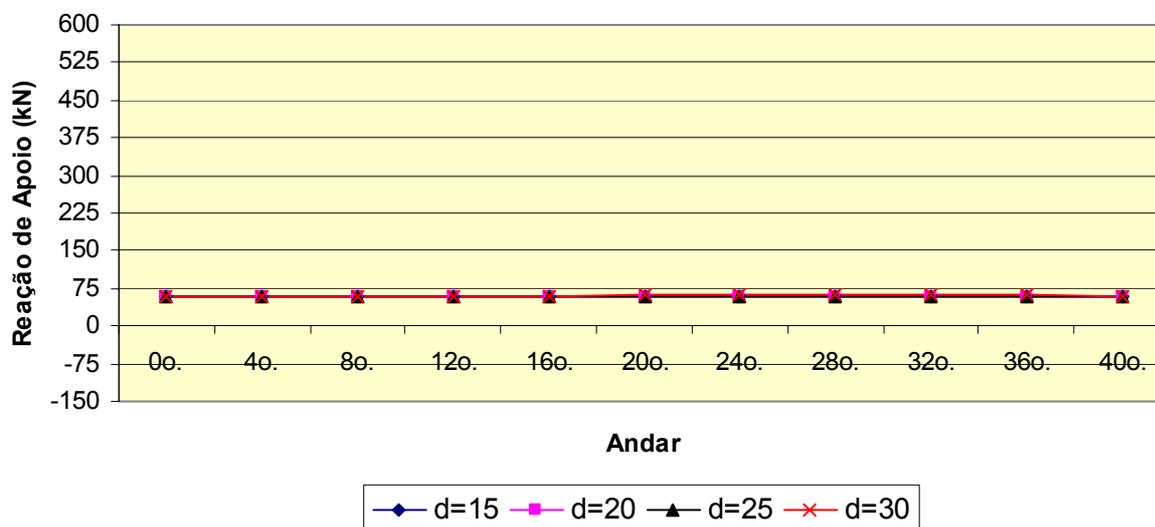


FIGURA 5.10 – Gráfico das reações de apoio no pilar P1 (*)

(*) – ver coluna 2 das tabelas 5.6, 5.19, 5.20 e 5.21.

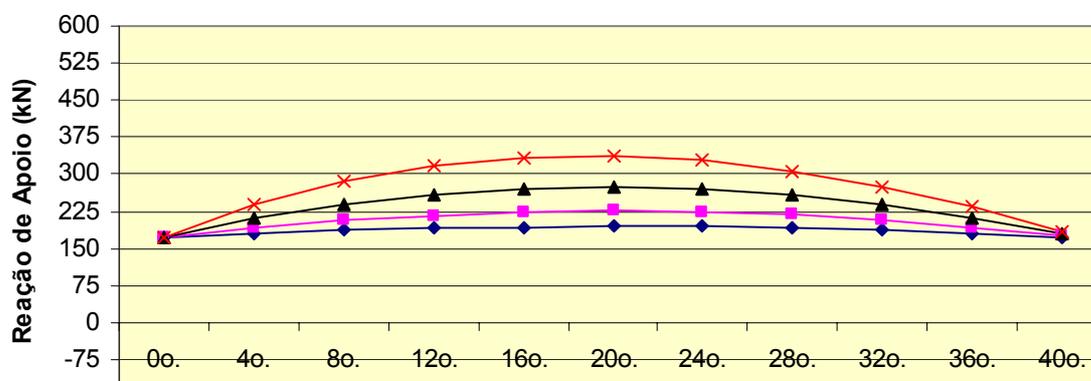


FIGURA 5.11 – Gráfico das reações de apoio no pilar P2 (*)

(*) – ver coluna 3 das tabelas 5.6, 5.19, 5.20 e 5.21.

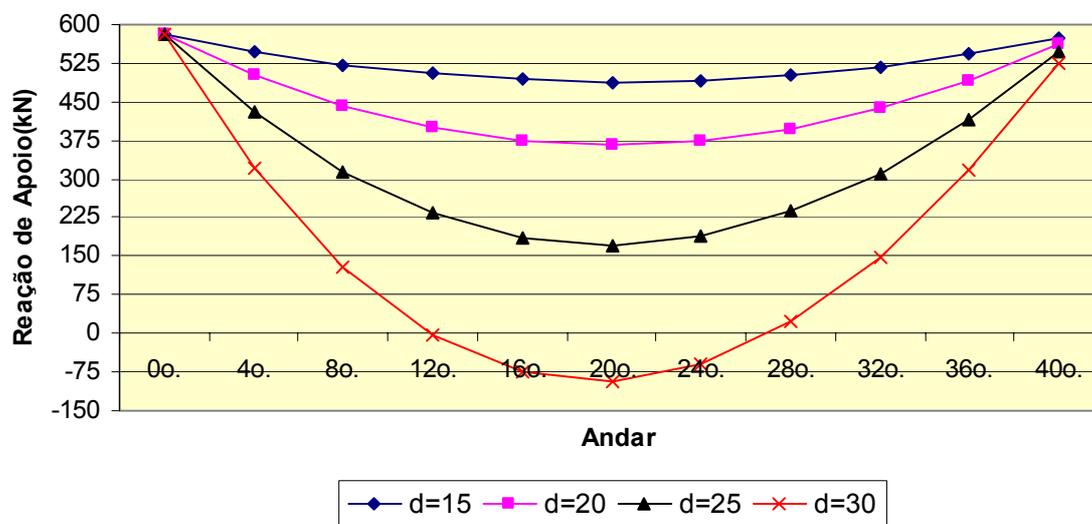


FIGURA 5.12 – Gráfico das reações de apoio no pilar P5 (*)

(*) – ver coluna 4 das tabelas 5.6, 5.19, 5.20 e 5.21.

6

MODELO LAJE-SDA

6.1 – DESCRIÇÃO

Neste modelo todas as lajes do edifício de 40 andares são calculadas considerando a estrutura pronta com todo o carregamento aplicado. Os pilares são impedidos de se deformarem axialmente em todos os andares.

A essência deste modelo é considerar que os pilares são indeformáveis e, conseqüentemente, com a ausência de recalques diferenciais entre eles, as lajes nos diversos pisos possuirão comportamento mecânico semelhante, ou seja, terão esforços praticamente iguais ao longo dos 40 andares.

Esta maneira de analisar edifícios é bastante comum, principalmente por simplificar o cálculo. O modelo LAJE-SDA (Sem Deformação Axial) deve ser usado com cuidado porque, ao serem desprezados os recalques diferenciais, estar-se-á deixando de levar em conta as importantes variações que ocorrem nos esforços das lajes ao longo dos diversos andares. Quanto maior forem os recalques diferenciais no edifício, maiores serão as

variações nos esforços, de modo que para análises deste tipo, deve-se projetar o edifício no sentido de minimizar esses recalques.

Na figura 6.1 representa-se um esquema do modelo estrutural analisado. Este modelo é composto por todas as lajes do andar tipo agindo simultaneamente e dos pilares P1, P2,...,P9, que as suportam. A seguir são dadas informações adicionais sobre o modelo:

- os pilares que suportam a laje tipo têm pé direito de 3 metros;
- todos os pilares são engastados na fundação e impedidos de se deslocarem verticalmente nos diversos pisos pelos vínculos indicados na figura 6.1;
- a laje é suposta engastada nos pilares;
- a laje está submetida a uma carga q superficial uniformemente distribuída;
- o material utilizado nas lajes e pilares é homogêneo, isotrópico e tem comportamento elástico-linear com módulo de elasticidade longitudinal $E = 30 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ e coeficiente de poisson $\nu = 0,2$;

Na figura 6.2 é mostrada a malha de elementos finitos utilizada na análise da laje tipo. Ela é similar à laje mostrada na figura 5.2. Ao todo foram utilizados $40 \times 400 = 16000$ elementos finitos de casca (SHELL Elastic 4 63).

Para os pilares foram usados elementos de barra de pórtico espacial (BEAM 3D Elastic 4) com o comprimento de 3 metros, totalizando 360 elementos finitos nos 40 andares do edifício. Ao todo, somando-se os elementos das placas com os dos pilares, foram usados 16360 elementos finitos no cálculo desta estrutura.

O comportamento mecânico dos diversos andares será estudado no centróide dos elementos A, B e C destacados.

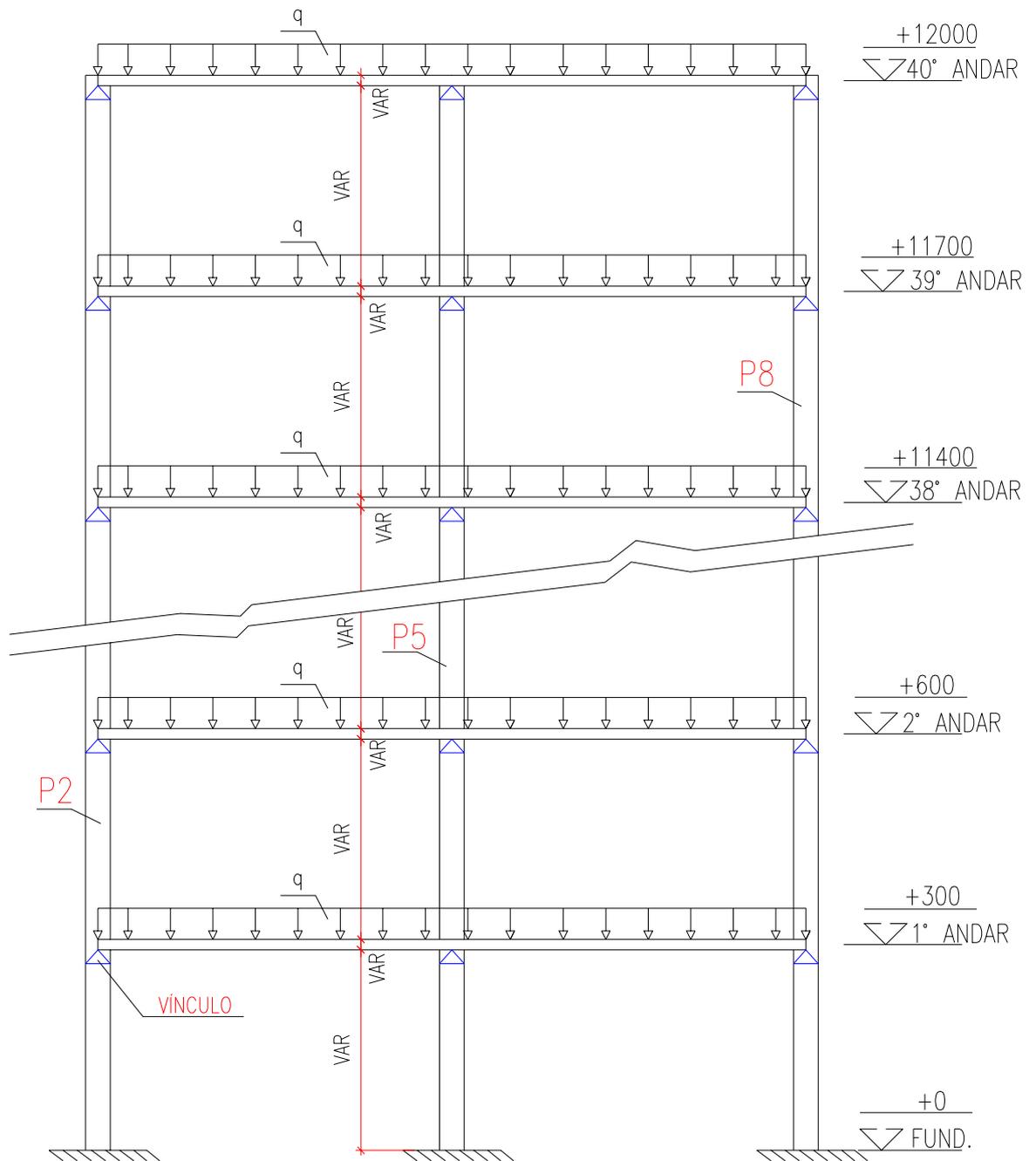


FIGURA 6.1 – Modelo LAJE-SDA

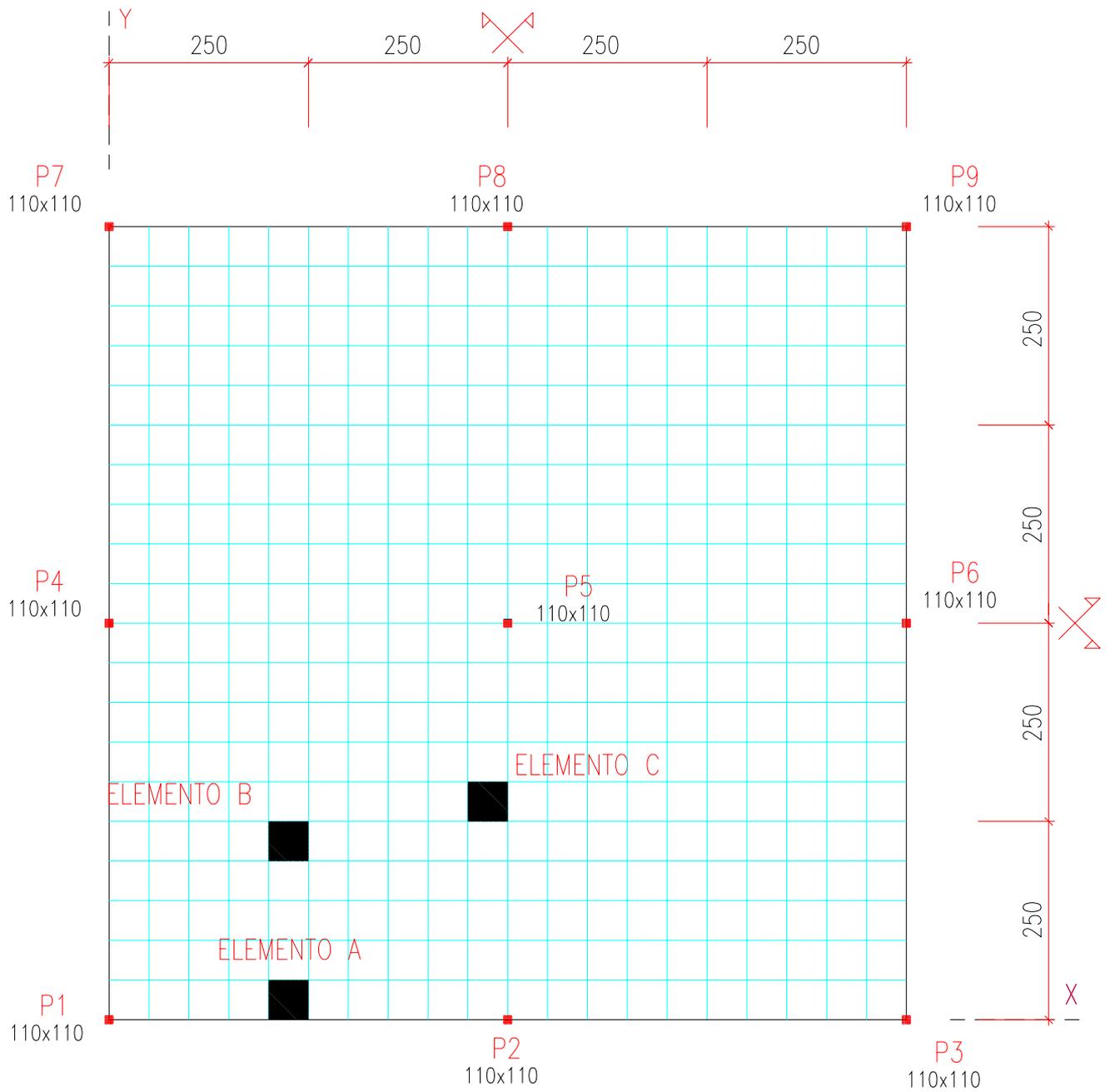


FIGURA 6.2 – Malha dos nós e elementos finitos da laje tipo (cotas e dimensões em centímetros)

6.2 - CARREGAMENTO

O carregamento do modelo possui as seguintes características:

- a laje tipo está submetida a uma carga superficial padrão $q = 15 \text{ kN/m}^2$ uniformemente distribuída;
- a carga q inclui peso próprio, revestimento, alvenaria e sobrecarga;
- mesmo com a variação da espessura da laje, a carga $q = 15 \text{ kN/m}^2$ permanece inalterada.

6.3 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item, foram feitas análises comparativas dos resultados obtidos através dos processamentos realizados. Os elementos A, B e C destacados na figura 6.2 foram os elementos escolhidos para se observar a variação dos esforços. Os processamentos foram feitos usando o programa ANSYS (KOHNRE, 1989).

Para efeito de comparação foram calculados valores de:

- momentos fletores M_x e M_y ;
- momento de torção M_{xy} ;
- reações verticais de apoio nos diversos pisos;
- reações verticais de apoio na fundação.

TABELA 6.1 – Esforços no centróide do elemento A na laje de 15 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$D\%M_x$	$D\%M_y$	$D\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	24,33	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	24,33	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
8 ^o .	24,33	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
12 ^o .	24,33	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
16 ^o .	24,33	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
20 ^o .	24,33	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
24 ^o .	24,33	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
28 ^o .	24,33	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
32 ^o .	24,33	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
36 ^o .	24,33	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
40 ^o .	24,35	3,32	0,44	0,1	0,0	0,0

(*) – Valores de referência.

Na tabela 6.1 pode-se ver os esforços obtidos no elemento A da malha representada na figura 6.2. A espessura da laje utilizada foi de 15 cm. A descrição desta tabela é análoga à feita para a tabela 5.2, do capítulo anterior.

Através desta tabela, pode-se ver que os esforços ao longo dos diversos pavimentos se mantêm constante, mesmo com a variação da posição dos andares. Conforme dito no item 6.1, analisar todas as lajes de um pavimento tipo como tendo comportamento mecânico igual, é prática bastante comum em projetos de edificios de andares múltiplos. Veremos mais adiante no capítulo 9, que esta prática é bastante discutível e deve ser feita com muito critério.

As tabelas 6.2, 6.3 e 6.4 mostradas abaixo, referem-se a este mesmo elemento A, apenas variando a espessura da laje tipo para 20, 25 e 30 centímetros respectivamente. Pode-se perceber nas colunas 2, 3 e 4 das tabelas abaixo, que praticamente não há variação nos esforços M_x , M_y e M_{xy} .

TABELA 6.2 – Esforços no centróide do elemento A na laje de 20 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$D\%M_x$	$D\%M_y$	$D\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	24,33	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	24,34	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
8 ^o .	24,34	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
12 ^o .	24,34	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
16 ^o .	24,34	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
20 ^o .	24,34	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
24 ^o .	24,34	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
28 ^o .	24,34	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
32 ^o .	24,34	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
36 ^o .	24,34	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
40 ^o .	24,35	3,33	0,43	0,1	0,3	-2,3

(*) – Valores de referência.

TABELA 6.3 – Esforços no centróide do elemento A na laje de 25 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$D\%M_x$	$D\%M_y$	$D\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	24,33	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	24,35	3,32	0,44	0,1	0,0	0,0
8 ^o .	24,35	3,32	0,44	0,1	0,0	0,0
12 ^o .	24,35	3,32	0,44	0,1	0,0	0,0
16 ^o .	24,35	3,32	0,44	0,1	0,0	0,0
20 ^o .	24,35	3,32	0,44	0,1	0,0	0,0
24 ^o .	24,35	3,32	0,44	0,1	0,0	0,0
28 ^o .	24,35	3,32	0,44	0,1	0,0	0,0
32 ^o .	24,35	3,32	0,44	0,1	0,0	0,0
36 ^o .	24,35	3,32	0,44	0,1	0,0	0,0
40 ^o .	24,39	3,34	0,42	0,2	0,6	-4,5

(*) – Valores de referência.

TABELA 6.4 – Esforços no centróide do elemento A na laje de 30 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$D\%M_x$	$D\%M_y$	$D\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	24,33	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	24,36	3,33	0,43	0,1	0,3	-2,3
8 ^o .	24,36	3,33	0,43	0,1	0,3	-2,3
12 ^o .	24,36	3,33	0,43	0,1	0,3	-2,3
16 ^o .	24,36	3,33	0,43	0,1	0,3	-2,3
20 ^o .	24,36	3,33	0,43	0,1	0,3	-2,3
24 ^o .	24,36	3,33	0,43	0,1	0,3	-2,3
28 ^o .	24,36	3,33	0,43	0,1	0,3	-2,3
32 ^o .	24,36	3,33	0,43	0,1	0,3	-2,3
36 ^o .	24,36	3,33	0,43	0,1	0,3	-2,3
40 ^o .	24,43	3,35	0,41	0,4	0,9	-6,8

(*) – Valores de referência.

O gráfico da figura 6.3 foi gerado a partir de valores que se encontram nas tabelas 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4. Nele pode-se ver a variação do momento fletor M_x no elemento A, ao longo dos andares do edifício.

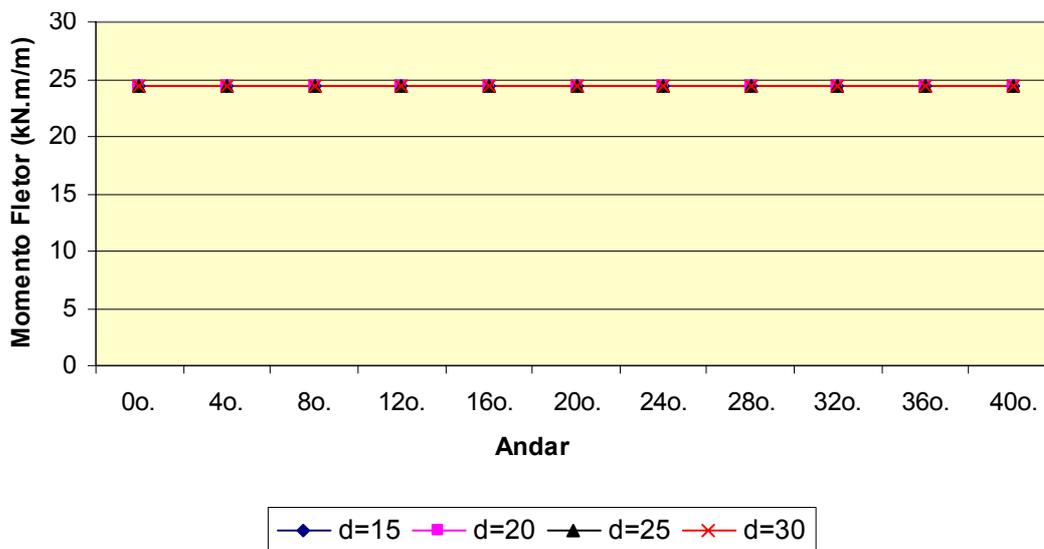


FIGURA 6.3 – Gráfico do momento fletor M_x – Elemento A (*)

(*) – ver coluna 2 das tabelas 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4.

As tabelas 6.5, 6.6, 6.7 e 6.8, mostram a variação dos esforços no elemento B dos diversos andares, para as lajes com espessura de 15, 20, 25 e 30 centímetros respectivamente. Pode-se ver nas colunas 2, 3 e 4 destas tabelas que os esforços M_x , M_y e M_{xy} se mantêm praticamente constante ao longo dos diversos andares.

TABELA 6.5 – Esforços no centróide do elemento B na laje de 15 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$D\%M_x$	$D\%M_y$	$D\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
4 ^o .	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
8 ^o .	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
12 ^o .	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
16 ^o .	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
20 ^o .	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
24 ^o .	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
28 ^o .	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
32 ^o .	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
36 ^o .	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
40 ^o .	18,40	18,40	0	0,1	0,1	0

(*) – Valores de referência.

TABELA 6.6 – Esforços no centróide do elemento B na laje de 20 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$D\%M_x$	$D\%M_y$	$D\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
4 ^o .	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
8 ^o .	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
12 ^o .	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
16 ^o .	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
20 ^o .	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
24 ^o .	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
28 ^o .	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
32 ^o .	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
36 ^o .	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
40 ^o .	18,41	18,41	0	0,1	0,1	0

(*) – Valores de referência.

TABELA 6.7 – Esforços no centróide do elemento B na laje de 25 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	D% M_x	D% M_y	D% M_{xy}
0 ^o . (*)	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
4 ^o .	18,40	18,40	0	0,1	0,1	0
8 ^o .	18,40	18,40	0	0,1	0,1	0
12 ^o .	18,40	18,40	0	0,1	0,1	0
16 ^o .	18,40	18,40	0	0,1	0,1	0
20 ^o .	18,40	18,40	0	0,1	0,1	0
24 ^o .	18,40	18,40	0	0,1	0,1	0
28 ^o .	18,40	18,40	0	0,1	0,1	0
32 ^o .	18,40	18,40	0	0,1	0,1	0
36 ^o .	18,40	18,40	0	0,1	0,1	0
40 ^o .	18,43	18,43	0	0,3	0,3	0

(*) – Valores de referência.

TABELA 6.8 – Esforços no centróide do elemento B na laje de 30 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	D% M_x	D% M_y	D% M_{xy}
0 ^o . (*)	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
4 ^o .	18,41	18,41	0	0,1	0,1	0
8 ^o .	18,41	18,41	0	0,1	0,1	0
12 ^o .	18,41	18,41	0	0,1	0,1	0
16 ^o .	18,41	18,41	0	0,1	0,1	0
20 ^o .	18,41	18,41	0	0,1	0,1	0
24 ^o .	18,41	18,41	0	0,1	0,1	0
28 ^o .	18,41	18,41	0	0,1	0,1	0
32 ^o .	18,41	18,41	0	0,1	0,1	0
36 ^o .	18,41	18,41	0	0,1	0,1	0
40 ^o .	18,63	18,63	0	1,3	1,3	0

(*) – Valores de referência.

O gráfico da figura 6.4 foi gerado a partir de valores que se encontram nas tabelas 6.5, 6.6, 6.7 e 6.8. Nele pode-se ver a variação dos momentos fletores M_x e M_y no elemento B, ao longo dos andares do edifício.

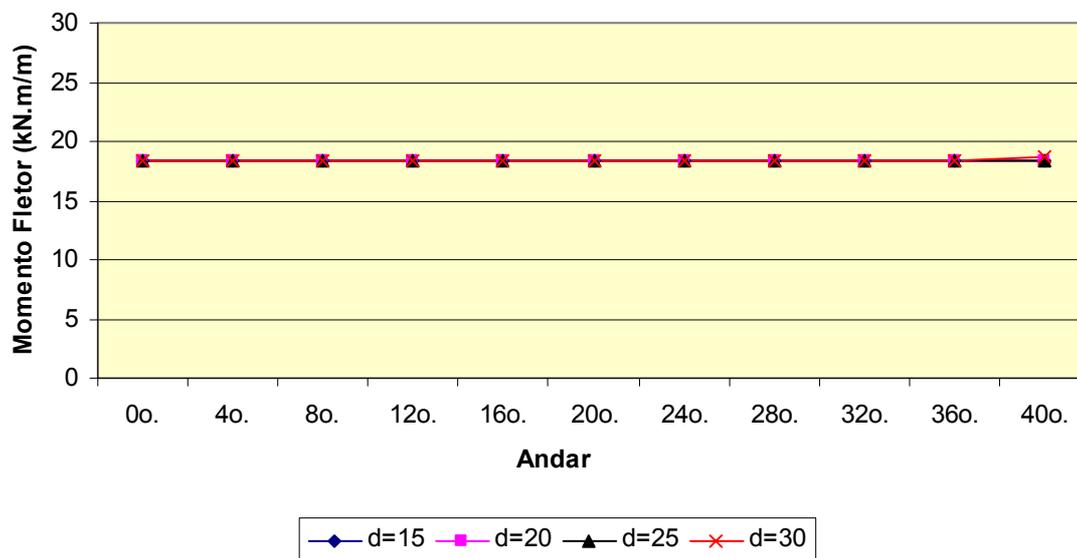


FIGURA 6.4 – Gráfico dos momentos fletores M_x e M_y – Elemento B (*)

(*) – ver colunas 2 e 3 das tabelas 6.5, 6.6, 6.7 e 6.8.

As tabelas 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12 mostram a variação dos esforços no elemento C dos diversos pavimentos, para as lajes com espessura de 15, 20, 25 e 30 centímetros respectivamente. Pode-se ver nas colunas 2, 3 e 4 destas tabelas que os esforços M_x , M_y e M_{xy} se mantêm praticamente constantes ao longo dos diversos andares.

TABELA 6.9 – Esforços no centróide do elemento C na laje de 15 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$D\%M_x$	$D\%M_y$	$D\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	-10,03	22,89	0,86	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	-10,03	22,89	0,86	0,0	0,0	0,0
8 ^o .	-10,03	22,89	0,86	0,0	0,0	0,0
12 ^o .	-10,03	22,89	0,86	0,0	0,0	0,0
16 ^o .	-10,03	22,89	0,86	0,0	0,0	0,0
20 ^o .	-10,03	22,89	0,86	0,0	0,0	0,0
24 ^o .	-10,03	22,89	0,86	0,0	0,0	0,0
28 ^o .	-10,03	22,89	0,86	0,0	0,0	0,0
32 ^o .	-10,03	22,89	0,86	0,0	0,0	0,0
36 ^o .	-10,03	22,89	0,86	0,0	0,0	0,0
40 ^o .	-10,04	22,90	0,86	-0,1	0,0	0,0

(*) – Valores de referência.

TABELA 6.10 – Esforços no centróide do elemento C na laje de 20 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$D\%M_x$	$D\%M_y$	$D\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	-10,03	22,89	0,86	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	-10,03	22,90	0,86	0,0	0,0	0,0
8 ^o .	-10,03	22,90	0,86	0,0	0,0	0,0
12 ^o .	-10,03	22,90	0,86	0,0	0,0	0,0
16 ^o .	-10,03	22,90	0,86	0,0	0,0	0,0
20 ^o .	-10,03	22,90	0,86	0,0	0,0	0,0
24 ^o .	-10,03	22,90	0,86	0,0	0,0	0,0
28 ^o .	-10,03	22,90	0,86	0,0	0,0	0,0
32 ^o .	-10,03	22,90	0,86	0,0	0,0	0,0
36 ^o .	-10,03	22,90	0,86	0,0	0,0	0,0
40 ^o .	-10,05	22,92	0,87	-0,2	0,1	1,2

(*) – Valores de referência.

TABELA 6.11 – Esforços no centróide do elemento C na laje de 25 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	D% M_x	D% M_y	D% M_{xy}
0 ^o . (*)	-10,03	22,89	0,86	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	-10,04	22,90	0,86	-0,1	0,0	0,0
8 ^o .	-10,04	22,90	0,86	-0,1	0,0	0,0
12 ^o .	-10,04	22,90	0,86	-0,1	0,0	0,0
16 ^o .	-10,04	22,90	0,86	-0,1	0,0	0,0
20 ^o .	-10,04	22,90	0,86	-0,1	0,0	0,0
24 ^o .	-10,04	22,90	0,86	-0,1	0,0	0,0
28 ^o .	-10,04	22,90	0,86	-0,1	0,0	0,0
32 ^o .	-10,04	22,90	0,86	-0,1	0,0	0,0
36 ^o .	-10,04	22,90	0,86	-0,1	0,0	0,0
40 ^o .	-10,05	22,94	0,87	-0,2	0,2	1,2

(*) – Valores de referência.

TABELA 6.12 – Esforços no centróide do elemento C na laje de 30 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	D% M_x	D% M_y	D% M_{xy}
0 ^o . (*)	-10,03	22,89	0,86	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	-10,04	22,91	0,86	-0,1	0,1	0,0
8 ^o .	-10,04	22,91	0,86	-0,1	0,1	0,0
12 ^o .	-10,04	22,91	0,86	-0,1	0,1	0,0
16 ^o .	-10,04	22,91	0,86	-0,1	0,1	0,0
20 ^o .	-10,04	22,91	0,86	-0,1	0,1	0,0
24 ^o .	-10,04	22,91	0,86	-0,1	0,1	0,0
28 ^o .	-10,04	22,91	0,86	-0,1	0,1	0,0
32 ^o .	-10,04	22,91	0,86	-0,1	0,1	0,0
36 ^o .	-10,04	22,91	0,86	-0,1	0,1	0,0
40 ^o .	-10,08	22,98	0,88	-0,5	0,4	2,3

(*) – Valores de referência.

Os gráficos das figuras 6.5 e 6.6 foram gerados a partir de valores que se encontram nas tabelas 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12. Neles pode-se ver a variação dos momentos fletores M_x e M_y no elemento C, ao longo dos andares do edifício.

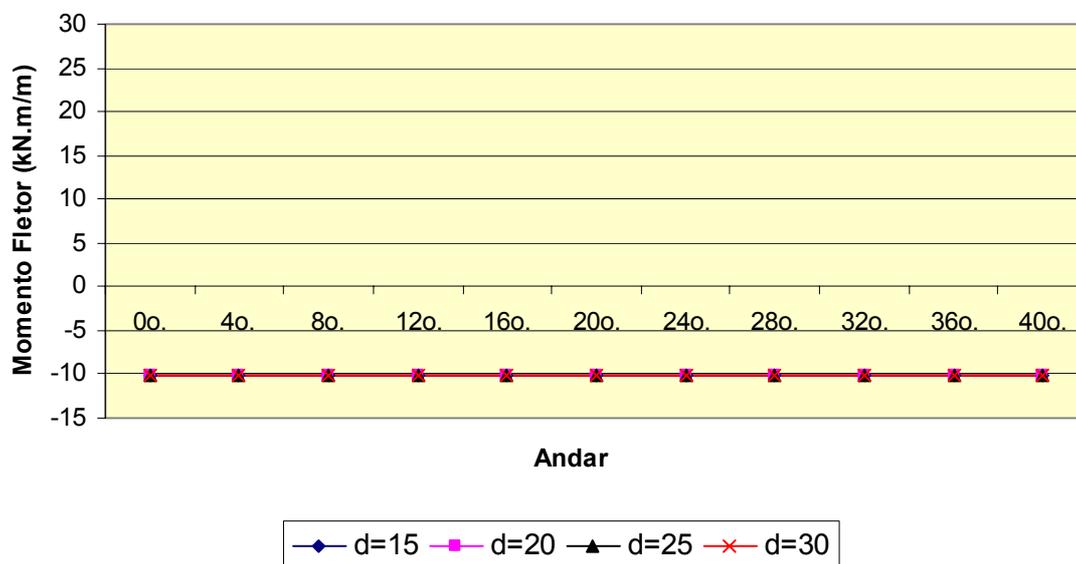


FIGURA 6.5 – Gráfico do momento fletor M_x – Elemento C (*)

(*) – ver coluna 2 das tabelas 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12.

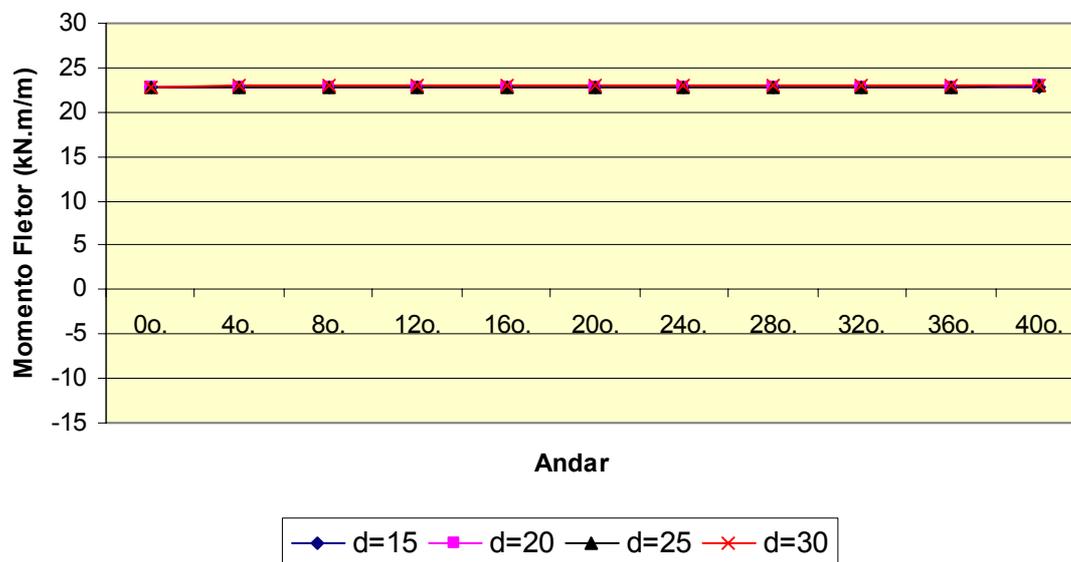


FIGURA 6.6 – Gráfico do momento fletor M_y – Elemento C (*)

(*) – ver coluna 3 das tabelas 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12.

As tabelas 6.13, 6.14, 6.15 e 6.16 referem-se às reações de apoio nas lajes dos pilares P1, P2 e P5 ao longo dos diversos andares tipos para as espessuras de 15, 20, 25 e 30 centímetros respectivamente. Nota-se que o mesmo comportamento dos esforços obtidos nas tabelas anteriores repete-se nas tabelas seguintes para as reações de apoio, ou seja, os valores de R_{P1} , R_{P2} e R_{P5} mantêm-se praticamente constantes ao longo dos diversos pavimentos do edifício.

TABELA 6.13 – Reações de apoio nos pilares com laje de 15 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	R_{P1} (kN)	R_{P2} (kN)	R_{P5} (kN)	$\Delta\%R_{P1}$	$\Delta\%R_{P2}$	$\Delta\%R_{P5}$
0 ^o . (*)	72,96	185,65	465,58	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	72,96	185,63	465,68	0,0	0,0	0,0
8 ^o .	72,96	185,63	465,68	0,0	0,0	0,0
12 ^o .	72,96	185,63	465,68	0,0	0,0	0,0
16 ^o .	72,96	185,63	465,68	0,0	0,0	0,0
20 ^o .	72,96	185,63	465,68	0,0	0,0	0,0
24 ^o .	72,96	185,63	465,68	0,0	0,0	0,0
28 ^o .	72,96	185,63	465,68	0,0	0,0	0,0
32 ^o .	72,96	185,63	465,68	0,0	0,0	0,0
36 ^o .	72,96	185,63	465,68	0,0	0,0	0,0
40 ^o .	72,94	185,57	465,96	0,0	0,0	0,1

(*) – Valores de referência.

TABELA 6.14 – Reações de apoio nos pilares com laje de 20 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	R _{P1} (kN)	R _{P2} (kN)	R _{P5} (kN)	Δ%R _{P1}	Δ%R _{P2}	Δ%R _{P5}
0 ^o . (*)	72,96	185,65	465,58	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	72,95	185,60	465,76	0,0	0,0	0,0
8 ^o .	72,95	185,60	465,76	0,0	0,0	0,0
12 ^o .	72,95	185,60	465,76	0,0	0,0	0,0
16 ^o .	72,95	185,60	465,76	0,0	0,0	0,0
20 ^o .	72,95	185,60	465,76	0,0	0,0	0,0
24 ^o .	72,95	185,60	465,76	0,0	0,0	0,0
28 ^o .	72,95	185,60	465,76	0,0	0,0	0,0
32 ^o .	72,95	185,60	465,76	0,0	0,0	0,0
36 ^o .	72,95	185,60	465,76	0,0	0,0	0,0
40 ^o .	72,93	185,47	466,40	0,0	-0,1	0,2

(*) – Valores de referência.

TABELA 6.15 – Reações de apoio nos pilares com laje de 25 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	R _{P1} (kN)	R _{P2} (kN)	R _{P5} (kN)	Δ%R _{P1}	Δ%R _{P2}	Δ%R _{P5}
0 ^o . (*)	72,96	185,65	465,58	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	72,95	185,56	465,96	0,0	0,0	0,1
8 ^o .	72,95	185,56	465,96	0,0	0,0	0,1
12 ^o .	72,95	185,56	465,96	0,0	0,0	0,1
16 ^o .	72,95	185,56	465,96	0,0	0,0	0,1
20 ^o .	72,95	185,56	465,96	0,0	0,0	0,1
24 ^o .	72,95	185,56	465,96	0,0	0,0	0,1
28 ^o .	72,95	185,56	465,96	0,0	0,0	0,1
32 ^o .	72,95	185,56	465,96	0,0	0,0	0,1
36 ^o .	72,95	185,56	465,96	0,0	0,0	0,1
40 ^o .	72,90	185,33	467,12	-0,1	-0,2	0,3

(*) – Valores de referência.

TABELA 6.16 – Reações de apoio nos pilares com laje de 30 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	R_{P1} (kN)	R_{P2} (kN)	R_{P5} (kN)	$\Delta\%R_{P1}$	$\Delta\%R_{P2}$	$\Delta\%R_{P5}$
0 ^o . (*)	72,96	185,65	465,58	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	72,94	185,50	466,24	0,0	-0,1	0,1
8 ^o .	72,94	185,50	466,24	0,0	-0,1	0,1
12 ^o .	72,94	185,50	466,24	0,0	-0,1	0,1
16 ^o .	72,94	185,50	466,24	0,0	-0,1	0,1
20 ^o .	72,94	185,50	466,24	0,0	-0,1	0,1
24 ^o .	72,94	185,50	466,24	0,0	-0,1	0,1
28 ^o .	72,94	185,50	466,24	0,0	-0,1	0,1
32 ^o .	72,94	185,50	466,24	0,0	-0,1	0,1
36 ^o .	72,94	185,50	466,24	0,0	-0,1	0,1
40 ^o .	72,86	185,12	468,08	-0,1	-0,3	0,5

(*) – Valores de referência.

Os gráficos das figuras 6.7, 6.8 e 6.9 foram gerados a partir de valores que se encontram nas tabelas 6.13, 6.14, 6.15 e 6.16. Neles pode-se ver a variação das reações R_{P1} , R_{P2} e R_{P5} nos pilares P1, P2 e P5 respectivamente, ao longo dos andares do edifício.

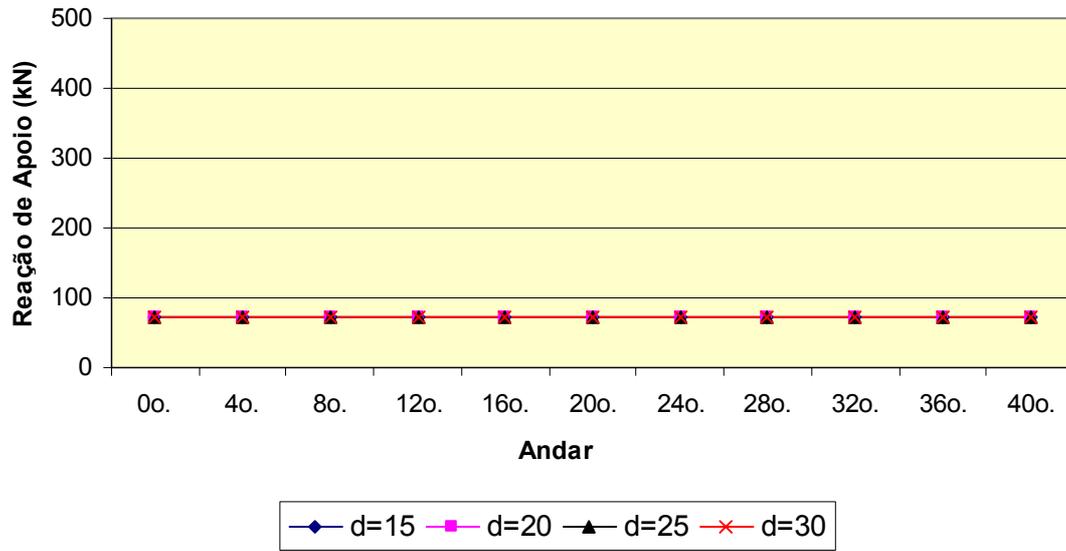


FIGURA 6.7 – Gráfico das reações de apoio no pilar P1 (*)

(*) – ver coluna 2 das tabelas 6.13, 6.14, 6.15 e 6.16.

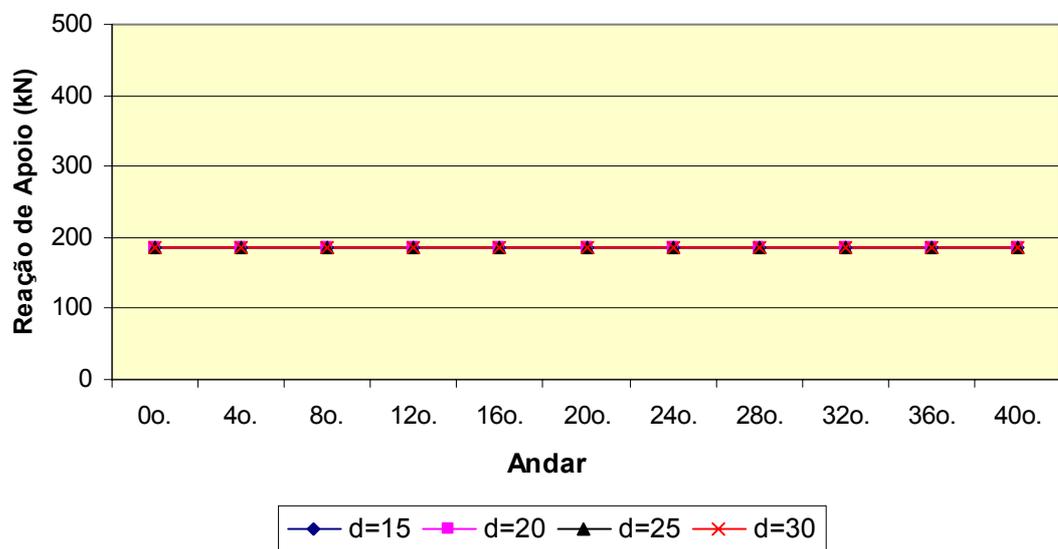


FIGURA 6.8 – Gráfico das reações de apoio no pilar P2 (*)

(*) – ver coluna 3 das tabelas 6.13, 6.14, 6.15 e 6.16.

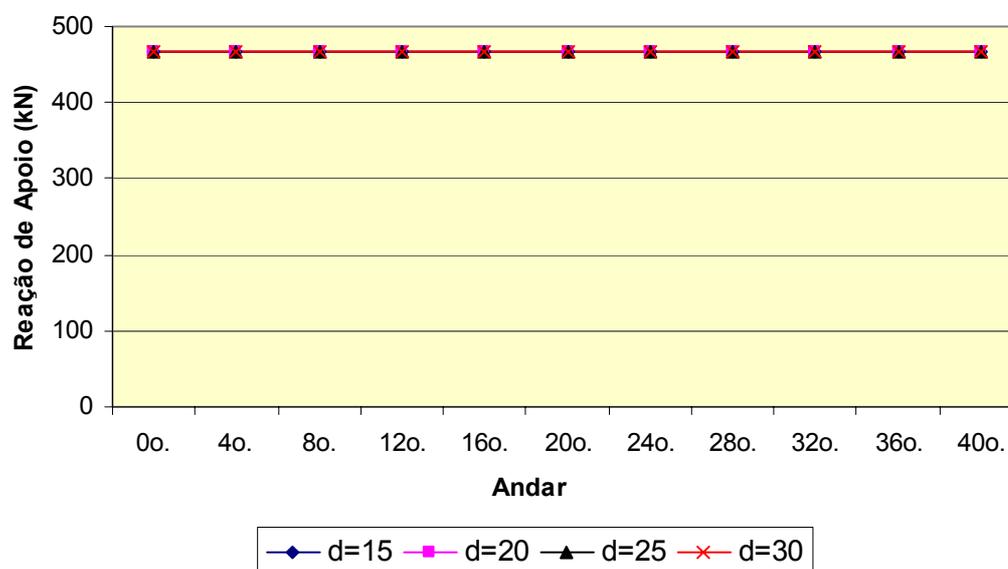


FIGURA 6.9 – Gráfico das reações de apoio no pilar P5 (*)

(*) – ver coluna 4 das tabelas 6.13, 6.14, 6.15 e 6.16

Na tabela 6.17 têm-se as reações de apoio dos pilares na fundação para as lajes com espessuras de 15, 20, 25 e 30 centímetros. As reações de apoio R_{F1} , R_{F2} e R_{F5} foram obtidas somando-se as reações obtidas em todos os 40 andares. Nas colunas 2, 3 e 4 pode-se ver que, com o aumento da espessura da laje, as reações de apoio nos pilares P1, P2 e P5 variam muito pouco se mantendo praticamente constantes.

TABELA 6.17 – Reações verticais de apoio na fundação

1	2	3	4
d (cm)	R_{F1} (kN)	R_{F2} (kN)	R_{F5} (kN)
15	2918,00	7425,00	18627,00
20	2918,00	7424,00	18631,00
25	2918,00	7422,00	18639,00
30	2917,00	7420,00	18651,00

Os gráficos mostrados nas figuras 6.10, 6.11 e 6.12 foram gerados a partir de valores que se encontram na tabela 6.17. Neles pode-se ver a variação das reações de apoio R_{F1} , R_{F2} e R_{F5} na fundação dos pilares P1, P2 e P5 respectivamente, variando-se a espessura da laje tipo.

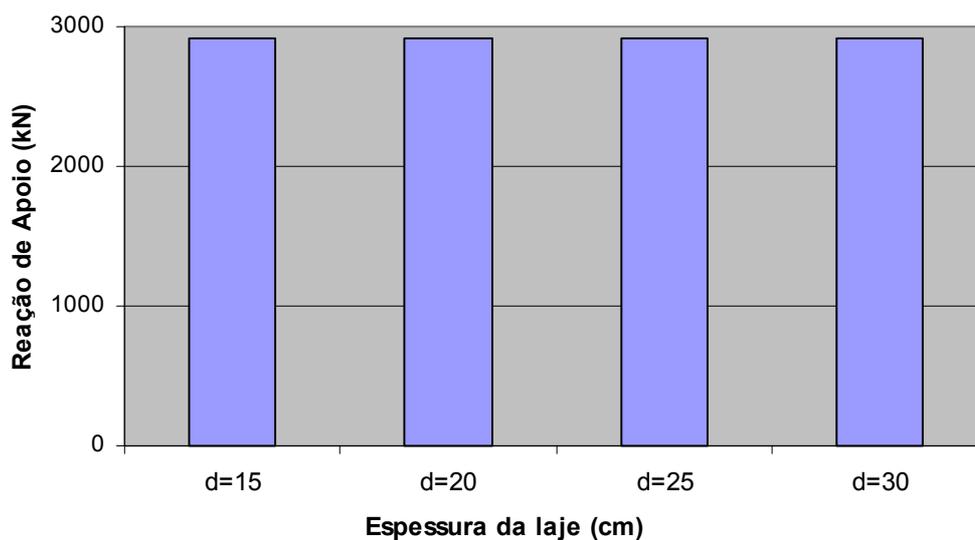


FIGURA 6.10 – Gráfico das reações verticais de apoio R_{F1} na fundação

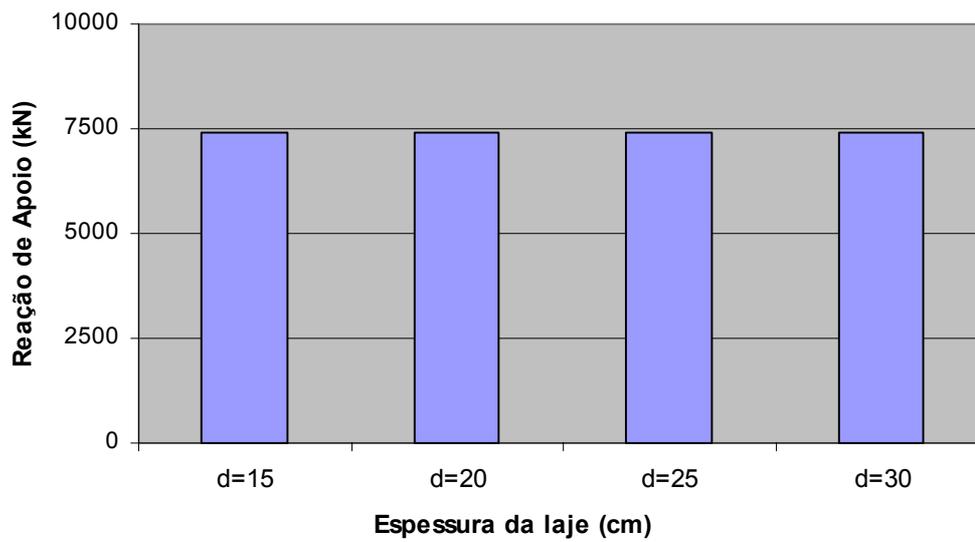


FIGURA 6.11 – Gráfico das reações verticais de apoio R_{F2} na fundação

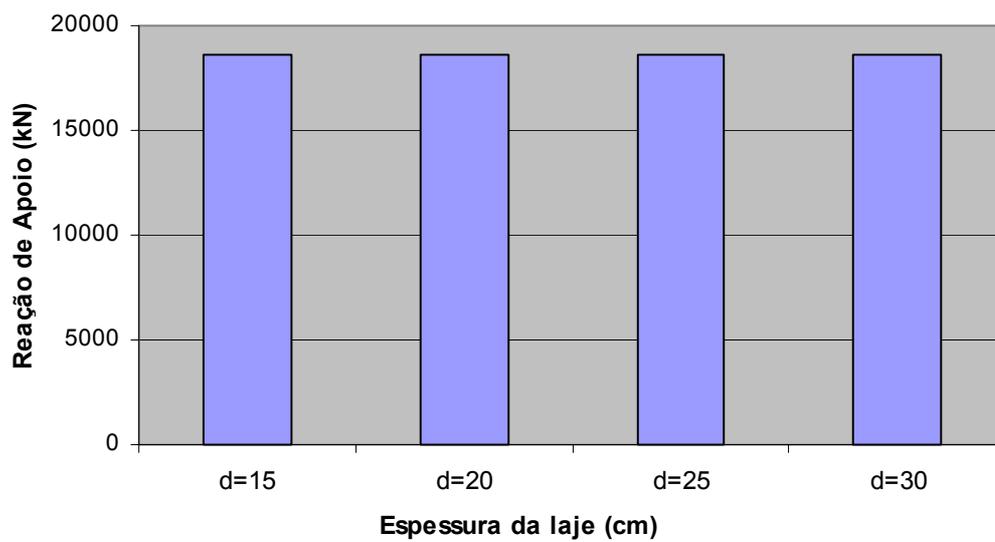


FIGURA 6.12 – Gráfico das reações verticais de apoio R_{F5} na fundação

7

MODELO LAJE-CDA

7.1 - DESCRIÇÃO

No modelo LAJE-CDA (Com Deformação Axial), assim como no modelo LAJE-SDA do capítulo anterior, todas as lajes do edifício de 40 andares são calculadas considerando-se a estrutura pronta com todo o carregamento aplicado. A diferença é que no modelo presente os pilares não estão impedidos de se deformarem axialmente em todos os andares.

Como consequência da deformabilidade axial dos pilares e da presença de recalques diferenciais entre eles tem-se, no comportamento mecânico das lajes, os esforços solicitantes variando ao longo dos vários andares.

O modelo LAJE-CDA é mais sofisticado que o modelo do capítulo anterior, exatamente por considerar a deformação axial dos pilares. O problema deste modelo é que ele não consegue refletir o que de fato acontece com a estrutura durante suas várias etapas de construção. Dentro do processo construtivo ela já começa a trabalhar sofrendo a ação do peso próprio dos elementos estruturais, revestimentos e alvenarias, bem como das cargas de montagem, tais como peso dos materiais de construção e entulhos de obra, escoramentos e ações estáticas e dinâmicas de equipamentos.

Deve-se ter em mente ao usar este modelo que ele não avalia corretamente os recalques diferenciais nos pilares. Isto se deve ao fato de que, quando se calcula a estrutura completa

com todos os carregamentos agindo simultaneamente, acaba-se admitindo que as ações aplicadas nas lajes inferiores influenciam o comportamento mecânico das lajes posicionadas nos andares superiores. Como consequência, os recalques diferenciais dos pilares calculados são excessivos, o que acarreta valores incorretos dos esforços solicitantes nas lajes posicionadas nos andares superiores.

Levando-se em conta o processo de construção das lajes, que é sempre de baixo para cima, pode-se concluir que não há possibilidade do carregamento posto nos pavimentos inferiores afetar o comportamento mecânico das lajes posicionadas nos pavimentos superiores.

Considerando o exposto nos parágrafos anteriores, deve-se usar este modelo com muito critério. No caso de edifícios de andares múltiplos de grande altura, como o discutido neste trabalho, os cuidados deverão ser ainda maiores.

O esquema do modelo estrutural analisado neste capítulo é o mesmo da figura 6.1 do capítulo anterior tendo, como única diferença, o fato de que agora os pilares não possuem os vínculos que impõe a restrição ao deslocamento vertical. Na figura 7.1 pode-se ver a representação do modelo.

Para facilitar a nossa análise comparativa, a mesma malha de elementos finitos e os mesmos elementos A, B e C destacados na figura 6.2 foram mantidos.

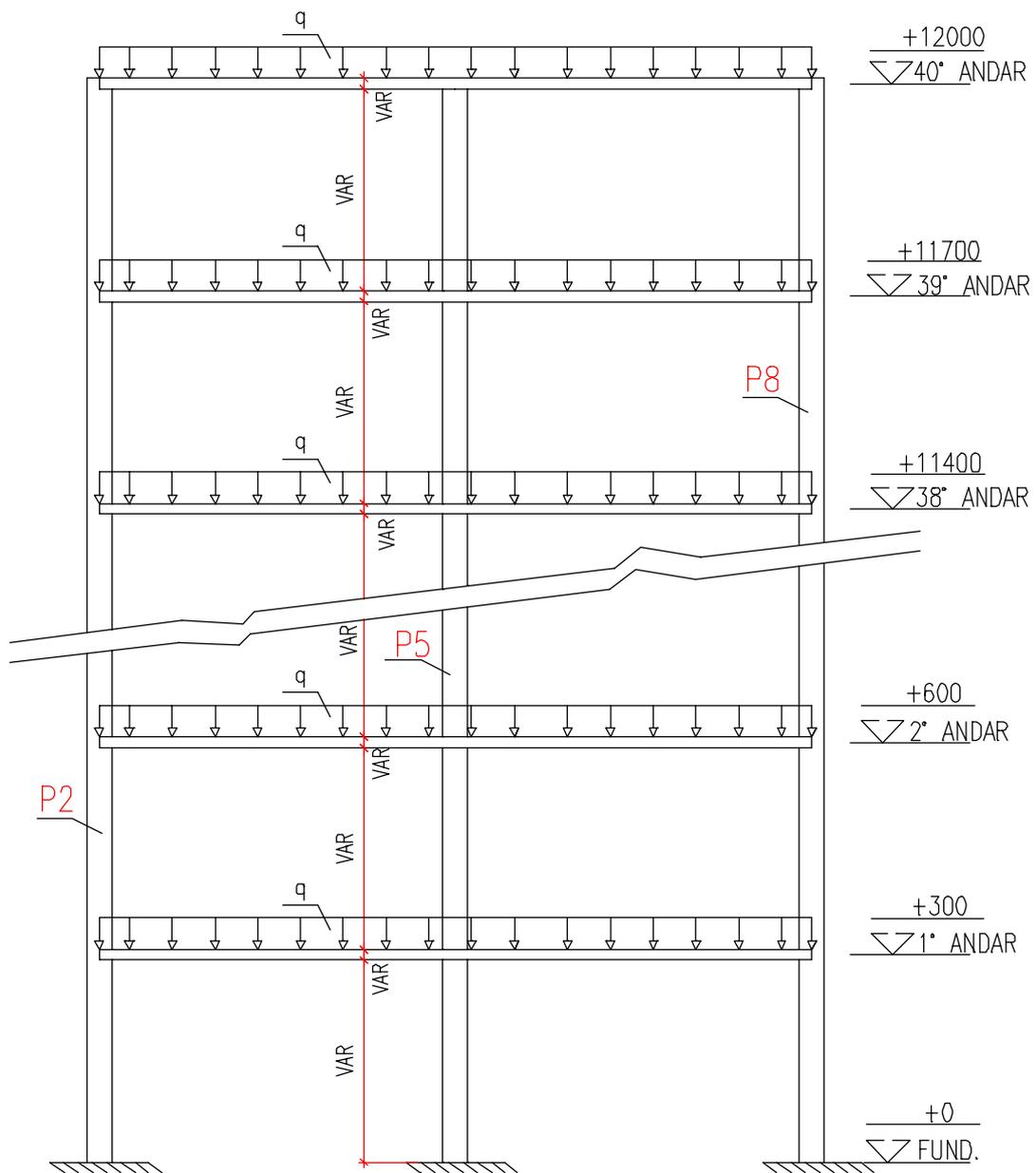


FIGURA 7.1 - Modelo LAJE-CDA

7.2 - CARREGAMENTO

O carregamento aplicado neste modelo é similar ao aplicado no modelo LAJE-SDA, mostrado no item 6.2.

7.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item, foram feitas análises comparativas dos resultados obtidos através dos processamentos realizados. Os elementos A, B e C destacados na figura 6.2 foram os escolhidos para se observar a variação dos esforços. Os processamentos foram feitos usando o programa ANSYS (KOHNRE, 1989).

Para efeito de comparação foram calculados valores de:

- momentos fletores M_x e M_y ;
- momento de torção M_{xy} ;
- reações verticais de apoio nos diversos pisos;
- reações verticais de apoio na fundação.

TABELA 7.1 - Esforços no centróide do elemento A na laje de 15 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	D% M_x	D% M_y	D% M_{xy}
0 ^o . (*)	24,33	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	24,95	3,28	0,39	2,5	-1,2	-11,4
8 ^o .	25,49	3,24	0,37	4,8	-2,4	-15,9
12 ^o .	25,95	3,21	0,37	6,7	-3,3	-15,9
16 ^o .	26,35	3,18	0,39	8,3	-4,2	-11,4
20 ^o .	26,68	3,16	0,41	9,7	-4,8	-6,8
24 ^o .	26,95	3,14	0,44	10,8	-5,4	0,0
28 ^o .	27,16	3,13	0,47	11,6	-5,7	6,8
32 ^o .	27,31	3,12	0,49	12,2	-6,0	11,4
36 ^o .	27,40	3,11	0,50	12,6	-6,3	13,6
40 ^o .	27,45	3,12	0,50	12,8	-6,0	13,6

(*) - Valores de referência.

Na tabela 7.1 pode-se ver os valores dos esforços obtidos no elemento A da malha representada na figura 6.2. A espessura da laje utilizada foi de 15 cm. A descrição desta tabela é análoga à feita para a tabela 5.2, do capítulo 5.

Através desta tabela, pode-se ver que os esforços nos diversos andares variam ao longo da altura. Na coluna 2 pode-se perceber que quanto mais alta for a posição da laje tipo no edifício, maior será o esforço M_x . Na laje de referência (0º andar) o esforço é de 24,33 kN.m/m; ele cresce gradualmente e na altura do 40º andar chega a 27,45 kN.m/m.

Na coluna 3 a variação de M_y se dá ao contrário à de M_x na coluna 2. Os esforços vão diminuindo com a altura, começando com 3,32 kN.m/m na laje de referência (0º andar) e diminuindo até o valor de 3,11 kN.m/m no 36º andar subindo, em seguida, para 3,12 kN.m/m no topo do edifício.

Na coluna 4 tem-se os valores do momento torsor. Ao contrário do que acontece nas colunas 2 e 3, o comportamento deste esforço com a variação da altura da laje tipo não possui um padrão semelhante aos anteriores. Inicialmente o momento torsor M_{xy} diminui seu valor de 0,44 kN.m/m para 0,37 kN.m/m na altura do 12º andar. Em seguida este valor sobe para 0,50 kN.m/m no topo do edifício.

Nas colunas 5, 6 e 7 têm-se as variações percentuais $\Delta\%M_x$, $\Delta\%M_y$ e $\Delta\%M_{xy}$, obtidas comparando-se os esforços nos diversos pavimentos com os da laje de referência (0º andar). A análise destas colunas dá uma idéia quantitativa de como os esforços em um mesmo ponto da laje tipo pode variar ao longo dos vários andares. O processo de obtenção desses valores é o mesmo mostrado no item 5.3 do capítulo 5.

As tabelas 7.2, 7.3 e 7.4 mostradas a seguir referem-se a este mesmo elemento A. Todavia, as espessuras da laje tipo são, agora, de 20, 25 e 30 centímetros respectivamente. Note-se que os valores de M_x , M_y e M_{xy} , bem como de $\Delta\%M_x$, $\Delta\%M_y$ e $\Delta\%M_{xy}$, aumentam na medida em que se aumenta a espessura da laje. Isto se deve à maior capacidade que a laje tem de redistribuir as cargas nos pilares, devido ao aumento da sua espessura. No mais,

praticamente o mesmo comportamento observado na tabela 7.1 em M_x , M_y , M_{xy} , $\Delta\%M_x$, $\Delta\%M_y$ e $\Delta\%M_{xy}$ é também observado nas tabelas 7.2, 7.3 e 7.4.

TABELA 7.2 - Esforços no centróide do elemento A na laje de 20 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$D\%M_x$	$D\%M_y$	$D\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	24,33	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	25,52	3,24	0,61	4,9	-2,4	38,6
8 ^o .	26,53	3,18	0,85	9,0	-4,2	93,2
12 ^o .	27,39	3,12	1,12	12,6	-6,0	154,5
16 ^o .	28,11	3,07	1,40	15,5	-7,5	218,2
20 ^o .	28,70	3,04	1,66	18,0	-8,4	277,3
24 ^o .	29,17	3,01	1,89	19,9	-9,3	329,5
28 ^o .	29,53	2,98	2,08	21,4	-10,2	372,7
32 ^o .	29,79	2,97	2,22	22,4	-10,5	404,5
36 ^o .	29,95	2,96	2,31	23,1	-10,8	425,0
40 ^o .	30,06	2,97	2,33	23,6	-10,5	429,5

(*) - Valores de referência.

TABELA 7.3 - Esforços no centróide do elemento A na laje de 25 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$D\%M_x$	$D\%M_y$	$D\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	24,33	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	26,18	3,20	0,98	7,6	-3,6	122,7
8 ^o .	27,69	3,11	1,62	13,8	-6,3	268,2
12 ^o .	28,94	3,03	2,28	18,9	-8,7	418,2
16 ^o .	29,96	2,96	2,92	23,1	-10,8	563,6
20 ^o .	30,77	2,91	3,51	26,5	-12,3	697,7
24 ^o .	31,42	2,87	4,00	29,1	-13,6	809,1
28 ^o .	31,90	2,84	4,41	31,1	-14,5	902,3
32 ^o .	32,25	2,82	4,70	32,6	-15,1	968,2
36 ^o .	32,45	2,81	4,89	33,4	-15,4	1011,4
40 ^o .	32,63	2,83	4,93	34,1	-14,8	1020,5

(*) - Valores de referência.

TABELA 7.4 - Esforços no centróide do elemento A na laje de 30 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$D\%M_x$	$D\%M_y$	$D\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	24,33	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	26,85	3,17	1,37	10,4	-4,5	211,4
8 ^o .	28,83	3,04	2,44	18,5	-8,4	454,5
12 ^o .	30,40	2,95	3,52	24,9	-11,1	700,0
16 ^o .	31,64	2,87	4,51	30,0	-13,6	925,0
20 ^o .	32,61	2,81	5,38	34,0	-15,4	1122,7
24 ^o .	33,35	2,77	6,10	37,1	-16,6	1286,4
28 ^o .	33,90	2,73	6,67	39,3	-17,8	1415,9
32 ^o .	34,28	2,71	7,08	40,9	-18,4	1509,1
36 ^o .	34,51	2,70	7,33	41,8	-18,7	1565,9
40 ^o .	34,77	2,74	7,38	42,9	-17,5	1577,3

(*) - Valores de referência.

O gráfico da figura 7.2 foi gerado a partir de valores que se encontram nas tabelas 7.1, 7.2, 7.3 e 7.4. Nele mostra-se a variação do momento fletor M_x do elemento A ao longo dos andares do edifício.

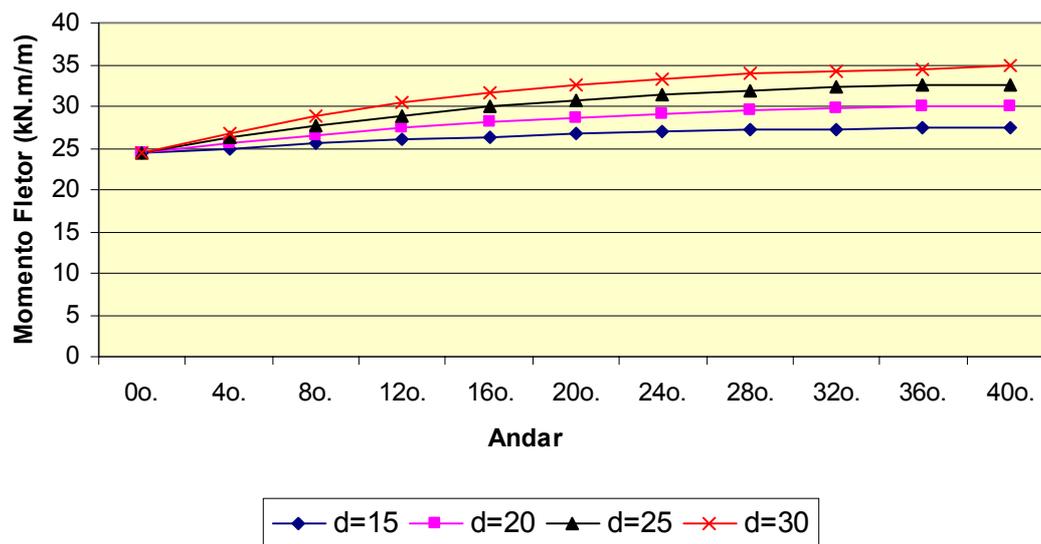


FIGURA 7.2 - Gráfico do momento fletor M_x - Elemento A (*)

(*) - ver coluna 2 das tabelas 7.1, 7.2, 7.3 e 7.4.

TABELA 7.5 - Esforços no centróide do elemento B na laje de 15 centímetros

1	2	3	4	6	7	8
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$D\%M_x$	$D\%M_y$	$D\%M_{xy}$
0 ^o (*)	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
4 ^o	19,08	19,08	0	3,8	3,8	0
8 ^o	19,68	19,68	0	7,1	7,1	0
12 ^o	20,21	20,21	0	9,9	9,9	0
16 ^o	20,65	20,65	0	12,3	12,3	0
20 ^o	21,02	21,02	0	14,3	14,3	0
24 ^o	21,33	21,33	0	16,0	16,0	0
28 ^o	21,56	21,56	0	17,3	17,3	0
32 ^o	21,73	21,73	0	18,2	18,2	0
36 ^o	21,83	21,83	0	18,7	18,7	0
40 ^o	21,88	21,88	0	19,0	19,0	0

(*) - Valores de referência.

Na tabela 7.5 pode-se ver os valores dos esforços obtidos no elemento B da malha representada na figura 6.2. A espessura da laje utilizada foi de 15 centímetros. A descrição desta tabela é análoga à feita para a tabela 5.2, do capítulo 5.

Devido à simetria, os valores de M_x e M_y mostrados respectivamente nas colunas 2 e 3 são iguais. Pode-se ver nessas colunas que quanto mais alta estiver posicionada a laje tipo, maiores serão os valores dos momentos fletores.

As colunas 5, 6 e 7 representam, respectivamente, as diferenças percentuais de M_x , M_y e M_{xy} . O valor máximo de $\Delta\%M_x = \Delta\%M_y = 19\%$ observado, se dá no 40^o andar.

As tabelas 7.6, 7.7 e 7.8 mostradas a seguir referem-se a este mesmo elemento B. Todavia, as espessuras da laje tipo são, agora, 20, 25 e 30 centímetros, respectivamente. Note-se que os valores de M_x e M_y bem como de $\Delta\%M_x$ e $\Delta\%M_y$, aumentam na medida em que se aumenta a espessura da laje. No mais, deve-se levar em conta que o mesmo comportamento

observado em M_x , M_y , M_{xy} , $\Delta\%M_x$, $\Delta\%M_y$ e $\Delta\%M_{xy}$ na tabela 7.5 repete-se para as tabelas a seguir.

TABELA 7.6 - Esforços no centróide do elemento B na laje de 20 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$D\%M_x$	$D\%M_y$	$D\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
4 ^o .	19,71	19,71	0	7,2	7,2	0
8 ^o .	20,84	20,84	0	13,3	13,3	0
12 ^o .	21,79	21,79	0	18,5	18,5	0
16 ^o .	22,59	22,59	0	22,9	22,9	0
20 ^o .	23,24	23,24	0	26,4	26,4	0
24 ^o .	23,76	23,76	0	29,3	29,3	0
28 ^o .	24,17	24,17	0	31,4	31,4	0
32 ^o .	24,45	24,45	0	33,0	33,0	0
36 ^o .	24,62	24,62	0	33,9	33,9	0
40 ^o .	24,72	24,72	0	34,5	34,5	0

(*) - Valores de referência.

TABELA 7.7 - Esforços no centróide do elemento B na laje de 25 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$D\%M_x$	$D\%M_y$	$D\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
4 ^o .	20,43	20,43	0	11,1	11,1	0
8 ^o .	22,11	22,11	0	20,3	20,3	0
12 ^o .	23,49	23,49	0	27,7	27,7	0
16 ^o .	24,60	24,60	0	33,8	33,8	0
20 ^o .	25,50	25,50	0	38,7	38,7	0
24 ^o .	26,20	26,20	0	42,5	42,5	0
28 ^o .	26,74	26,74	0	45,4	45,4	0
32 ^o .	27,11	27,11	0	47,4	47,4	0
36 ^o .	27,34	27,34	0	48,7	48,7	0
40 ^o .	27,49	27,49	0	49,5	49,5	0

(*) - Valores de referência.

TABELA 7.8 - Esforços no centróide do elemento B na laje de 30 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$D\%M_x$	$D\%M_y$	$D\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
4 ^o .	21,17	21,17	0	15,1	15,1	0
8 ^o .	23,35	23,35	0	27,0	27,0	0
12 ^o .	25,07	25,07	0	36,4	36,4	0
16 ^o .	26,42	26,42	0	43,7	43,7	0
20 ^o .	27,48	27,48	0	49,5	49,5	0
24 ^o .	28,29	28,29	0	53,8	53,8	0
28 ^o .	28,88	28,88	0	57,1	57,1	0
32 ^o .	29,30	29,30	0	59,3	59,3	0
36 ^o .	29,54	29,54	0	60,7	60,7	0
40 ^o .	29,75	29,75	0	61,8	61,8	0

(*) - Valores de referência.

O gráfico da figura 7.3 foi gerado a partir de valores que se encontram nas tabelas 7.5, 7.6, 7.7 e 7.8. Nele mostra-se a variação dos momentos fletores M_x e M_y do elemento B ao longo dos andares do edifício.

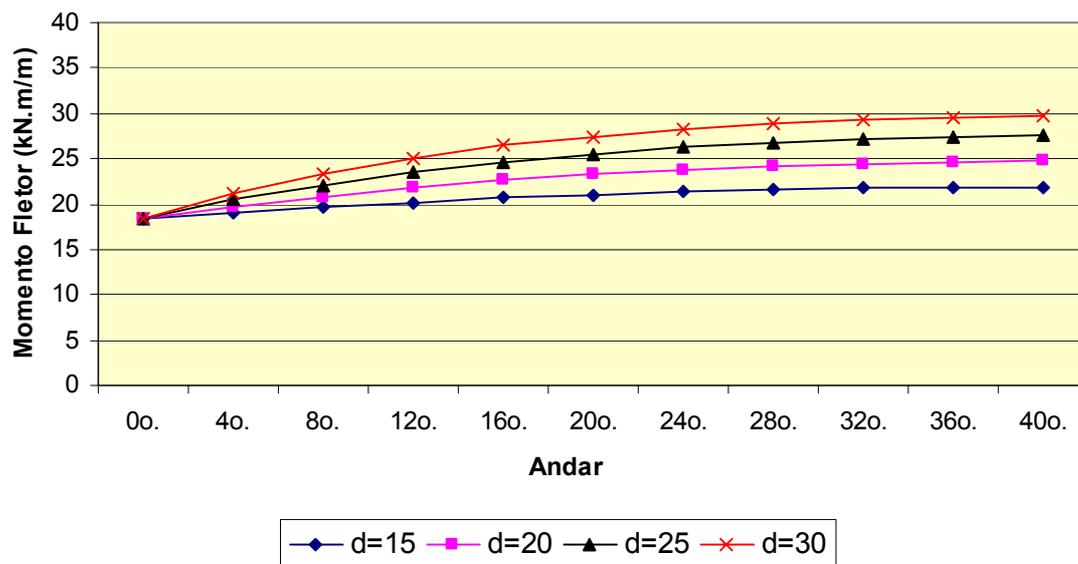


FIGURA 7.3 - Gráfico dos momentos fletores M_x e M_y - Elemento B (*)

(*) - ver colunas 2 e 3 das tabelas 7.5, 7.6, 7.7 e 7.8.

TABELA 7.9 - Esforços no centróide do elemento C na laje de 15 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	D% M_x	D% M_y	D% M_{xy}
0 ^o (*)	-10,03	22,89	0,86	0,0	0,0	0,0
4 ^o	-7,61	23,85	0,70	24,1	4,2	-18,6
8 ^o	-5,50	24,67	0,56	45,2	7,8	-34,9
12 ^o	-3,69	25,39	0,45	63,2	10,9	-47,7
16 ^o	-2,15	25,99	0,36	78,6	13,5	-58,1
20 ^o	-0,87	26,49	0,28	91,3	15,7	-67,4
24 ^o	0,17	26,89	0,22	101,7	17,5	-74,4
28 ^o	0,97	27,20	0,18	109,7	18,8	-79,1
32 ^o	1,54	27,42	0,14	115,4	19,8	-83,7
36 ^o	1,89	27,56	0,13	118,8	20,4	-84,9
40 ^o	2,02	27,62	0,12	120,1	20,7	-86,0

(*) - Valores de referência.

Na tabela 7.9 pode-se ver os valores dos esforços obtidos no centróide do elemento C da malha representada na figura 6.2. A espessura da laje utilizada foi de 15 centímetros. A descrição desta tabela é análoga à feita para a tabela 5.2, do capítulo 5.

Em comparação aos elementos anteriores, os esforços no centróide do elemento C foram os que apresentaram maior variação ao longo da altura do edifício.

Na coluna 2, onde se tem os momentos M_x , pode-se ver que na laje de referência (0^o andar) o valor de M_x é de -10,03 kN.m/m e no 40^o andar este valor chega a 2,02 kN.m/m. Portanto, o esforço muda de sinal ao longo da altura do edifício.

Os valores do momento M_y , mostrados na coluna 3, possuem uma variação mais discreta se comparada ao observado na coluna 2 para M_x . Na laje de referência o valor de M_y é de 22,89 kN.m/m e no topo do edifício este valor chega a 27,62 kN.m/m.

No momento torsor M_{xy} da coluna 4, o comportamento observado nos valores é de diminuição com o aumento da altura dos andares. Na laje de referência o valor de M_{xy} é de 0,86 kN.m/m e no 40º andar este valor chega a 0,12 kN.m/m.

As colunas 5, 6 e 7 representam, respectivamente, as diferenças percentuais de M_x , M_y e M_{xy} . O valor máximo de $\Delta\%M_x$ é de 120,1% e o de $\Delta\%M_y$ é de 20,7%, ambos observados no 40º andar.

As tabelas 7.10, 7.11 e 7.12 mostradas a seguir referem-se a este mesmo elemento C. Todavia, as espessuras da laje tipo são, agora, de 20, 25 e 30 centímetros, respectivamente. Nota-se que os valores de M_x , M_y , $\Delta\%M_x$ e $\Delta\%M_y$ aumentam à medida que se aumenta a espessura da laje. No mais, deve-se levar em conta que o mesmo comportamento observado em M_x , M_y , M_{xy} , $\Delta\%M_x$, $\Delta\%M_y$ e $\Delta\%M_{xy}$ na tabela 7.9 repete-se para as tabelas 7.10, 7.11 e 7.12.

TABELA 7.10 - Esforços no centróide do elemento C na laje de 20 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$D\%M_x$	$D\%M_y$	$D\%M_{xy}$
0º. (*)	-10,03	22,89	0,86	0,0	0,0	0,0
4º.	-5,52	24,65	0,61	45,0	7,7	-29,1
8º.	-1,72	26,11	0,42	82,9	14,1	-51,2
12º.	1,47	27,33	0,27	114,7	19,4	-68,6
16º.	4,11	28,33	0,15	141,0	23,8	-82,6
20º.	6,27	29,15	0,06	162,5	27,3	-92,7
24º.	7,98	29,80	0,00	179,6	30,2	-100,2
28º.	9,28	30,29	-0,05	192,5	32,3	-105,6
32º.	10,21	30,63	-0,08	201,8	33,8	-109,3
36º.	10,77	30,85	-0,10	207,4	34,8	-111,4
40º.	10,97	30,96	-0,10	209,4	35,3	-111,4

(*) - Valores de referência.

TABELA 7.11 - Esforços no centróide do elemento C na laje de 25 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$D\%M_x$	$D\%M_y$	$D\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	-10,03	22,89	0,86	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	-3,21	25,52	0,53	68,0	11,5	-38,4
8 ^o .	2,32	27,62	0,31	123,1	20,7	-64,0
12 ^o .	6,80	29,30	0,15	167,8	28,0	-82,6
16 ^o .	10,39	30,64	0,04	203,6	33,9	-95,3
20 ^o .	13,25	31,70	-0,03	232,1	38,5	-103,8
24 ^o .	15,47	32,52	-0,08	254,2	42,1	-109,3
28 ^o .	17,14	33,13	-0,11	270,9	44,7	-112,8
32 ^o .	18,30	33,55	-0,13	282,5	46,6	-115,1
36 ^o .	19,01	33,81	-0,14	289,5	47,7	-116,3
40 ^o .	19,23	33,98	-0,13	291,7	48,4	-115,1

(*) - Valores de referência.

TABELA 7.12 - Esforços no centróide do elemento C na laje de 30 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$D\%M_x$	$D\%M_y$	$D\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	-10,03	22,89	0,86	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	-0,87	26,41	0,46	91,3	15,4	-46,5
8 ^o .	6,21	29,07	0,22	161,9	27,0	-74,4
12 ^o .	11,70	31,11	0,07	216,7	35,9	-91,9
16 ^o .	15,95	32,67	-0,01	259,0	42,7	-101,5
20 ^o .	19,22	33,86	-0,06	291,6	47,9	-106,9
24 ^o .	21,70	34,75	-0,08	316,4	51,8	-109,4
28 ^o .	23,52	35,40	-0,09	334,5	54,7	-110,6
32 ^o .	24,77	35,85	-0,09	347,0	56,6	-110,9
36 ^o .	25,52	36,11	-0,10	354,4	57,8	-111,0
40 ^o .	25,72	36,34	-0,07	356,4	58,8	-108,4

(*) - Valores de referência.

Os gráficos das figuras 7.4 e 7.5 foram gerados a partir de valores que se encontram nas tabelas 7.9, 7.10, 7.11 e 7.12. Neles mostra-se a variação dos momentos fletores M_x e M_y do elemento C ao longo dos andares do edifício.

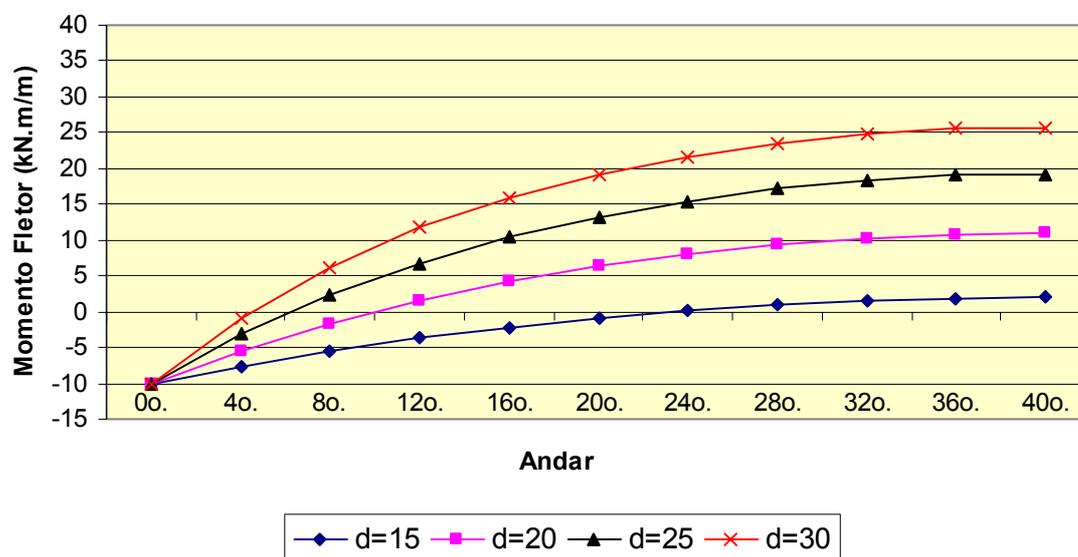


FIGURA 7.4 - Gráfico do momento fletor M_x - Elemento C (*)

(*) - ver coluna 2 das tabelas 7.9, 7.10, 7.11 e 7.12.

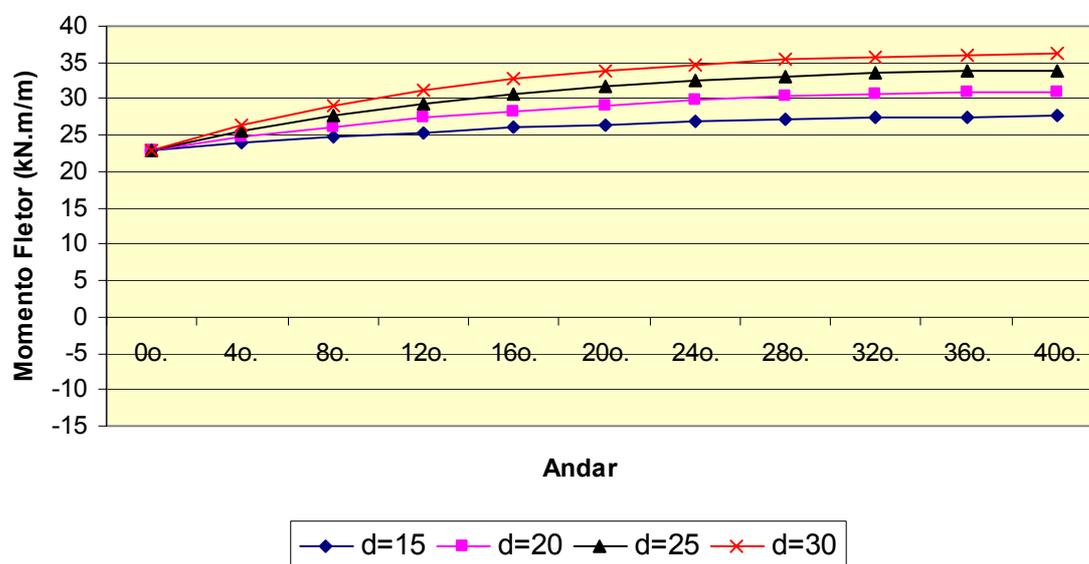


FIGURA 7.5 - Gráfico do momento fletor M_y - Elemento C (*)

(*) - ver coluna 3 das tabelas 7.9, 7.10, 7.11 e 7.12.

TABELA 7.13 - Recalques diferenciais nos pilares com laje de 15 centímetros

1	2	3	4	5	6
Andar	U_{P1} (mm)	U_{P2} (mm)	U_{P5} (mm)	$D_{P5/P2}$ (mm)	$D_{P5/P1}$ (mm)
0 ^o . (*)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 ^o .	1,03	2,51	4,91	2,40	3,88
8 ^o .	1,97	4,77	9,23	4,46	7,26
12 ^o .	2,81	6,78	12,99	6,21	10,18
16 ^o .	3,54	8,53	16,21	7,68	12,67
20 ^o .	4,16	10,01	18,92	8,91	14,76
24 ^o .	4,67	11,24	21,13	9,89	16,46
28 ^o .	5,08	12,21	22,84	10,63	17,76
32 ^o .	5,37	12,90	24,08	11,18	18,71
36 ^o .	5,56	13,34	24,84	11,50	19,28
40 ^o .	5,63	13,50	25,13	11,63	19,50

(*) - Valores de referência.

A tabela 7.13 mostrada acima refere-se aos recalques diferenciais dos pilares para a espessura da laje tipo de 15 centímetros.

Na coluna 1 tem-se a posição da laje no edifício. Nas colunas 2, 3 e 4 têm-se os deslocamentos verticais U_{P1} , U_{P2} e U_{P5} (positivos para baixo) nos pilares P1, P2 e P5 respectivamente; nas colunas 5 e 6 têm-se os recalques diferenciais de P2 e P1 em relação a P5. O processo de cálculo destes recalques diferenciais é descrito no texto relativo à tabela 5.5 do capítulo 5.

Nota-se nas colunas 2, 3 e 4 que o comportamento dos três pilares é semelhante ao se variar a posição da laje ao longo da altura do edifício. Na laje de referência, onde os apoios são infinitamente rígidos, tem-se um deslocamento vertical igual a zero para todos os pilares. A partir daí, o deslocamento vertical vai aumentando à medida que aumenta a altura do andar, até atingir um deslocamento máximo no topo do edifício.

Como o pilar P5 é o que mais absorve carga, pode-se ver que seu deslocamento vertical é o maior de todos, sendo quase o dobro do deslocamento de P2 e quase cinco vezes maior que o deslocamento do pilar P1.

Os recalques diferenciais mostrados nas colunas 5 e 6 também evidenciam as diferenças entre os deslocamentos dos pilares. Pode-se ver que os recalques diferenciais são significativos e, conforme descrito no item 7.1, maiores que os que realmente ocorrem, contribuindo, desta forma, para as deficiências deste modelo.

As tabelas 7.14, 7.15 e 7.16 são análogas à tabela 7.13 tendo como diferença as espessuras da laje, agora de 20, 25 e 30 centímetros, respectivamente.

Note-se nas três tabelas que, apesar dos valores de U_{P1} , U_{P2} , U_{P5} , $\Delta_{P5/P2}$ e $\Delta_{P5/P1}$ manterem o mesmo comportamento descrito para a tabela 7.13 eles tendem a diminuir à medida que se aumenta a espessura da laje.

TABELA 7.14 - Recalques diferenciais nos pilares com laje de 20 centímetros

1	2	3	4	5	6
Andar	U_{P1} (mm)	U_{P2} (mm)	U_{P5} (mm)	$\Delta_{P5/P2}$ (mm)	$\Delta_{P5/P1}$ (mm)
0 ^o . (*)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 ^o .	1,18	2,52	4,30	1,78	3,12
8 ^o .	2,25	4,79	8,04	3,25	5,79
12 ^o .	3,21	6,80	11,26	4,46	8,05
16 ^o .	4,06	8,55	13,99	5,44	9,93
20 ^o .	4,79	10,04	16,27	6,23	11,48
24 ^o .	5,40	11,27	18,12	6,85	12,72
28 ^o .	5,88	12,23	19,54	7,31	13,66
32 ^o .	6,22	12,93	20,57	7,64	14,35
36 ^o .	6,44	13,36	21,20	7,84	14,76
40 ^o .	6,52	13,53	21,44	7,91	14,92

(*) - Valores de referência.

TABELA 7.15 - Recalques diferenciais nos pilares com laje de 25 centímetros

1	2	3	4	5	6
Andar	U _{P1} (mm)	U _{P2} (mm)	U _{P5} (mm)	D _{P5/P2} (mm)	D _{P5/P1} (mm)
0 ^o . (*)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 ^o .	1,34	2,48	3,81	1,33	2,47
8 ^o .	2,58	4,71	7,07	2,36	4,49
12 ^o .	3,69	6,67	9,86	3,19	6,17
16 ^o .	4,68	8,39	12,21	3,82	7,53
20 ^o .	5,53	9,84	14,15	4,31	8,62
24 ^o .	6,24	11,03	15,71	4,68	9,47
28 ^o .	6,81	11,96	16,92	4,96	10,11
32 ^o .	7,21	12,64	17,79	5,15	10,58
36 ^o .	7,47	13,05	18,32	5,27	10,85
40 ^o .	7,57	13,21	18,52	5,31	10,95

(*) - Valores de referência.

TABELA 7.16 - Recalques diferenciais nos pilares com laje de 30 centímetros

1	2	3	4	5	6
Andar	U _{P1} (mm)	U _{P2} (mm)	U _{P5} (mm)	D _{P5/P2} (mm)	D _{P5/P1} (mm)
0 ^o . (*)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 ^o .	1,49	2,42	3,43	1,01	1,94
8 ^o .	2,88	4,59	6,34	1,75	3,46
12 ^o .	4,13	6,50	8,81	2,31	4,68
16 ^o .	5,24	8,15	10,87	2,72	5,63
20 ^o .	6,21	9,55	12,57	3,02	6,36
24 ^o .	7,01	10,70	13,95	3,25	6,94
28 ^o .	7,65	11,60	15,00	3,40	7,35
32 ^o .	8,11	12,25	15,76	3,51	7,65
36 ^o .	8,40	12,65	16,22	3,57	7,82
40 ^o .	8,51	12,80	16,40	3,60	7,89

(*) - Valores de referência.

Os gráficos das figuras 7.6 e 7.7 foram gerados a partir de valores que se encontram nas tabelas 7.13, 7.14, 7.15 e 7.16. Neles mostra-se a variação dos recalques diferenciais dos pilares ao longo dos andares do edifício.

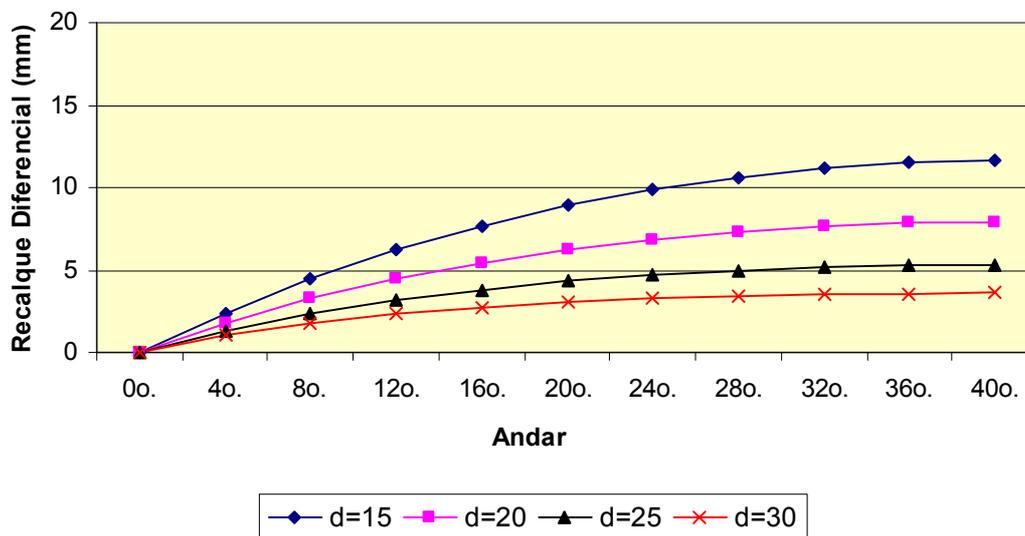


FIGURA 7.6 - Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P2 (*)

(*) - ver coluna 5 das tabelas 7.13, 7.14, 7.15 e 7.16.

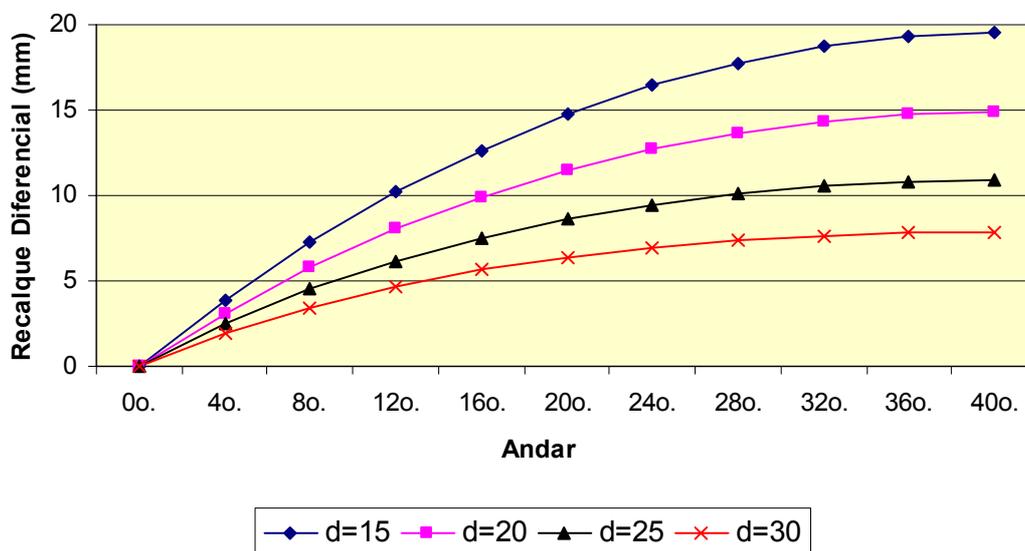


FIGURA 7.7 - Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P1 (*)

(*) - ver coluna 6 das tabelas 7.13, 7.14, 7.15 e 7.16.

TABELA 7.17- Reações de apoio nos pilares com laje de 15 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	R_{P1} (kN)	R_{P2} (kN)	R_{P5} (kN)	$\Delta\%R_{P1}$	$\Delta\%R_{P2}$	$\Delta\%R_{P5}$
0 ^o . (*)	72,96	185,65	465,58	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	75,14	189,27	442,36	3,0	2,0	-5,0
8 ^o .	77,14	192,26	422,40	5,7	3,6	-9,3
12 ^o .	78,94	194,69	405,44	8,2	4,9	-12,9
16 ^o .	80,53	196,66	391,27	10,4	5,9	-16,0
20 ^o .	81,89	198,21	379,60	12,2	6,8	-18,5
24 ^o .	83,02	199,42	370,26	13,8	7,4	-20,5
28 ^o .	83,91	200,32	363,09	15,0	7,9	-22,0
32 ^o .	84,56	200,94	357,98	15,9	8,2	-23,1
36 ^o .	84,96	201,32	354,86	16,5	8,4	-23,8
40 ^o .	85,10	201,38	354,08	16,6	8,5	-23,9

(*) - Valores de referência.

A tabela 7.17 mostrada acima refere-se às reações de apoio dos pilares nas lajes para a espessura da laje tipo de 15 centímetros.

Na coluna 1 tem-se a posição da laje no edifício. Nas colunas 2, 3 e 4 têm-se as reações de apoio R_{P1} , R_{P2} e R_{P5} nos pilares P1, P2 e P5 respectivamente; nas colunas 5, 6 e 7 têm-se as diferenças percentuais em relação às reações de apoio na laje de referência (0^o andar). O processo de cálculo dessas diferenças percentuais é descrito no texto referente à tabela 5.6 do capítulo 5.

Nota-se nas colunas 2 e 3 que os valores das reações de apoio R_{P1} e R_{P2} aumentam à medida que aumenta a altura dos andares. Na laje de referência temos para R_{P1} e R_{P2} os valores de 72,96 kN e 185,65 kN, respectivamente. No 40^o andar, após um aumento gradual ao longo da altura do edifício, R_{P1} e R_{P2} atingem os valores de 85,10 kN e 201,38 kN, respectivamente.

Na coluna 4 têm-se os valores da reação de apoio R_{P5} . Estes valores diminuem gradualmente com o aumento da altura dos andares, ao contrário do que ocorre com os valores de R_{P1} e R_{P2} . Na laje de referência tem-se o valor de 465,58 kN, enquanto que no 40º andar este valor chega a 354,08 kN.

Nas colunas 5, 6 e 7 têm-se os valores das diferenças percentuais referentes às reações de apoio dos pilares P1, P2 e P5, respectivamente. O comportamento dos valores das diferenças percentuais é diretamente ligado ao comportamento de R_{P1} , R_{P2} e R_{P5} e dá uma idéia do quanto elas estão variando. Pode-se ver no 40º andar que $\Delta\%R_{P1} = 16,6\%$, $\Delta\%R_{P2} = 8,5\%$ e $\Delta\%R_{P5} = -23,9\%$.

As tabelas 7.18, 7.19 e 7.20 são análogas à tabela 7.17 tendo como diferença as espessuras da laje, agora de 20, 25 e 30 centímetros, respectivamente.

Nota-se nas três tabelas que os valores de R_{P1} , R_{P2} , R_{P5} , $\Delta\%R_{P1}$, $\Delta\%R_{P2}$ e $\Delta\%R_{P5}$ mantêm o mesmo comportamento descrito na tabela 7.17. Estes valores tendem a aumentar no caso de R_{P1} , R_{P2} , $\Delta\%R_{P1}$ e $\Delta\%R_{P2}$ e a diminuir no caso de R_{P5} e $\Delta\%R_{P5}$, à medida que se aumenta a espessura da laje.

TABELA 7.18 - Reações de apoio nos pilares com laje de 20 centímetros

1 Andar	2 R_{P1} (kN)	3 R_{P2} (kN)	4 R_{P5} (kN)	5 $\Delta\%R_{P1}$	6 $\Delta\%R_{P2}$	7 $\Delta\%R_{P5}$
0º (*)	72,96	185,65	465,58	0,0	0,0	0,0
4º	78,07	190,51	425,68	7,0	2,6	-8,6
8º	82,74	194,03	392,92	13,4	4,5	-15,6
12º	86,92	196,50	366,31	19,1	5,8	-21,3
16º	90,58	198,20	344,88	24,2	6,8	-25,9
20º	93,71	199,33	327,84	28,4	7,4	-29,6
24º	96,28	200,08	314,58	32,0	7,8	-32,4
28º	98,30	200,54	304,66	34,7	8,0	-34,6
32º	99,77	200,80	297,71	36,8	8,2	-36,1
36º	100,68	200,94	293,51	38,0	8,2	-37,0
40º	100,96	200,80	292,92	38,4	8,2	-37,1

(*) - Valores de referência.

TABELA 7.19 - Reações de apoio nos pilares com laje de 25 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	R _{P1} (kN)	R _{P2} (kN)	R _{P5} (kN)	$\Delta\%R_{P1}$	$\Delta\%R_{P2}$	$\Delta\%R_{P5}$
0 ^o . (*)	72,96	185,65	465,58	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	81,75	191,11	408,56	12,1	2,9	-12,2
8 ^o .	89,67	194,21	364,48	22,9	4,6	-21,7
12 ^o .	96,64	195,71	330,58	32,5	5,4	-29,0
16 ^o .	102,65	196,20	304,59	40,7	5,7	-34,6
20 ^o .	107,70	196,09	284,81	47,6	5,6	-38,8
24 ^o .	111,81	195,69	269,98	53,3	5,4	-42,0
28 ^o .	115,00	195,20	259,21	57,6	5,1	-44,3
32 ^o .	117,29	194,75	251,84	60,8	4,9	-45,9
36 ^o .	118,69	194,45	247,44	62,7	4,7	-46,9
40 ^o .	119,08	193,99	247,74	63,2	4,5	-46,8

(*) - Valores de referência.

TABELA 7.20 - Reações de apoio nos pilares com laje de 30 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	R _{P1} (kN)	R _{P2} (kN)	R _{P5} (kN)	$\Delta\%R_{P1}$	$\Delta\%R_{P2}$	$\Delta\%R_{P5}$
0 ^o . (*)	72,96	185,65	465,58	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	85,57	191,49	391,75	17,3	3,1	-15,9
8 ^o .	96,68	193,72	338,38	32,5	4,3	-27,3
12 ^o .	106,22	193,81	299,88	45,6	4,4	-35,6
16 ^o .	114,23	192,77	271,99	56,6	3,8	-41,6
20 ^o .	120,80	191,26	251,78	65,6	3,0	-45,9
24 ^o .	126,02	189,67	237,24	72,7	2,2	-49,0
28 ^o .	129,99	188,26	227,01	78,2	1,4	-51,2
32 ^o .	132,80	187,16	220,18	82,0	0,8	-52,7
36 ^o .	134,51	186,45	216,16	84,4	0,4	-53,6
40 ^o .	134,84	185,67	217,95	84,8	0,0	-53,2

(*) - Valores de referência.

Os gráficos das figuras 7.8, 7.9 e 7.10 foram gerados a partir de valores que se encontram nas tabelas 7.17, 7.18, 7.19 e 7.20. Neles mostra-se a variação das reações de apoio nos pilares ao longo dos andares do edifício.

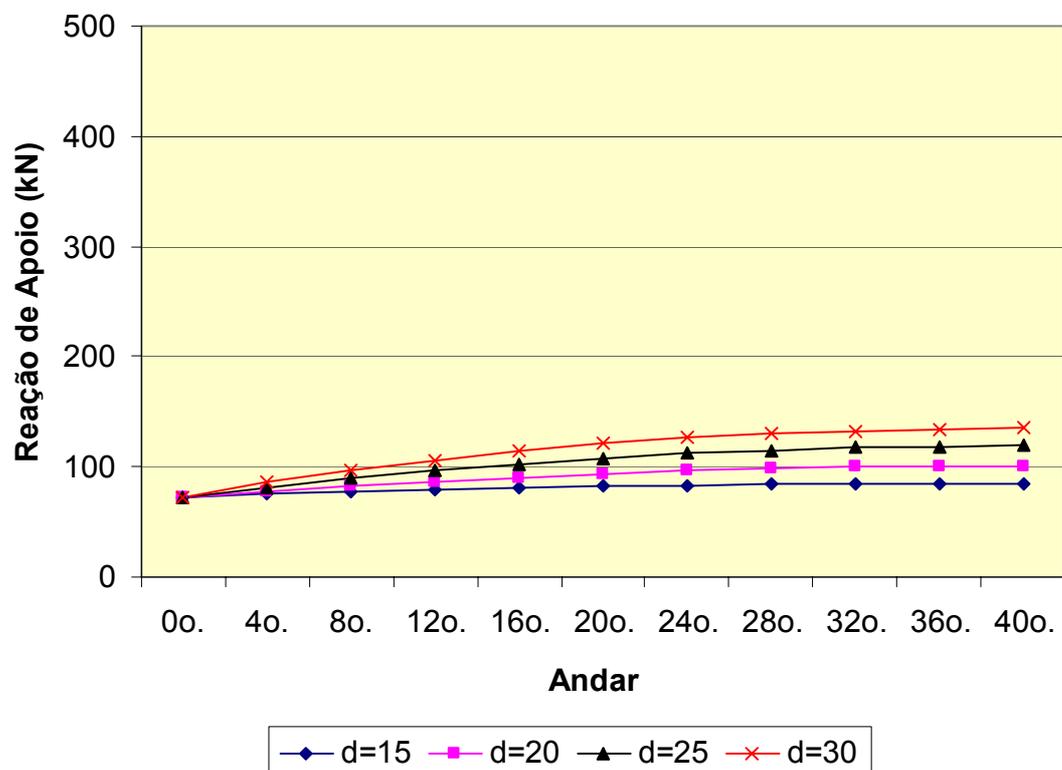


FIGURA 7.8 - Gráfico das reações de apoio do pilar P1 (*)

(*) - ver coluna 2 das tabelas 7.17, 7.18, 7.19 e 7.20.

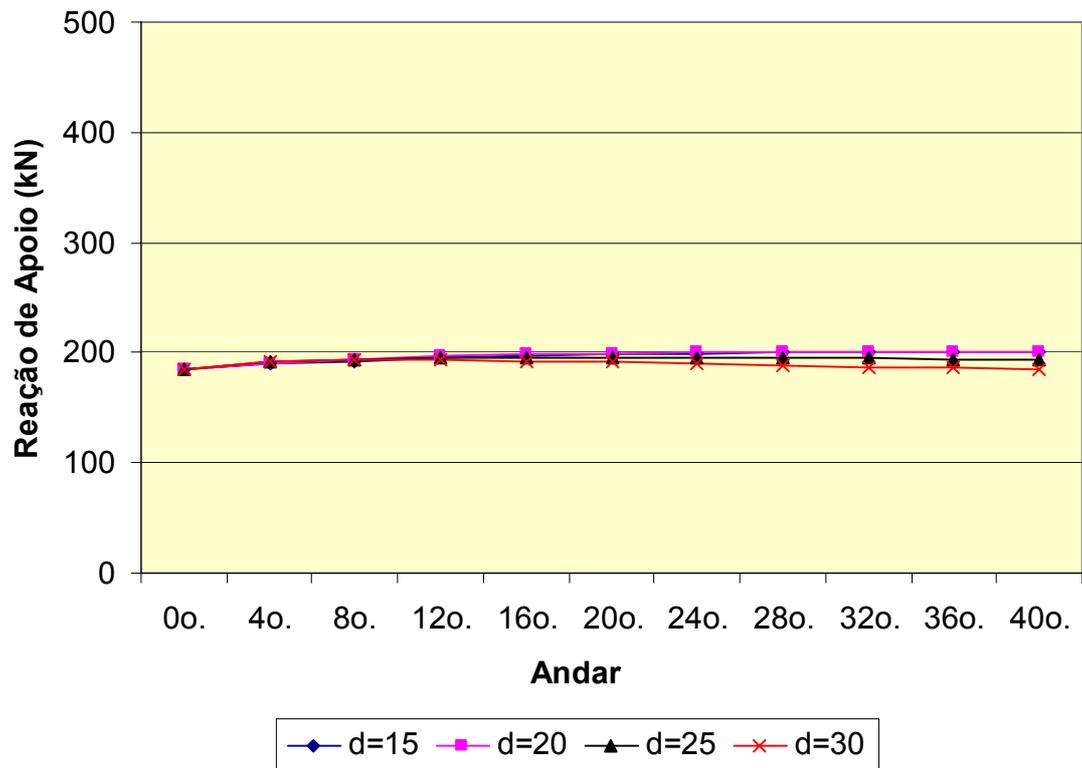


FIGURA 7.9 - Gráfico das reações de apoio do pilar P2 (*)

(*) - ver coluna 3 das tabelas 7.17, 7.18, 7.19 e 7.20.

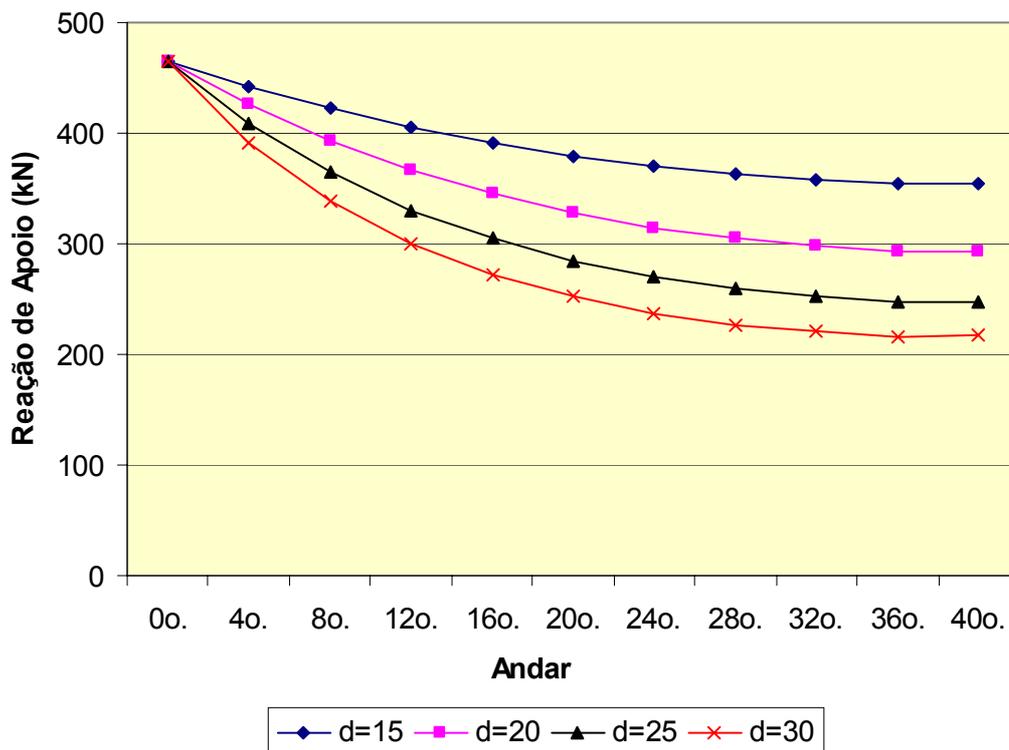


FIGURA 7.10 - Gráfico das reações de apoio do pilar P5 (*)

(*) - ver coluna 4 das tabelas 7.17, 7.18, 7.19 e 7.20.

Na tabela 7.21 tem-se as reações de apoio na fundação para as lajes com espessuras de 15, 20, 25 e 30 centímetros. As reações de apoio R_{F1} , R_{F2} e R_{F5} foram obtidas calculando-se a estrutura do edifício com todo o carregamento aplicado (figura 7.1).

TABELA 7.21 - Reações verticais de apoio na fundação

1	2	3	4
d (cm)	R_{F1} (kN)	R_{F2} (kN)	R_{F5} (kN)
15	3243,30	7875,60	15524,00
20	3671,80	7906,20	13688,00
25	4175,00	7779,70	12181,00
30	4638,40	7604,30	11029,00

Na coluna 2 pode-se ver que, com o aumento da espessura da laje, as reações de apoio no pilar P1 aumentam. Quando a espessura da laje tipo é 15 centímetros tem-se $R_{F1} = 3243,30$ kN e quando a espessura é 30 centímetros tem-se $R_{F1} = 4638,40$ kN.

Na coluna 3 vê-se que as reações R_{F2} mantêm seus valores próximos entre si.

As reações R_{F5} na coluna 4 seguem padrão oposto às reações R_{F1} na coluna 2, ou seja, com o aumento da espessura da laje ocorre diminuição nas reações de apoio. Quando a espessura da laje tipo é 15 centímetros tem-se $R_{F5} = 15524$ kN e quando a espessura é 30 tem-se $R_{F5} = 11029$ kN.

Pode-se concluir pelo exame das quatro colunas da tabela 7.21 que, com o aumento da espessura da laje tipo, ocorre uma redistribuição de cargas nos pilares. O pilar P5 perde carga enquanto que a do pilar P1 aumenta.

Os gráficos mostrados nas figuras 7.11, 7.12 e 7.13 foram gerados a partir de valores que se encontram na tabela 7.21. Neles pode-se ver a variação das reações de apoio R_{F1} , R_{F2} e R_{F5} na fundação dos pilares P1, P2 e P5 respectivamente ao variar-se a espessura da laje tipo.

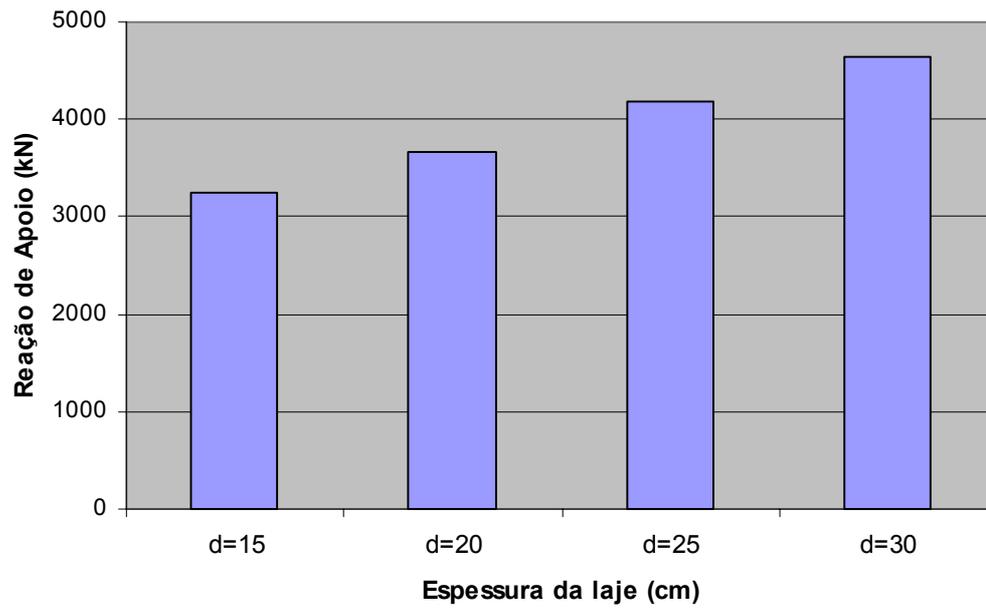


FIGURA 7.11 - Gráfico das reações de apoio R_{F1} na fundação

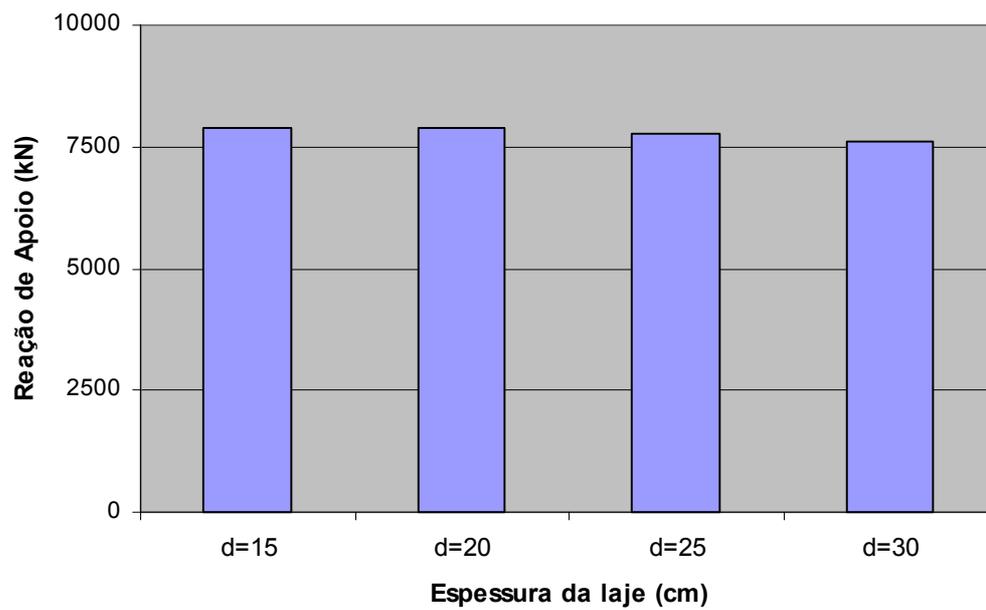


FIGURA 7.12 - Gráfico das reações de apoio R_{F2} na fundação

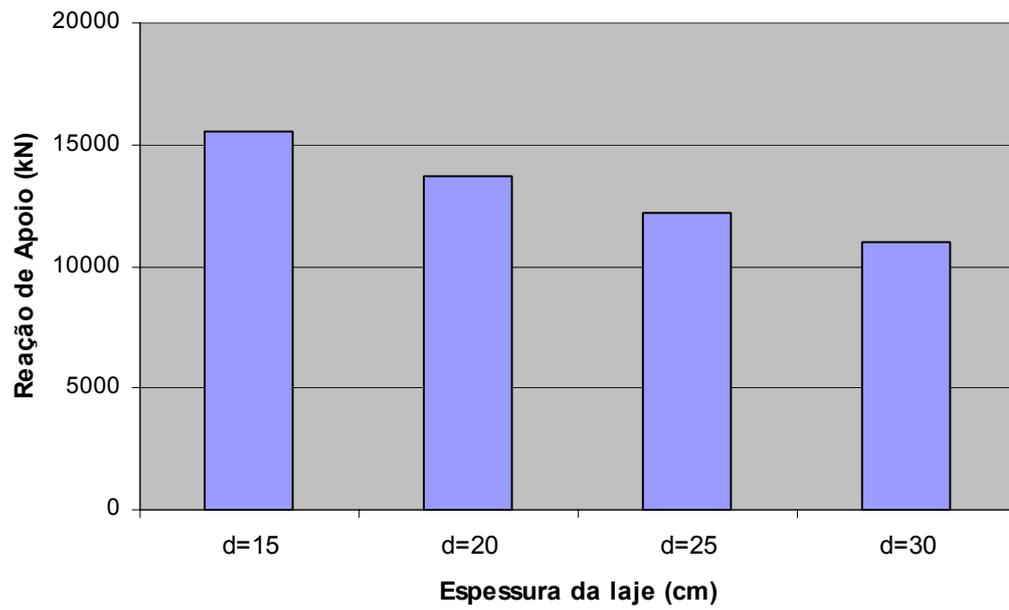


FIGURA 7.13 - Gráfico das reações de apoio RF5 na fundação

8

MODELO LAJE-EVOL

8.1 – DESCRIÇÃO

O modelo de cálculo evolutivo faz uma simulação aproximada daquilo que realmente ocorre com uma estrutura durante seu processo de execução e carregamento.

Neste modelo é possível aplicar os carregamentos na ordem em que eles realmente incidem sobre a estrutura, podendo-se levar em consideração ações importantes que só ocorrem durante a execução tais como peso dos materiais de construção, entulhos de obra, escoramentos e ações estáticas e dinâmicas de equipamentos.

Pelo fato de se calcular a estrutura de forma gradativa, acaba-se estimulando uma maior interação entre aquilo que é feito no escritório de projetos e no canteiro de obras. Isto porque, para o calculista, quanto mais informação da obra ele conseguir colocar no seu projeto, mais refinados serão os resultados que ele irá conseguir e mais próximo da realidade seu modelo estrutural estará.

Outra vantagem importante deste modelo é que, para estruturas executadas com o material concreto armado, acaba-se podendo inserir no cálculo as características do material que variam com o tempo. Pode-se, por exemplo, levar em consideração mais adequadamente as variações que ocorrem no módulo de elasticidade do material ao longo do tempo, coisa que os outros modelos não permitem.

A idéia é mostrar que por mais simples que seja o modelo, desde que ele obedeça a “filosofia” do cálculo evolutivo, ele sempre apresentará resultados melhores do que qualquer um dos modelos apresentados nos capítulos anteriores.

Observando a seqüência das figuras 8.1, 8.2, 8.3, 8.4 e 8.5 pode-se ver como foi feito o cálculo evolutivo deste modelo.

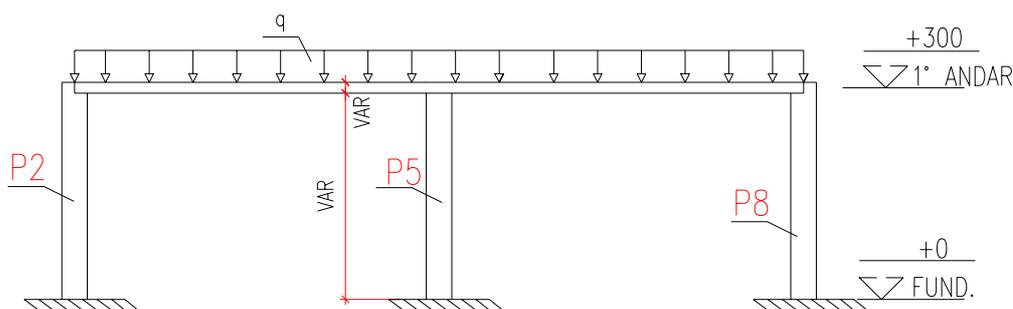


FIGURA 8.1 – Estrutura 1 do Modelo LAJE-EVOL

Na figura 8.1 pode-se ver o esquema da primeira estrutura que se calcula no modelo LAJE-EVOL. Nesta estrutura, considera-se que apenas os elementos estruturais do 1º andar estão com capacidade mecânica para suportar as ações de carregamento. Então, já considerando as contribuições de peso próprio, revestimento, alvenaria e sobrecarga, o carregamento superficial q é aplicado integralmente.

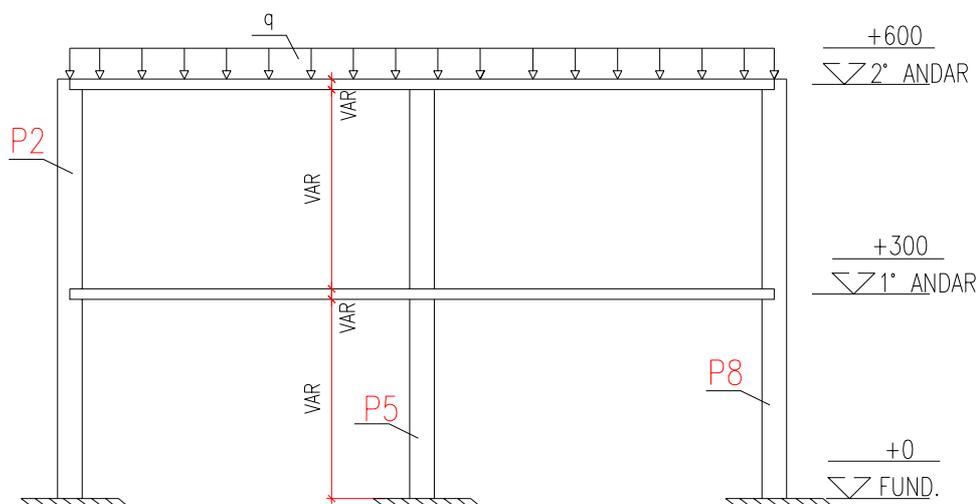


FIGURA 8.2 – Estrutura 2 do Modelo LAJE-EVOL

Na figura 8.2 tem-se o esquema da segunda estrutura calculada no modelo LAJE-EVOL. Nesta estrutura, considera-se que todos os elementos estruturais, até o 2º andar, estão com capacidade mecânica para suportar as ações de carregamento. Assim, o carregamento superficial q é agora aplicado na laje do 2º andar. Note-se que o carregamento é aplicado apenas no 2º andar, uma vez que o do 1º andar já foi aplicado, conforme mostrado na figura 1.

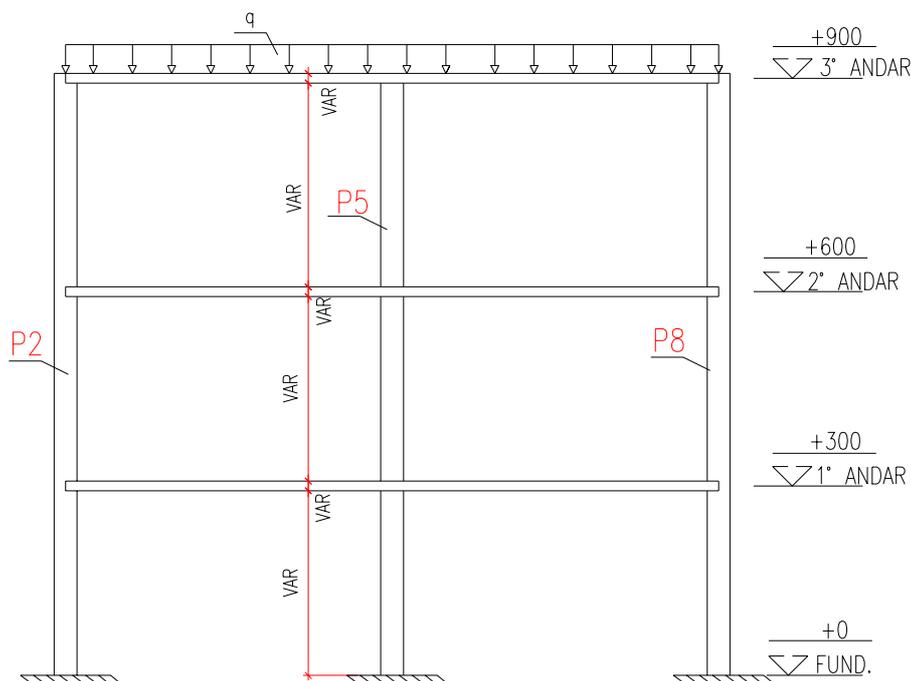


FIGURA 8.3 – Estrutura 3 do Modelo LAJE-EVOL

Na figura 8.3 tem-se o esquema da terceira estrutura calculada no modelo LAJE-EVOL. Nesta estrutura, considera-se que todos os elementos estruturais até o 3º andar estão com capacidade mecânica para suportar as ações de carregamento. Como o carregamento q já foi aplicado nas lajes do 1º e 2º andares, ele é aplicado, agora, apenas na laje do 3º andar.

A descrição das estruturas que vão de 4 a 38 é similar à feita para as estruturas 1,2 e 3.

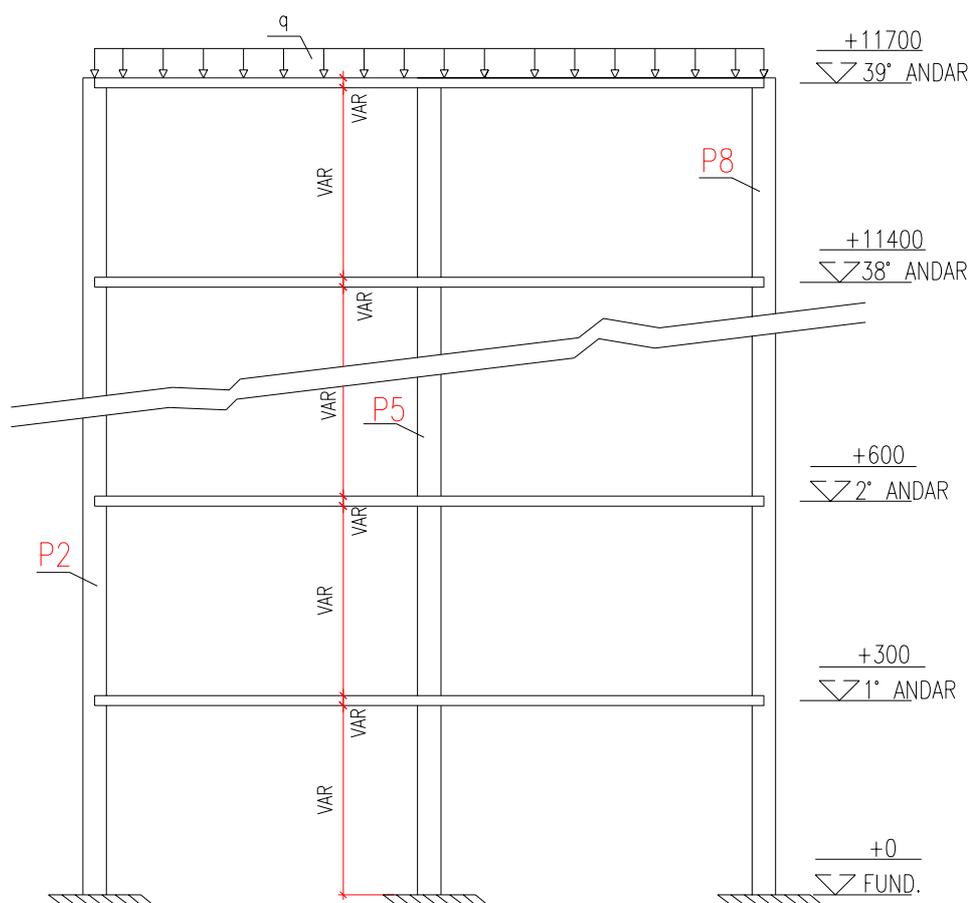


FIGURA 8.4 – Estrutura 39 do Modelo LAJE-EVOL

Na figura 8.4 tem-se o esquema da estrutura 39 calculada no modelo LAJE-EVOL.

Nesta estrutura, considera-se que todos os elementos estruturais, até o 39º andar, estão com capacidade mecânica para suportar as ações de carregamento. Deve-se ter em mente que o carregamento q já foi aplicado nas lajes posicionadas abaixo do 39º andar, assim, ele é aplicado apenas na laje do 39º andar.

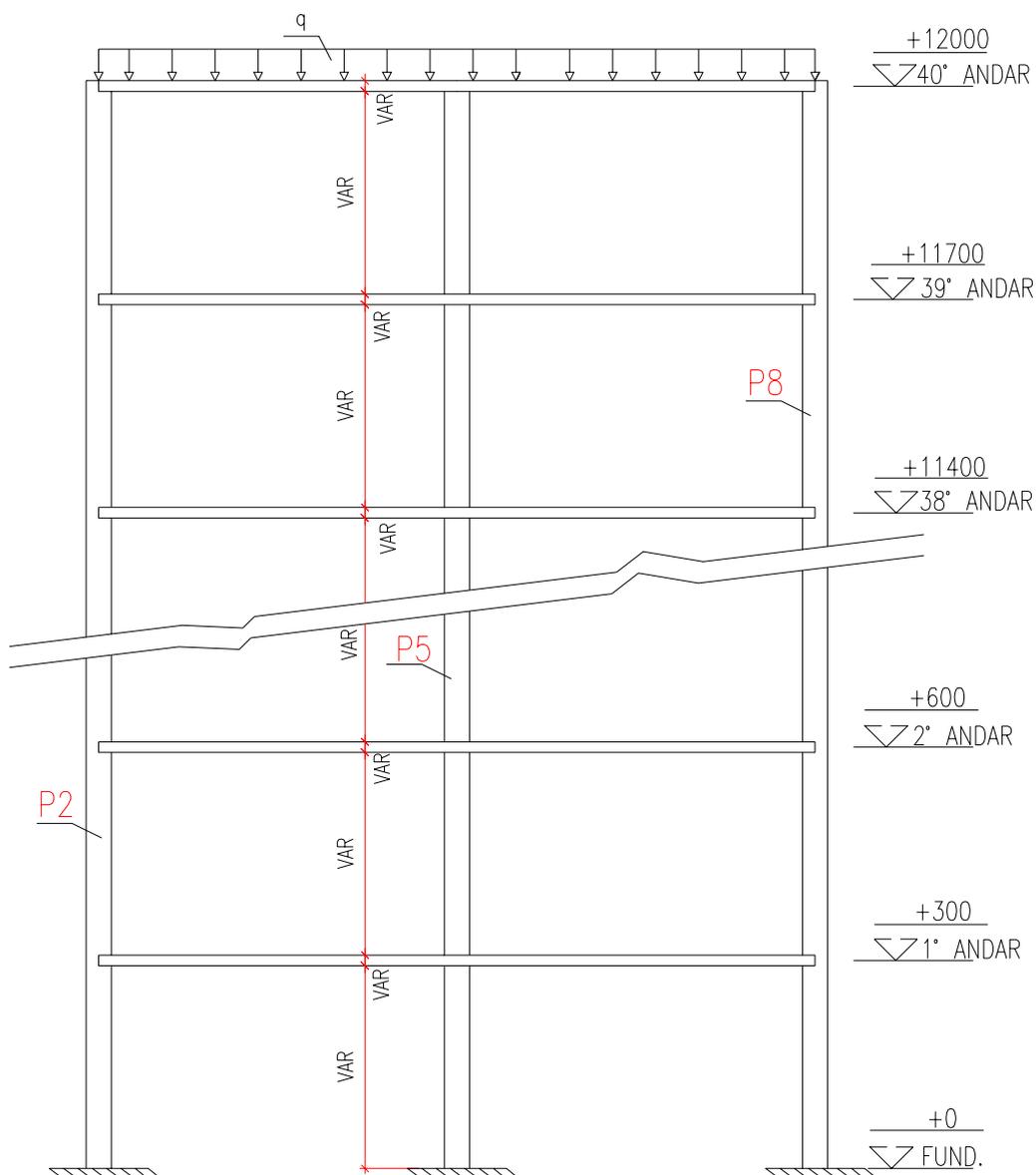


FIGURA 8.5 – Estrutura 40 do Modelo LAJE-EVOL

Na figura 8.5 tem-se o esquema da estrutura 40 calculada no modelo LAJE-EVOL.

Nesta estrutura, considera-se que todos os elementos estruturais, até o 40º andar, estão com capacidade mecânica para suportar as ações de carregamento. Como o carregamento q já foi aplicado nas lajes posicionadas abaixo do 40º andar, ele é aplicado apenas na laje do 40º andar.

A malha de elementos finitos de cada laje calculada será a mesma mostrada na figura 6.2, com todas as características mecânicas do material descritas no capítulo 6.

O mesmo elemento de barra descrito no item 6.1 é utilizado para os pilares neste capítulo.

8.2 - CARREGAMENTO

O carregamento aplicado neste modelo é similar ao aplicado no modelo LAJE-SDA exposto no item 6.2. Todavia, conforme descrito no item anterior este carregamento é aplicado na estrutura em 40 etapas distintas e não simultaneamente, como ocorre no modelo SDA.

8.3 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item, foram feitas análises comparativas dos resultados obtidos através dos processamentos realizados com o modelo evolutivo. Os elementos A, B e C destacados na figura 6.2 também foram os escolhidos para se observar a variação dos esforços. Os processamentos foram feitos usando o programa ANSYS (KOHNRE, 1989).

Ao contrário dos modelos anteriores, a obtenção de resultados no modelo LAJE-EVOL não é feita de forma direta. Nos modelos LAJE-SDA e LAJE-CDA, calcula-se a estrutura completa com todo o carregamento aplicado. Posteriormente, para se fazer as análises necessárias, basta ir diretamente aos resultados de interesse.

No caso do modelo LAJE-EVOL calculam-se 40 estruturas, conforme descrito no item 8.1. Para cada estrutura calculada, anotam-se os resultados relativos aos elementos A, B e C em planilhas distintas, onde é feito um somatório para obterem-se os resultados finais.

Um exemplo do processo feito no cálculo do modelo LAJE-EVOL é mostrado na tabela 8.1, para laje de 20 centímetros de espessura, onde se tem o somatório dos resultados obtidos para o elemento A, na laje localizada no 4^o andar.

TABELA 8.1 – Esforços no centróide do elemento A na laje de 20 centímetros do 4º andar

Estrutura	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	24,421	3,327	0,4033
5	4,29E-02	-4,77E-03	-2,27E-02
6	4,41E-02	-4,21E-03	-2,25E-02
7	4,67E-02	-3,29E-03	-2,22E-02
8	4,64E-02	-3,20E-03	-2,09E-02
9	4,57E-02	-3,20E-03	-1,95E-02
10	4,51E-02	-3,16E-03	-1,80E-02
11	4,45E-02	-3,11E-03	-1,64E-02
12	4,39E-02	-3,05E-03	-1,48E-02
13	4,32E-02	-3,00E-03	-1,32E-02
14	4,26E-02	-2,94E-03	-1,16E-02
15	4,18E-02	-2,88E-03	-9,95E-03
16	4,11E-02	-2,82E-03	-8,32E-03
17	4,04E-02	-2,76E-03	-6,72E-03
18	3,96E-02	-2,70E-03	-5,16E-03
19	3,89E-02	-2,64E-03	-3,63E-03
20	3,81E-02	-2,58E-03	-2,16E-03
21	3,74E-02	-2,52E-03	-7,43E-04
22	3,66E-02	-2,46E-03	6,14E-04
23	3,59E-02	-2,40E-03	1,91E-03
24	3,51E-02	-2,34E-03	3,14E-03
25	3,44E-02	-2,28E-03	4,30E-03
26	3,36E-02	-2,22E-03	5,39E-03
27	3,29E-02	-2,17E-03	6,41E-03
28	3,22E-02	-2,11E-03	7,37E-03
29	3,14E-02	-2,06E-03	8,25E-03
30	3,07E-02	-2,01E-03	9,08E-03
31	3,00E-02	-1,95E-03	9,84E-03
32	2,94E-02	-1,90E-03	1,05E-02
33	2,87E-02	-1,85E-03	1,12E-02
34	2,80E-02	-1,80E-03	1,17E-02
35	2,74E-02	-1,76E-03	1,23E-02
36	2,67E-02	-1,71E-03	1,27E-02
37	2,61E-02	-1,66E-03	1,32E-02
38	2,55E-02	-1,62E-03	1,35E-02
39	2,48E-02	-1,58E-03	1,39E-02
40	2,42E-02	-1,53E-03	1,42E-02
Total	25,717248	3,236748	0,354159

Na coluna 1, tem-se o número da estrutura que foi calculada. Estas estruturas são as mesmas descritas no item 8.1 e ilustradas nas figuras de 8.1 a 8.5.

Nas colunas 2, 3 e 4, têm-se os momentos M_x , M_y e M_{xy} , respectivamente. Pode-se observar nas linhas das três primeiras estruturas, que os resultados obtidos para os momentos são nulos. Isto se deve ao fato de que um elemento localizado no 4º andar, ainda não construído, não é afetado pelos carregamentos que agem nos 1º, 2º e 3º andares. Assim, apenas os carregamentos postos a partir da estrutura 4 passam a afetar a laje do 4º andar .

Observando os resultados da estrutura 4, pode-se ver que seus valores são bem maiores, quando comparados com os valores das estruturas seguintes. Isto se deve ao fato de que o elemento que está sendo estudado localiza-se na laje do 4º andar, onde o carregamento q está sendo aplicado diretamente sobre ele. Quando o carregamento localiza-se nos andares superiores ao 4º, pode-se ver que o efeito vai diminuindo à medida que vai aumentando a altura do carregamento. Assim sendo, quando se calcula a estrutura 40 (carregamento q no 40º andar) obtém-se o menor efeito no 4º andar, como pode ser visto na penúltima linha da tabela 8.1.

Na última linha da tabela 8.1, tem-se a soma das contribuições obtidas em todas as 40 estruturas para os esforços no elemento A localizado no 4ª andar. Estes valores são os resultados finais que irão servir nas análises sobre o comportamento estrutural do elemento A e estão anotados na tabela 8.3.

Observe-se que o procedimento feito para o elemento A localizado no 4º andar também deve ser feito para o elemento A localizado nos demais andares. O mesmo procedimento deve ser repetido para os demais elementos e também para se calcular as reações de apoio e os deslocamentos nos pilares.

Procedendo-se da forma acima descrita, é possível organizar diversas tabelas onde são comparados os resultados relativos a:

- momentos fletores M_x e M_y ;
- momento de torção M_{xy} ;
- reações de apoio nos pilares nos diversos pisos;
- reações verticais de apoio na fundação.

TABELA 8.2 – Esforços no centróide do elemento A na laje de 15 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$\Delta\%M_x$	$\Delta\%M_y$	$\Delta\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	24,33	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	25,00	3,28	0,17	2,8	-1,3	-60,5
8 ^o .	25,50	3,24	0,17	4,8	-2,3	-61,3
12 ^o .	25,84	3,22	0,13	6,2	-3,0	-70,5
16 ^o .	26,05	3,21	0,13	7,0	-3,4	-70,4
20 ^o .	26,11	3,20	0,16	7,3	-3,5	-64,2
24 ^o .	26,04	3,21	0,20	7,0	-3,4	-54,5
28 ^o .	25,84	3,22	0,25	6,2	-3,0	-43,2
32 ^o .	25,52	3,24	0,30	4,9	-2,3	-31,2
36 ^o .	25,08	3,27	0,36	3,1	-1,4	-18,7
40 ^o .	24,51	3,31	0,42	0,7	-0,2	-4,8

(*) – Valores de referência.

Na tabela 8.2 pode-se ver os valores dos esforços obtidos no elemento A da malha representada na figura 6.2. A espessura da laje utilizada foi de 15 cm. A descrição desta tabela é análoga à feita para a tabela 6.1, do capítulo 6.

Através desta tabela, pode-se ver que os esforços variam ao longo dos diversos andares do edifício. Na coluna 2 pode-se perceber que o esforço M_x aumenta do andar 0^o (laje de referência) até o 20^o andar quando, então, M_x passa a ter seus valores diminuídos. Na laje de referência (0^o andar) o esforço é de 24,33 kN.m/m; ele cresce gradualmente até o 20^o

andar chegando ao valor de 26,11 kN.m/m; a partir de então, o valor de M_x passa a diminuir, chegando ao valor de 24,51 kN.m/m no 40º andar.

Na coluna 3 a variação de M_y se dá ao contrário à de M_x na coluna 2. Inicialmente os esforços vão diminuindo com a altura, começando com 3,32 kN.m/m na laje de referência (0º andar) e diminuindo até o valor de 3,20 kN.m/m no 20º andar; em seguida, os valores sobem até atingir o valor de 3,31 kN.m/m no topo do edifício.

Na coluna 4 tem-se os valores do momento torsor. Inicialmente o momento torsor M_{xy} diminui seu valor de 0,44 kN.m/m para 0,13 kN.m/m no 12º andar. Este valor mantém-se constante no 16º andar para, em seguida, subir para o valor 0,16 kN.m/m no 20º andar; do 20º ao 40º andar os valores de M_{xy} vão aumentando gradualmente até atingir 0,42 kN.m/m.

Nas colunas 5, 6 e 7 têm-se as variações percentuais $\Delta\%M_x$, $\Delta\%M_y$ e $\Delta\%M_{xy}$, obtidas comparando-se os esforços nos diversos andares com os da laje de referência (0º andar). A análise destas colunas dá uma idéia percentual de como os esforços em um mesmo ponto da laje tipo podem variar ao longo dos vários andares. O processo de obtenção desses valores é o mesmo mostrado no item 5.3 do capítulo 5.

As tabelas 8.3, 8.4 e 8.5 mostradas a seguir referem-se a este mesmo elemento A. Todavia, as espessuras da laje tipo são, agora, de 20, 25 e 30 centímetros respectivamente. Note-se que os valores de M_x , M_y e M_{xy} , bem como de $\Delta\%M_x$, $\Delta\%M_y$ e $\Delta\%M_{xy}$, variam à medida que se aumenta a espessura da laje. No mais, praticamente o mesmo comportamento observado na tabela 8.2 em M_x , M_y , M_{xy} , $\Delta\%M_x$, $\Delta\%M_y$ e $\Delta\%M_{xy}$ é também observado nas tabelas 8.3, 8.4 e 8.5.

TABELA 8.3 – Esforços no centróide do elemento A na laje de 20 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$\Delta\%M_x$	$\Delta\%M_y$	$\Delta\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	24,33	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	25,72	3,24	0,35	5,7	-2,5	-19,5
8 ^o .	26,71	3,17	0,42	9,8	-4,5	-4,7
12 ^o .	27,38	3,13	0,56	12,5	-5,8	26,7
16 ^o .	27,75	3,10	0,71	14,1	-6,5	60,5
20 ^o .	27,85	3,10	0,82	14,5	-6,7	86,2
24 ^o .	27,69	3,11	0,87	13,8	-6,4	97,5
28 ^o .	27,28	3,14	0,85	12,1	-5,6	94,2
32 ^o .	26,65	3,18	0,75	9,5	-4,3	71,3
36 ^o .	25,61	3,24	0,58	5,3	-2,5	32,2
40 ^o .	24,69	3,31	0,46	1,5	-0,3	5,2

(*) – Valores de referência.

TABELA 8.4 – Esforços no centróide do elemento A na laje de 25 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$\Delta\%M_x$	$\Delta\%M_y$	$\Delta\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	24,33	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	26,64	3,19	0,69	9,5	-3,9	56,7
8 ^o .	28,22	3,09	1,17	16,0	-7,0	166,6
12 ^o .	29,23	3,02	1,68	20,1	-9,0	282,1
16 ^o .	29,75	2,99	2,07	22,3	-9,9	370,5
20 ^o .	29,85	2,99	2,26	22,7	-10,1	413,5
24 ^o .	29,57	3,00	2,22	21,5	-9,5	405,3
28 ^o .	28,93	3,05	1,98	18,9	-8,3	349,4
32 ^o .	27,94	3,11	1,57	14,8	-6,4	256,0
36 ^o .	26,60	3,19	1,06	9,3	-3,8	140,2
40 ^o .	24,90	3,31	0,53	2,4	-0,3	21,4

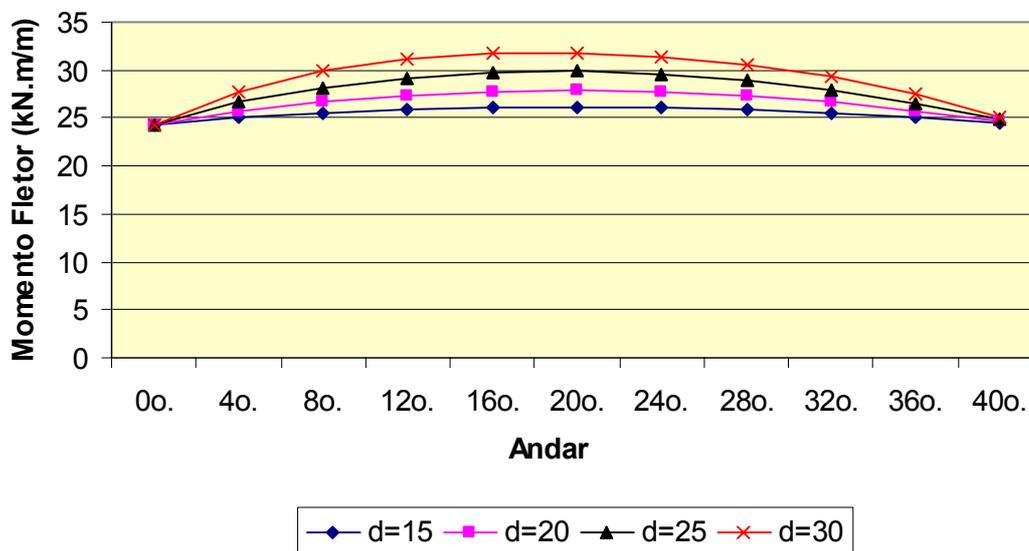
(*) – Valores de referência.

TABELA 8.5 – Esforços no centróide do elemento A na laje de 30 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$\Delta\%M_x$	$\Delta\%M_y$	$\Delta\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	24,33	3,32	0,44	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	27,68	3,14	1,23	13,8	-5,4	180,3
8 ^o .	29,85	3,00	2,33	22,7	-9,5	429,1
12 ^o .	31,15	2,92	3,30	28,0	-11,9	649,9
16 ^o .	31,77	2,89	3,92	30,6	-13,1	790,2
20 ^o .	31,83	2,88	4,11	30,8	-13,1	833,0
24 ^o .	31,41	2,91	3,88	29,1	-12,3	782,9
28 ^o .	30,55	2,96	3,32	25,6	-10,7	654,6
32 ^o .	29,24	3,05	2,50	20,2	-8,3	468,8
36 ^o .	27,46	3,16	1,55	12,8	-4,9	251,6
40 ^o .	25,15	3,31	0,60	3,4	-0,2	37,4

(*) – Valores de referência.

O gráfico da figura 8.6 foi gerado a partir de valores que se encontram nas tabelas 8.2, 8.3, 8.4 e 8.5. Nele mostra-se a variação do momento fletor M_x do elemento A ao longo dos andares do edifício.

**FIGURA 8.6 – Gráfico do momento fletor M_x – Elemento A (*)**

(*) - ver coluna 2 das tabelas 8.2, 8.3, 8.4 e 8.5.

TABELA 8.6 – Esforços no centróide do elemento B na laje de 15 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$\Delta\%M_x$	$\Delta\%M_y$	$\Delta\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
4 ^o .	19,14	19,14	0	4,1	4,1	0
8 ^o .	19,70	19,70	0	7,1	7,1	0
12 ^o .	20,09	20,09	0	9,3	9,3	0
16 ^o .	20,32	20,32	0	10,5	10,5	0
20 ^o .	20,39	20,39	0	10,9	10,9	0
24 ^o .	20,31	20,31	0	10,5	10,5	0
28 ^o .	20,09	20,09	0	9,2	9,2	0
32 ^o .	19,72	19,72	0	7,3	7,3	0
36 ^o .	19,22	19,22	0	4,5	4,5	0
40 ^o .	18,58	18,58	0	1,1	1,1	0

(*) – Valores de referência.

Na tabela 8.6 pode-se ver os valores dos esforços obtidos no elemento B da malha representada na figura 6.2. A espessura da laje utilizada foi de 15 centímetros. A descrição desta tabela é análoga à feita para a tabela 6.1, do capítulo 6.

Devido à simetria, os valores de M_x e M_y mostrados respectivamente nas colunas 2 e 3 são iguais. Pode-se ver nessas colunas que, quando a laje tipo está localizada no 20^o andar, os esforços M_x e M_y são máximos e seu valor é 20,39 kN.m/m. Esse comportamento é o mesmo descrito para a tabela 8.2.

As colunas 5, 6 e 7 representam, respectivamente, as diferenças percentuais de M_x , M_y e M_{xy} . O valor máximo de $\Delta\%M_x = \Delta\%M_y = 10,9\%$ observado se dá no 20^o andar.

As tabelas 8.7, 8.8 e 8.9 mostradas a seguir referem-se a este mesmo elemento B. Todavia, as espessuras da laje tipo são, agora, 20, 25 e 30 centímetros, respectivamente. Note-se que os valores de M_x e M_y , bem como de $\Delta\%M_x$ e $\Delta\%M_y$, variam à medida que se aumenta a

espessura da laje. No mais, deve-se levar em conta que o mesmo comportamento observado em M_x , M_y , M_{xy} , $\Delta\%M_x$, $\Delta\%M_y$ e $\Delta\%M_{xy}$ na tabela 8.6 repete-se para as tabelas a seguir.

TABELA 8.7 – Esforços no centróide do elemento B na laje de 20 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$\Delta\%M_x$	$\Delta\%M_y$	$\Delta\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
4 ^o .	19,93	19,93	0	8,4	8,4	0
8 ^o .	21,05	21,05	0	14,5	14,5	0
12 ^o .	21,79	21,79	0	18,5	18,5	0
16 ^o .	22,20	22,20	0	20,8	20,8	0
20 ^o .	22,31	22,31	0	21,3	21,3	0
24 ^o .	22,12	22,12	0	20,3	20,3	0
28 ^o .	21,67	21,67	0	17,9	17,9	0
32 ^o .	20,96	20,96	0	14,0	14,0	0
36 ^o .	20,00	20,00	0	8,8	8,8	0
40 ^o .	18,77	18,77	0	2,1	2,1	0

(*) – Valores de referência.

TABELA 8.8 – Esforços no centróide do elemento B na laje de 25 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$\Delta\%M_x$	$\Delta\%M_y$	$\Delta\%M_{xy}$
0° (*)	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
4°	20,94	20,94	0	13,9	13,9	0
8°	22,70	22,70	0	23,5	23,5	0
12°	23,82	23,82	0	29,5	29,5	0
16°	24,39	24,39	0	32,7	32,7	0
20°	24,49	24,49	0	33,2	33,2	0
24°	24,17	24,17	0	31,5	31,5	0
28°	23,46	23,46	0	27,6	27,6	0
32°	22,37	22,37	0	21,7	21,7	0
36°	20,89	20,89	0	13,6	13,6	0
40°	19,00	19,00	0	3,3	3,3	0

(*) – Valores de referência.

TABELA 8.9 – Esforços no centróide do elemento B na laje de 30 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$\Delta\%M_x$	$\Delta\%M_y$	$\Delta\%M_{xy}$
0° (*)	18,39	18,39	0	0,0	0,0	0
4°	22,07	22,07	0	20,1	20,1	0
8°	24,46	24,46	0	33,1	33,1	0
12°	25,89	25,89	0	40,8	40,8	0
16°	26,57	26,57	0	44,5	44,5	0
20°	26,63	26,63	0	44,8	44,8	0
24°	26,17	26,17	0	42,3	42,3	0
28°	25,22	25,22	0	37,1	37,1	0
32°	23,78	23,78	0	29,3	29,3	0
36°	21,81	21,81	0	18,6	18,6	0
40°	19,25	19,25	0	4,7	4,7	0

(*) – Valores de referência.

O gráfico da figura 8.7 foi gerado a partir de valores que se encontram nas tabelas 8.6, 8.7, 8.8 e 8.9. Nele mostra-se a variação dos momentos fletores M_x e M_y do elemento B ao longo dos andares do edifício.

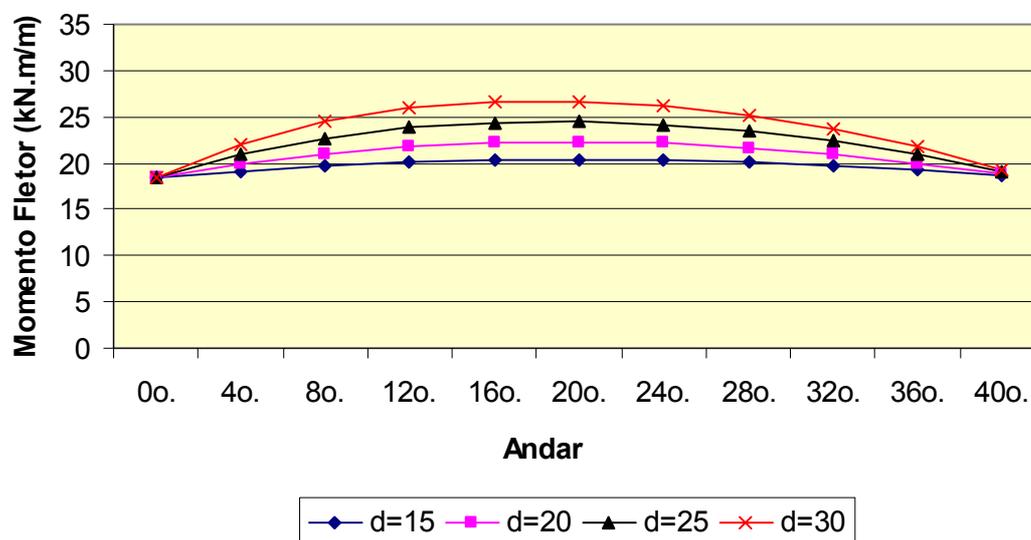


FIGURA 8.7 – Gráfico dos momentos fletores M_x e M_y – Elemento B (*)

(*) - ver colunas 2 e 3 das tabelas 8.6, 8.7, 8.8 e 8.9.

TABELA 8.10 – Esforços no centróide do elemento C na laje de 15 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$\Delta\%M_x$	$\Delta\%M_y$	$\Delta\%M_{xy}$
0 ^{o.} (*)	-10,03	22,89	0,86	0,0	0,0	0,0
4 ^{o.}	-7,40	23,96	0,67	26,2	4,7	-22,1
8 ^{o.}	-5,41	24,75	0,52	46,1	8,1	-39,5
12 ^{o.}	-4,03	25,29	0,45	59,8	10,5	-47,7
16 ^{o.}	-3,24	25,60	0,43	67,7	11,8	-50,0
20 ^{o.}	-3,01	25,69	0,37	70,0	12,2	-57,0
24 ^{o.}	-3,30	25,57	0,40	67,1	11,7	-53,5
28 ^{o.}	-4,10	25,25	0,46	59,1	10,3	-46,5
32 ^{o.}	-5,38	24,74	0,55	46,4	8,1	-36,1
36 ^{o.}	-7,15	24,04	0,67	28,7	5,0	-22,1
40 ^{o.}	-9,40	23,16	0,82	6,3	1,2	-4,7

(*) – Valores de referência.

Na tabela 8.10 pode-se ver os valores dos esforços obtidos no centróide do elemento C da malha representada na figura 6.2. A espessura da laje utilizada foi de 15 centímetros. A descrição desta tabela é análoga à feita para a tabela 6.1, do capítulo 6.

Na coluna 2, onde se tem o momento fletor M_x , pode-se ver que na laje de referência (0º andar) seu valor é de $-10,03$ kN.m/m e no 20º andar este valor chega a $-3,01$ kN.m/m. Depois M_x diminui chegando, no 40º andar, ao valor de $-9,40$ kN.m/m.

Os valores do momento M_y , mostrados na coluna 3, não variam tanto como os observados na coluna 2 para M_x . Na laje de referência o valor de M_y é de $22,89$ kN.m/m e no 20º andar este valor chega a $25,69$ kN.m/m. Depois M_y diminui chegando, no 40º andar, ao valor de $23,16$ kN.m/m.

No momento torsor M_{xy} da coluna 4 o comportamento observado nos valores é de diminuição até o 20º andar onde, a partir daí, esses valores passam a crescer. Na laje de referência o valor de M_{xy} é de $0,86$ kN.m/m, no 20º andar este valor cai para $0,37$ kN.m/m e no 40º ele sobe para $0,82$ kN.m/m.

As colunas 5, 6 e 7 representam, respectivamente, as diferenças percentuais de M_x , M_y e M_{xy} . O valor máximo de $\Delta\%M_x$ é de $70,0\%$ e o de $\Delta\%M_y$ é de $12,2\%$, ambos observados no 20º andar.

As tabelas 8.11, 8.12 e 8.13 mostradas a seguir referem-se a este mesmo elemento C. Todavia, as espessuras da laje tipo são, agora, de 20, 25 e 30 centímetros, respectivamente. Nota-se que os valores de M_x , M_y , M_{xy} , $\Delta\%M_x$, $\Delta\%M_y$ e $\Delta\%M_{xy}$ variam à medida que se aumenta a espessura da laje. No mais, deve-se levar em conta que o mesmo comportamento observado em M_x , M_y , M_{xy} , $\Delta\%M_x$, $\Delta\%M_y$ e $\Delta\%M_{xy}$ na tabela 8.10 repete-se para as tabelas 8.11, 8.12 e 8.13.

TABELA 8.11 – Esforços no centróide do elemento C na laje de 20 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$\Delta\%M_x$	$\Delta\%M_y$	$\Delta\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	-10,03	22,89	0,86	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	-4,74	25,01	0,52	52,8	9,3	-39,6
8 ^o .	-0,90	26,51	0,29	91,1	15,8	-66,1
12 ^o .	1,63	27,48	0,16	116,3	20,1	-81,6
16 ^o .	2,99	28,00	0,10	129,8	22,3	-88,3
20 ^o .	3,29	28,11	0,10	132,8	22,8	-88,1
24 ^o .	2,64	27,85	0,15	126,4	21,6	-82,3
28 ^o .	1,09	27,24	0,24	110,9	19,0	-71,5
32 ^o .	-1,33	26,30	0,38	86,7	14,9	-55,8
36 ^o .	-5,18	24,79	0,58	48,4	8,3	-32,2
40 ^o .	-8,85	23,39	0,80	11,8	2,2	-7,1

(*) – Valores de referência.

TABELA 8.12 – Esforços no centróide do elemento C na laje de 25 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$\Delta\%M_x$	$\Delta\%M_y$	$\Delta\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	-10,03	22,89	0,86	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	-1,48	26,28	0,38	85,3	14,8	-55,4
8 ^o .	4,40	28,53	0,10	143,9	24,7	-87,8
12 ^o .	8,05	29,91	-0,03	180,3	30,7	-103,5
16 ^o .	9,87	30,58	-0,07	198,4	33,6	-108,4
20 ^o .	10,14	30,66	-0,05	201,1	34,0	-106,4
24 ^o .	9,05	30,24	0,01	190,2	32,1	-99,2
28 ^o .	6,69	29,35	0,11	166,7	28,2	-87,3
32 ^o .	3,09	27,98	0,26	130,8	22,2	-69,9
36 ^o .	-1,83	26,10	0,47	81,7	14,0	-45,0
40 ^o .	-8,22	23,67	0,78	18,1	3,4	-9,2

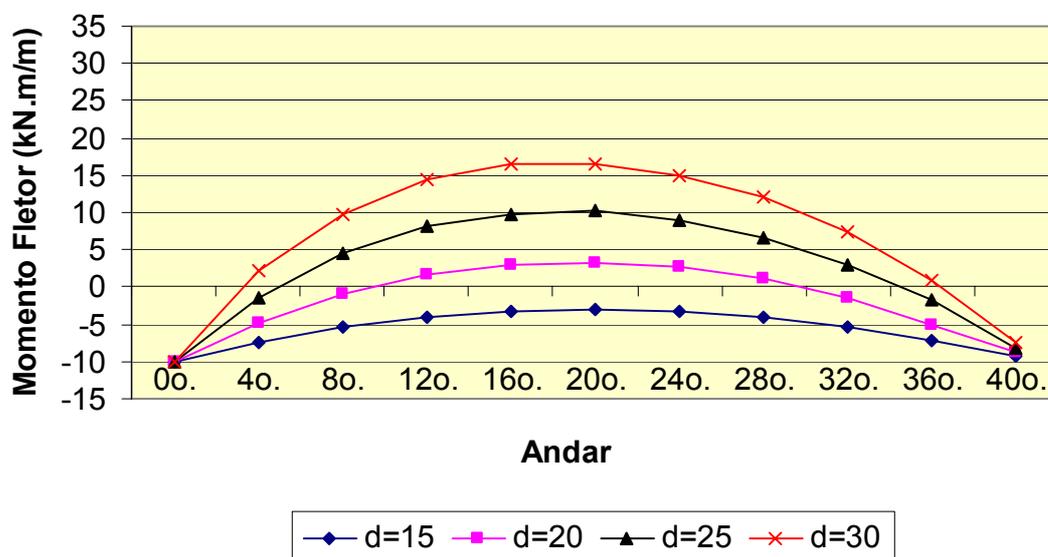
(*) – Valores de referência.

TABELA 8.13 – Esforços no centróide do elemento C na laje de 30 centímetros

1	2	3	4	5	6	7
Andar	M_x (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_{xy} (kN.m/m)	$\Delta\%M_x$	$\Delta\%M_y$	$\Delta\%M_{xy}$
0 ^o . (*)	-10,03	22,89	0,86	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	2,06	27,65	0,27	120,6	20,8	-68,4
8 ^o .	9,86	30,60	-0,01	198,3	33,7	-101,7
12 ^o .	14,38	32,27	-0,12	243,4	41,0	-113,9
16 ^o .	16,45	33,01	-0,14	264,0	44,2	-115,7
20 ^o .	16,58	33,04	-0,11	265,3	44,3	-112,7
24 ^o .	15,07	32,47	-0,05	250,2	41,9	-106,4
28 ^o .	12,02	31,34	0,03	219,8	36,9	-96,3
32 ^o .	7,40	29,61	0,17	173,7	29,4	-80,1
36 ^o .	1,00	27,20	0,40	109,9	18,8	-53,9
40 ^o .	-7,56	23,98	0,76	24,6	4,7	-11,2

(*) – Valores de referência.

Os gráficos das figuras 8.8 e 8.9 foram gerados a partir de valores que se encontram nas tabelas 8.10, 8.11, 8.12 e 8.13. Neles mostra-se a variação dos momentos fletores M_x e M_y do elemento C ao longo dos andares do edifício.

**FIGURA 8.8 – Gráfico do momento fletor M_x – Elemento C (*)**

(*) - ver coluna 2 das tabelas 8.10, 8.11, 8.12 e 8.13.

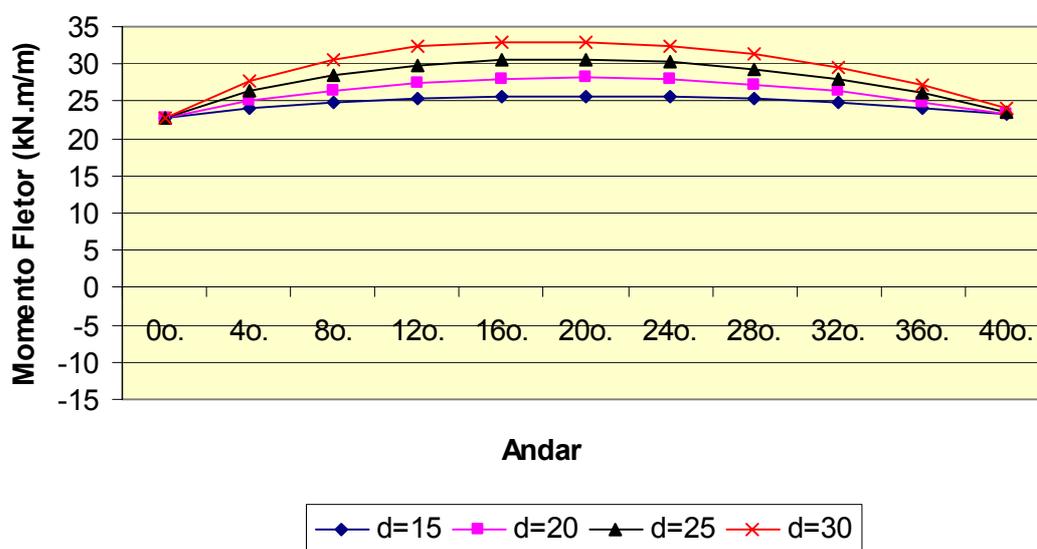


FIGURA 8.9 – Gráfico do momento fletor M_y – Elemento C (*)

(*) - ver coluna 3 das tabelas 8.10, 8.11, 8.12 e 8.13.

TABELA 8.14 – Recalques diferenciais nos pilares com laje de 15 centímetros

1	2	3	4	5	6
Andar	U_{P1} (mm)	U_{P2} (mm)	U_{P5} (mm)	$D_{P5/P2}$ (mm)	$D_{P5/P1}$ (mm)
0 ^o . (*)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 ^o .	0,94	2,37	5,08	2,71	4,13
8 ^o .	1,69	4,25	8,97	4,72	7,27
12 ^o .	2,24	5,62	11,70	6,08	9,46
16 ^o .	2,59	6,47	13,32	6,85	10,73
20 ^o .	2,74	6,81	13,87	7,05	11,13
24 ^o .	2,67	6,63	13,36	6,73	10,69
28 ^o .	2,40	5,92	11,84	5,92	9,44
32 ^o .	1,91	4,69	9,32	4,63	7,41
36 ^o .	1,20	2,93	5,80	2,87	4,60
40 ^o .	0,27	0,65	1,28	0,63	1,02

(*) – Valores de referência.

A tabela 8.14 mostrada acima refere-se aos recalques diferenciais dos pilares para a espessura da laje tipo de 15 centímetros.

Na coluna 1 tem-se a posição da laje no edifício. Nas colunas 2, 3 e 4 têm-se os deslocamentos verticais U_{P1} , U_{P2} e U_{P5} (positivos para baixo) nos pilares P1, P2 e P5, respectivamente; nas colunas 5 e 6 têm-se os recalques diferenciais de P2 e P1 em relação a P5. O processo de cálculo destes recalques diferenciais é descrito no texto relativo à tabela 5.5 do capítulo 5.

Nota-se nas colunas 2, 3 e 4 que o comportamento dos três pilares é semelhante ao se variar à posição da laje ao longo da altura do edifício. Na laje de referência (0° andar), onde os apoios são infinitamente rígidos, tem-se um deslocamento vertical igual a zero para todos os pilares. A partir daí, o deslocamento vertical vai aumentando à medida que aumenta a altura do andar, até atingir um deslocamento máximo na metade do edifício (20° andar). Depois, o deslocamento vai diminuindo gradualmente até o topo do edifício (40° andar). Os recalques diferenciais mostrados nas colunas 5 e 6 dão uma idéia melhor das diferenças entre os deslocamentos dos pilares. Pode-se ver que o pilar P5 desloca-se mais em relação ao pilar P1 do que em relação ao pilar P2.

As tabelas 8.15, 8.16 e 8.17 são análogas à tabela 8.14 tendo como diferença as espessuras da laje, agora de 20, 25 e 30 centímetros, respectivamente.

Nota-se nas três tabelas que os valores de U_{P1} , U_{P2} , U_{P5} , $\Delta_{P5/P2}$ e $\Delta_{P5/P1}$ mantêm o mesmo comportamento descrito para a tabela 8.14. Todavia, eles tendem a diminuir à medida que aumenta a espessura da laje.

TABELA 8.15 – Recalques diferenciais nos pilares com laje de 20 centímetros

1	2	3	4	5	6
Andar	U _{P1} (mm)	U _{P2} (mm)	U _{P5} (mm)	D _{P5/P2} (mm)	D _{P5/P1} (mm)
0 ^o . (*)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 ^o .	1,02	2,41	4,61	2,20	3,59
8 ^o .	1,84	4,32	8,07	3,75	6,22
12 ^o .	2,46	5,72	10,45	4,73	7,99
16 ^o .	2,86	6,59	11,82	5,23	8,96
20 ^o .	3,03	6,92	12,24	5,32	9,20
24 ^o .	2,98	6,73	11,76	5,03	8,78
28 ^o .	2,69	5,99	10,40	4,41	7,71
32 ^o .	2,15	4,73	8,18	3,45	6,03
36 ^o .	1,35	2,95	5,10	2,15	3,74
40 ^o .	0,30	0,65	1,13	0,48	0,83

(*) – Valores de referência.

TABELA 8.16 – Recalques diferenciais nos pilares com laje de 25 centímetros

1	2	3	4	5	6
Andar	U _{P1} (mm)	U _{P2} (mm)	U _{P5} (mm)	D _{P5/P2} (mm)	D _{P5/P1} (mm)
0 ^o . (*)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 ^o .	1,13	2,42	4,16	1,75	3,03
8 ^o .	2,05	4,33	7,22	2,89	5,16
12 ^o .	2,75	5,71	9,27	3,56	6,52
16 ^o .	3,22	6,57	10,43	3,87	7,21
20 ^o .	3,44	6,89	10,78	3,89	7,34
24 ^o .	3,39	6,67	10,34	3,67	6,95
28 ^o .	3,06	5,93	9,15	3,22	6,09
32 ^o .	2,45	4,67	7,22	2,54	4,77
36 ^o .	1,54	2,91	4,51	1,61	2,97
40 ^o .	0,34	0,64	1,01	0,37	0,66

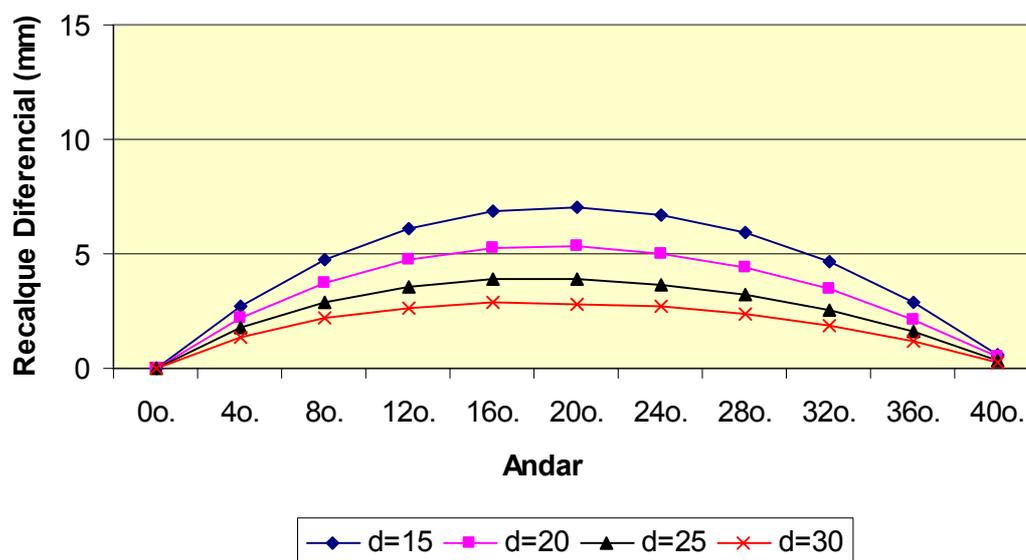
(*) – Valores de referência.

TABELA 8.17 – Recalques diferenciais nos pilares com laje de 30 centímetros

1	2	3	4	5	6
Andar	U _{P1} (mm)	U _{P2} (mm)	U _{P5} (mm)	D _{P5/P2} (mm)	D _{P5/P1} (mm)
0 ^o . (*)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 ^o .	1,25	2,39	3,78	1,38	2,53
8 ^o .	2,28	4,28	6,49	2,21	4,20
12 ^o .	3,08	5,63	8,29	2,66	5,21
16 ^o .	3,62	6,46	9,30	2,84	5,68
20 ^o .	3,86	6,75	9,59	2,84	5,73
24 ^o .	3,81	6,53	9,21	2,68	5,40
28 ^o .	3,44	5,80	8,17	2,37	4,73
32 ^o .	2,74	4,57	6,46	1,89	3,72
36 ^o .	1,72	2,84	4,06	1,22	2,34
40 ^o .	0,38	0,63	0,91	0,29	0,53

(*) – Valores de referência.

Os gráficos das figuras 8.10 e 8.11 foram gerados a partir de valores que se encontram nas tabelas 8.14, 8.15, 8.16 e 8.17. Neles mostra-se a variação dos recalques diferenciais dos pilares ao longo dos andares do edifício.

**FIGURA 8.10 – Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P2 (*)**

(*) - ver coluna 5 das tabelas 8.14, 8.15, 8.16 e 8.17.

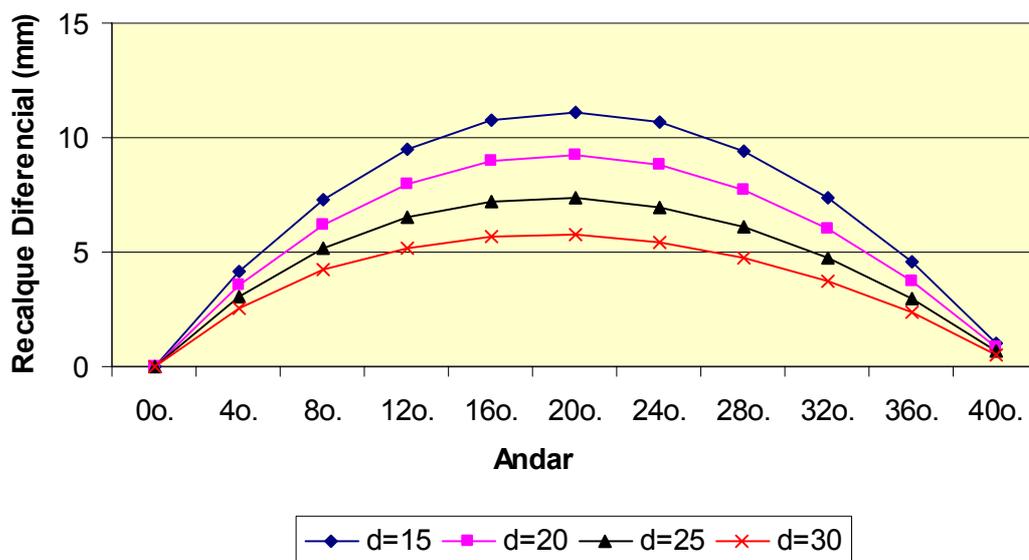


FIGURA 8.11 – Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P1 (*)

(*) - ver coluna 6 das tabelas 8.14, 8.15, 8.16 e 8.17.

TABELA 8.18– Reações de apoio nos pilares com laje de 15 centímetros

1 Andar	2 R _{P1} (kN)	3 R _{P2} (kN)	4 R _{P5} (kN)	5 $\Delta\%R_{P1}$	6 $\Delta\%R_{P2}$	7 $\Delta\%R_{P5}$
0 ^o . (*)	72,96	185,65	465,58	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	74,90	190,30	439,79	2,7	2,5	-5,5
8 ^o .	76,49	193,65	419,47	4,8	4,3	-9,9
12 ^o .	77,69	195,78	406,12	6,5	5,5	-12,8
16 ^o .	78,47	196,84	398,76	7,6	6,0	-14,4
20 ^o .	78,80	196,97	396,91	8,0	6,1	-14,8
24 ^o .	78,68	196,29	400,11	7,8	5,7	-14,1
28 ^o .	78,08	194,87	408,16	7,0	5,0	-12,3
32 ^o .	77,02	192,78	420,84	5,6	3,8	-9,6
36 ^o .	75,48	190,01	438,02	3,5	2,3	-5,9
40 ^o .	73,50	186,53	459,88	0,7	0,5	-1,2

(*) – Valores de referência.

A tabela 8.18 mostrada acima refere-se às reações de apoio dos pilares para a espessura da laje tipo de 15 centímetros.

Na coluna 1 tem-se a posição da laje no edifício. Nas colunas 2, 3 e 4 têm-se as reações de apoio R_{P1} , R_{P2} e R_{P5} nos pilares P1, P2 e P5, respectivamente; nas colunas 5, 6 e 7 têm-se as diferenças percentuais em relação às reações de apoio na laje de referência (0º andar). O processo de cálculo dessas diferenças percentuais é descrito no texto referente à tabela 5.6 do capítulo 5.

O comportamento das reações de apoio R_{P1} e R_{P2} nas colunas 2 e 3 assemelham-se. Nota-se que os valores aumentam até se atingir o 20º andar quando, então, os valores das reações começam a diminuir. Na laje de referência temos para R_{P1} e R_{P2} os valores de 72,96 kN e 185,65 kN, respectivamente. No 20º andar, após um aumento gradual ao longo da altura do edifício, R_{P1} e R_{P2} atingem os valores de 78,80 kN e 196,97 kN, respectivamente. A partir do 20º andar, os valores de R_{P1} e R_{P2} vão diminuindo gradualmente até o 40º andar, quando os valores atingem 73,50 kN e 186,53 kN, respectivamente.

Na coluna 4 têm-se os valores da reação de apoio R_{P5} . Como ocorreu no modelo LAJE-MOL, o comportamento de R_{P5} é o contrário de R_{P1} e R_{P2} , ou seja, seus valores inicialmente diminuem até o 20º andar e, em seguida, crescem até o topo do edifício. Na laje de referência tem-se o valor de 465,58 kN, no 20º andar este valor cai para 396,91 kN e no 40º andar este valor atinge 459,88 kN.

Nas colunas 5, 6 e 7 têm-se os valores das diferenças percentuais referentes às reações de apoio dos pilares P1, P2 e P5, respectivamente. O comportamento dos valores das diferenças percentuais é diretamente ligado ao comportamento de R_{P1} , R_{P2} e R_{P5} e dá uma idéia do quanto as reações estão variando. Pode-se ver no 20º andar que $\Delta\%R_{P1} = 8,0\%$, $\Delta\%R_{P2} = 6,1\%$ e $\Delta\%R_{P5} = -14,8\%$.

As tabelas 8.19, 8.20 e 8.21 são análogas à tabela 8.18 tendo como diferença as espessuras da laje, agora de 20, 25 e 30 centímetros, respectivamente.

Nota-se nas três tabelas que os valores de R_{P1} , R_{P2} , R_{P5} , $\Delta\%R_{P1}$, $\Delta\%R_{P2}$ e $\Delta\%R_{P5}$ mantêm o mesmo comportamento descrito na tabela 8.18. Estes valores tendem a aumentar no caso de R_{P1} e $\Delta\%R_{P1}$ e a diminuir no caso de R_{P5} e $\Delta\%R_{P5}$, à medida que aumenta a espessura da

laje. Os valores de R_{P2} e $\Delta\%R_{P2}$ foram pouco afetados com a variação da espessura das lajes tipo.

TABELA 8.19 – Reações de apoio nos pilares com laje de 20 centímetros

1 Andar	2 R_{P1} (kN)	3 R_{P2} (kN)	4 R_{P5} (kN)	6 $\Delta\%R_{P1}$	7 $\Delta\%R_{P2}$	8 $\Delta\%R_{P5}$
0 ^o . (*)	72,96	185,65	465,58	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	77,87	193,17	415,86	6,7	4,1	-10,7
8 ^o .	81,91	197,91	380,71	12,3	6,6	-18,2
12 ^o .	84,93	200,39	358,74	16,4	7,9	-22,9
16 ^o .	86,84	201,20	347,80	19,0	8,4	-25,3
20 ^o .	87,58	200,85	346,31	20,0	8,2	-25,6
24 ^o .	87,13	199,63	352,96	19,4	7,5	-24,2
28 ^o .	85,50	197,70	367,19	17,2	6,5	-21,1
32 ^o .	82,76	195,04	388,80	13,4	5,1	-16,5
36 ^o .	78,98	191,52	418,03	8,2	3,2	-10,2
40 ^o .	74,24	186,81	455,80	1,8	0,6	-2,1

(*) – Valores de referência.

TABELA 8.20 – Reações de apoio nos pilares com laje de 25 centímetros

1 Andar	2 R_{P1} (kN)	3 R_{P2} (kN)	4 R_{P5} (kN)	5 $\Delta\%R_{P1}$	6 $\Delta\%R_{P2}$	7 $\Delta\%R_{P5}$
0 ^o . (*)	72,96	185,65	465,58	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	82,39	195,08	390,11	12,9	5,1	-16,2
8 ^o .	90,05	199,72	340,91	23,4	7,6	-26,8
12 ^o .	95,61	201,18	312,82	31,0	8,4	-32,8
16 ^o .	98,89	200,98	300,53	35,5	8,3	-35,5
20 ^o .	99,88	200,05	300,29	36,9	7,8	-35,5
24 ^o .	98,67	198,83	310,01	35,2	7,1	-33,4
28 ^o .	95,40	197,33	329,09	30,8	6,3	-29,3
32 ^o .	90,27	195,26	357,90	23,7	5,2	-23,1
36 ^o .	83,46	192,09	397,80	14,4	3,5	-14,6
40 ^o .	75,16	186,93	451,64	3,0	0,7	-3,0

(*) – Valores de referência.

TABELA 8.21 – Reações de apoio nos pilares com laje de 30 centímetros

1 Andar	2 R _{P1} (kN)	3 R _{P2} (kN)	4 R _{P5} (kN)	5 $\Delta\%R_{P1}$	6 $\Delta\%R_{P2}$	7 $\Delta\%R_{P5}$
0 ^o . (*)	72,96	185,65	465,58	0,0	0,0	0,0
4 ^o .	88,01	195,86	364,53	20,6	5,5	-21,7
8 ^o .	99,90	198,90	304,79	36,9	7,1	-34,5
12 ^o .	108,10	198,38	274,11	48,2	6,9	-41,1
16 ^o .	112,50	196,96	262,17	54,2	6,1	-43,7
20 ^o .	113,35	195,85	263,21	55,4	5,5	-43,5
24 ^o .	111,01	195,31	274,72	52,2	5,2	-41,0
28 ^o .	105,84	195,05	296,42	45,1	5,1	-36,3
32 ^o .	98,14	194,39	329,88	34,5	4,7	-29,1
36 ^o .	88,16	192,27	378,31	20,8	3,6	-18,7
40 ^o .	76,12	186,99	447,56	4,3	0,7	-3,9

(*) – Valores de referência.

Os gráficos das figuras 8.12, 8.13 e 8.14 foram gerados a partir de valores que se encontram nas tabelas 8.18, 8.19, 8.20 e 8.21. Neles mostra-se a variação das reações de apoio nos pilares ao longo dos andares do edifício.

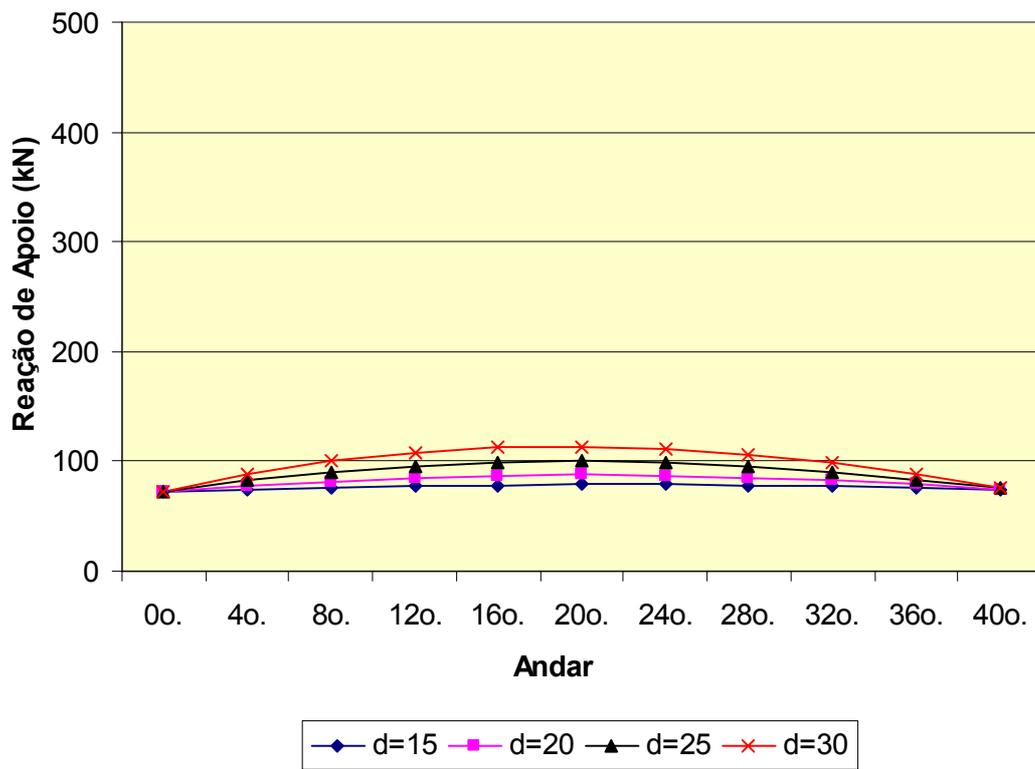


FIGURA 8.12 – Gráfico das reações de apoio do pilar P1 (*)

(*) - ver coluna 2 das tabelas 8.18, 8.19, 8.20 e 8.21.

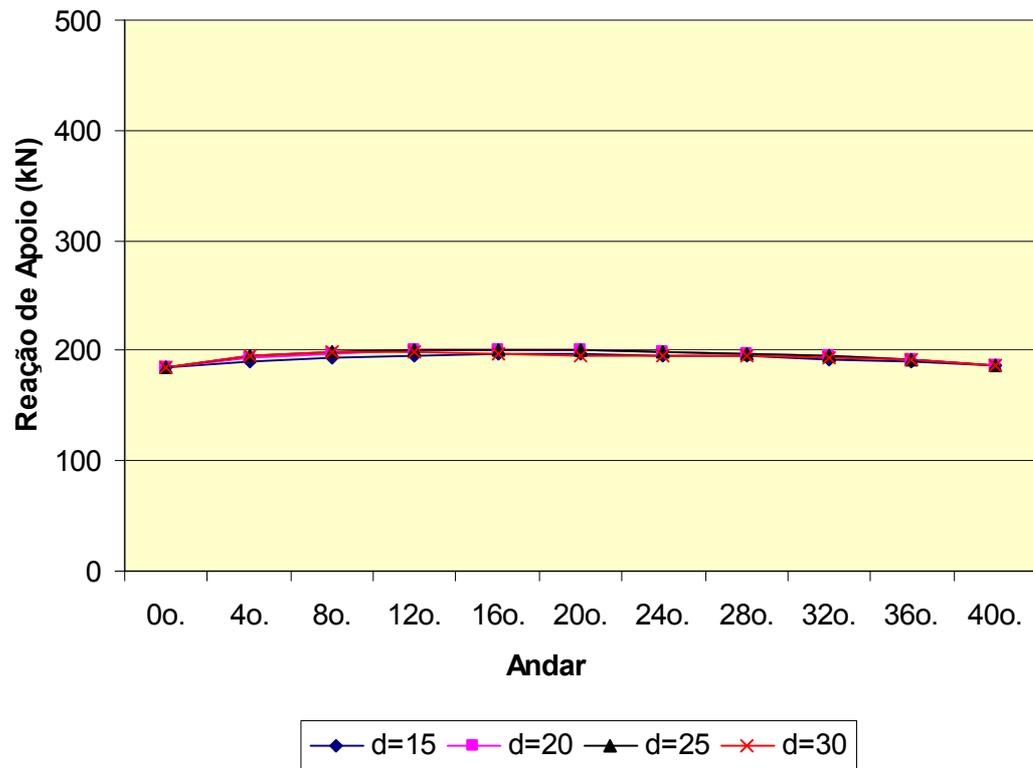


FIGURA 8.13 – Gráfico das reações de apoio do pilar P2 (*)

(*) - ver coluna 3 das tabelas 8.18, 8.19, 8.20 e 8.21.

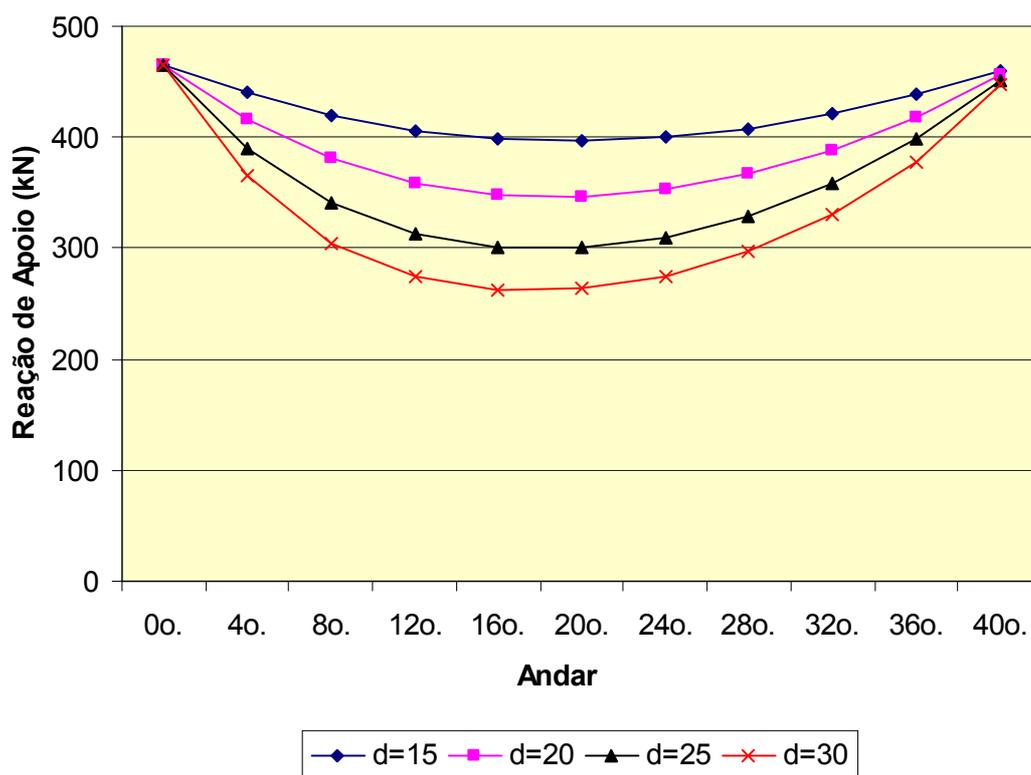


FIGURA 8.14 – Gráfico das reações de apoio do pilar P5 (*)

(*) - ver coluna 4 das tabelas 8.18, 8.19, 8.20 e 8.21.

Na tabela 8.22 têm-se as reações verticais de apoio na fundação para as lajes com espessuras de 15, 20, 25 e 30 centímetros. As reações de apoio R_{F1} , R_{F2} e R_{F5} foram obtidas fazendo-se o somatório das reações obtidas nas 40 estruturas calculadas (figuras 8.1 a 8.5).

TABELA 8.22 – Reações verticais de apoio na fundação

1	2	3	4
d (cm)	R_{F1} (kN)	R_{F2} (kN)	R_{F5} (kN)
15	3076,94	7737,58	16741,95
20	3312,30	7859,54	15312,56
25	3641,78	7873,60	13938,31
30	4008,93	7804,63	12745,81

Na coluna 2 pode-se ver que, com o aumento da espessura da laje, as reações de apoio no pilar P1 aumentam. Quando a espessura da laje tipo é 15 centímetros tem-se $R_{F1} = 3076,94$ kN e quando a espessura é 30 centímetros tem-se $R_{F1} = 4008,93$ kN.

Na coluna 3, repetindo o que acontece com as reações ao longo do edifício, vê-se que as reações R_{F2} mantêm seus valores próximos entre si.

As reações R_{F5} na coluna 4 seguem padrão oposto às R_{F1} na coluna 2, ou seja, com o aumento da espessura da laje ocorre diminuição em seus valores. Quando a espessura da laje tipo é 15 centímetros tem-se $R_{F5} = 16741,95$ kN e quando a espessura é 30 tem-se $R_{F5} = 12745,81$ kN.

Os gráficos mostrados nas figuras 8.15, 8.16 e 8.17 foram gerados a partir de valores que se encontram na tabela 8.22. Neles pode-se ver a variação das reações de apoio R_{F1} , R_{F2} e R_{F5} na fundação dos pilares P1, P2 e P5, respectivamente, ao variar a espessura da laje tipo.

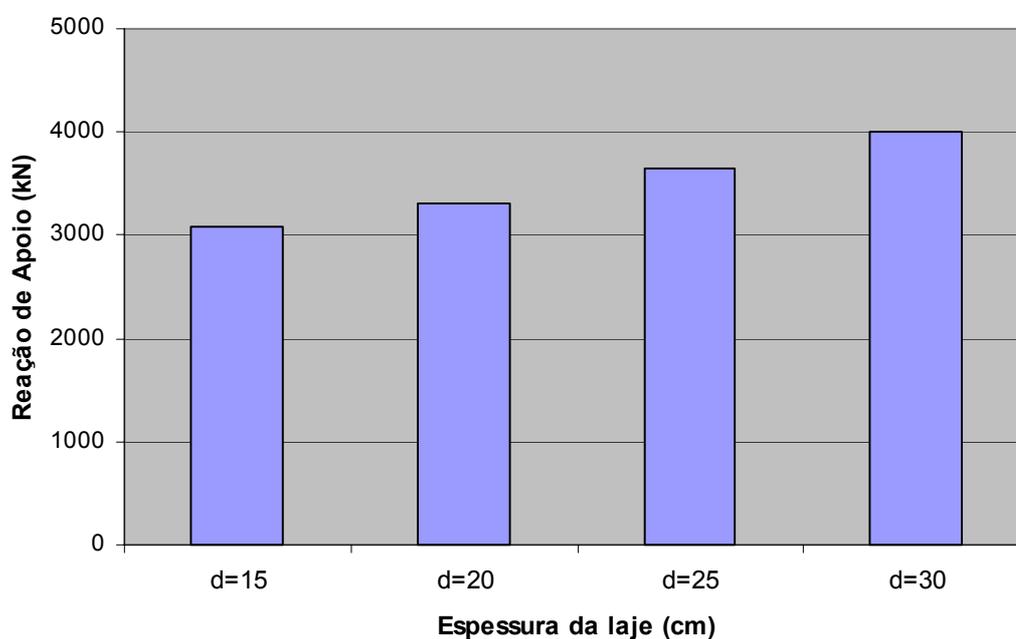


FIGURA 8.15 – Gráfico das reações de apoio R_{F1} na fundação

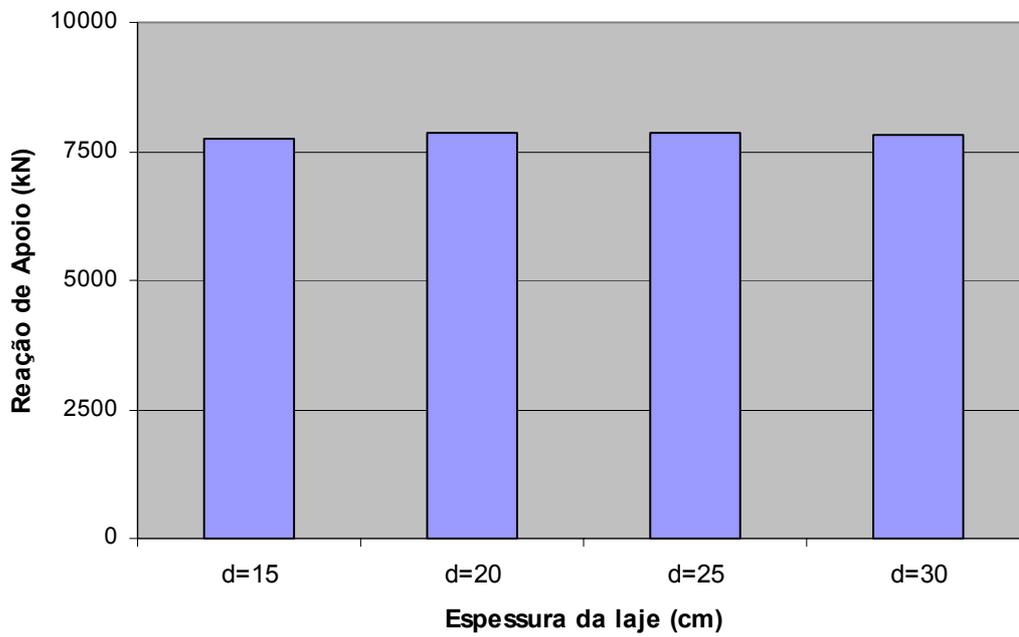


FIGURA 8.16 – Gráfico das reações de apoio R_{F2} na fundação

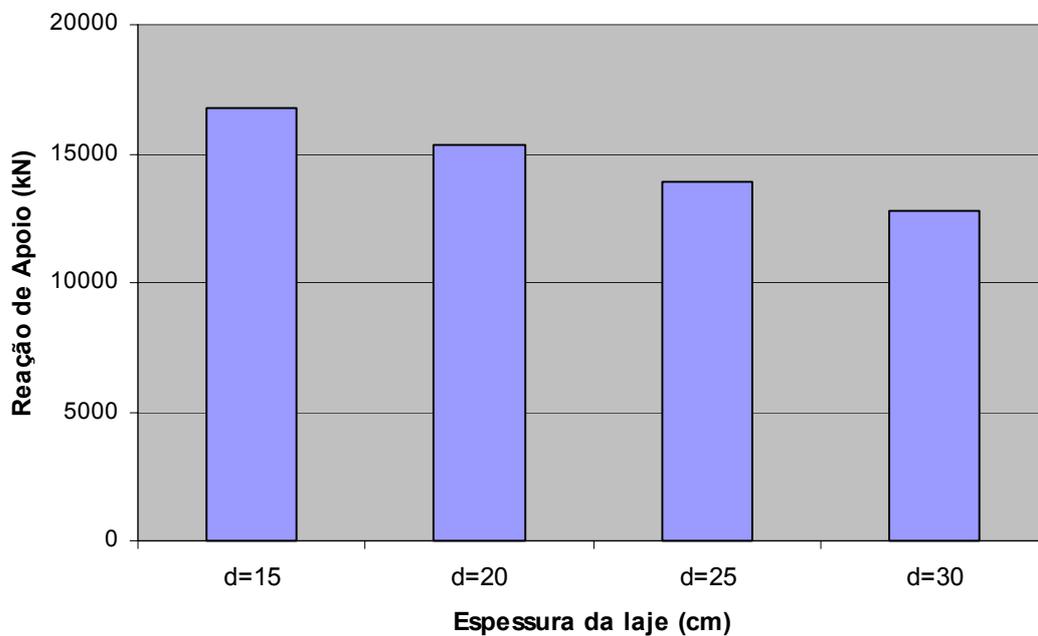


FIGURA 8.17 – Gráfico das reações de apoio R_{F5} na fundação

9

COMPARAÇÕES ENTRE OS MODELOS LAJE-SDA, LAJE-CDA E LAJE-EVOL

9.1 - Objetivo

Neste capítulo são feitas comparações entre os modelos LAJE-SDA, LAJE-CDA e LAJE-EVOL analisados nos capítulos anteriores.

A idéia é utilizar os resultados obtidos anteriormente para os três modelos e compará-los através de gráficos, só que desta vez, juntando-os em uma única figura.

Considera-se que o modelo LAJE-EVOL é o modelo paradigma, ou seja, o modelo que dá os resultados mais próximos da realidade. Desta forma, deve ser observado quanto os resultados dos outros modelos aproximam-se ou afastam-se dele.

Assim, variando-se a espessura da laje, como feito anteriormente, comparar-se-á os momentos fletores nos elementos A, B e C, os recalques diferenciais nos pilares, as reações de apoio das lajes ao longo do edifício e as reações verticais de apoio na fundação.

Os elementos acima mencionados são os elementos A, B e C da malha de elementos finitos da figura 6.2 já utilizados neste trabalho.

As comparações entre os três modelos serão feitas através das tabelas e gráficos elaborados a seguir.

9.2 – Comparações do momento fletor M_x no centróide do elemento A

Todos os resultados obtidos do momento fletor M_x para o elemento A, nos modelos LAJE-SDA, LAJE-CDA e LAJE-EVOL, são agora comparados entre si.

Nas tabelas 9.1, 9.2, 9.3 e 9.4 pode-se ver os resultados dos três modelos para as espessuras da laje de 15, 20, 25 e 30 centímetros, respectivamente.

Na coluna 1 das quatro tabelas tem-se a posição da laje no edifício. Nas colunas 2, 3 e 4 têm-se os resultados de M_x , no centróide do elemento A, para os modelos LAJE-EVOL, LAJE-CDA e LAJE-SDA, respectivamente.

Os gráficos das figuras 9.1, 9.2, 9.3 e 9.4 foram gerados a partir de valores que se encontram nas tabelas 9.1, 9.2, 9.3 e 9.4, respectivamente. Neles mostra-se a variação do momento fletor M_x do elemento A ao longo do edifício.

Observe-se nos quatro gráficos que até o 20^o andar as curvas dos modelos LAJE-EVOL e LAJE-CDA praticamente se confundem. A partir do 20^o andar a curva do modelo LAJE-EVOL tende a se aproximar da curva do modelo LAJE-SDA.

TABELA 9.1 – Momento fletor M_x no centróide do elemento A na laje de 15 centímetros

1	2	3	4
	LAJE-EVOL	LAJE-CDA	LAJE-SDA
Andar	M_x (kN.m/m)	M_x (kN.m/m)	M_x (kN.m/m)
0°	24,33	24,33	24,33
4°	25,00	24,95	24,33
8°	25,50	25,49	24,33
12°	25,84	25,95	24,33
16°	26,05	26,35	24,33
20°	26,11	26,68	24,33
24°	26,04	26,95	24,33
28°	25,84	27,16	24,33
32°	25,52	27,31	24,33
36°	25,08	27,40	24,33
40°	24,51	27,45	24,35

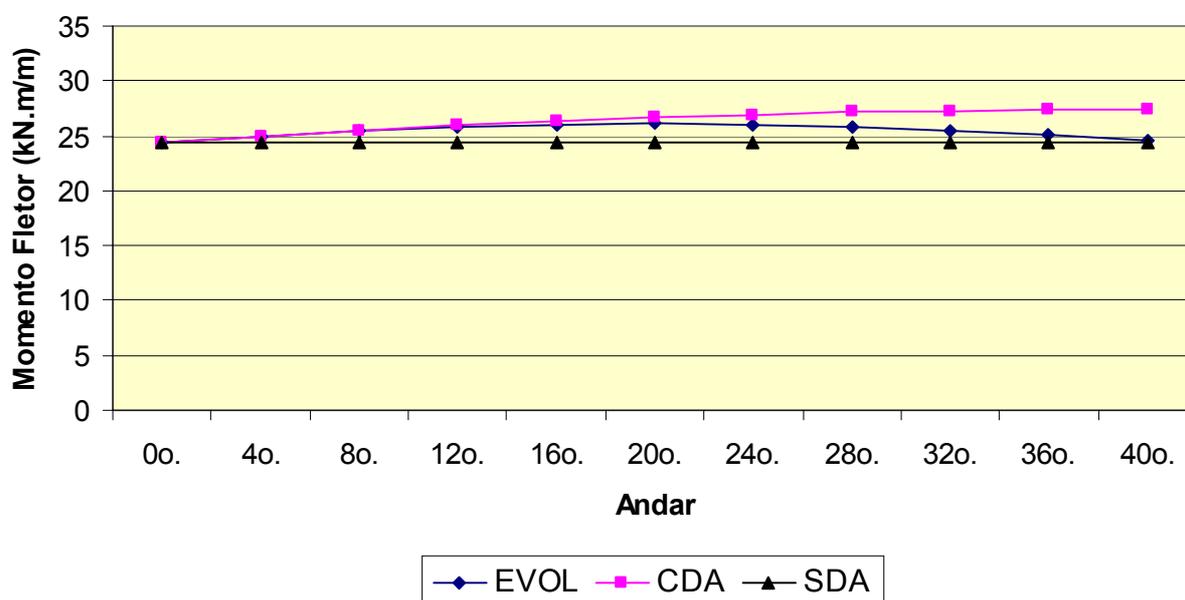


FIGURA 9.1 – Gráfico do momento fletor M_x na laje de 15 centímetros – Elemento A

TABELA 9.2 – Momento fletor M_x no centróide do elemento A na laje de 20 centímetros

1	2	3	4
	LAJE-EVOL	LAJE-CDA	LAJE-SDA
Andar	M_x (kN.m/m)	M_x (kN.m/m)	M_x (kN.m/m)
0°	24,33	24,33	24,33
4°	25,72	25,52	24,34
8°	26,71	26,53	24,34
12°	27,38	27,39	24,34
16°	27,75	28,11	24,34
20°	27,85	28,70	24,34
24°	27,69	29,17	24,34
28°	27,28	29,53	24,34
32°	26,65	29,79	24,34
36°	25,61	29,95	24,34
40°	24,69	30,06	24,35

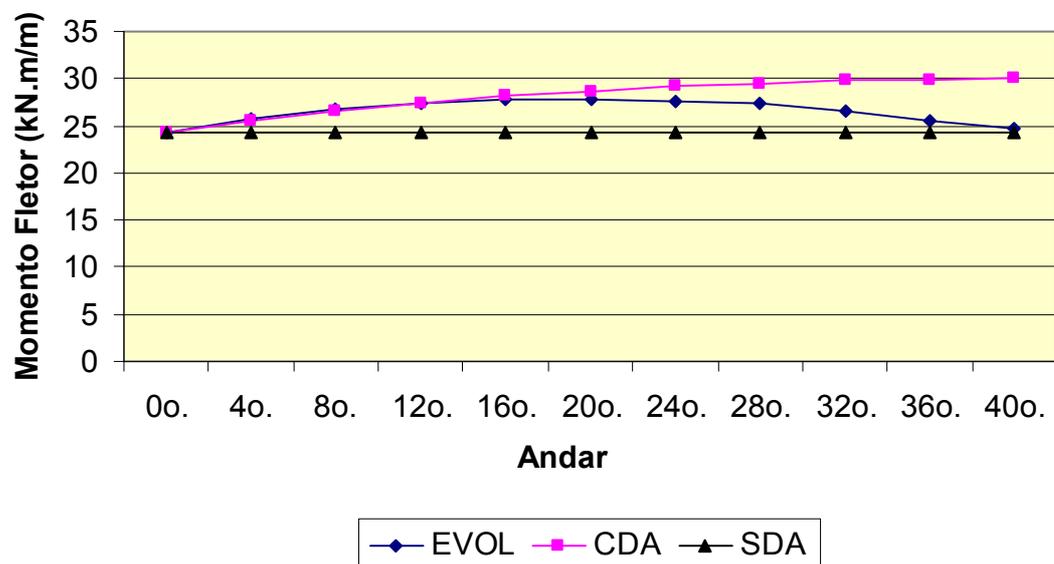


FIGURA 9.2 – Gráfico do momento fletor M_x na laje de 20 centímetros – Elemento A

TABELA 9.3 – Momento fletor M_x no centróide do elemento A na laje de 25 centímetros

1	2	3	4
	LAJE-EVOL	LAJE-CDA	LAJE-SDA
Andar	M_x (kN.m/m)	M_x (kN.m/m)	M_x (kN.m/m)
0°	24,33	24,33	24,33
4°	26,64	26,18	24,35
8°	28,22	27,69	24,35
12°	29,23	28,94	24,35
16°	29,75	29,96	24,35
20°	29,85	30,77	24,35
24°	29,57	31,42	24,35
28°	28,93	31,90	24,35
32°	27,94	32,25	24,35
36°	26,60	32,45	24,35
40°	24,90	32,63	24,39

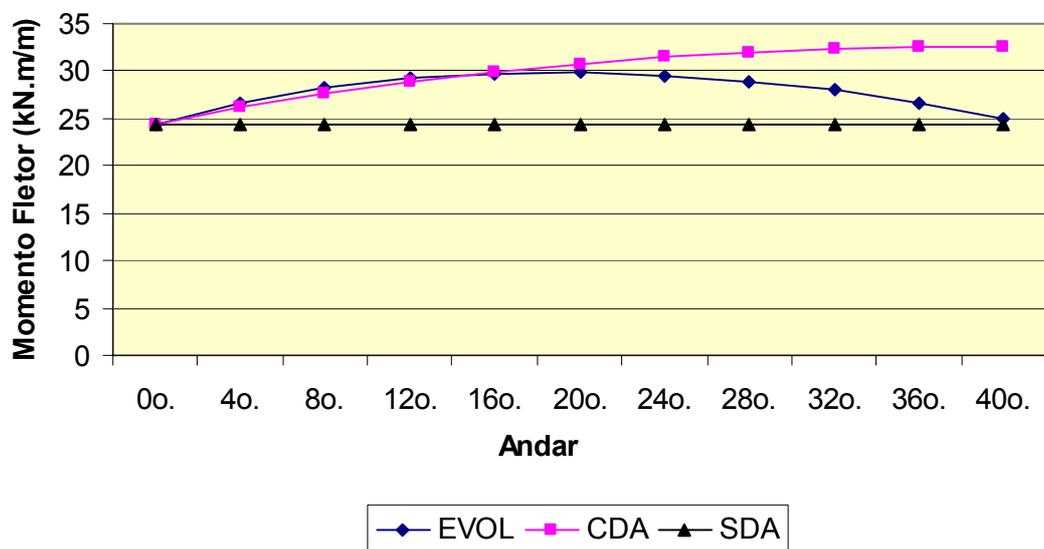


FIGURA 9.3 – Gráfico do momento fletor M_x na laje de 25 centímetros – Elemento A

TABELA 9.4 – Momento fletor M_x no centróide do elemento A na laje de 30 centímetros

1	2	3	4
	LAJE-EVOL	LAJE-CDA	LAJE-SDA
Andar	M_x (kN.m/m)	M_x (kN.m/m)	M_x (kN.m/m)
0 ^o .	24,33	24,33	24,33
4 ^o .	27,68	26,85	24,36
8 ^o .	29,85	28,83	24,36
12 ^o .	31,15	30,40	24,36
16 ^o .	31,77	31,64	24,36
20 ^o .	31,83	32,61	24,36
24 ^o .	31,41	33,35	24,36
28 ^o .	30,55	33,90	24,36
32 ^o .	29,24	34,28	24,36
36 ^o .	27,46	34,51	24,36
40 ^o .	25,15	34,77	24,43

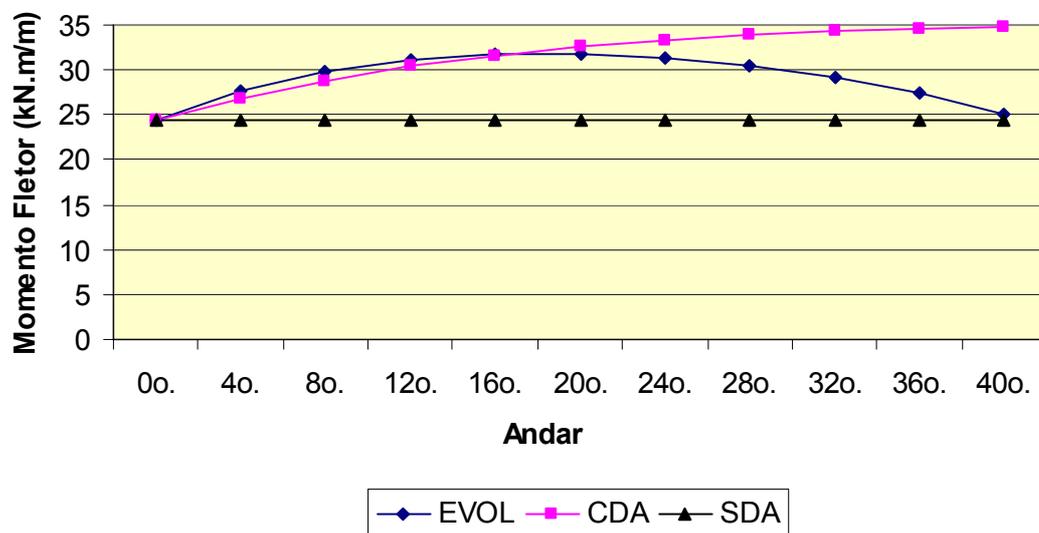


FIGURA 9.4 – Gráfico do momento fletor M_x na laje de 30 centímetros – Elemento A

9.3 – Comparações dos momentos fletores M_x e M_y no centróide do elemento B

Todos os resultados obtidos dos momentos fletores M_x e M_y para o elemento B, nos modelos LAJE-SDA, LAJE-CDA e LAJE-EVOL, são agora comparados entre si.

Nas tabelas 9.5, 9.6, 9.7 e 9.8 pode-se ver os resultados dos três modelos para as espessuras da laje de 15, 20, 25 e 30 centímetros, respectivamente.

Na coluna 1 das quatro tabelas tem-se a posição da laje no edifício. Nas colunas 2, 3 e 4 têm-se os resultados de M_x e M_y no centróide do elemento B, para os modelos LAJE-EVOL, LAJE-CDA e LAJE-SDA, respectivamente.

Os gráficos das figuras 9.5, 9.6, 9.7 e 9.8 foram gerados a partir de valores que se encontram nas tabelas 9.5, 9.6, 9.7 e 9.8, respectivamente. Neles mostra-se a variação dos momentos fletores M_x e M_y do elemento B ao longo do edifício.

Observe-se nos quatro gráficos que até o 20º andar as curvas dos modelos LAJE-EVOL e LAJE-CDA praticamente se confundem. A partir do 20º andar a curva do modelo LAJE-EVOL tende a se aproximar da curva do modelo LAJE-SDA.

TABELA 9.5 – Momentos fletores M_x e M_y no centróide do elemento B na laje de 15 centímetros

1	2	3	4
	LAJE-EVOL	LAJE-CDA	LAJE-SDA
Andar	$M_x = M_y$ (kN.m/m)	$M_x = M_y$ (kN.m/m)	$M_x = M_y$ (kN.m/m)
0°	18,39	18,39	18,39
4°	19,14	19,08	18,39
8°	19,70	19,68	18,39
12°	20,09	20,21	18,39
16°	20,32	20,65	18,39
20°	20,39	21,02	18,39
24°	20,31	21,33	18,39
28°	20,09	21,56	18,39
32°	19,72	21,73	18,39
36°	19,22	21,83	18,39
40°	18,58	21,88	18,40

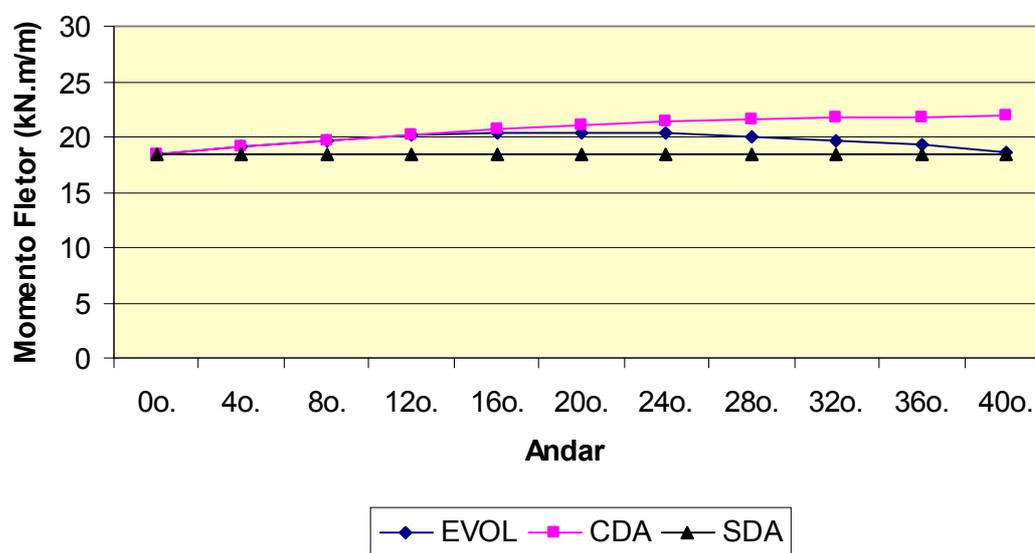


FIGURA 9.5 – Gráfico dos momentos fletores M_x e M_y na laje de 15 centímetros – Elemento B

TABELA 9.6 – Momentos fletores M_x e M_y no centróide do elemento B na laje de 20 centímetros

1	2	3	4
	LAJE-EVOL	LAJE-CDA	LAJE-SDA
Andar	$M_x = M_y$ (kN.m/m)	$M_x = M_y$ (kN.m/m)	$M_x = M_y$ (kN.m/m)
0 ^o .	18,39	18,39	18,39
4 ^o .	19,93	19,71	18,39
8 ^o .	21,05	20,84	18,39
12 ^o .	21,79	21,79	18,39
16 ^o .	22,20	22,59	18,39
20 ^o .	22,31	23,24	18,39
24 ^o .	22,12	23,76	18,39
28 ^o .	21,67	24,17	18,39
32 ^o .	20,96	24,45	18,39
36 ^o .	20,00	24,62	18,39
40 ^o .	18,77	24,72	18,41

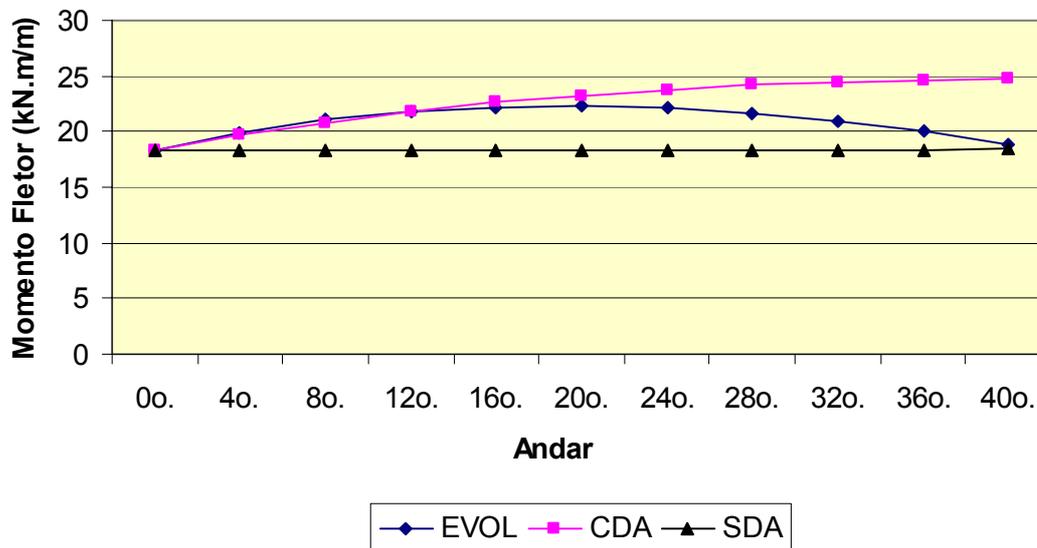


FIGURA 9.6 – Gráfico dos momentos fletores M_x e M_y na laje de 20 centímetros – Elemento B

TABELA 9.7 – Momentos fletores M_x e M_y no centróide do elemento B na laje de 25 centímetros

1	2	3	4
	LAJE-EVOL	LAJE-CDA	LAJE-SDA
Andar	$M_x = M_y$ (kN.m/m)	$M_x = M_y$ (kN.m/m)	$M_x = M_y$ (kN.m/m)
0 ^o .	18,39	18,39	18,39
4 ^o .	20,94	20,43	18,40
8 ^o .	22,70	22,11	18,40
12 ^o .	23,82	23,49	18,40
16 ^o .	24,39	24,60	18,40
20 ^o .	24,49	25,50	18,40
24 ^o .	24,17	26,20	18,40
28 ^o .	23,46	26,74	18,40
32 ^o .	22,37	27,11	18,40
36 ^o .	20,89	27,34	18,40
40 ^o .	19,00	27,49	18,43

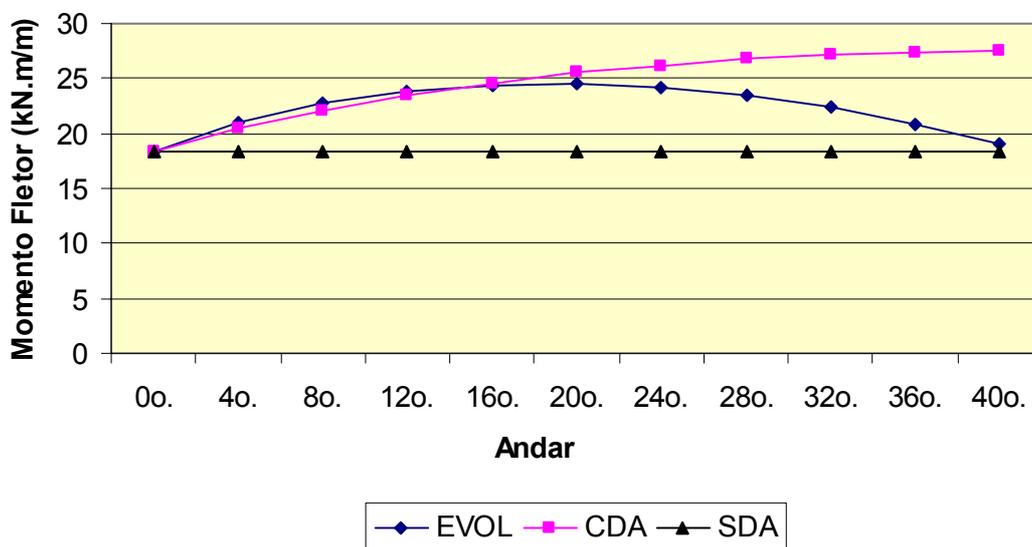


FIGURA 9.7 – Gráfico dos momentos fletores M_x e M_y na laje de 25 centímetros – Elemento B

TABELA 9.8 – Momentos fletores M_x e M_y no centróide do elemento B na laje de 30 centímetros

1	2	3	4
	LAJE-EVOL	LAJE-CDA	LAJE-SDA
Andar	$M_x = M_y$ (kN.m/m)	$M_x = M_y$ (kN.m/m)	$M_x = M_y$ (kN.m/m)
0 ^o	18,39	18,39	18,39
4 ^o	22,07	21,17	18,41
8 ^o	24,46	23,35	18,41
12 ^o	25,89	25,07	18,41
16 ^o	26,57	26,42	18,41
20 ^o	26,63	27,48	18,41
24 ^o	26,17	28,29	18,41
28 ^o	25,22	28,88	18,41
32 ^o	23,78	29,30	18,41
36 ^o	21,81	29,54	18,41
40 ^o	19,25	29,75	18,63

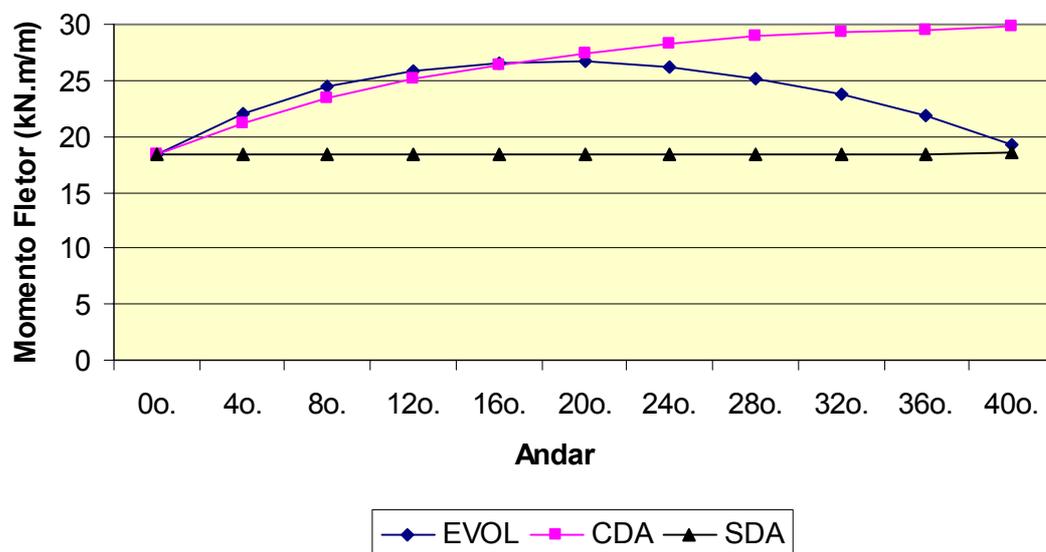


FIGURA 9.8 – Gráfico dos momentos fletores M_x e M_y na laje de 30 centímetros – Elemento B

9.4 – Comparações dos momentos fletores M_x e M_y no centróide do elemento C

Todos os resultados obtidos dos momentos fletores M_x e M_y para o elemento C, nos modelos LAJE-SDA, LAJE-CDA e LAJE-EVOL, são agora comparados entre si.

Nas tabelas 9.9, 9.10, 9.11 e 9.12 pode-se ver os resultados do momento fletor M_x nos três modelos para as espessuras da laje de 15, 20, 25 e 30 centímetros, respectivamente.

Na coluna 1 das quatro tabelas seguintes tem-se a posição da laje no edifício. Nas colunas 2, 3 e 4 têm-se os resultados de M_x no centróide do elemento C, para os modelos LAJE-EVOL, LAJE-CDA e LAJE-SDA, respectivamente.

Os gráficos das figuras 9.9, 9.10, 9.11 e 9.12 foram gerados a partir de valores que se encontram nas tabelas 9.9, 9.10, 9.11 e 9.12, respectivamente. Neles mostra-se a variação dos momentos fletores M_x do elemento C ao longo do edifício.

Observe-se nos quatro gráficos que até o 20º andar as curvas dos modelos LAJE-EVOL e LAJE-CDA praticamente se confundem. A partir do 20º andar, a curva do modelo LAJE-EVOL tende a se aproximar da curva do modelo LAJE-SDA.

TABELA 9.9 – Momento fletor M_x no centróide do elemento C na laje de 15 centímetros

1	2	3	4
	LAJE-EVOL	LAJE-CDA	LAJE-SDA
Andar	M_x (kN.m/m)	M_x (kN.m/m)	M_x (kN.m/m)
0 ^o .	-10,03	-10,03	-10,03
4 ^o .	-7,40	-7,61	-10,03
8 ^o .	-5,41	-5,50	-10,03
12 ^o .	-4,03	-3,69	-10,03
16 ^o .	-3,24	-2,15	-10,03
20 ^o .	-3,01	-0,87	-10,03
24 ^o .	-3,30	0,17	-10,03
28 ^o .	-4,10	0,97	-10,03
32 ^o .	-5,38	1,54	-10,03
36 ^o .	-7,15	1,89	-10,03
40 ^o .	-9,40	2,02	-10,04

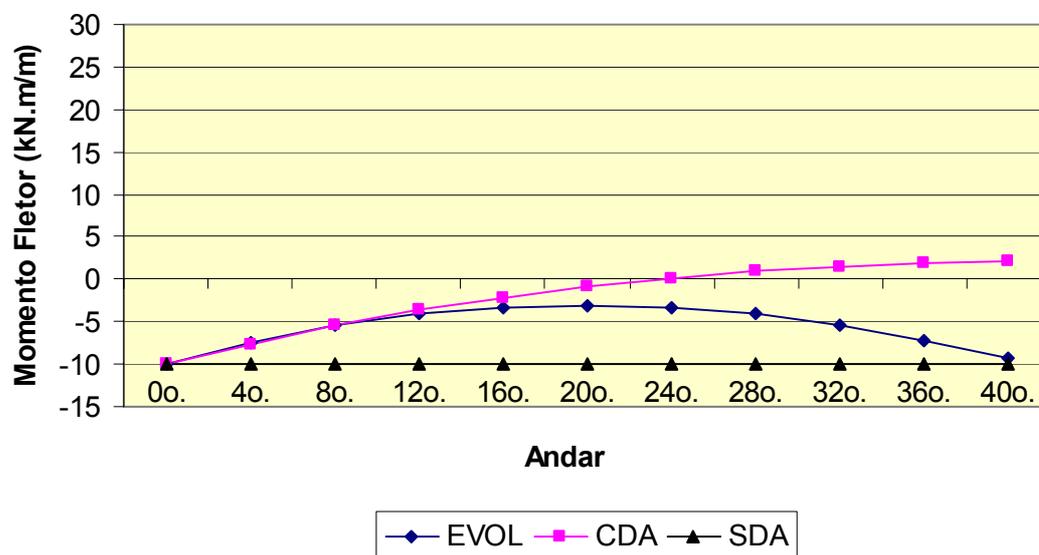


FIGURA 9.9 – Gráfico do momento fletor M_x na laje de 15 centímetros – Elemento C

TABELA 9.10 – Momento fletor M_x no centróide do elemento C na laje de 20 centímetros

1	2	3	4
	LAJE-EVOL	LAJE-CDA	LAJE-SDA
Andar	M_x (kN.m/m)	M_x (kN.m/m)	M_x (kN.m/m)
0 ^o .	-10,03	-10,03	-10,03
4 ^o .	-4,74	-5,52	-10,03
8 ^o .	-0,90	-1,72	-10,03
12 ^o .	1,63	1,47	-10,03
16 ^o .	2,99	4,11	-10,03
20 ^o .	3,29	6,27	-10,03
24 ^o .	2,64	7,98	-10,03
28 ^o .	1,09	9,28	-10,03
32 ^o .	-1,33	10,21	-10,03
36 ^o .	-5,18	10,77	-10,03
40 ^o .	-8,85	10,97	-10,05

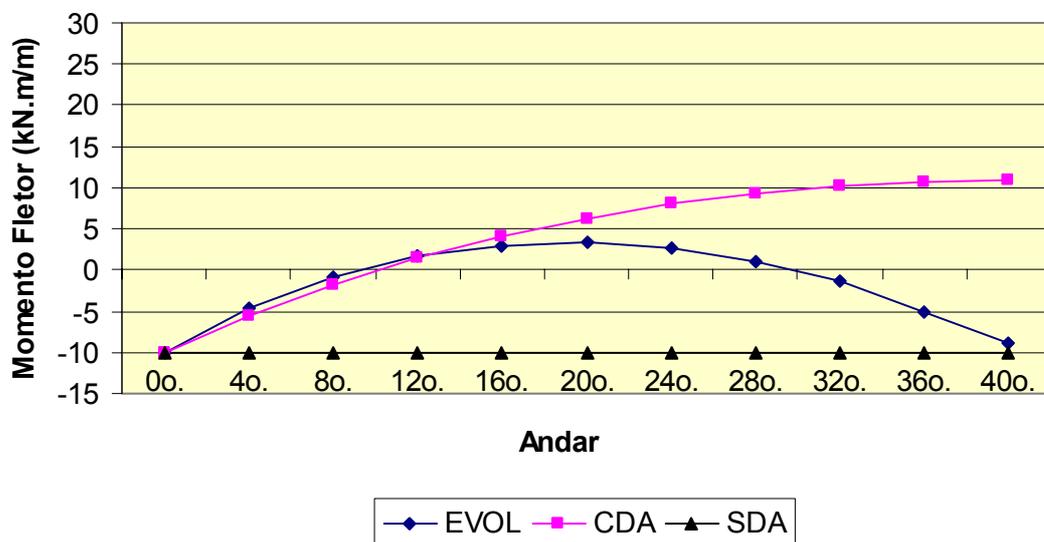


FIGURA 9.10 – Gráfico do momento fletor M_x na laje de 20 centímetros – Elemento C

TABELA 9.11 – Momento fletor M_x no centróide do elemento C na laje de 25 centímetros

1	2	3	4
	LAJE-EVOL	LAJE-CDA	LAJE-SDA
Andar	M_x (kN.m/m)	M_x (kN.m/m)	M_x (kN.m/m)
0 ^o .	-10,03	-10,03	-10,03
4 ^o .	-1,48	-3,21	-10,04
8 ^o .	4,40	2,32	-10,04
12 ^o .	8,05	6,80	-10,04
16 ^o .	9,87	10,39	-10,04
20 ^o .	10,14	13,25	-10,04
24 ^o .	9,05	15,47	-10,04
28 ^o .	6,69	17,14	-10,04
32 ^o .	3,09	18,30	-10,04
36 ^o .	-1,83	19,01	-10,04
40 ^o .	-8,22	19,23	-10,05

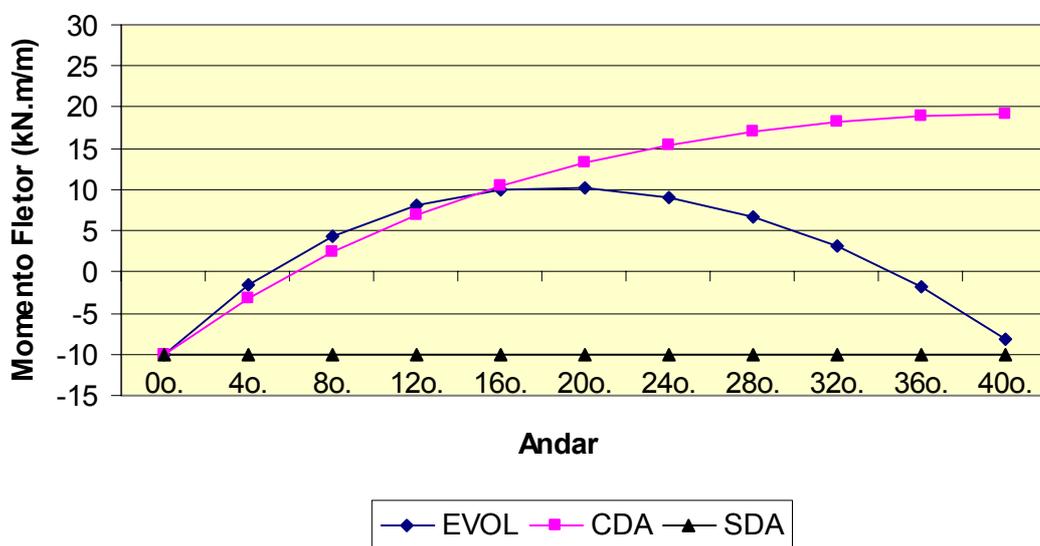


FIGURA 9.11 – Gráfico do momento fletor M_x na laje de 25 centímetros – Elemento C

TABELA 9.12 – Momento fletor M_x no centróide do elemento C na laje de 30 centímetros

1	2	3	4
	LAJE-EVOL	LAJE-CDA	LAJE-SDA
Andar	M_x (kN.m/m)	M_x (kN.m/m)	M_x (kN.m/m)
0 ^o .	-10,03	-10,03	-10,03
4 ^o .	2,06	-0,87	-10,04
8 ^o .	9,86	6,21	-10,04
12 ^o .	14,38	11,70	-10,04
16 ^o .	16,45	15,95	-10,04
20 ^o .	16,58	19,22	-10,04
24 ^o .	15,07	21,70	-10,04
28 ^o .	12,02	23,52	-10,04
32 ^o .	7,40	24,77	-10,04
36 ^o .	1,00	25,52	-10,04
40 ^o .	-7,56	25,72	-10,08

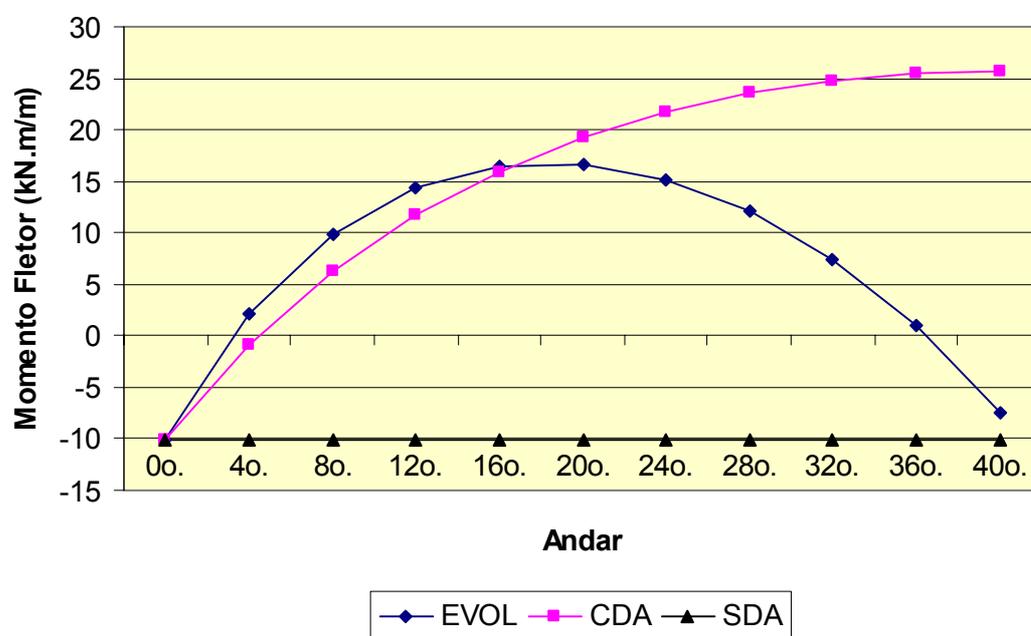


FIGURA 9.12 – Gráfico do momento fletor M_x na laje de 30 centímetros – Elemento C

Nas tabelas 9.13, 9.14, 9.15 e 9.16 pode-se ver os resultados do momento fletor M_y nos três modelos, para as espessuras da laje de 15, 20, 25 e 30 centímetros, respectivamente.

Na coluna 1 das quatro tabelas seguintes tem-se a posição da laje no edifício. Nas colunas 2, 3 e 4 têm-se os resultados de M_y no centróide do elemento C, para os modelos LAJE-EVOL, LAJE-CDA e LAJE-SDA, respectivamente.

Os gráficos das figuras 9.13, 9.14, 9.15 e 9.16 foram gerados a partir de valores que se encontram nas tabelas 9.13, 9.14, 9.15 e 9.16, respectivamente. Neles mostra-se a variação dos momentos fletores M_y do elemento C ao longo do edifício.

Observe-se nos quatro gráficos que até o 20º andar as curvas dos modelos LAJE-EVOL e LAJE-CDA praticamente se confundem. A partir do 20º andar, a curva do modelo LAJE-EVOL tende a se aproximar da curva do modelo LAJE-SDA.

TABELA 9.13 – Momento fletor M_y no centróide do elemento C na laje de 15 centímetros

1	2	3	4
	LAJE-EVOL	LAJE-CDA	LAJE-SDA
Andar	M_y (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)
0 ^o .	22,89	22,89	22,89
4 ^o .	23,96	23,85	22,89
8 ^o .	24,75	24,67	22,89
12 ^o .	25,29	25,39	22,89
16 ^o .	25,60	25,99	22,89
20 ^o .	25,69	26,49	22,89
24 ^o .	25,57	26,89	22,89
28 ^o .	25,25	27,20	22,89
32 ^o .	24,74	27,42	22,89
36 ^o .	24,04	27,56	22,89
40 ^o .	23,16	27,62	22,90

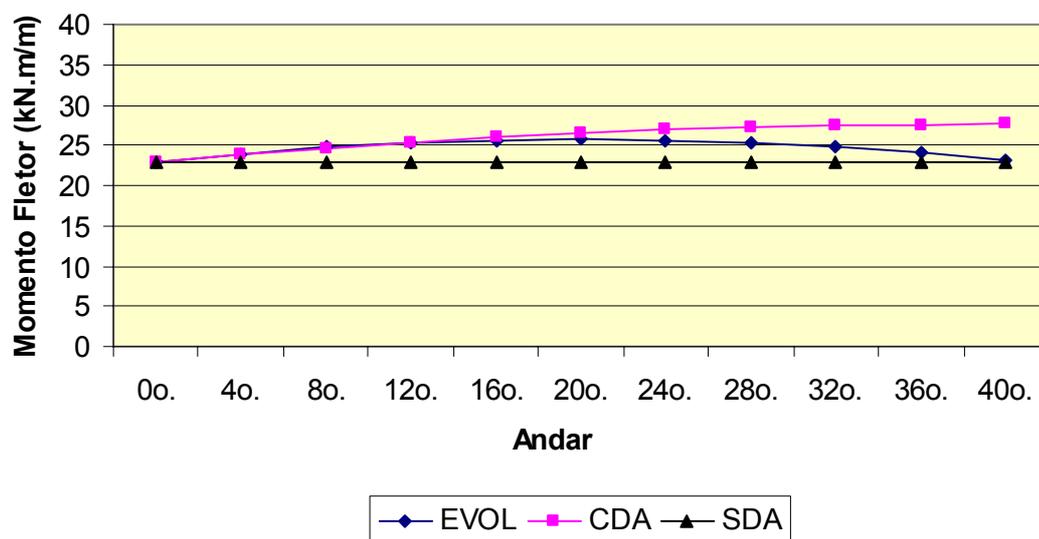


FIGURA 9.13 – Gráfico do momento fletor M_y na laje de 15 centímetros – Elemento C

TABELA 9.14 – Momento fletor M_y no centróide do elemento C na laje de 20 centímetros

1	2	3	4
	LAJE-EVOL	LAJE-CDA	LAJE-SDA
Andar	M_y (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)
0 ^o .	22,89	22,89	22,89
4 ^o .	25,01	24,65	22,90
8 ^o .	26,51	26,11	22,90
12 ^o .	27,48	27,33	22,90
16 ^o .	28,00	28,33	22,90
20 ^o .	28,11	29,15	22,90
24 ^o .	27,85	29,80	22,90
28 ^o .	27,24	30,29	22,90
32 ^o .	26,30	30,63	22,90
36 ^o .	24,79	30,85	22,90
40 ^o .	23,39	30,96	22,92

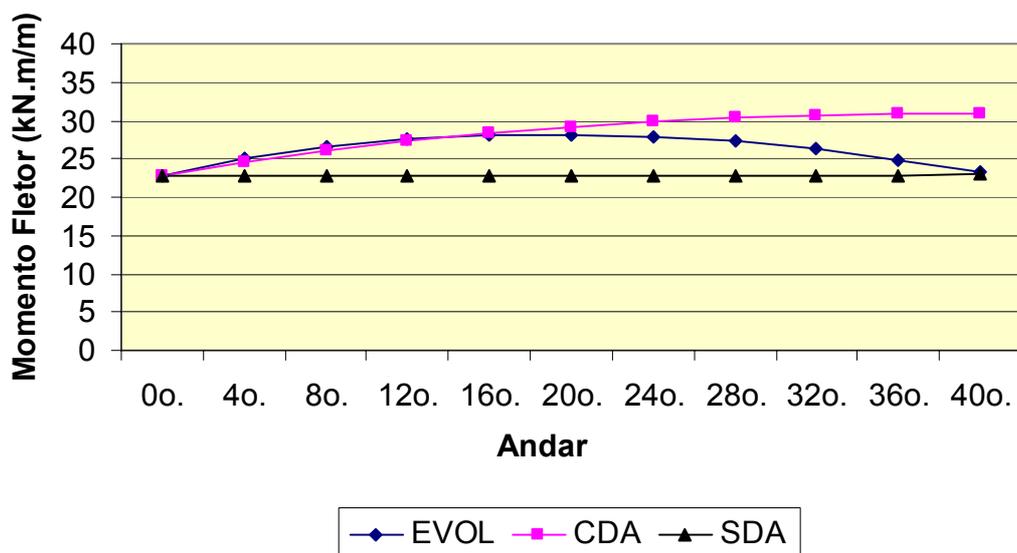


FIGURA 9.14 – Gráfico do momento fletor M_y na laje de 20 centímetros – Elemento C

TABELA 9.15 – Momento fletor M_y no centróide do elemento C na laje de 25 centímetros

1	2	3	4
	LAJE-EVOL	LAJE-CDA	LAJE-SDA
Andar	M_y (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)
0 ^o .	22,89	22,89	22,89
4 ^o .	26,28	25,52	22,90
8 ^o .	28,53	27,62	22,90
12 ^o .	29,91	29,30	22,90
16 ^o .	30,58	30,64	22,90
20 ^o .	30,66	31,70	22,90
24 ^o .	30,24	32,52	22,90
28 ^o .	29,35	33,13	22,90
32 ^o .	27,98	33,55	22,90
36 ^o .	26,10	33,81	22,90
40 ^o .	23,67	33,98	22,94

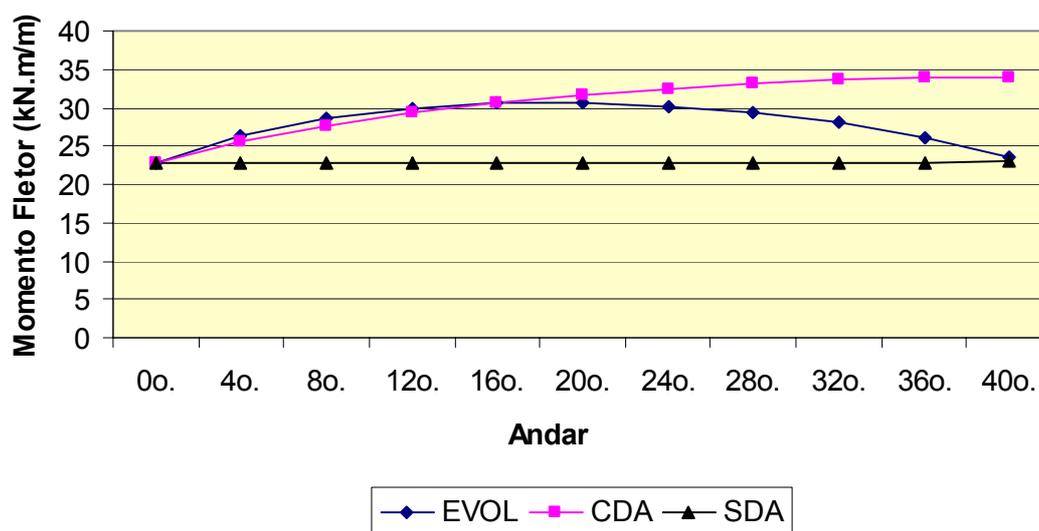


FIGURA 9.15 – Gráfico do momento fletor M_y na laje de 25 centímetros – Elemento C

TABELA 9.16 – Momento fletor M_y no centróide do elemento C na laje de 30 centímetros

1	2	3	4
	LAJE-EVOL	LAJE-CDA	LAJE-SDA
Andar	M_y (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)	M_y (kN.m/m)
0 ^o .	22,89	22,89	22,89
4 ^o .	27,65	26,41	22,91
8 ^o .	30,60	29,07	22,91
12 ^o .	32,27	31,11	22,91
16 ^o .	33,01	32,67	22,91
20 ^o .	33,04	33,86	22,91
24 ^o .	32,47	34,75	22,91
28 ^o .	31,34	35,40	22,91
32 ^o .	29,61	35,85	22,91
36 ^o .	27,20	36,11	22,91
40 ^o .	23,98	36,34	22,98

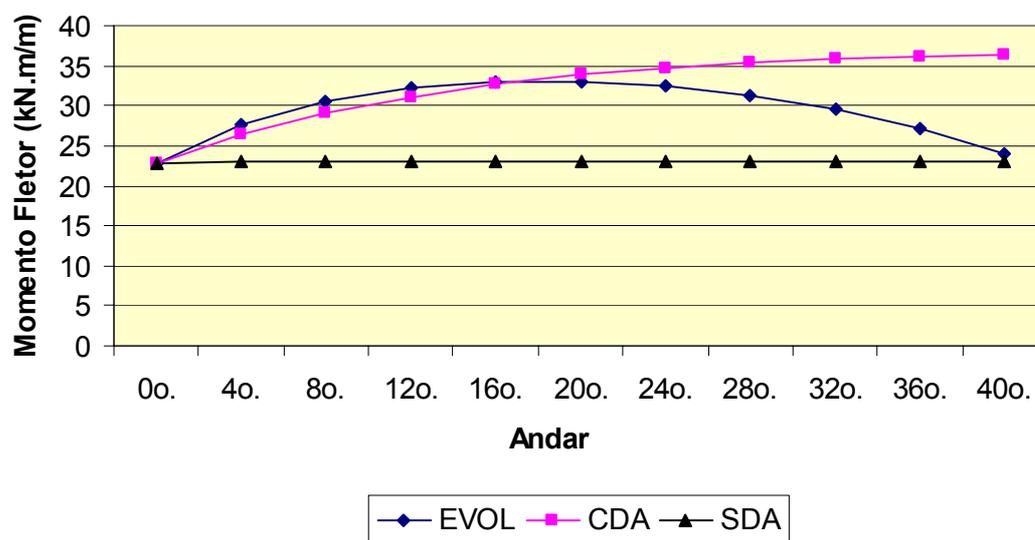


FIGURA 9.16 – Gráfico do momento fletor M_y na laje de 30 centímetros – Elemento C

9.5 – Comparações dos recalques diferenciais nos pilares

Todos os resultados obtidos dos recalques diferenciais entre os pilares P5 e P2 e P5 e P1, nos modelos LAJE-SDA, LAJE-CDA e LAJE-EVOL, são agora comparados entre si.

Nas tabelas 9.17, 9.18, 9.19 e 9.20 pode-se ver os resultados dos recalques diferenciais entre os pilares P5 e P2 nos três modelos, para as espessuras da laje de 15, 20, 25 e 30 centímetros, respectivamente.

Na coluna 1 das quatro tabelas seguintes tem-se a posição da laje no edifício. Nas colunas 2, 3 e 4 têm-se os recalques diferenciais entre os pilares P5 e P2, para os modelos LAJE-EVOL, LAJE-CDA e LAJE-SDA, respectivamente.

Os gráficos das figuras 9.17, 9.18, 9.19 e 9.20 foram gerados a partir de valores que se encontram nas tabelas 9.17, 9.18, 9.19 e 9.20, respectivamente. Neles mostra-se a variação dos recalques diferenciais entre os pilares P5 e P2 ao longo do edifício.

Observe-se nos quatro gráficos que até o 20^o andar as curvas dos modelos LAJE-EVOL e LAJE-CDA praticamente se confundem. A partir do 20^o andar a curva do modelo LAJE-EVOL tende a se aproximar da curva do modelo LAJE-SDA.

TABELA 9.17 – Recalque diferencial entre os pilares P5 e P2 com laje de 15 centímetros

1 Andar	2 LAJE-EVOL	3 LAJE-CDA	4 LAJE-SDA
	$\Delta_{P5/P2}$ (mm)	$\Delta_{P5/P2}$ (mm)	$\Delta_{P5/P2}$ (mm)
0 ^o .	0,00	0,00	0,00
4 ^o .	2,71	2,40	0,00
8 ^o .	4,72	4,46	0,00
12 ^o .	6,08	6,21	0,00
16 ^o .	6,85	7,68	0,00
20 ^o .	7,05	8,91	0,00
24 ^o .	6,73	9,89	0,00
28 ^o .	5,92	10,63	0,00
32 ^o .	4,63	11,18	0,00
36 ^o .	2,87	11,50	0,00
40 ^o .	0,63	11,63	0,00

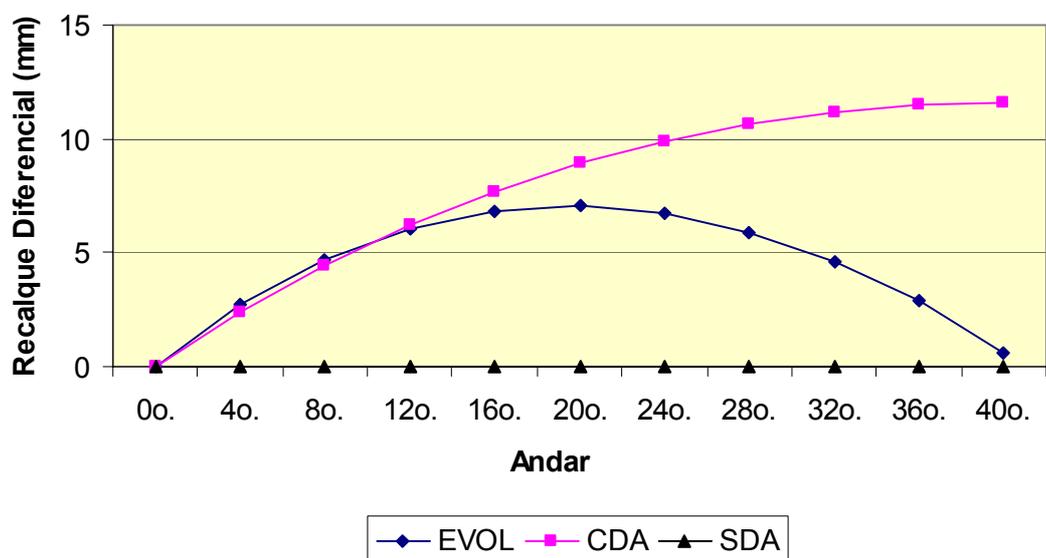


FIGURA 9.17 – Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P2 com laje de 15 centímetros

TABELA 9.18 – Recalque diferencial entre os pilares P5 e P2 com laje de 20 centímetros

1 Andar	2 LAJE-EVOL	3 LAJE-CDA	4 LAJE-SDA
	$\Delta_{P5/P2}$ (mm)	$\Delta_{P5/P2}$ (mm)	$\Delta_{P5/P2}$ (mm)
0 ^o .	0,00	0,00	0,00
4 ^o .	2,20	1,78	0,00
8 ^o .	3,75	3,25	0,00
12 ^o .	4,73	4,46	0,00
16 ^o .	5,23	5,44	0,00
20 ^o .	5,32	6,23	0,00
24 ^o .	5,03	6,85	0,00
28 ^o .	4,41	7,31	0,00
32 ^o .	3,45	7,64	0,00
36 ^o .	2,15	7,84	0,00
40 ^o .	0,48	7,91	0,00

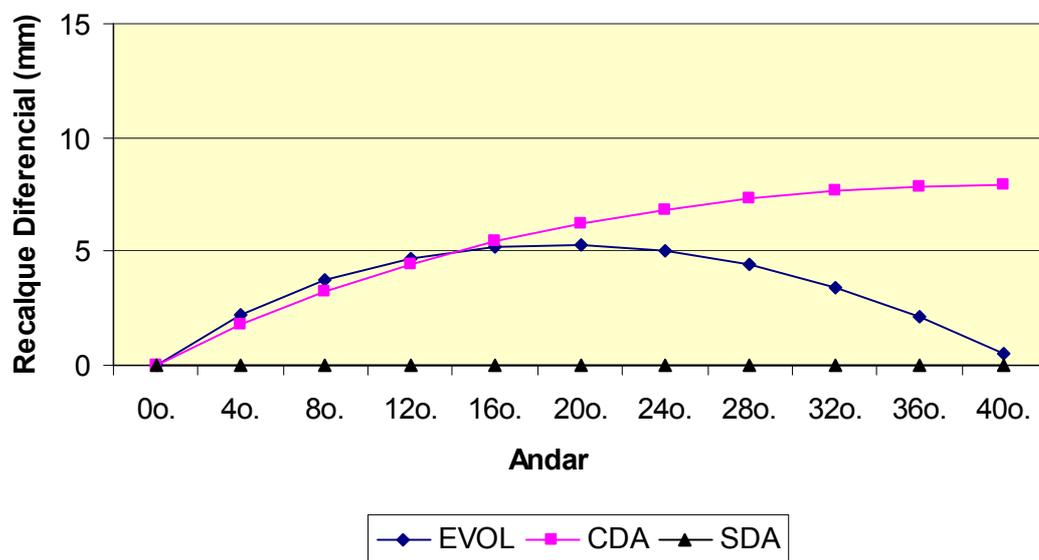


FIGURA 9.18 – Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P2 com laje de 20 centímetros

TABELA 9.19 – Recalque diferencial entre os pilares P5 e P2 com laje de 25 centímetros

1 Andar	2 LAJE-EVOL	3 LAJE-CDA	4 LAJE-SDA
	$\Delta_{P5/P2}$ (mm)	$\Delta_{P5/P2}$ (mm)	$\Delta_{P5/P2}$ (mm)
0 ^o .	0,00	0,00	0,00
4 ^o .	1,75	1,33	0,00
8 ^o .	2,89	2,36	0,00
12 ^o .	3,56	3,19	0,00
16 ^o .	3,87	3,82	0,00
20 ^o .	3,89	4,31	0,00
24 ^o .	3,67	4,68	0,00
28 ^o .	3,22	4,96	0,00
32 ^o .	2,54	5,15	0,00
36 ^o .	1,61	5,27	0,00
40 ^o .	0,37	5,31	0,00

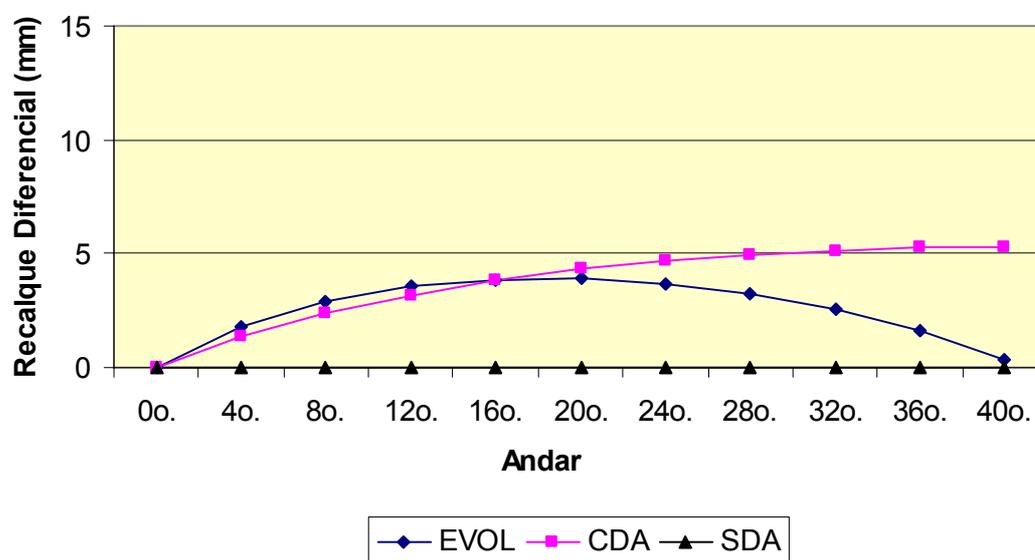


FIGURA 9.19 – Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P2 com laje de 25 centímetros

TABELA 9.20 – Recalque diferencial entre os pilares P5 e P2 com laje de 30 centímetros

1 Andar	2 LAJE-EVOL	3 LAJE-CDA	4 LAJE-SDA
	$\Delta_{P5/P2}$ (mm)	$\Delta_{P5/P2}$ (mm)	$\Delta_{P5/P2}$ (mm)
0 ^o .	0,00	0,00	0,00
4 ^o .	1,38	1,01	0,00
8 ^o .	2,21	1,75	0,00
12 ^o .	2,66	2,31	0,00
16 ^o .	2,84	2,72	0,00
20 ^o .	2,84	3,02	0,00
24 ^o .	2,68	3,25	0,00
28 ^o .	2,37	3,40	0,00
32 ^o .	1,89	3,51	0,00
36 ^o .	1,22	3,57	0,00
40 ^o .	0,29	3,60	0,00

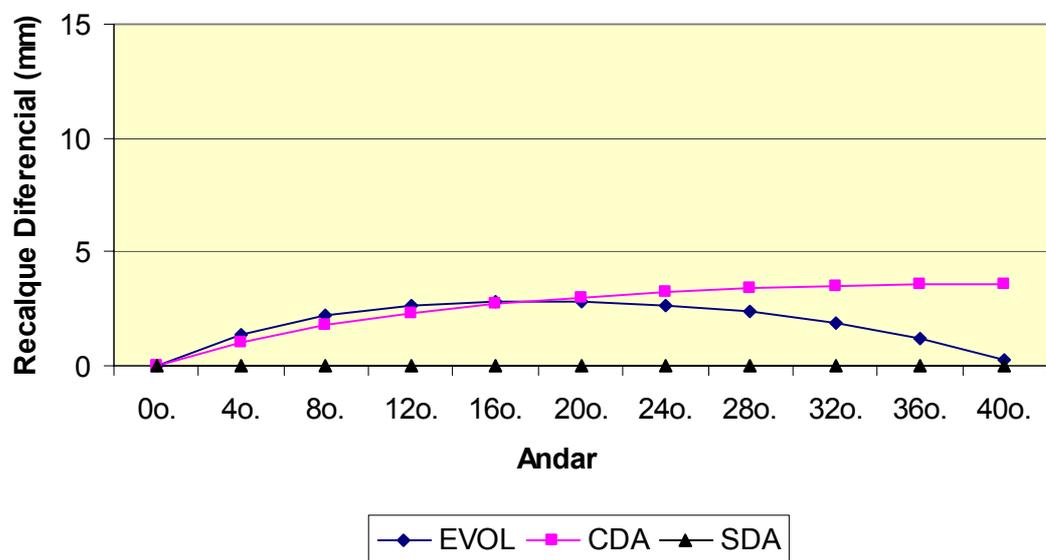


FIGURA 9.20 – Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P2 com laje de 30 centímetros

Nas tabelas 9.21, 9.22, 9.23 e 9.24 pode-se ver os resultados dos recalques diferenciais entre os pilares P5 e P1 nos três modelos, para as espessuras da laje de 15, 20, 25 e 30 centímetros, respectivamente.

Na coluna 1 das quatro tabelas seguintes tem-se a posição da laje no edifício. Nas colunas 2, 3 e 4 têm-se os recalques diferenciais entre os pilares P5 e P1, para os modelos LAJE-EVOL, LAJE-CDA e LAJE-SDA, respectivamente.

Os gráficos das figuras 9.21, 9.22, 9.23 e 9.24 foram gerados a partir de valores que se encontram nas tabelas 9.21, 9.22, 9.23 e 9.24, respectivamente. Neles mostra-se a variação dos recalques diferenciais entre os pilares P5 e P1 ao longo do edifício.

Observe-se nos quatro gráficos que até o 20^o andar as curvas dos modelos LAJE-EVOL e LAJE-CDA praticamente se confundem. A partir do 20^o andar a curva do modelo LAJE-EVOL tende a se aproximar da curva do modelo LAJE-SDA.

TABELA 9.21 – Recalque diferencial entre os pilares P5 e P1 com laje de 15 centímetros

1 Andar	2 LAJE-EVOL	3 LAJE-CDA	4 LAJE-SDA
	$\Delta_{P5/P1}$ (mm)	$\Delta_{P5/P1}$ (mm)	$\Delta_{P5/P1}$ (mm)
0 ^o .	0,00	0,00	0,00
4 ^o .	4,13	3,88	0,00
8 ^o .	7,27	7,26	0,00
12 ^o .	9,46	10,18	0,00
16 ^o .	10,73	12,67	0,00
20 ^o .	11,13	14,76	0,00
24 ^o .	10,69	16,46	0,00
28 ^o .	9,44	17,76	0,00
32 ^o .	7,41	18,71	0,00
36 ^o .	4,60	19,28	0,00
40 ^o .	1,02	19,50	0,00

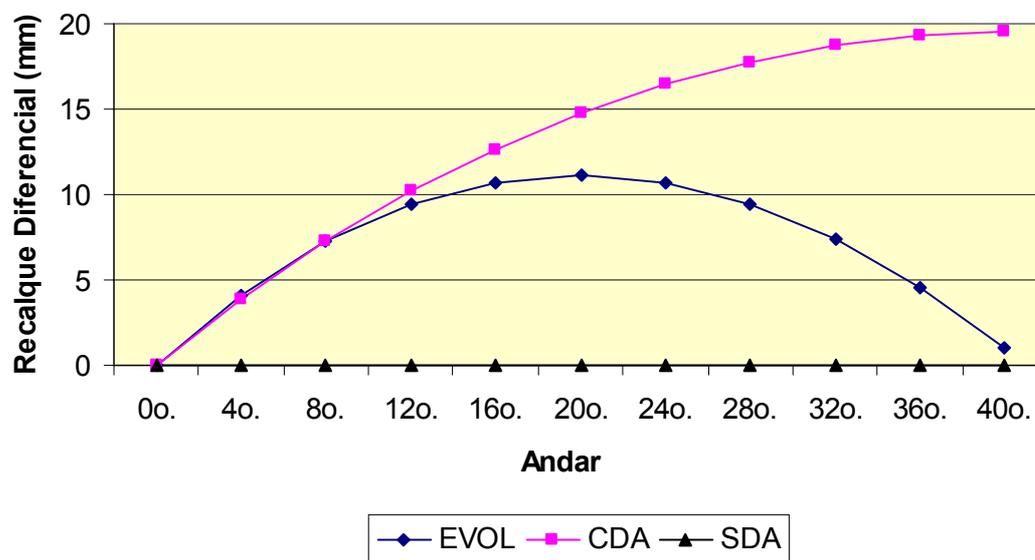


FIGURA 9.21 – Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P1 com laje de 15 centímetros

TABELA 9.22 – Recalque diferencial entre os pilares P5 e P1 com laje de 20 centímetros

1 Andar	2 LAJE-EVOL	3 LAJE-CDA	4 LAJE-SDA
	$\Delta_{P5/P1}$ (mm)	$\Delta_{P5/P1}$ (mm)	$\Delta_{P5/P1}$ (mm)
0 ^o .	0,00	0,00	0,00
4 ^o .	3,59	3,12	0,00
8 ^o .	6,22	5,79	0,00
12 ^o .	7,99	8,05	0,00
16 ^o .	8,96	9,93	0,00
20 ^o .	9,20	11,48	0,00
24 ^o .	8,78	12,72	0,00
28 ^o .	7,71	13,66	0,00
32 ^o .	6,03	14,35	0,00
36 ^o .	3,74	14,76	0,00
40 ^o .	0,83	14,92	0,00

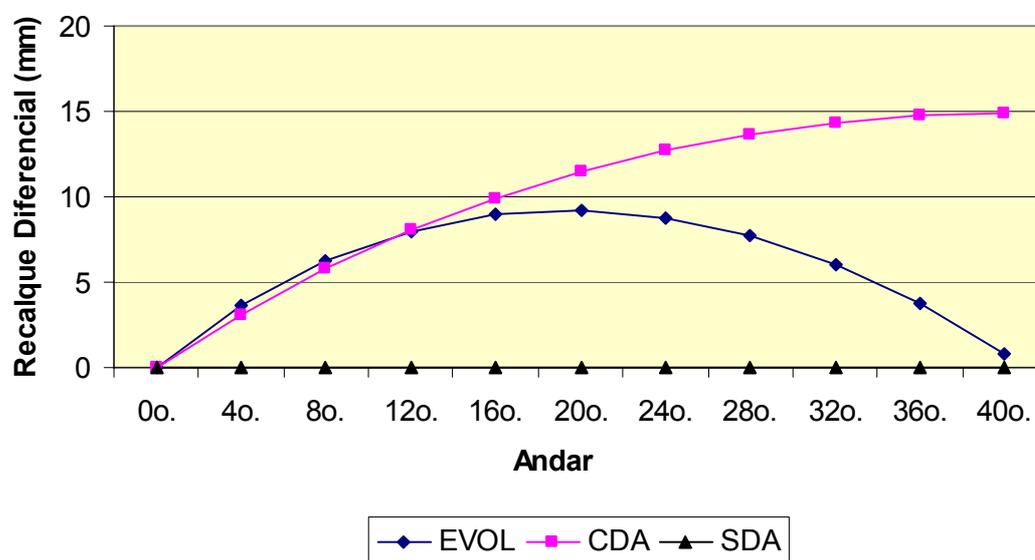


FIGURA 9.22 – Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P1 com laje de 20 centímetros

TABELA 9.23 – Recalque diferencial entre os pilares P5 e P1 com laje de 25 centímetros

1 Andar	2 LAJE-EVOL	3 LAJE-CDA	4 LAJE-SDA
	$\Delta_{P5/P1}$ (mm)	$\Delta_{P5/P1}$ (mm)	$\Delta_{P5/P1}$ (mm)
0 ^o .	0,00	0,00	0,00
4 ^o .	3,03	2,47	0,00
8 ^o .	5,16	4,49	0,00
12 ^o .	6,52	6,17	0,00
16 ^o .	7,21	7,53	0,00
20 ^o .	7,34	8,62	0,00
24 ^o .	6,95	9,47	0,00
28 ^o .	6,09	10,11	0,00
32 ^o .	4,77	10,58	0,00
36 ^o .	2,97	10,85	0,00
40 ^o .	0,66	10,95	0,00

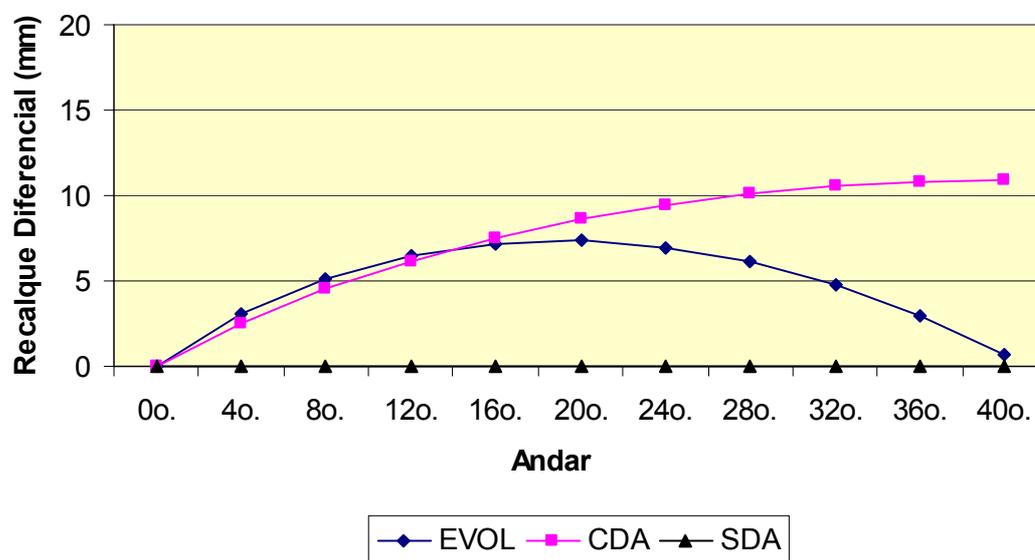


FIGURA 9.23 – Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P1 com laje de 25 centímetros

TABELA 9.24 – Recalque diferencial entre os pilares P5 e P1 com laje de 30 centímetros

1 Andar	2 LAJE-EVOL	3 LAJE-CDA	4 LAJE-SDA
	$\Delta_{P5/P1}$ (mm)	$\Delta_{P5/P1}$ (mm)	$\Delta_{P5/P1}$ (mm)
0 ^o .	0,00	0,00	0,00
4 ^o .	2,53	1,94	0,00
8 ^o .	4,20	3,46	0,00
12 ^o .	5,21	4,68	0,00
16 ^o .	5,68	5,63	0,00
20 ^o .	5,73	6,36	0,00
24 ^o .	5,40	6,94	0,00
28 ^o .	4,73	7,35	0,00
32 ^o .	3,72	7,65	0,00
36 ^o .	2,34	7,82	0,00
40 ^o .	0,53	7,89	0,00

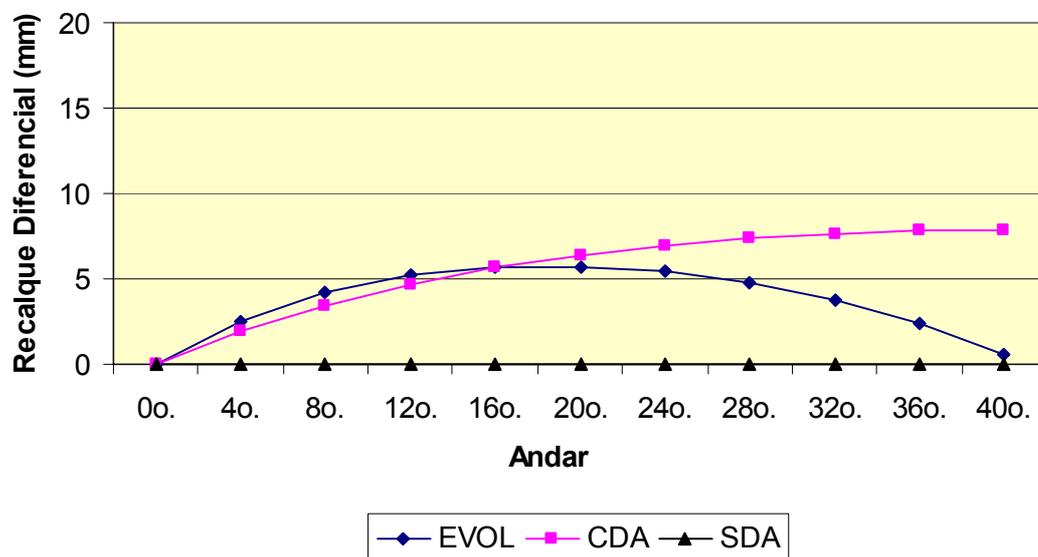


FIGURA 9.24 – Gráfico do recalque diferencial entre os pilares P5 e P1 com laje de 30 centímetros

9.6 – Comparações das reações de apoio das lajes nos pilares

Todos os resultados obtidos das reações de apoio das lajes nos pilares P1, P2 e P5, nos modelos LAJE-SDA, LAJE-CDA e LAJE-EVOL, são agora comparados entre si.

Nas tabelas 9.25, 9.26, 9.27 e 9.28 pode-se ver os resultados das reações de apoio do pilar P1 nos três modelos, para as espessuras da laje de 15, 20, 25 e 30 centímetros, respectivamente.

Na coluna 1 das quatro tabelas seguintes tem-se a posição da laje no edifício. Nas colunas 2, 3 e 4 têm-se as reações de apoio das lajes no pilar P1, para os modelos LAJE-EVOL, LAJE-CDA e LAJE-SDA, respectivamente.

Os gráficos das figuras 9.25, 9.26, 9.27 e 9.28 foram gerados a partir de valores que se encontram nas tabelas 9.25, 9.26, 9.27 e 9.28, respectivamente. Neles mostra-se a variação das reações de apoio das lajes no pilar P1 ao longo do edifício.

Observe-se nos quatro gráficos que até o 20^o andar as curvas dos modelos LAJE-EVOL e LAJE-CDA praticamente se confundem. A partir do 20^o andar a curva do modelo LAJE-EVOL tende a se aproximar da curva do modelo LAJE-SDA.

TABELA 9.25 – Reações de apoio no pilar P1 com laje de 15 centímetros

1 Andar	2 LAJE-EVOL	3 LAJE-CDA	4 LAJE-SDA
	R _{P1} (kN)	R _{P1} (kN)	R _{P1} (kN)
0 ^o .	72,96	72,96	72,96
4 ^o .	74,90	75,14	72,96
8 ^o .	76,49	77,14	72,96
12 ^o .	77,69	78,94	72,96
16 ^o .	78,47	80,53	72,96
20 ^o .	78,80	81,89	72,96
24 ^o .	78,68	83,02	72,96
28 ^o .	78,08	83,91	72,96
32 ^o .	77,02	84,56	72,96
36 ^o .	75,48	84,96	72,96
40 ^o .	73,50	85,10	72,94

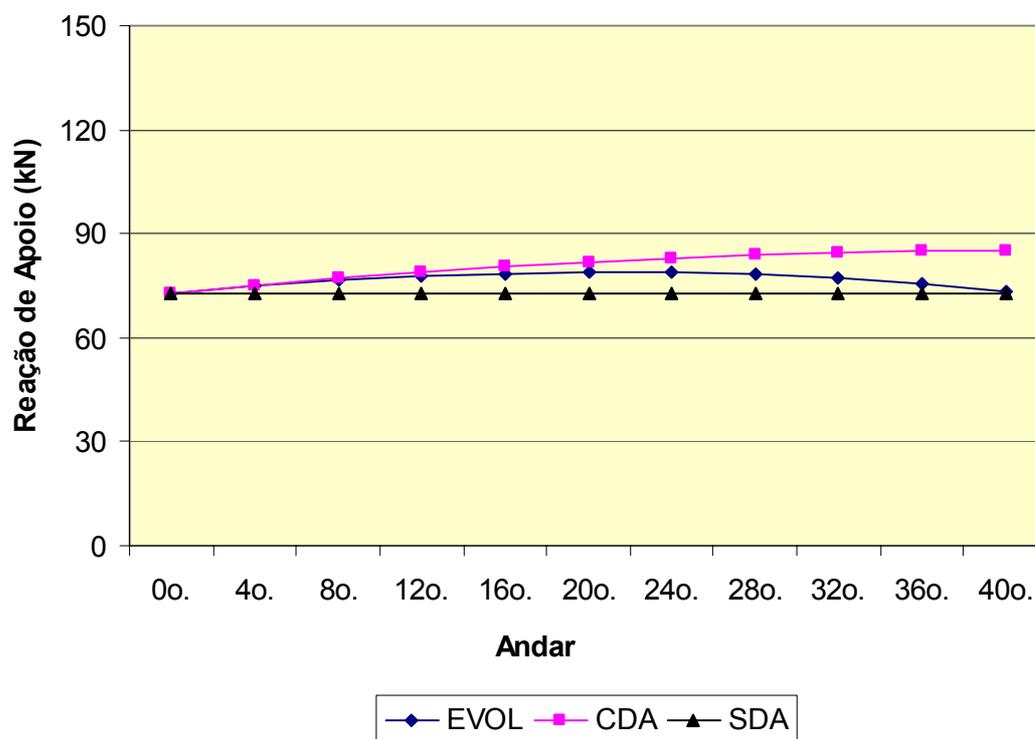


FIGURA 9.25 – Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P1 com laje de 15 centímetros

TABELA 9.26 – Reações de apoio no pilar P1 com laje de 20 centímetros

1 Andar	2 LAJE-EVOL	3 LAJE-CDA	4 LAJE-SDA
	R_{P1} (kN)	R_{P1} (kN)	R_{P1} (kN)
0°.	72,96	72,96	72,96
4°.	77,87	78,07	72,95
8°.	81,91	82,74	72,95
12°.	84,93	86,92	72,95
16°.	86,84	90,58	72,95
20°.	87,58	93,71	72,95
24°.	87,13	96,28	72,95
28°.	85,50	98,30	72,95
32°.	82,76	99,77	72,95
36°.	78,98	100,68	72,95
40°.	74,24	100,96	72,93

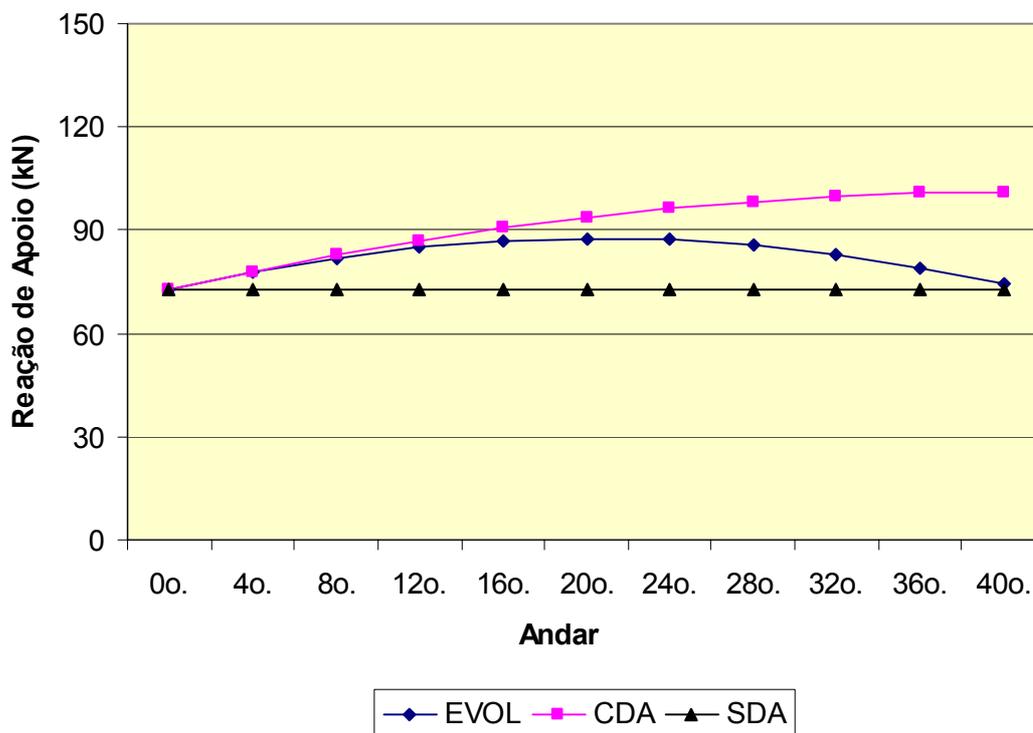


FIGURA 9.26 – Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P1 com laje de 20 centímetros

TABELA 9.27 – Reações de apoio no pilar P1 com laje de 25 centímetros

1 Andar	2 LAJE-EVOL	3 LAJE-CDA	4 LAJE-SDA
	R_{P1} (kN)	R_{P1} (kN)	R_{P1} (kN)
0 ^o .	72,96	72,96	72,96
4 ^o .	82,39	81,75	72,95
8 ^o .	90,05	89,67	72,95
12 ^o .	95,61	96,64	72,95
16 ^o .	98,89	102,65	72,95
20 ^o .	99,88	107,70	72,95
24 ^o .	98,67	111,81	72,95
28 ^o .	95,40	115,00	72,95
32 ^o .	90,27	117,29	72,95
36 ^o .	83,46	118,69	72,95
40 ^o .	75,16	119,08	72,90

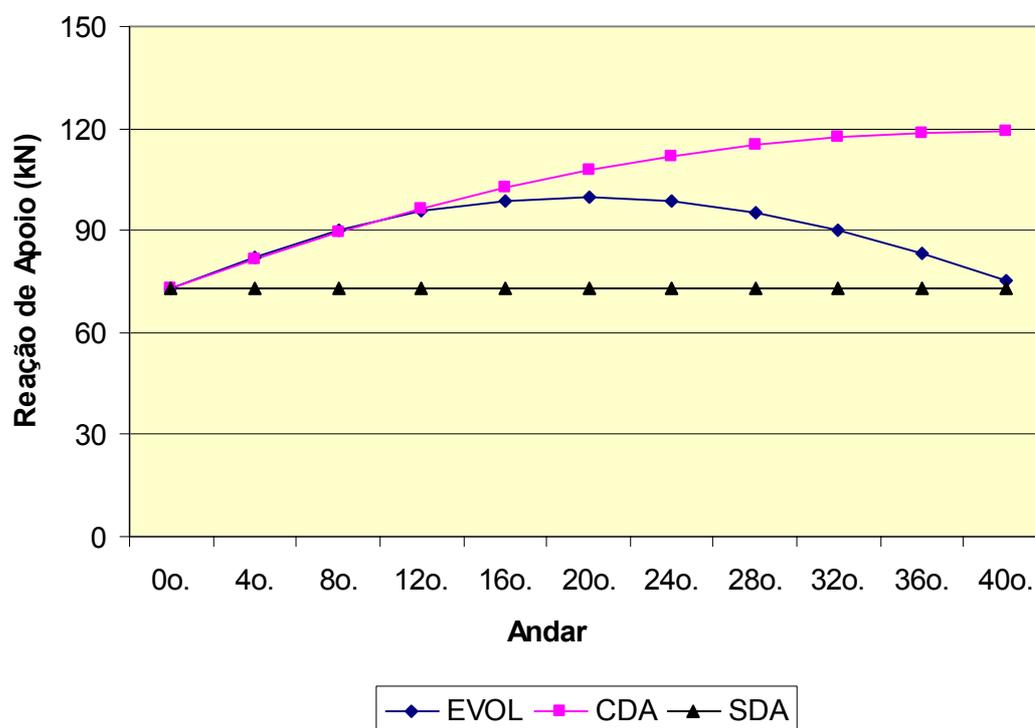


FIGURA 9.27 – Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P1 com laje de 25 centímetros

TABELA 9.28 – Reações de apoio no pilar P1 com laje de 30 centímetros

1 Andar	2 LAJE-EVOL	3 LAJE-CDA	4 LAJE-SDA
	R_{P1} (kN)	R_{P1} (kN)	R_{P1} (kN)
0°.	72,96	72,96	72,96
4°.	88,01	85,57	72,94
8°.	99,90	96,68	72,94
12°.	108,10	106,22	72,94
16°.	112,50	114,23	72,94
20°.	113,35	120,80	72,94
24°.	111,01	126,02	72,94
28°.	105,84	129,99	72,94
32°.	98,14	132,80	72,94
36°.	88,16	134,51	72,94
40°.	76,12	134,84	72,86

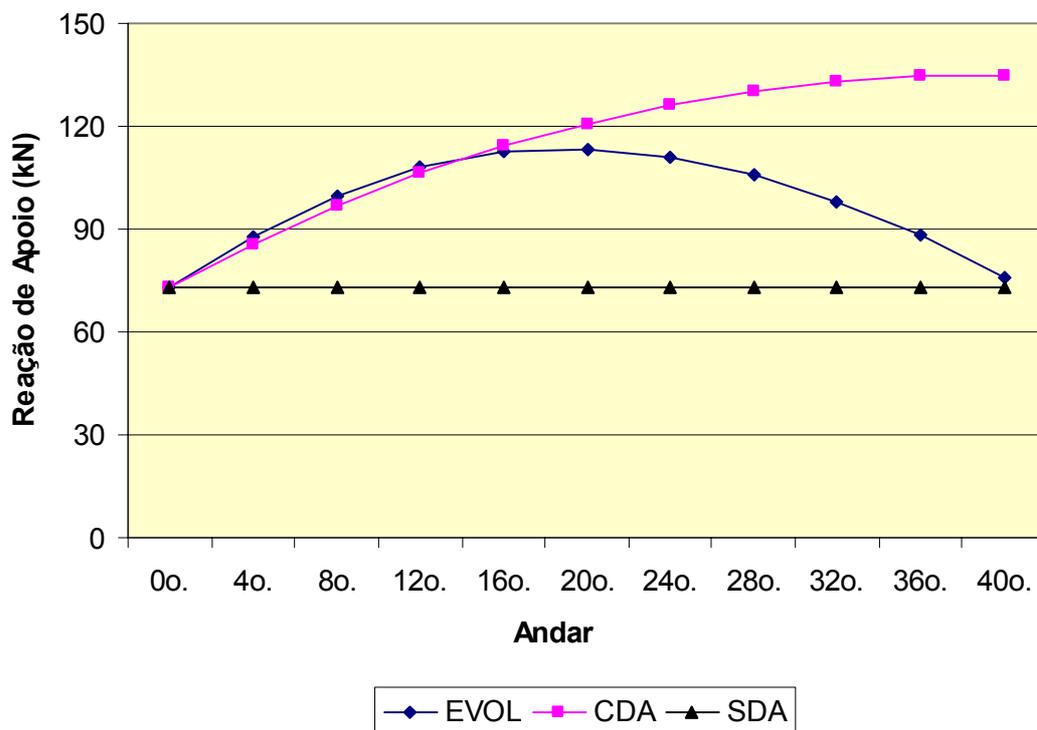


FIGURA 9.28 – Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P1 com laje de 30 centímetros

Nas tabelas 9.29, 9.30, 9.31 e 9.32 pode-se ver os resultados das reações de apoio do pilar P2 nos três modelos, para as espessuras da laje de 15, 20, 25 e 30 centímetros, respectivamente.

Na coluna 1 das quatro tabelas seguintes tem-se a posição da laje no edifício. Nas colunas 2, 3 e 4 têm-se as reações de apoio das lajes no pilar P2, para os modelos LAJE-EVOL, LAJE-CDA e LAJE-SDA, respectivamente.

Os gráficos das figuras 9.29, 9.30, 9.31 e 9.32 foram gerados a partir de valores que se encontram nas tabelas 9.29, 9.30, 9.31 e 9.32, respectivamente. Neles mostra-se a variação das reações de apoio das lajes no pilar P2 ao longo do edifício.

Observe-se nos quatro gráficos que até o 20^o andar as curvas dos modelos LAJE-EVOL e LAJE-CDA praticamente se confundem. A partir do 20^o andar a curva do modelo LAJE-EVOL tende a se aproximar da curva do modelo LAJE-SDA.

TABELA 9.29 – Reações de apoio no pilar P2 com laje de 15 centímetros

1 Andar	2 LAJE-EVOL	3 LAJE-CDA	4 LAJE-SDA
	R_{P2} (kN)	R_{P2} (kN)	R_{P2} (kN)
0 ^o .	185,65	185,65	185,65
4 ^o .	190,30	189,27	185,63
8 ^o .	193,65	192,26	185,63
12 ^o .	195,78	194,69	185,63
16 ^o .	196,84	196,66	185,63
20 ^o .	196,97	198,21	185,63
24 ^o .	196,29	199,42	185,63
28 ^o .	194,87	200,32	185,63
32 ^o .	192,78	200,94	185,63
36 ^o .	190,01	201,32	185,63
40 ^o .	186,53	201,38	185,57

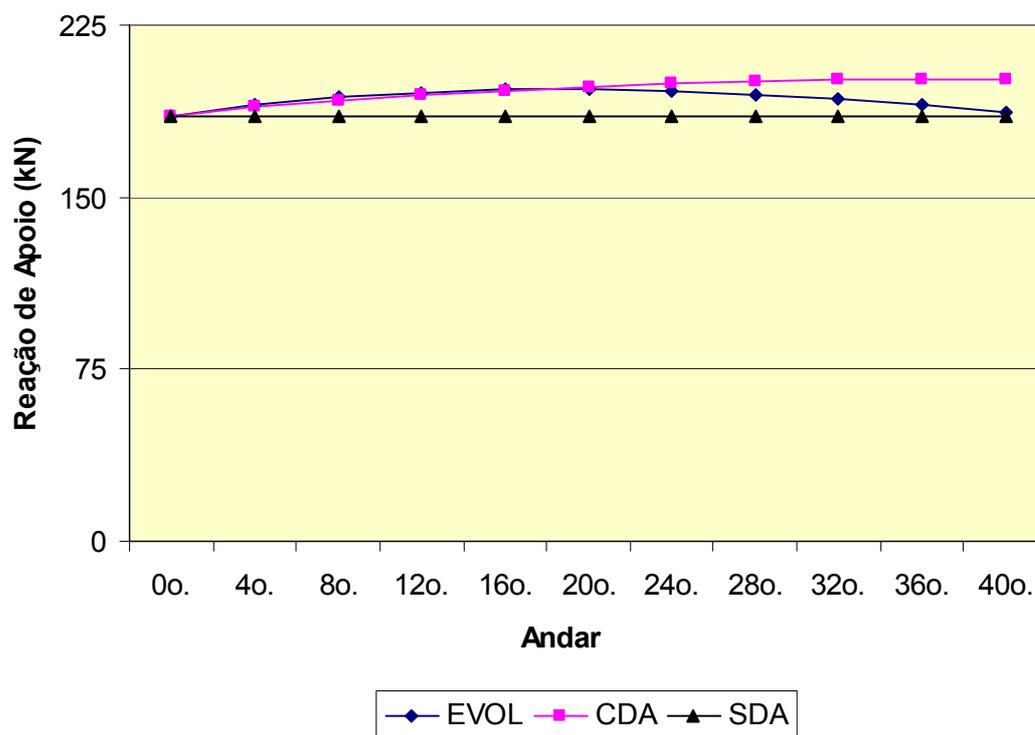


FIGURA 9.29 – Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P2 com laje de 15 centímetros

TABELA 9.30 – Reações de apoio no pilar P2 com laje de 20 centímetros

1 Andar	2 LAJE-EVOL	3 LAJE-CDA	4 LAJE-SDA
	R_{P2} (kN)	R_{P2} (kN)	R_{P2} (kN)
0°.	185,65	185,65	185,65
4°.	193,17	190,51	185,60
8°.	197,91	194,03	185,60
12°.	200,39	196,50	185,60
16°.	201,20	198,20	185,60
20°.	200,85	199,33	185,60
24°.	199,63	200,08	185,60
28°.	197,70	200,54	185,60
32°.	195,04	200,80	185,60
36°.	191,52	200,94	185,60
40°.	186,81	200,80	185,47

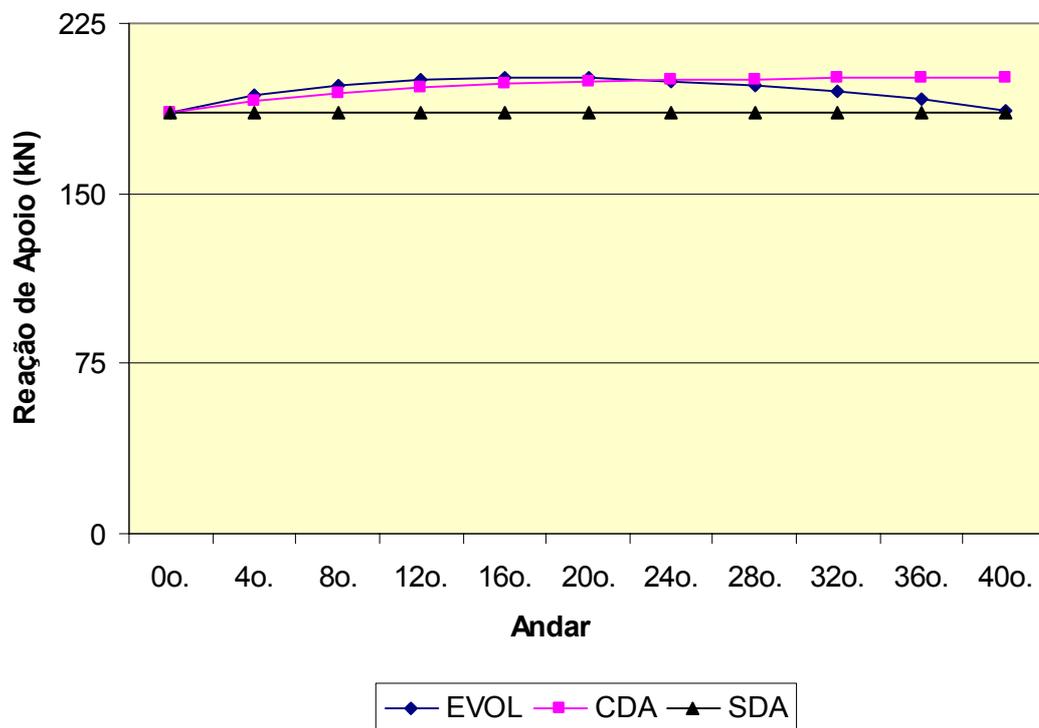


FIGURA 9.30 – Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P2 com laje de 20 centímetros

TABELA 9.31 – Reações de apoio no pilar P2 com laje de 25 centímetros

1 Andar	2 LAJE-EVOL	3 LAJE-CDA	4 LAJE-SDA
	R_{P2} (kN)	R_{P2} (kN)	R_{P2} (kN)
0 ^o .	185,65	185,65	185,65
4 ^o .	195,08	191,11	185,56
8 ^o .	199,72	194,21	185,56
12 ^o .	201,18	195,71	185,56
16 ^o .	200,98	196,20	185,56
20 ^o .	200,05	196,09	185,56
24 ^o .	198,83	195,69	185,56
28 ^o .	197,33	195,20	185,56
32 ^o .	195,26	194,75	185,56
36 ^o .	192,09	194,45	185,56
40 ^o .	186,93	193,99	185,33

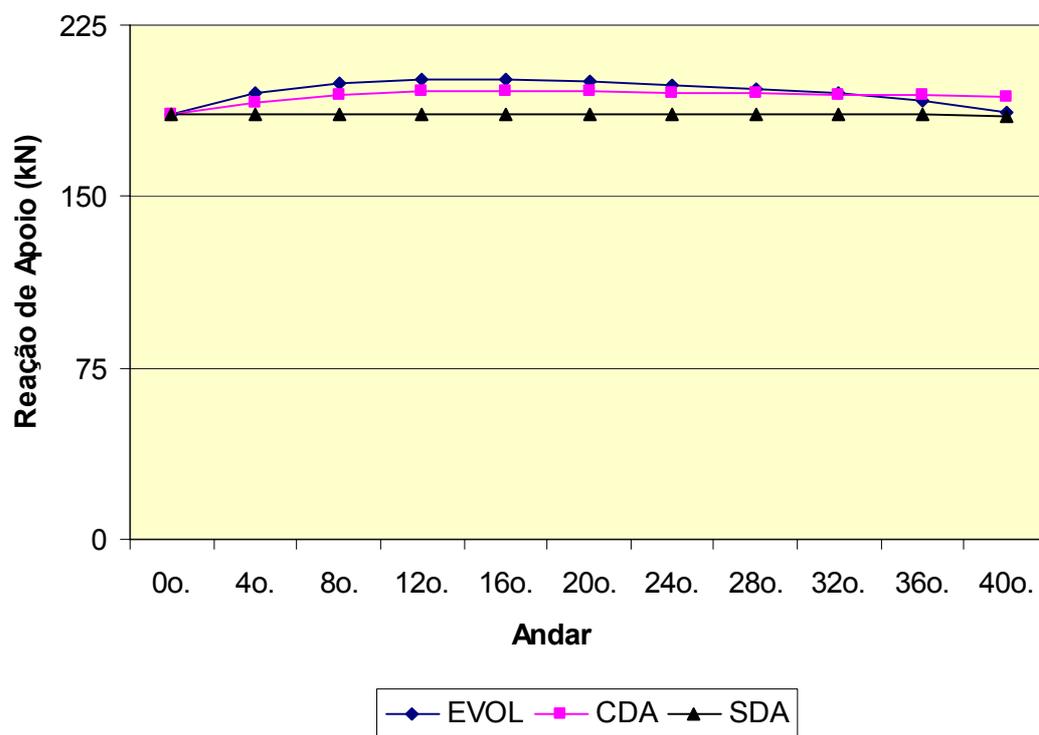


FIGURA 9.31 – Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P2 com laje de 25 centímetros

TABELA 9.32 – Reações de apoio no pilar P2 com laje de 30 centímetros

1 Andar	2 LAJE-EVOL	3 LAJE-CDA	4 LAJE-SDA
	R _{P2} (kN)	R _{P2} (kN)	R _{P2} (kN)
0°.	185,65	185,65	185,65
4°.	195,86	191,49	185,50
8°.	198,90	193,72	185,50
12°.	198,38	193,81	185,50
16°.	196,96	192,77	185,50
20°.	195,85	191,26	185,50
24°.	195,31	189,67	185,50
28°.	195,05	188,26	185,50
32°.	194,39	187,16	185,50
36°.	192,27	186,45	185,50
40°.	186,99	185,67	185,12

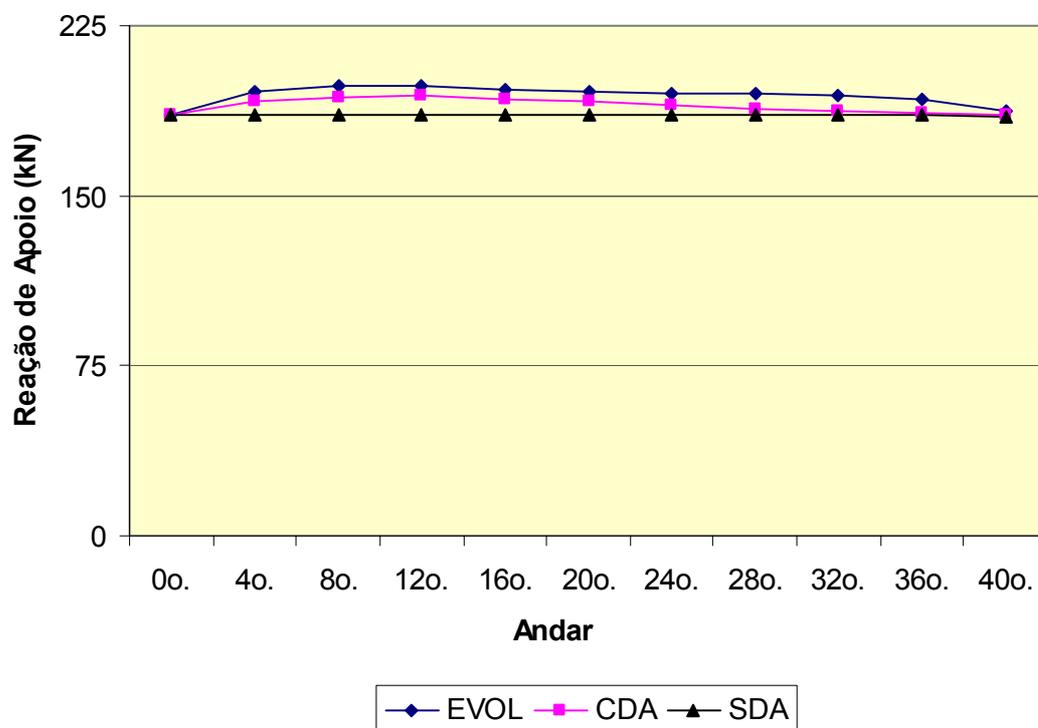


FIGURA 9.32 – Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P2 com laje de 30 centímetros

Nas tabelas 9.33, 9.34, 9.35 e 9.36 pode-se ver os resultados das reações de apoio das lajes no pilar P5 nos três modelos, para as espessuras da laje de 15, 20, 25 e 30 centímetros, respectivamente.

Na coluna 1 das quatro tabelas seguintes tem-se a posição da laje no edifício. Nas colunas 2, 3 e 4 têm-se as reações de apoio das lajes no pilar P5, para os modelos LAJE-EVOL, LAJE-CDA e LAJE-SDA, respectivamente.

Os gráficos das figuras 9.33, 9.34, 9.35 e 9.36 foram gerados a partir de valores que se encontram nas tabelas 9.33, 9.34, 9.35 e 9.36, respectivamente. Neles mostra-se a variação das reações de apoio das lajes no pilar P5 ao longo do edifício.

Observe-se nos quatro gráficos que até o 20º andar as curvas dos modelos LAJE-EVOL e LAJE-CDA praticamente se confundem. A partir do 20º andar a curva do modelo LAJE-EVOL tende a se aproximar da curva do modelo LAJE-SDA.

TABELA 9.33 – Reações de apoio no pilar P5 com laje de 15 centímetros

1 Andar	2 LAJE-EVOL	3 LAJE-CDA	4 LAJE-SDA
	R _{P5} (kN)	R _{P5} (kN)	R _{P5} (kN)
0°.	465,58	465,58	465,58
4°.	439,79	442,36	465,68
8°.	419,47	422,40	465,68
12°.	406,12	405,44	465,68
16°.	398,76	391,27	465,68
20°.	396,91	379,60	465,68
24°.	400,11	370,26	465,68
28°.	408,16	363,09	465,68
32°.	420,84	357,98	465,68
36°.	438,02	354,86	465,68
40°.	459,88	354,08	465,96

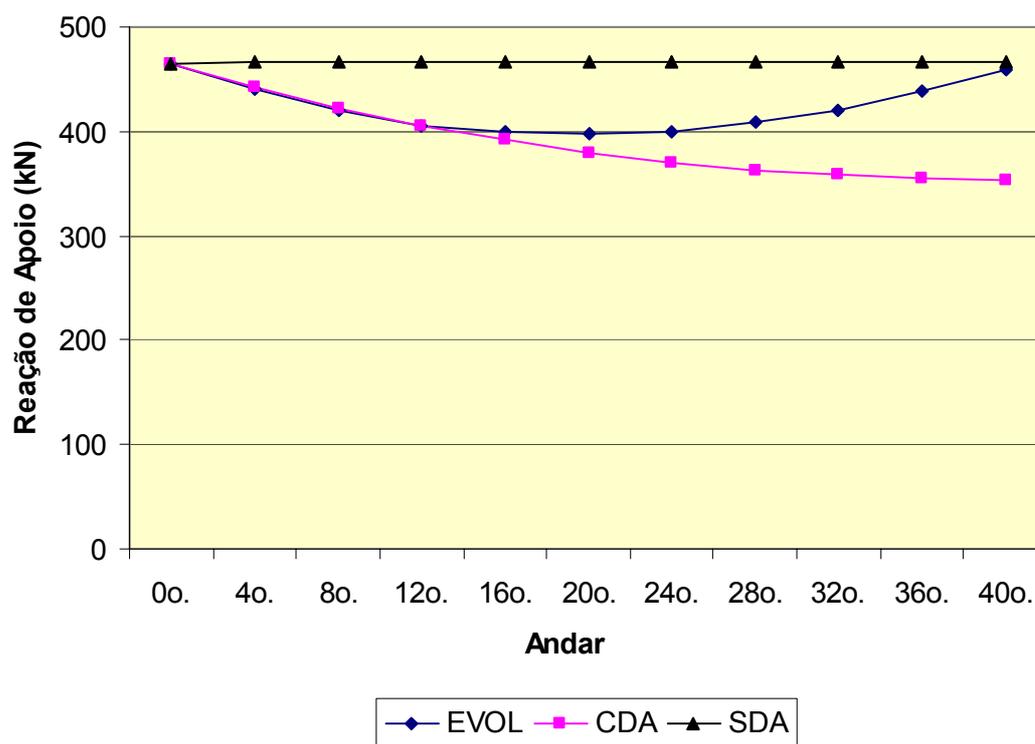


FIGURA 9.33 – Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P5 com laje de 15 centímetros

TABELA 9.34 – Reações de apoio no pilar P5 com laje de 20 centímetros

1 Andar	2 LAJE-EVOL	3 LAJE-CDA	4 LAJE-SDA
	R _{P5} (kN)	R _{P5} (kN)	R _{P5} (kN)
0°.	465,58	465,58	465,58
4°.	415,86	425,68	465,76
8°.	380,71	392,92	465,76
12°.	358,74	366,31	465,76
16°.	347,80	344,88	465,76
20°.	346,31	327,84	465,76
24°.	352,96	314,58	465,76
28°.	367,19	304,66	465,76
32°.	388,80	297,71	465,76
36°.	418,03	293,51	465,76
40°.	455,80	292,92	466,40

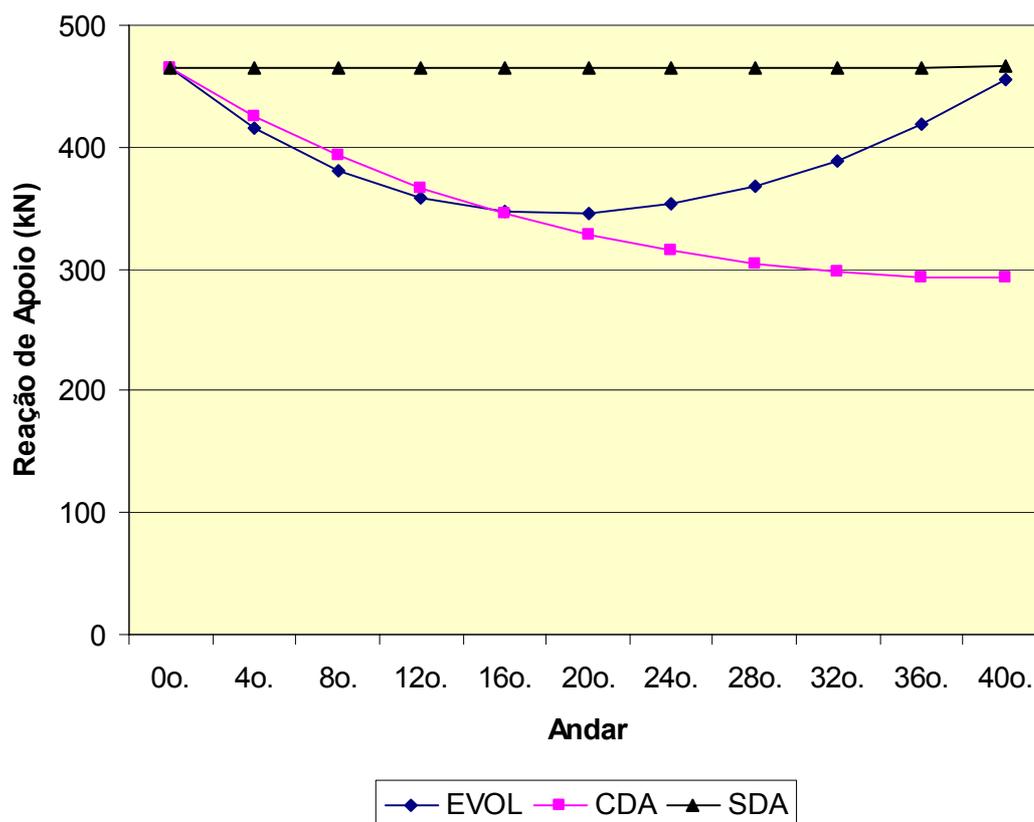


FIGURA 9.34 – Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P5 com laje de 20 centímetros

TABELA 9.35 – Reações de apoio no pilar P5 com laje de 25 centímetros

1 Andar	2 LAJE-EVOL	3 LAJE-CDA	4 LAJE-SDA
	R _{P5} (kN)	R _{P5} (kN)	R _{P5} (kN)
0°.	465,58	465,58	465,58
4°.	390,11	408,56	465,96
8°.	340,91	364,48	465,96
12°.	312,82	330,58	465,96
16°.	300,53	304,59	465,96
20°.	300,29	284,81	465,96
24°.	310,01	269,98	465,96
28°.	329,09	259,21	465,96
32°.	357,90	251,84	465,96
36°.	397,80	247,44	465,96
40°.	451,64	247,74	467,12

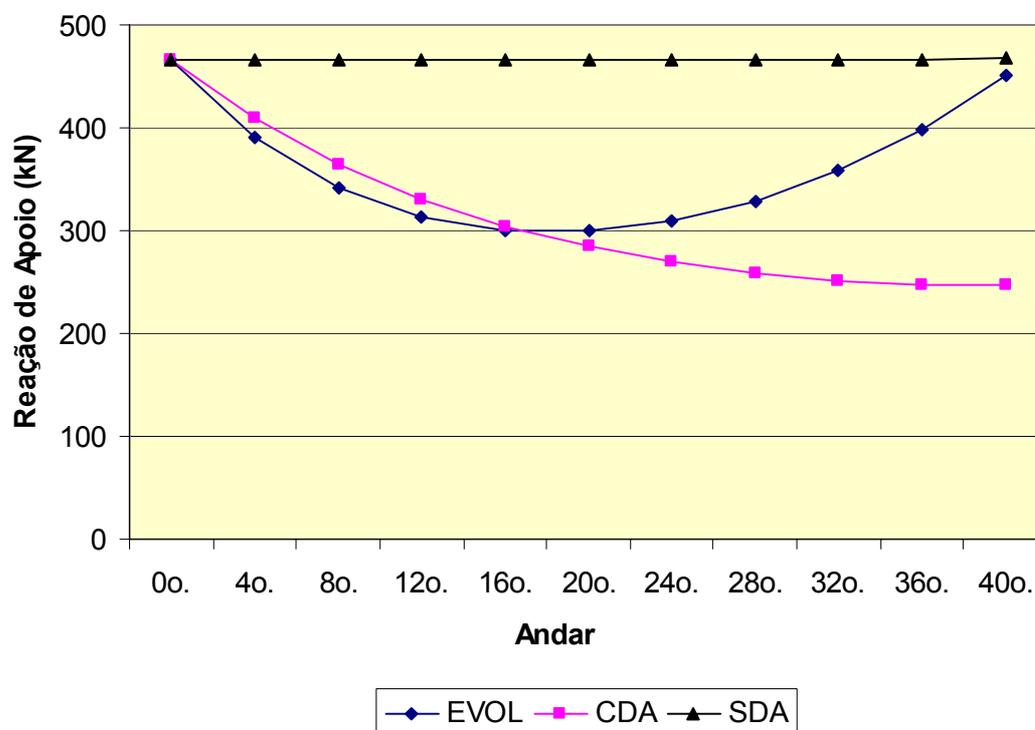


FIGURA 9.35 – Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P5 com laje de 25 centímetros

TABELA 9.36 – Reações de apoio no pilar P5 com laje de 30 centímetros

1 Andar	2 LAJE-EVOL	3 LAJE-CDA	4 LAJE-SDA
	R _{P5} (kN)	R _{P5} (kN)	R _{P5} (kN)
0°.	465,58	465,58	465,58
4°.	364,53	391,75	466,24
8°.	304,79	338,38	466,24
12°.	274,11	299,88	466,24
16°.	262,17	271,99	466,24
20°.	263,21	251,78	466,24
24°.	274,72	237,24	466,24
28°.	296,42	227,01	466,24
32°.	329,88	220,18	466,24
36°.	378,31	216,16	466,24
40°.	447,56	217,95	468,08

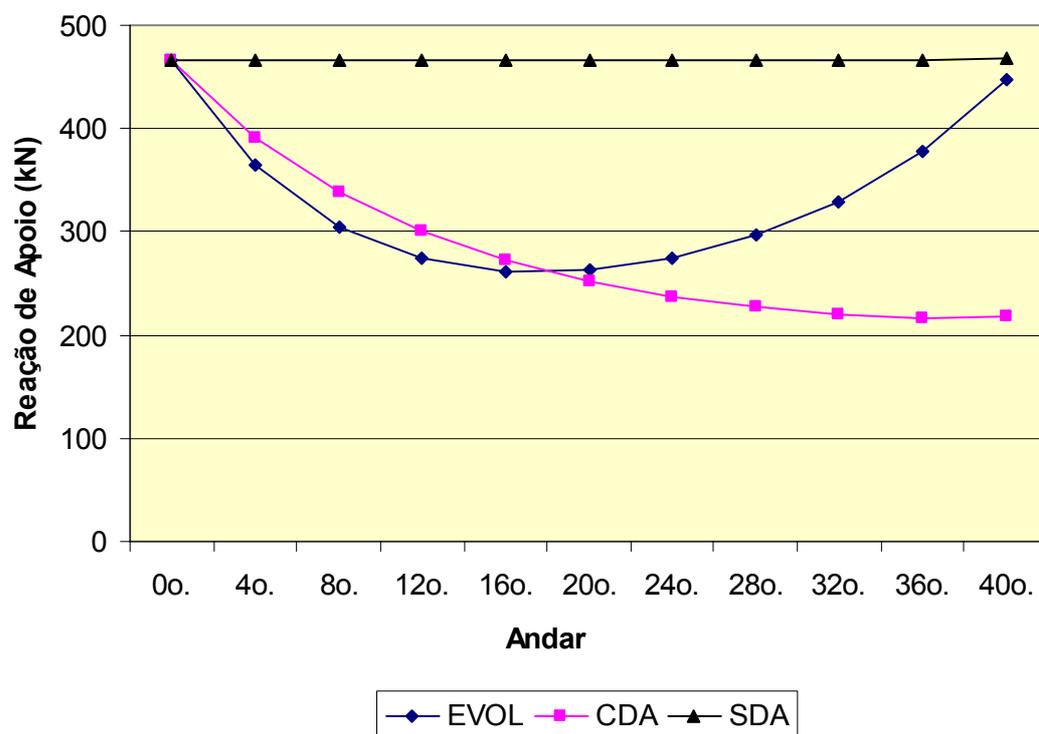


FIGURA 9.36 – Gráfico das reações de apoio das lajes no pilar P5 com laje de 30 centímetros

9.7 – Comparações das reações verticais de apoio dos pilares na fundação

Todos os resultados obtidos das reações verticais de apoio na fundação dos pilares P1, P2 e P5, nos modelos LAJE-SDA, LAJE-CDA e LAJE-EVOL, são agora comparados entre si.

Nas tabelas 9.37, 9.38 e 9.39 pode-se ver os resultados das reações de apoio R_{F1} , R_{F2} e R_{F5} nos três modelos, com as espessuras da laje de 15, 20, 25 e 30 centímetros.

Na coluna 1 das três tabelas seguintes têm-se as espessuras da laje no edifício. Nas colunas 2, 3 e 4 têm-se as reações verticais de apoio na fundação, para os modelos LAJE-EVOL, LAJE-CDA e LAJE-SDA, respectivamente.

Os gráficos das figuras 9.37, 9.38 e 9.39 foram gerados a partir de valores que se encontram nas tabelas 9.37, 9.38 e 9.39, respectivamente. Neles mostra-se a variação das reações de apoio R_{F1} , R_{F2} e R_{F5} .

TABELA 9.37 – Reações verticais de apoio na fundação do pilar P1

1	2	3	4
	LAJE-EVOL	LAJE-CDA	LAJE-SDA
d (cm)	R_{F1} (kN)	R_{F1} (kN)	R_{F1} (kN)
15	3076,94	3243,30	2918,00
20	3312,30	3671,80	2918,00
25	3641,78	4175,00	2918,00
30	4008,93	4638,40	2918,00

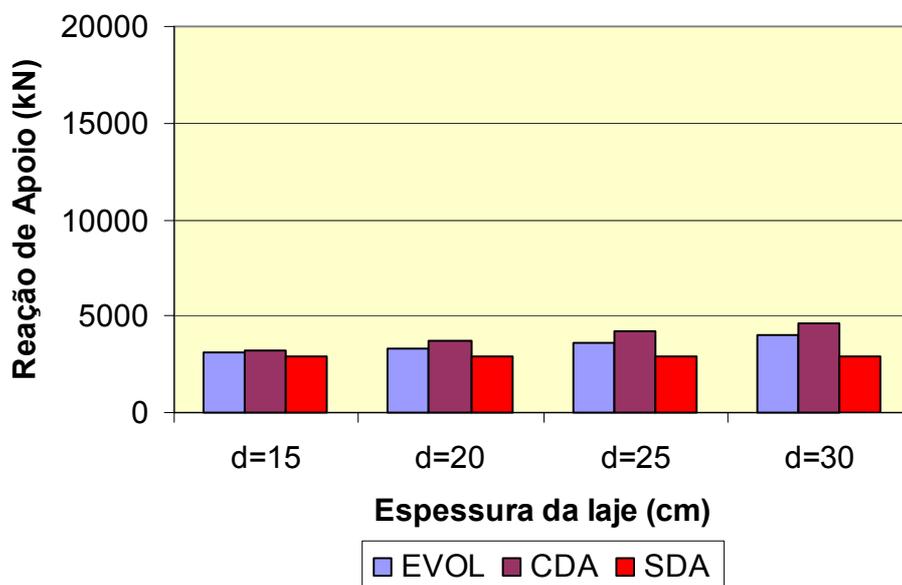
FIGURA 9.37 – Gráfico das reações verticais de apoio R_{F1} na fundação

TABELA 9.38 – Reações verticais de apoio na fundação do pilar P2

1	2	3	4
	LAJE-EVOL	LAJE-CDA	LAJE-SDA
d (cm)	R_{F2} (kN)	R_{F2} (kN)	R_{F2} (kN)
15	7737,58	7875,60	7425,00
20	7859,54	7906,20	7424,00
25	7873,60	7779,70	7422,00
30	7804,63	7604,30	7420,00

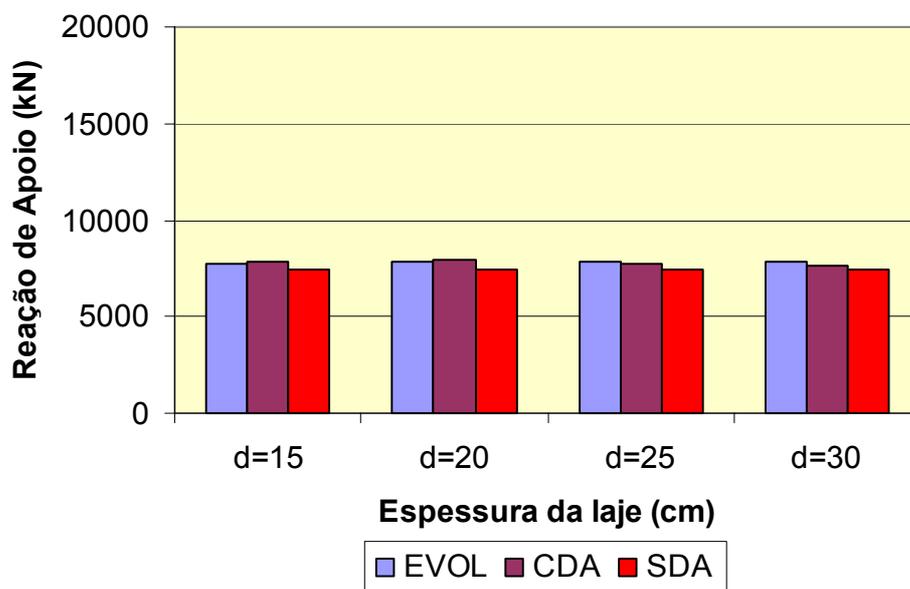
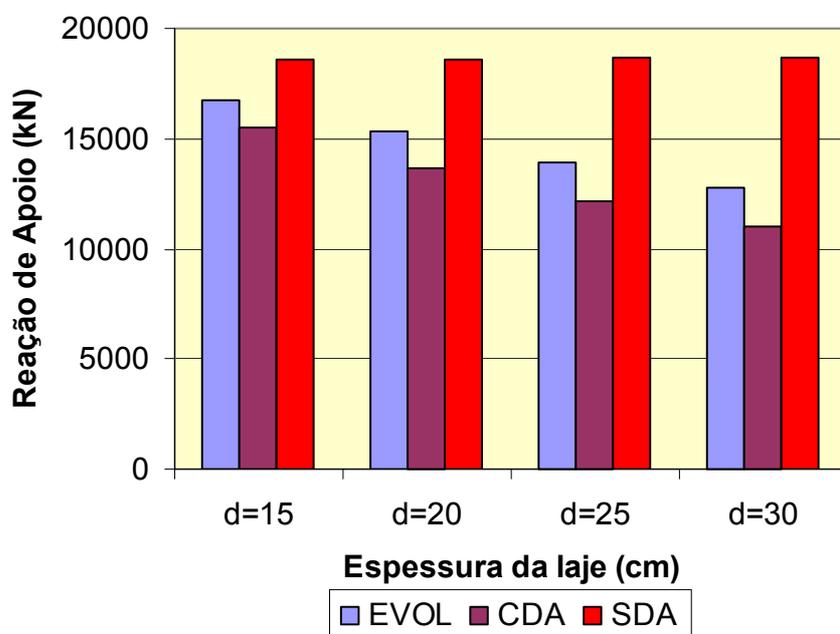
FIGURA 9.38 – Gráfico das reações verticais de apoio R_{F2} na fundação

TABELA 9.39 – Reações verticais de apoio na fundação do pilar P5

1	2	3	4
	LAJE-EVOL	LAJE-CDA	LAJE-SDA
d (cm)	R_{F5} (kN)	R_{F5} (kN)	R_{F5} (kN)
15	16741,95	15524,00	18627,00
20	15312,56	13688,00	18631,00
25	13938,31	12181,00	18639,00
30	12745,81	11029,00	18651,00

FIGURA 9.39 – Gráfico das reações verticais de apoio R_{F5} na fundação

10

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisada uma estrutura de 40 andares sem vigamento através de 4 modelos de cálculo diferentes. Os modelos LAJE-MOL, LAJE-SDA, LAJE-CDA e LAJE-EVOL foram usados e mostraram como as variações dos esforços e deslocamentos podem ocorrer numa laje-tipo ao longo da altura do edifício. Para cada modelo calculado, um resultado diferente foi encontrado; assim, pode-se dizer que a intenção inicial, de mostrar que a escolha do modelo estrutural é importante na análise de edifícios altos com lajes lisas, foi alcançada.

O modelo LAJE-MOL mostrou que os esforços solicitantes e as reações de apoio das lajes são muito afetados pelos recalques diferenciais dos pilares. Através dele fica claro que apesar das lajes ao longo do edifício terem o mesmo formato geométrico, possuem esforços bastante diferentes, não justificando-se a repetição de uma mesma armação para todas as lajes.

Os recalques diferenciais dos pilares por sua vez são afetados pela rigidez axial dos pilares e pela rigidez à flexão das lajes. Pode-se conseguir a diminuição dos recalques diferenciais e, conseqüentemente, a diminuição da variação dos esforços solicitantes nas lajes-tipo através de três caminhos distintos: 1^o) aumentando a rigidez axial de todos os pilares; 2^o) aumentando a rigidez à flexão das lajes; 3^o) uniformizando as tensões normais médias dos pilares em cada andar.

O primeiro caminho descrito muitas vezes pode não ser viável por causa dos limites impostos pelo projeto arquitetônico que impede o aumento excessivo das seções transversais dos pilares. O segundo caminho, conforme demonstrado ao longo deste trabalho, acaba não sendo viável pelo fato de que o aumento da rigidez à flexão das lajes acarreta em aumento do módulo dos esforços solicitantes e das variações dos esforços de cada laje-tipo. Já o terceiro caminho que busca a uniformização das tensões normais médias dos pilares em um mesmo andar é mais viável, conforme os estudos feitos por COELHO (2003), e pode ser perfeitamente adaptado para qualquer projeto, desde que sejam respeitados os limites impostos pelo projeto arquitetônico.

Os modelos LAJE-SDA e LAJE-CDA são dois modelos clássicos de cálculo ainda utilizados entre os profissionais da área de projeto. Como foi mostrado no capítulo 9, os resultados apresentados por estes dois modelos divergem bastante do modelo que simula as seqüências construtiva e de carregamento (modelo LAJE-EVOL).

Pode-se ver no modelo LAJE-SDA que os recalques diferenciais são supostos nulos, o que leva a esforços solicitantes constantes nas lajes-tipo ao longo da altura do edifício. Isso vai diretamente contra aquilo que foi exposto no modelo LAJE-MOL, que mostra exatamente a importância de considerar esses recalques diferenciais.

No modelo LAJE-CDA é justamente a má avaliação desses recalques diferenciais que fazem dele um modelo incorreto na avaliação dos esforços das lajes. Note-se que ao construir um novo andar as lajes são niveladas e, portanto, os recalques diferenciais neste nível são nulos. Isso significa que o carregamento vertical já introduzido no edifício não

afeta os esforços em uma laje recém-construída. No modelo LAJE-CDA, todavia, os recalques diferenciais devidos ao carregamento vertical acumulam-se de baixo para cima não ocorrendo o nivelamento dos andares recém-construídos. Este fato pode levar a erros expressivos na avaliação dos esforços nas lajes, principalmente nos andares superiores do edifício.

Desta forma, não é recomendável o uso dos modelos LAJE-SDA e LAJE-CDA na análise de edifícios altos.

O modelo LAJE-EVOL apresentado é mais adequado para a análise de edifícios altos por considerar a seqüência natural de construção e entrada dos carregamentos. É certo que o modelo desenvolvido neste trabalho pode ser melhorado se os carregamentos aplicados seguirem exatamente o cronograma de execução da obra e forem considerados o escoramento das lajes e os demais carregamentos de montagem que ocorrem durante a construção. Em todo caso, o cálculo evolutivo sempre será superior aos modelos clássicos exatamente por considerar, como já foi dito, a seqüência natural de construção e carregamento.

Conclui-se que a grande vantagem do cálculo evolutivo é permitir que se faça uma análise estrutural mais próxima da realidade. Por outro lado, sua desvantagem é o aumento das informações necessárias e do esforço computacional. Este esforço, porém, é bastante reduzido quando se tem à disposição softwares que permitam a análise seqüencial. Citam-se como exemplos de softwares que já permitem fazer o cálculo evolutivo tridimensional pelo método dos elementos finitos os programas ANSYS e SAP-2000.

BIBLIOGRAFIA

CAMPOS, M. R. - *Projeto e Implementação de um Software Amigável para Análise de Placas Ortótropas com Enrijecedores*, Dissertação (Mestrado), DEES – UFMG, 1996.

CAMPOS, M. R. - *Plenor - Um Software Didático e Amigável para Análise de Placas com Enrijecedores*, XVIII Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Volume IV, pg. 1467-1476, 1997, Brasil.

CHOI, C. K. e KIM, E. D. - *Multistory Frames Under Sequential Gravity Loads*, Journal of Structural Engineering – ASCE, v. 111, No. 11, Nov., 1985, p. 2373 – 2384.

COELHO, A. O. L. - *Influência das Etapas de Construção e Carregamento na Análise de Pórticos Planos em Edifícios Altos*, Dissertação (Mestrado), DEES – UFMG, 2003.

DE SALVO, G. J. & GORMAN, R. W. - *ANSYS - Engineering Analysis System User's Manual – Vol. 1*, 1989, Swanson Analysis Systems Inc.

FINTEL, M. - *Handbook of Concrete Engineering*. 1ª edição. Chicago: Van Nostrand Reinhold Company, 1974. 801 p.

FONTE, A. O. C. e SORIANO, H. L. - *Influência do Efeito Construtivo Incremental em Edifícios Altos*, II Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, USP, 1989.

GRUNDY, P.; KABAILA, A. - *Construction Loads on Slabs with Shored Formwork in Multistory Buildings*, ACI Structural Journal, v. 60, No. 12, p. 1729-1738, Dec., 1963

KOHNRE, P. C. - ANSYS - *Engineering Analysis System Theoretical Manual - 2.0 Element Library (Sections: from 2.41 to 2.99)*, 1989, Swanson Analysis Systems Inc.

KRIPKA, M. - *Análise Incremental Construtiva de Edificações*, Rio de Janeiro, 1990, Dissertação (Mestrado) – COPPE – UFRJ.

LIN, T. Y.; STOTESBURY, S. D. - *Structural Concepts and Systems for Architects and Engineers*. New York: John Wiley, 1981. 549 p.

LIU, X.; CHEN, W.; BOWMAN, M. D. - *Construction Load Analysis For Concrete Structures*, Journal os Structural Engineering, ASCE, v. 111, No. 5, May, 1985, p. 1019-1036.

PEREZ, G. B. - *Análise Comparativa de Modelos do Sistema Estrutural de um Edifício de Andares Múltiplos em Concreto Armado*, Dissertação (Mestrado), 1999, Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG.

PEREZ, G. B. - *Comparação de Modelos Clássicos para Cálculo da Estrutura de um Edifício de Andares Múltiplos*, IV Simpósio Mineiro de Mecânica Computacional, pg. 259-266, Uberlândia, 2000.

PITANGUEIRA, R. e VASCONCELLOS FILHO, A. - *Uso do Programa PLENOR para Análise de Estruturas Reticuladas*, 1999, Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG.

PRADO, J. F. M. A.; RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. - *Panorama Sobre Ações Construtivas em Estruturas de Edifícios em Concreto Armado*. Revista IBRACON, 1998, No. 21, Abr-Jul, p.21-31.

PRADO, J. F. M. A. - *Estruturas de Edifícios em Concreto Armado Submetidas a Ações de Construção*, 1999, Tese (Doutorado) Departamento de Engenharia de Estruturas da USP – São Carlos.

RAMALHO, M. A.; PRADO, J. F. M. A.; CORRÊA, M. R. S. - *Construction Load Analysis of Concrete Structures Using Computer 3D Models*, Computational Mechanics – CIMNE, Barcelona, 1998.

SELVARAJ, S.; SHARMA, S. P. - *Influence of Construction Sequence on the Stresses in Tall Building Frames*. Regional Conference on Tall Buildings, Bangkok, Jan., 1974, p. 197 - 211.

STIVAROS, P. C.; HALVORSEN, G. T. - *Equivalent Frame Analysis of Concrete Buildings During Construction*, *Concrete International*, p. 57-62, Aug., 1991

SHATERMAN, M. I. & IVIANSKI, A. M. - *Entrepisos sin Vigas*, 1960, Editora Inter Ciencia.

SMITH, B. S.; COULL, A. - *Tall Building Structures: Analysis and Design*. 1ª edição. New York: John Wiley, 1991. 537 p.

TESORO, F. R. - *Los Forjados Reticulados – Manual Practico*, 1998, CYPE.

VASCONCELLOS FILHO, A. - *Edifícios de Andares Múltiplos*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1981. 148 p. Tese (Concurso de Professor Titular).

VASCONCELLOS FILHO, A e CAMPOS, M.R. - *Programa PLENOR – Exemplos de Aplicação*, 1996, Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG.