

1 VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE UMA ESTRUTURA DIMENSIONADA
2 PELO MÉTODO SIMPLIFICADO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

3 ⁽¹⁾ Rayssa Gonçalves Silva

4 ⁽²⁾ Marília Gonçalves Marques

5 ⁽¹⁾ Estudante do curso de Engenharia Civil – Universidade Federal de Viçosa, Campus Rio Paranaíba

6 ⁽²⁾ Professora do curso de Engenharia Civil - Universidade Federal de Viçosa, Campus Rio Paranaíba

7 Presidente da banca: Marília Gonçalves Marques

8 Membro 1: Simone Rodrigues Campos Ruas

9 Membro 2: Daniel Santana de Magalhães

10 16 de dezembro de 2020

11 **RESUMO**

12 No cálculo estrutural existem várias formas de dimensionamento, entre eles, o método dos elementos
13 finitos (MEF) e o método simplificado. Neste trabalho foi verificado uma estrutura dimensionada
14 pelo método simplificado utilizando o método dos elementos finitos a fim de mostrar as principais
15 diferenças e semelhanças entre os dois tipos de dimensionamento. O MEF realiza análises de
16 estruturas dividindo em elementos menores que refinam os resultados. Neste trabalho foi utilizado
17 para as análises o SAP2000 versão 17. Já o método simplificado utiliza softwares para obtenção de
18 esforços, como por exemplo o FTOOL, planilhas para o dimensionamento e detalhamento manual
19 utilizando programas de desenho como Autocad. As verificações encontradas para os elementos de
20 lajes, vigas e pilares obtiveram resultados diferentes para os dois métodos. No método simplificado,
21 os resultados são confiáveis por ser baseado na NBR 6118 (2014) e NBR 6120 (2019), porém, não
22 trouxe resultados precisos para cada região da estrutura. No MEF, é visto resultados variados em cada
23 região da estrutura, como os momentos fletores nas lajes, que 85% foram menores no simplificado.
24 As vigas também, com 69% dos momentos fletores e 73% dos esforços cortantes com valores maiores
25 no método simplificado.

26 **PALAVRAS-CHAVES:** Análise Estrutural. Dimensionamento. Estrutura de Concreto Armado.

27 **ABSTRACT**

28 In structural calculation there are several forms of design, including the finite element method (FEM)
29 and the simplified method. In this work, a structure dimensioned by the simplified method was
30 verified using the finite element method in order to show the main differences and similarities
31 between the two types of design. The MEF performs analysis of structures dividing into smaller
32 elements that refine the results. In this work, SAP2000 version 17 was used for analysis. The
33 simplified method uses software to obtain efforts, such as FTOOL, spreadsheets for dimensioning
34 and manual detailing using drawing programs such as Autocad. The checks found for the elements

35 of slabs, beams and columns obtained different results for the two methods. In the simplified method,
36 the results are reliable because it is based on NBR 6118 (2014) and NBR 6120 (2019), however, it
37 did not bring precise results for each region of the structure. In the FEM, varied results are seen in
38 each region of the structure, such as the bending moments in the slabs, which 85% were lower in the
39 simplified. The beams also, with 69% of the bending moments and 73% of the shear forces with
40 higher values in the simplified method.

41 **KEY-WORDS:** Design. Reinforced concrete structure. Structural analysis.

42 1. INTRODUÇÃO

43 O método simplificado é a base de cálculos que dimensionam os elementos estruturais por
44 etapas e que se baseiam em normas para garantir estruturas com segurança e conforto, como a
45 Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6118 (2014). Oliveira (2009) citou que com o
46 desenvolvimento das cidades, as obras começaram a tomar novas formas, com perfis estruturais mais
47 esbeltos para otimizar o espaço. Assim, surgiram edifícios cada vez mais altos, devido a verticalização
48 das grandes cidades e conseqüentemente mais cargas sendo suportadas pelas estruturas.

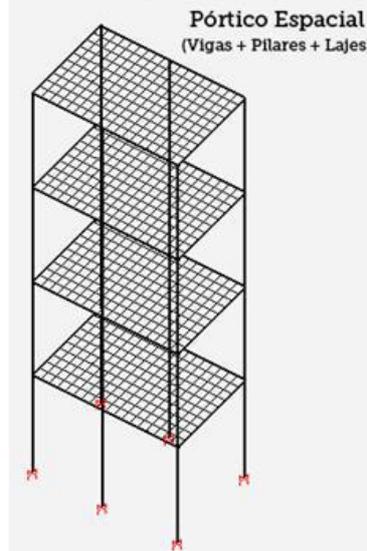
49 Segundo Junges (2011), para realizar o dimensionamento de uma estrutura, é feito um pré-
50 dimensionamento para obter as ações atuantes e depois analisar os esforços e deslocamentos do
51 projeto. Após o pré-dimensionamento verifica-se as exigências de segurança conforme o Estado
52 Limite Último (ELU), depois é feito a análise de fissuras e deslocamentos para o Estado Limite de
53 Serviço (ELS). Antes da evolução computacional na engenharia, não se preocupava muito em
54 verificar o ELS, pois as estruturas eram robustas e por isso sofreriam menores deslocamentos.

55 Nessa nova configuração de projetos estruturais, foi visto a necessidade de se utilizar novos
56 métodos que fossem mais precisos para realizar análises de deslocamentos e fissuras. Assim surgiram
57 diversos estudos para a utilização do Método de Elementos Finitos (MEF) na área de Engenharia
58 Civil. Vários softwares começaram a utilizar o MEF para o cálculo estrutural, como o SAP2000. Esse
59 programa modela objetos em 3D para realizar análises das mais variadas situações estruturais, com
60 cargas sísmicas, de vento, móveis, entre outras.

61 O MEF, segundo Bathe (2006), será utilizado cada vez mais para fins de engenharia para análise
62 de sólidos e estruturas, e transferência de calor e fluidos. Conforme Alves (2007), o MEF consiste
63 em dividir um sistema ou elemento em partes menores por meio da discretização. Ou seja, ao analisar
64 uma laje maciça, segundo Werner e Vargas (2013), adota-se uma placa retangular que será dividida
65 em várias figuras geométricas, denominadas elementos finitos e seus nós serão os pontos nodais, que
66 formarão uma malha. Com a malha geométrica, é realizado análises precisas sobre o objeto como um
67 modelo numérico que realiza métodos matriciais de rigidez e equações lineares para alcançar
68 resultados precisos.

69 Outros problemas que sempre foram adotados como cálculos simplificados foram as análises
70 não linear da estrutura de concreto armado e do aço, que faz uma análise do projeto na posição
71 deformada, chamada não-linearidade geométrica (NLG) e o comportamento não linear do concreto e
72 do aço, chamado não linearidade física (NLF). Com a presença de softwares essa análise se mostrou
73 necessária e de grande importância. Então, se faz necessário o método dos elementos finitos. Em
74 programas como o SAP2000 foi possível iniciar análise de pórticos espaciais com grelhas, que se
75 referem às lajes discretizadas, como é visto na Figura 1.

76 Figura 1: Modelo de pórtico espacial com grelhas



77 Fonte: Sgarbi (2013).
78

79 No método simplificado, para Sgarbi (2013), é dado como hipótese de cálculo para lajes, a
80 distribuição de cargas pelo método da área de influência ou pelos valores tabelados dos esforços,
81 elaborado por Pinheiro (2007) conforme a NBR 6118 (2014). As vigas consideradas contínuas
82 possuem restrições ou liberações perfeitas nos bordos para translação e rotação, e assim, as cargas
83 das lajes são transmitidas para as vigas como cargas distribuídas. Os pilares podem ser dimensionados
84 com engaste perfeito ou rotação nos nós. E, também, com a aplicação de uma mola que compatibilize
85 os esforços viga/pilar e pilar/fundação. Com isso, os cálculos são obtidos por etapas, primeiramente
86 dimensiona-se as lajes, as vigas e depois os pilares.

87 Como foi analisado na tese de Couras (2019), que realizou a modelagem por elementos finitos
88 de tabuleiros de pontes rodoviárias com vigas retas em concreto armado, foi comparado o esforço
89 cortante e momento fletor das longarinas da ponte entre o MEF e o método simplificado. Concluiu-
90 se que os resultados foram próximos e geralmente os menores valores eram do MEF, além das
91 considerações de esforços particulares em regiões das longarinas que só é analisado pelo programa
92 que podem causar fissuras. Werner e Vargas (2013) compararam um pavimento com 9 lajes entre
93 métodos simplificados tabelados e a utilização do Cypecad como MEF. Percebeu-se que uma de suas
94 lajes resultou em maiores deslocamentos máximos no programa. Desta forma, há uma influência

95 direta dos resultados das vigas no dimensionamento das lajes, que no método simplificado não se faz
96 essa consideração, apenas das lajes para as vigas.

97 Com isso, procura-se validar o MEF e o método simplificado para que seja possível garantir
98 um dimensionamento eficiente em ambas as situações, pois o custo da utilização de um software pode
99 não ser viável para um engenheiro civil, sendo necessário a utilização apenas de métodos
100 simplificados.

101 **2. OBJETIVOS**

102 **2.1 Objetivo geral**

103 Verificar o dimensionamento estrutural de uma casa de dois pavimentos pelo método
104 simplificado, utilizando o método dos elementos finitos. O método de elementos finitos será analisado
105 no software SAP2000 versão 17.

106 **2.2 Objetivos específicos**

- 107 • Avaliar os esforços e deslocamentos de uma estrutura dimensionada no método simplificado,
108 utilizando o SAP2000, como pórtico espacial com as lajes discretizadas.
- 109 • Comparar os resultados dos esforços calculados pelo método simplificado e do MEF nas lajes,
110 vigas e pilares.

111 **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

112 **3.1 Estudo de caso**

113 Neste trabalho, foi utilizado como base para comparação, um projeto arquitetônico de uma casa
114 de dois pavimentos e barrilete com área total de 203,70 m², como apresentado nas Figuras 2 e 3. Os
115 dados disponibilizados para o pré-dimensionamento da residência foram retirados dos cortes da
116 planta. A espessura da alvenaria é de 15 cm, desta forma, uma dimensão dos pilares e das vigas foi
117 de 14 cm, a altura da viga foi de 30 cm e a espessura da laje adotada foi de 10 cm.

118

119

120

121

122

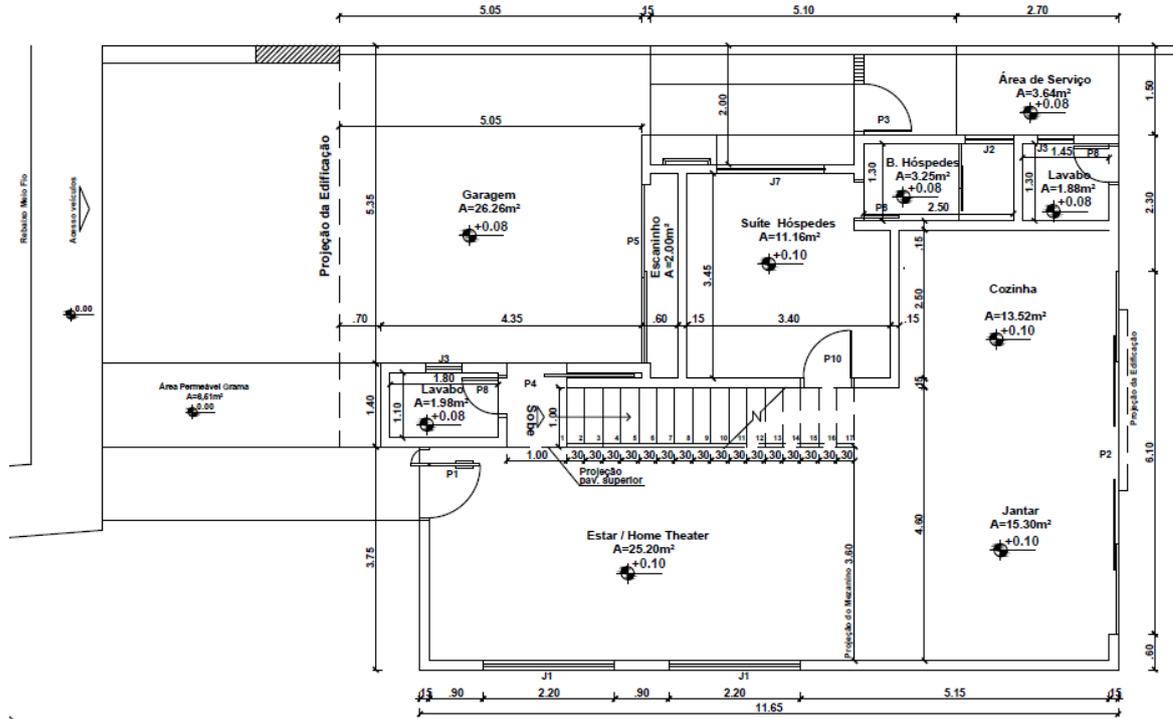
123

124

125

126

Figura 2: Pavimento inferior



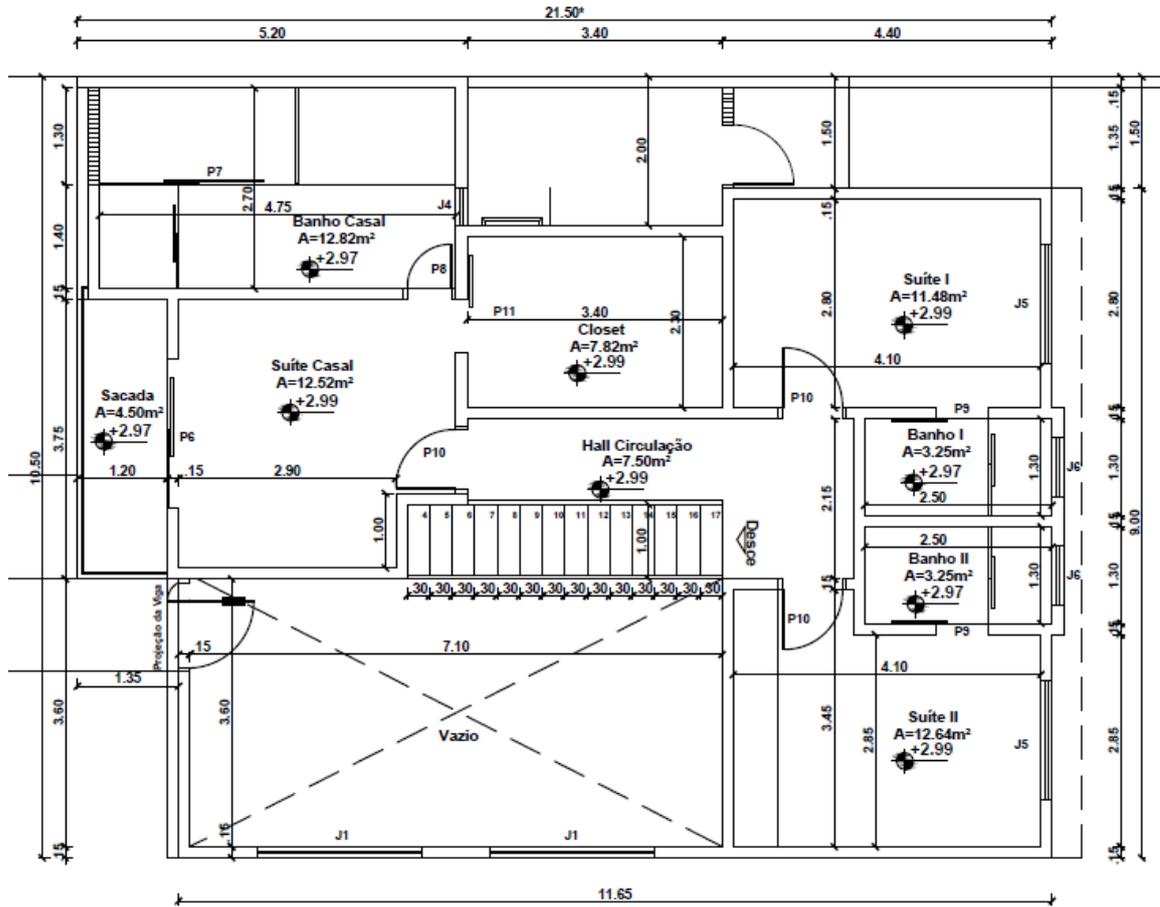
128

129

Fonte: Projeto arquitetônico de autoria de Gustavo Veiga (2013)

130

Figura 3: Pavimento superior



131

132

Fonte: Projeto arquitetônico de autoria de Gustavo Veiga (2013)

133 **3.2 Método Simplificado**

134 O dimensionamento da estrutura foi seguido conforme as prescrições normativas da NBR 6118
135 (2014). O dimensionamento foi feito utilizando planilhas do Excel e a obtenção dos esforços pelo
136 FTOOL. As considerações adotadas em relação aos materiais foram: concreto de 25 MPa, barras de
137 aço CA-50, módulo de elasticidade inicial de 28 GPa e módulo de elasticidade secante de 24 GPa,
138 coeficiente de Poisson: $\nu = 0,2$, pé direito do pavimento inferior de 2,89 m, pé direito do pavimento
139 superior de 2,80 m e o pé direito do barrilete é de 2,50 m.

140 Para o cálculo estrutural foram utilizadas as combinações de Estado de Limite Último (ELU)
141 para determinar os esforços e momentos de cálculo, e o Estado de Limite de Serviço (ELS) com a
142 combinação quase permanente, para analisar as flechas obtidas na estrutura. As cargas existentes na
143 casa, como as cargas de alvenaria, a carga permanente, peso próprio e a sobrecarga foram seguidas
144 segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6120 (2019).

145 O dimensionamento realizado em etapas, foi dividido entre a análise das lajes, vigas, pilares e
146 escadas, nessa ordem. Para que assim, siga o raciocínio em que as lajes descarregam nas vigas seus
147 esforços, e as vigas descarregam nos pilares.

148 Adotou-se para as lajes a distribuição de cargas pelo método da área de influência e os valores
149 tabelados dos esforços, elaborado por Pinheiro (2007). As vigas e pilares foram modelados no Ftool.

150 **3.3 Método dos Elementos Finitos**

151 Foi modelado no SAP2000 o projeto estrutural da casa que foi calculado pelo método
152 simplificado, utilizando as mesmas dimensões da estrutura final e as mesmas considerações de dados
153 de entrada, como as características dos materiais e a utilização dos critérios da NBR 6118 (2014).

154 No método dos elementos finitos, a estrutura foi modelada como um pórtico espacial como
155 grelhas. Houve a interligação entre os pavimentos com os pilares, as vigas e as lajes de forma que as
156 condições de contorno com relação à rigidez das ligações dos pavimentos com os pilares fossem
157 aproximadas ao executado em obra. As lajes foram modeladas como grelhas discretizadas, ou seja,
158 uma placa que foi dividida em várias partes (elementos finitos) e que se conectam através dos nós.

159 Os pilares e vigas da estrutura são adotados como elementos de barra e as lajes e a escada como
160 elemento shell, que é a soma do elemento membrana e elemento placa. As lajes discretizadas
161 formaram malhas quadrangulares com dimensão máxima de até 0,80m. Essa dimensão foi o menor
162 valor que o programa conseguiu analisar sem prejudicar o funcionamento do software. Pois quanto
163 menor a discretização, aumenta o refinamento de interações de cálculos, e torna a análise mais
164 demorada e com defeitos pelo tamanho do arquivo.

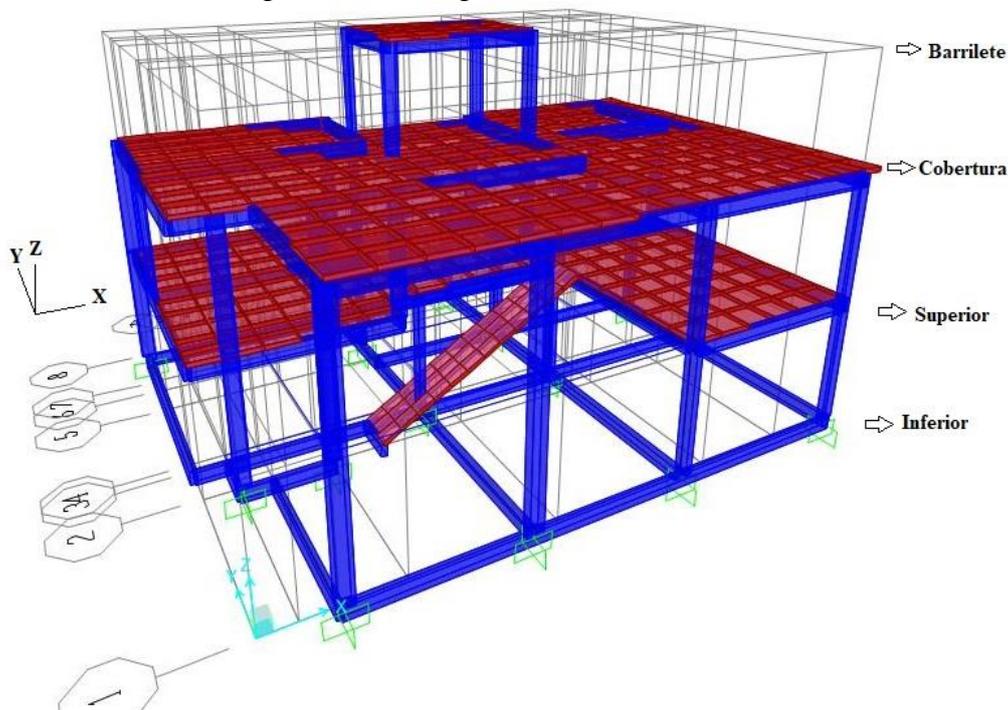
165 As considerações de flexibilidade da estrutura, é o fator mais importante para garantir que as
166 ligações viga/pilar e pilar/fundação se assemelham ao modelo simplificado para a melhor comparação

167 entre os métodos. Para isso, foram feitas as associações das vigas e pilares com um fator de zona
168 rígida igual a 1 (um), em que a ligação entre os nós viga/pilar é considerado engastamento perfeito.
169 Outra configuração utilizada no programa, foi a união entre os elementos de barra, que no caso são
170 as vigas e pilares através das ligações entre os nós desses elementos. No comando de configuração
171 do SAP2000, foi gerada a restrição de bordas que realiza a união dos nós entre os elementos
172 desencontrados e garantindo maior interação entre os elementos estruturais. Esse comando é referente
173 a unir os elementos de modelagem em seus nós e não referente as ligações de apoio entre viga/pilar,
174 viga/viga e laje/viga.

175 Todas as lajes e a escada foram armadas nas duas direções e a marquise armada em uma só
176 direção devido ao seu pequeno vão em uma de suas dimensões, utilizando apenas armadura de
177 distribuição em um dos lados. No fim foram inseridas na base dos pilares do 1º pavimento as
178 restrições nos nós para representar o apoio engastado, como sendo a fundação da residência.

179 Após a modelagem, foi necessário inserir no programa as combinações de Estado de Limite
180 Último (ELU) e Estado de Limite de Serviço (ELS) com a combinação quase permanente. As cargas
181 utilizadas foram as mesmas utilizadas no método simplificado. Na Figura 4, observa-se a modelagem
182 da residência finalizada.

183 Figura 4: Modelagem da casa no SAP2000



184
185
186

Fonte: Autoria própria

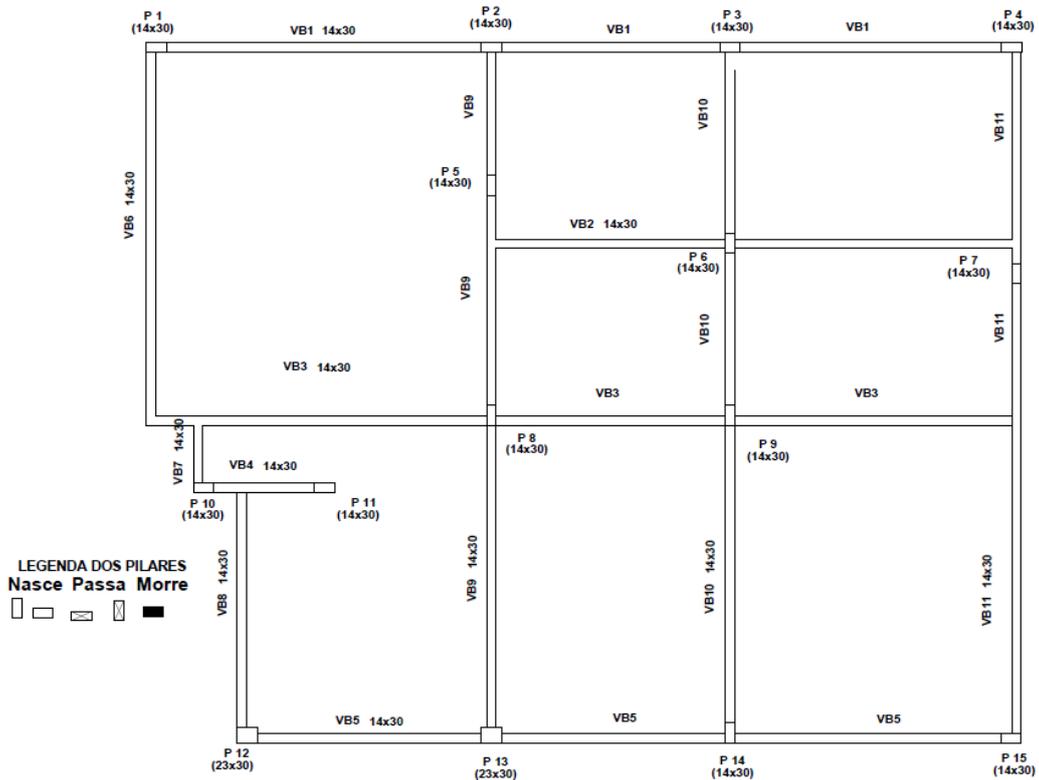
187 **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

188 **4.1 Modelo Simplificado**

189 No dimensionamento estrutural utilizando o método simplificado, foi visto que a estrutura no
190 pré-dimensionamento ficou frágil e alguns pilares muito esbeltos, como os pilares P12 e P13
191 necessitaram de um aumento na seção transversal para diminuir o índice de esbeltez.

192 Nas Figuras 5, 6 e 7 estão apresentadas as plantas de forma do pavimento inferior, superior e
193 cobertura.

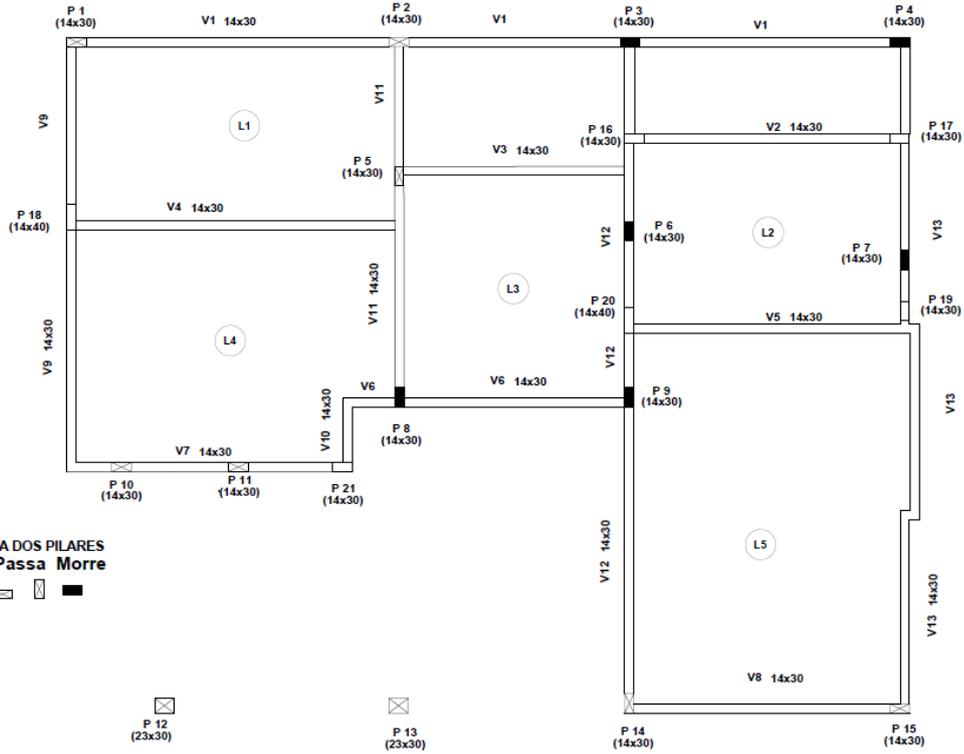
194 **Figura 5: Planta de forma do pavimento inferior**



Fonte: Autoria própria

195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207

Figura 6: Planta de forma do pavimento superior



209

210

Fonte: Autoria própria

211

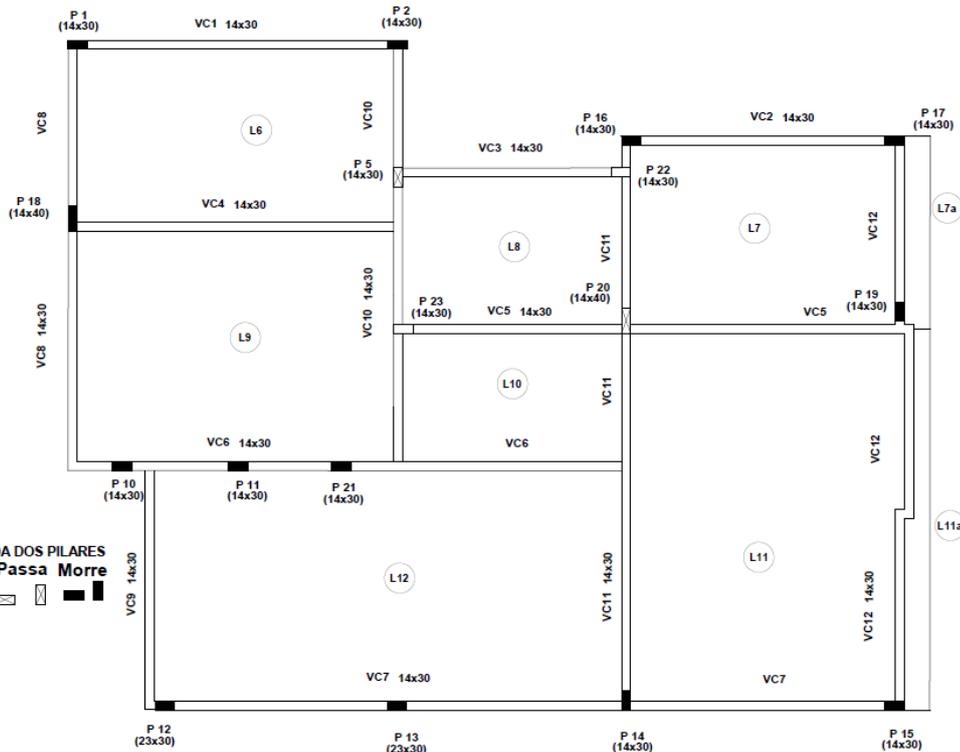
212

213

214

A presença de cargas elevadas, como a banheira e a caixa d'água, foram os pontos críticos na análise do dimensionamento estrutural, para alinhar os esforços obtidos e a capacidade de resistência da estrutura.

Figura 7: Planta de forma da cobertura



215

216

Fonte: Autoria própria

217 No Apêndice A há tabelas com os resultados dos esforços de todos os pilares e das lajes e vigas
218 do pavimento superior, para serem comparadas com o MEF.

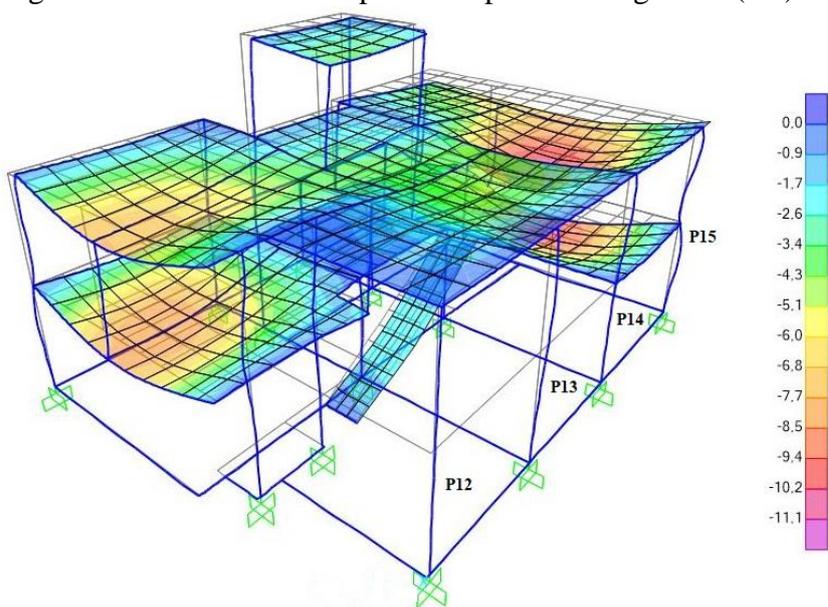
219 4.2 Método dos Elementos Finitos

220 O projeto pós dimensionado pelo método simplificado, foi modelado com as mesmas posições
221 dos pilares e vigas, as mesmas dimensões, cargas, restrições e materiais. E após feita a análise da
222 estrutura foram retirados os resultados separadamente de cada elemento estrutural: lajes, vigas e
223 pilares, nessa ordem.

224 Na Figura 8, a análise do modelo estrutural mostra os deslocamentos em escala ampliada. Desta
225 forma, visualiza-se o comportamento de cada elemento, como o engastamento perfeito considerado
226 entre vigas, pilares e fundação, tornando uma estrutura mais rígida. Mostra-se também o
227 comportamento de flambagem dos pilares, os pilares P14 e P15 apresentaram menor esbeltez pela
228 presença das vigas do pavimento superior, já os pilares sem as vigas intermediárias, como os pilares
229 P12 e P13 exibiram maior flexibilidade, todos indicados na Figura 8.

230 No Apêndice A estão as tabelas dos esforços gerados no MEF de todos os pilares da residência
231 e das lajes e vigas do pavimento superior.

232 Figura 8: Deslocamento do pórtico espacial com grelhas (cm)



233
234

Fonte: Autoria própria

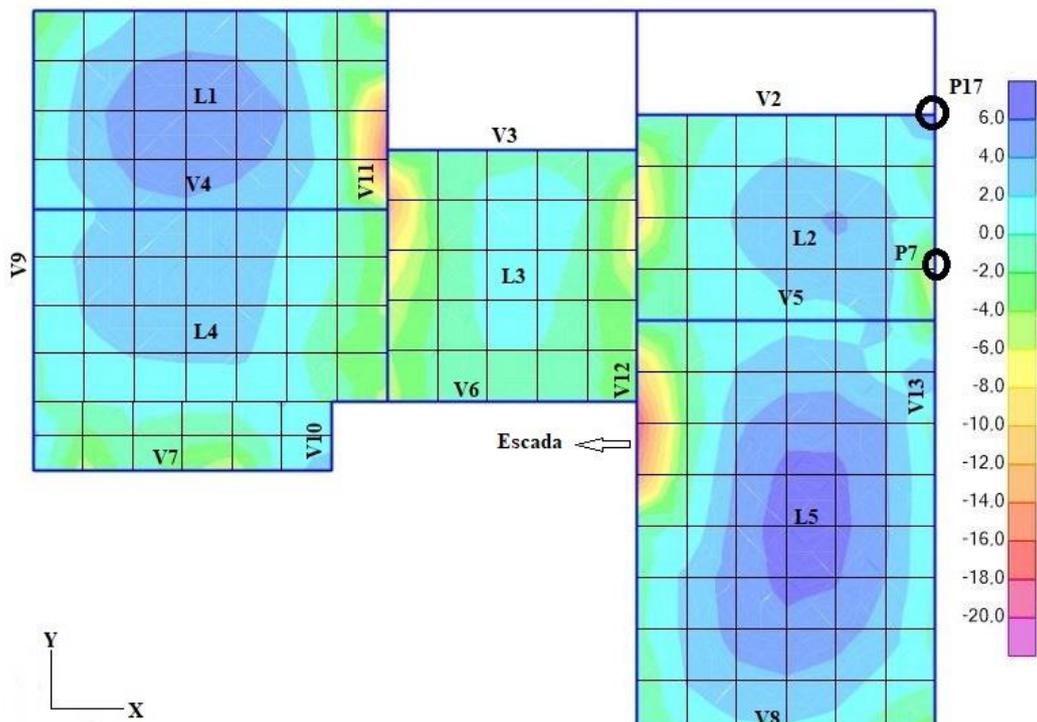
235 4.3 Análise das lajes entre o método dos elementos finitos e o método 236 simplificado

237 Através da combinação de cargas no Estado Limite Último, os momentos na direção X e Y das
238 lajes do pavimento superior no programa SAP2000 estão representados nas Figuras 9 e 10.

239
240
241

242

Figura 9: Momento na direção X do pavimento superior no SAP2000 (kNm/m).



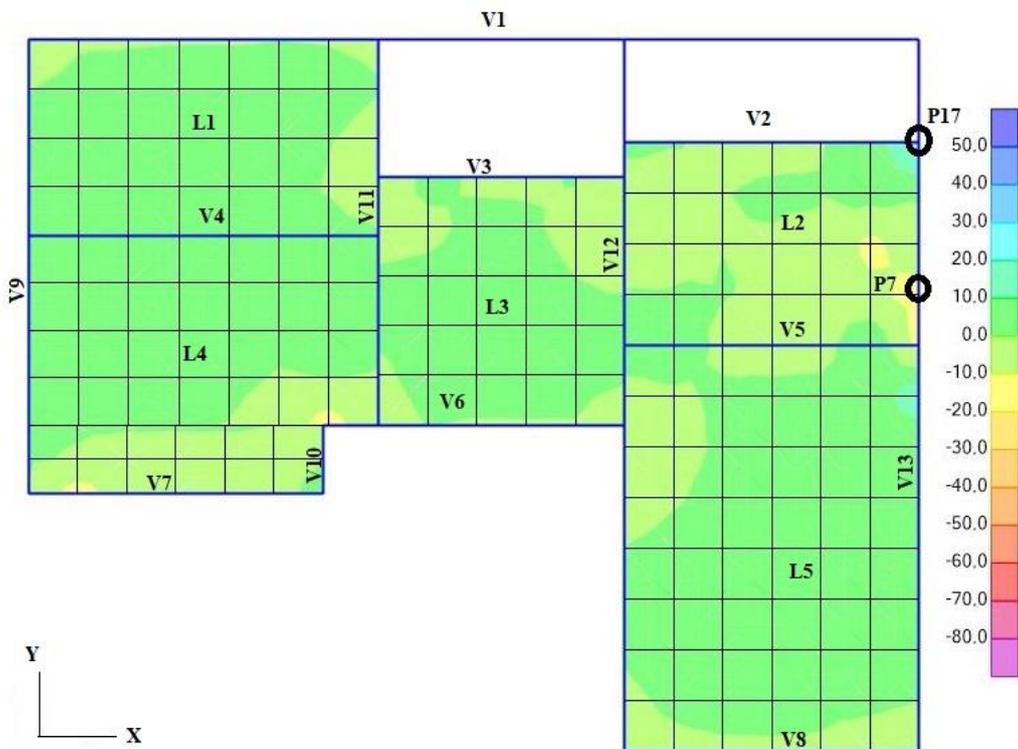
243

244

Fonte: Autoria própria

245

Figura 10: Momento na direção Y do pavimento superior no SAP2000 (kNm/m)



246

247

Fonte: Autoria própria

248

249

250

Para as lajes L1 e L3, no modelo simplificado, os momentos negativos em Y foram considerados nulos, devido a utilização da tabela de vinculação de lajes de Pinheiro (2007) que considerou apoiado nesse sentido. No SAP2000 foi considerado um momento negativo atuando entre

251 laje/laje, ou seja, um engastamento no encontro de bordas entre as lajes, que foi definido pelo
252 programa na modelagem.

253 Na laje L2, os momentos na direção Y conforme o modelo simplificado foi de 1,05 kNm/m e
254 no MEF foi de 24,25 kNm/m, segundo a Tabela 1. A diferença observada entre os dois métodos foi
255 pela presença do pilar P16 que nasce no encontro das vigas V2 e V13 no pavimento superior. Desta
256 forma, no SAP2000 a laje L2 que está apoiada nas vigas V2 e V13, recebeu os esforços vindos da
257 transferência de cargas dos pilares e vigas, que resultou em um momento fletor positivo alto. Ainda
258 na laje L2, por meio da Tabela 1. Analisa-se os momentos negativos na direção Y conforme o modelo
259 simplificado que foi de 3,63 kNm/m e no modelo dos elementos finitos foi de 13,10 kNm/m.

260 Tabela 1: Comparação dos momentos fletores no ELU entre os métodos

Lajes	Momentos (kNm/m)	Simplificado	SAP2000
L1	Mx +	5,09	5,91
	Mx -	10,49	14,08
	My +	1,49	7,32
	My -	0,00	5,72
L2	Mx +	2,08	5,34
	Mx -	4,61	8,91
	My +	1,05	24,25
	My -	3,63	13,10
L3	Mx +	2,55	1,14
	Mx -	5,70	12,61
	My +	1,52	2,49
	My -	0,00	4,10
L4	Mx +	3,31	3,71
	Mx -	7,53	5,42
	My +	1,91	5,26
	My -	6,15	14,12
L5	Mx +	8,59	6,91
	Mx -	0,00	18,67
	My +	5,15	14,86
	My -	0,00	3,05

261 A diferença entre os dois métodos foi pela presença do pilar P7 que morre na viga V13 no
262 pavimento superior, como pode ser visto no MEF apresentado na Figura 10. No simplificado não foi
263 possível analisar as influências dos pilares nas lajes.

264 Na laje L5 pelo método das tabelas de vinculação de lajes do Pinheiro (2007), foi adotado uma
265 laje com apoio simples e indeslocabilidade dos apoios, e no programa SAP2000 os resultados são
266 influenciados por todas as lajes vizinhas, pelas vigas que servem de apoio para a laje e principalmente
267 o engastamento da laje da escada com a laje L5. Com isso, no SAP2000 o momento negativo foi de
268 18,67 kNm/m na direção X e 3,05 kNm/m na direção Y, segundo a Tabela 1. No método simplificado
269 os resultados para momentos negativos foram nulos.

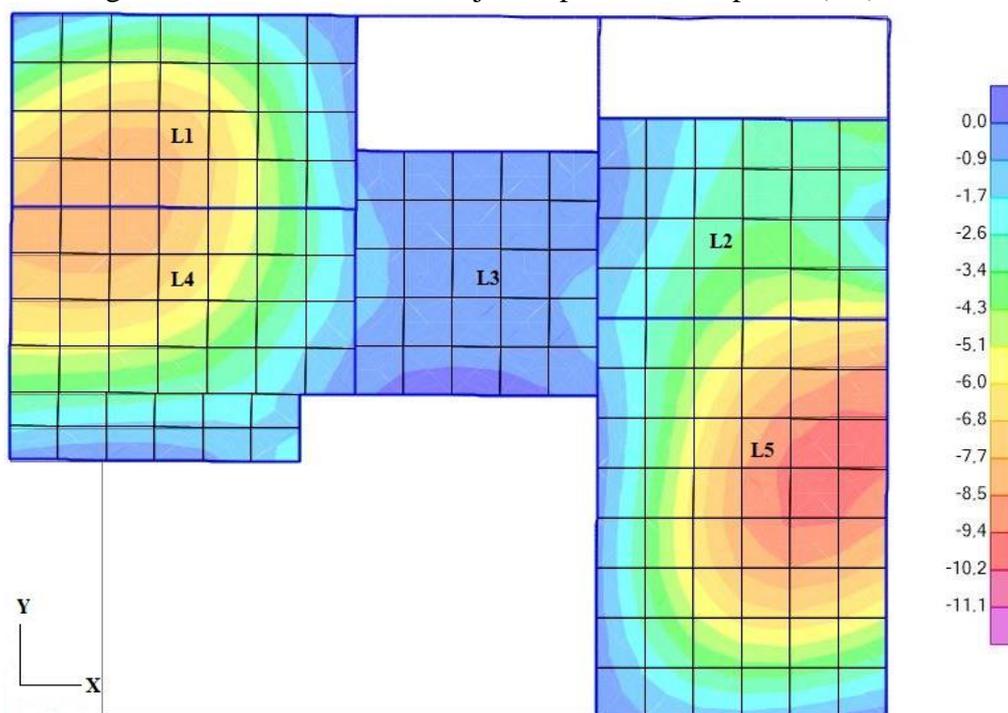
270 As lajes da residência estão engastadas perfeitamente no MEF, em que se analisa na Figura 10
271 a presença de momentos negativos nas bordas entre as lajes vizinhas. No engastamento entre as lajes

272 L1 e L4, e L2 e L5, elas possuem um momento positivo na ligação entre lajes, porém, o valor alto de
273 momento positivo na parte central dessas lajes foi diminuído ao chegar na ligação entre lajes,
274 concluindo a presença de engastamento.

275 As flechas obtidas no eixo Z nas lajes do pavimento superior foram analisadas e comparadas
276 entre os métodos. No geral, todas as flechas analisadas nesse pavimento foram maiores no programa
277 SAP2000, devido ao deslocamento da laje estar vinculado ao deslocamento das vigas, considera-se a
278 viga e a laje deslocando juntas. No método simplificado as lajes são consideradas apoiadas em vigas
279 com elevada rigidez, à vista disso os deslocamentos das lajes são menores por não realizar a interação
280 entre os elementos viga/laje. Os momentos retirados no SAP2000 foram os máximos encontrados na laje, e
281 no método simplificado foi uma média encontrada em toda a região da laje.

282 A discretização das lajes do pavimento superior possibilitou trazer resultados mais refinados,
283 como se vê na Figura 11 e os resultados da comparação entre os métodos na Tabela 2. A laje L1
284 possui uma carga permanente da banheira que proporcionou o valor alto da flecha da laje de 8,38 cm.
285 Assim como, na laje L4 e L5 que possuem grandes deslocamentos devido a carga permanente da laje
286 impermeabilizada. A laje L4 gerou um deslocamento de 8,07 cm e a laje L5 de 9,89 cm.

287 Figura 11: Flechas em Z nas lajes do pavimento superior (cm)



288
289
290
291
292
293
294
295

Fonte: Autoria própria

Tabela 2: Comparação das flechas nas lajes no ELS do pavimento superior

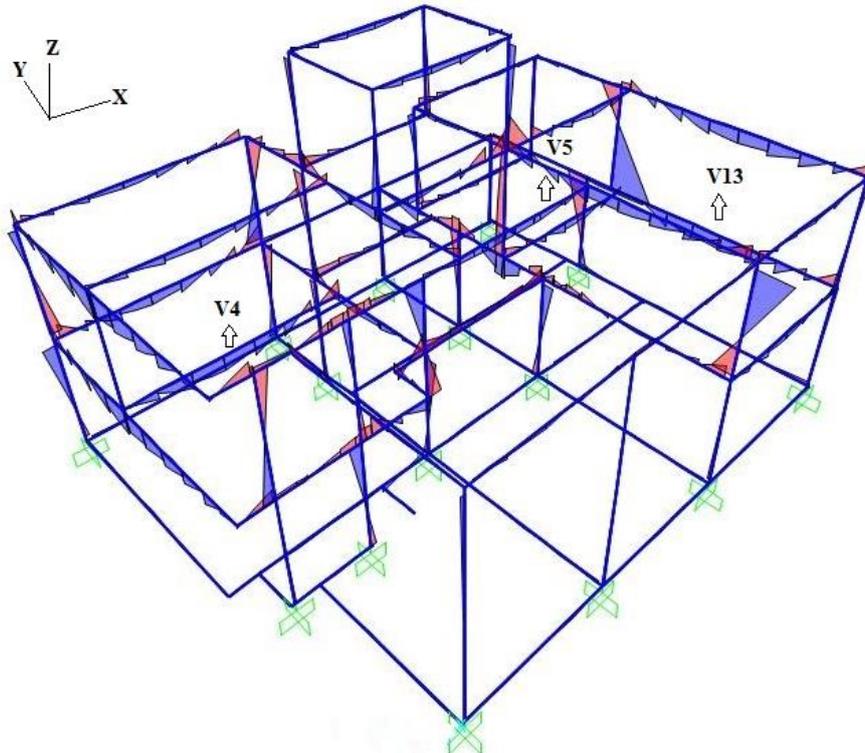
Lajes	Simplificado (cm)	SAP2000 (cm)	Deslocamento limite (cm)
L1	0,40	8,38	1,14
L2	1,11	6,11	1,18
L3	0,16	1,26	1,42
L4	0,31	8,07	1,53
L5	1,33	9,89	1,70

297 Segundo a NBR 6118 (2014), o deslocamento limite visível em elementos estruturais é de
 298 $L/250$, onde L é a distância entre o pilar externo e o primeiro pilar interno. Esse limite foi atendido
 299 para todas as lajes do pavimento superior do método simplificado, e não foi atendido pelo MEF,
 300 apenas na laje L3.

301 4.4 Análise das vigas entre o método dos elementos finitos e o método 302 simplificado

303 As vigas que serão analisadas compõem o pavimento superior. O momento XZ e o esforço
 304 cortante das vigas foram os dados retirados para a análise. Na Figura 11, são vistos os diagramas das
 305 vigas modelada no SAP2000 com a combinação no Estado Limite Último.

306 Figura 11: Momento em X nas vigas e pilares da residência.



307
 308

Fonte: Autoria própria

309 Dentre as vigas analisadas, as que obtiveram resultados muito discrepantes foram as vigas V4,
 310 V5 e V13. As vigas V4, V5 e V13 possuem valores altos de reações das lajes que apoiam nessas
 311 vigas, que causaram no método simplificado momentos máximos de 69,10 kNm/m na viga V4, 37,50
 312 kNm na viga V5 e 52,90 kNm na viga V13, conseqüentemente, altos valores de esforços cortantes.

313 No SAP2000 é visto no diagrama de esforços das vigas V4, V5 e V13 que as cargas distribuídas são
 314 inferiores aos valores do Ftool, em que no SAP2000 é lançado a carga automaticamente e no Ftool é
 315 colocado manualmente, porém as cargas nas lajes e de alvenaria foram igualmente lançadas em ambos
 316 os programas. Na Tabela 3 foi possível analisar os resultados discutidos. No Apêndice A está a tabela
 317 completa com os momentos fletores e esforços cortantes das vigas do pavimento superior.

318 Tabela 3: Comparação dos momentos fletores e esforços cortante das vigas no ELU

Vigas	Resultados	Simplificado	SAP2000
V4	Mxz + (kNm)	69,10	13,61
	Mxz - (kNm)	47,70	12,49
	V + (kN)	81,90	27,25
	V - (kN)	63,00	16,87
V5	Mxz + (kNm)	37,50	8,13
	Mxz - (kNm)	23,70	8,65
	V + (kN)	49,70	13,89
	V - (kN)	38,90	19,65
V13	Mxz + (kNm)	31,30	15,93
	Mxz - (kNm)	52,90	13,74
	V + (kN)	45,90	18,31
	V - (kN)	53,90	25,66

319

320 **4.5 Análise dos pilares entre o método dos elementos finitos e o método** 321 **simplificado**

322 Foram analisados nos pilares os momentos fletores de base e de topo no eixo X e no eixo Y e o
 323 esforço normal, utilizando a combinação do Estado Limite Último. Após análise dos resultados foram
 324 comparados entre os métodos. No apêndice A estão todos os resultados dos pilares.

325 Os resultados encontrados no MEF e no método simplificado foram próximos, a maior
 326 diferença foi encontrada no pilar P18 com o valor de 47,70 kNm na direção Y na base do pilar e 41,10
 327 kNm na direção Y no topo do pilar pelo método simplificado e no MEF foi de 0,01 kNm na base do
 328 pilar e 1,58 kNm no topo do pilar. Esses valores no simplificado ocorreram devido a carga no pilar
 329 estar maior e as cargas distribuídas da viga engastada a ela estarem maior que no MEF.

330 No esforço normal, as maiores diferenças foram nos pilares P5, P6 e P9. Em P5 houve uma
 331 diferença de 163,34 kN de esforço normal entre os métodos, em que no MEF a carga axial no pilar
 332 estava maior. Na tabela 4, apresenta os resultados dos pilares P5, P6, P9 e P18. No Apêndice A estão
 333 os resultados dos momentos fletores e esforço normal de todos os pilares da residência.

334

335

336

337

338

339

340

Tabela 4: Comparação dos momentos fletores e esforço normal dos pilares.

Pilar	Lance	Direção	Mbase (kNm)		Mtopo (kNm)		Nk, total (kN)	
			Simplificado	SAP2000	Simplificado	SAP2000	Simplificado	Sap2000
P5	1º	X	2,00	3,15	12,10	6,19	66,97	230,31
		Y	2,50	1,75	2,50	3,26		
	2º	X	3,70	6,27	0,80	10,27	63,77	121,82
		Y	4,90	6,12	2,20	5,46		
P6	3º	X	1,10	3,09	1,40	4,80	15,03	21,15
		Y	6,20	0,57	2,70	2,00		
	1º	X	0,10	2,37	1,20	9,36	36,03	166,83
		Y	3,20	0,93	1,21	2,15		
P9	1º	X	0,50	5,67	10,8	9,92	60,23	203,30
		Y	1,50	1,92	0,60	3,83		
P18	1º	X	2,50	3,47	1,60	4,03	63,18	13,67
		Y	47,70	0,01	41,1	1,58		

341 **5. CONCLUSÃO**

342 Ao modelar o projeto no programa SAP2000 foi possível manter as mesmas características do
343 projeto calculado no método simplificado. Foram mantidas todas as posições dos elementos
344 estruturais, as dimensões, materiais, cargas e combinações de dimensionamento. Os pontos de maior
345 desigualdade foram as considerações de vinculação entre laje/laje, viga/viga e pilar/viga, o que gerou
346 diagramas de esforços diferentes, mas com resultados aceitáveis. No SAP2000, o pórtico espacial
347 com grelhas, que continha as lajes discretizadas proporcionou resultados em cada elemento finito.

348 As flechas no MEF obtiveram valores maiores que no método simplificado devido às
349 considerações no simplificado em que, as lajes são apoiadas em vigas e não deslocam juntas, já no
350 SAP2000 as lajes e vigas deslocam juntas, causando uma diferença de até 8,56 cm de flecha entre os
351 métodos.

352 Na análise do método simplificado, 85% dos momentos fletores das lajes foram menores que
353 no MEF. Para as vigas, 69% dos momentos fletores e 73% dos esforços cortantes tiveram valores
354 maiores no método simplificado. Para os pilares, 69% dos momentos fletores de base foram menores
355 no simplificado, assim como no momento fletor de base, com 64%. Nos pilares, o esforço normal no
356 método simplificado foi menor em 81% dos resultados.

357 As diferenças encontradas entre os métodos se justifica principalmente pela forma de interação
358 entre os elementos. No método simplificado foi realizado por etapas entre lajes, pilares e vigas, e no
359 MEF foi feito por pórtico espacial com grelhas. O MEF mostrou que na estrutura podem surgir
360 esforços que não foram considerados no simplificado, pois realiza a distribuição de esforços em todo
361 o pavimento. Os apoios das lajes e vigas foram considerados diferentes, no método simplificado os
362 apoios das lajes são indeslocáveis, o que não acontece no MEF.

363 Apesar dos resultados encontrados serem diferentes, o método simplificado por ser manual, é
364 considerado confiável para cálculos estruturais, pois foi seguido todas as normas para garantir
365 segurança e estabilidade na obra. A melhor forma é analisar em específicas partes da estrutura tais
366 divergências com maior cautela para obter o melhor resultado. Utilizar o método que possui maior
367 facilidade para trabalhar, pois o engenheiro precisa da teoria e saber identificar possíveis erros para a
368 correta modelagem e dimensionamento.

369 **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

370 ALVES, Lucas Máximo. **Métodos dos Elementos Finitos**. 2007. Apostila (Disciplina de Métodos
371 dos Elementos Finitos do curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Métodos
372 Numéricos do Setor de Tecnologia/Setor de Ciências Exatas). Universidade Federal do Paraná,
373 Curitiba, PR, 2007.

374 AQUE, Anderléia Depintor; BAVARESCO, Danicler; NOGUEIRA, João Dirceu. **Análise do**
375 **momento fletor em laje lisa**. Revista UNINGÁ Review. Maringá, Vol. 29, n.1, pp.07-13, Jan - Mar
376 2017.

377 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118: Projeto de**
378 **estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro. ABNT 2014.

379 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6120: Ações para o**
380 **cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro. ABNT 2019.

381 BATHE, Klaus-Jürgen. **Finite Element Procedures**. 2. ed. Watertown, MA: K.J. Bathe. Vol. 1,
382 1043 p., 2014.

383 COURAS, Levi Pereira. **Modelação por elementos finitos de tabuleiros de pontes Rodoviárias**
384 **com vigas retas em concreto armado**. 2019. Monografia (Curso de Engenharia Civil).
385 Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2019.

386 VEIGA, Gustavo. **Projeto Habitação Residencial Seriada em 77 unidades**. 2013

387 JUNGES, Elisabeth. **Estudo comparativo entre métodos simplificados e modelos de elementos**
388 **finitos não lineares para o cálculo de flecha imediata em vigas de concreto armado**. 2011.
389 Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC). Universidade Federal de Santa
390 Catarina, Florianópolis, SC, 2011.

391 OLIVEIRA, Janes Cleiton Alves de Oliveira. **Avaliação da rigidez de pórticos Tridimensionais**
392 **de concreto armado**. 2009. Tese (Doutorado em estruturas e construção civil). Faculdade de
393 Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2009.

394 PINHEIRO, Libânio M. **Tabelas de Lajes**. 2007. Apostila (Escola de Engenharia de São Carlos).
395 Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2007.

396 SAP2000 17. **Programa de elementos finitos para modelação, análise e dimensionamento de**
397 **estruturas**. Computers and Structures. Disponível em < [https://www.csiportugal.com/software/2/](https://www.csiportugal.com/software/2/sap2000)
398 [sap2000](https://www.csiportugal.com/software/2/sap2000) >.

399 SGARBI, Mauricio. **Modelagem de estruturas de edifícios**. Apostila (Curso de Modelagem de
400 Edifício). Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural. 2013.

401 WERNER, Beatriz Vitali; VARGAS, Alexandre. **Análise comparativa entre diferentes métodos**
402 **de cálculo para o dimensionamento de lajes maciças bidirecionais**. Revista Iniciação Científica.
403 Criciúma, SC, Vol. 11, n. 1, 2013.
404

APÊNDICE A – TABELAS DE ESFORÇOS DA RESIDÊNCIA

Tabela A.1: Comparação dos momentos fletores no ELU entre os métodos

Lajes	Momentos (kNm/m)	Simplificado	SAP2000
L1	Mx +	5,09	5,91
	Mx -	10,49	14,08
	My +	1,49	7,32
	My -	0,00	5,72
L2	Mx +	2,08	5,34
	Mx -	4,61	8,91
	My +	1,05	24,25
	My -	3,63	13,10
L3	Mx +	2,55	1,14
	Mx -	5,70	12,61
	My +	1,52	2,49
	My -	0,00	4,10
L4	Mx +	3,31	3,71
	Mx -	7,53	5,42
	My +	1,91	5,26
	My -	6,15	14,12
L5	Mx +	8,59	6,91
	Mx -	0,00	18,67
	My +	5,15	14,86
	My -	0,00	3,05

Tabela A.2: Comparação das flechas nas lajes no ELS do pavimento superior

Lajes	Simplificado (cm)	SAP2000 (cm)	Deslocamento limite (cm)
L1	0,40	8,38	1,14
L2	1,11	6,11	1,18
L3	0,16	1,26	1,42
L4	0,31	8,07	1,53
L5	1,33	9,89	1,70

Tabela A.3: Comparação dos momentos fletores e esforços cortante das vigas no ELU do pavimento superior

Vigas	Resultados	Simplificado	SAP2000
V1	Mxz + (kNm)	20,40	8,91
	Mxz - (kNm)	35,10	16,37
	V + (kN)	43,40	27,68
	V - (kN)	43,80	28,71
V2	Mxz + (kNm)	10,60	3,49
	Mxz - (kNm)	14,00	7,85
	V + (kN)	23,10	3,33
	V - (kN)	23,10	10,48
V3	Mxz + (kNm)	11,00	0,00
	Mxz - (kNm)	9,40	7,30
	V + (kN)	17,30	2,09
	V - (kN)	17,30	7,70
V4	Mxz + (kNm)	69,10	13,61
	Mxz - (kNm)	47,70	12,49
	V + (kN)	81,90	27,25
	V - (kN)	63,00	16,87
V5	Mxz + (kNm)	37,50	8,13
	Mxz - (kNm)	23,70	8,65
	V + (kN)	49,70	13,89
	V - (kN)	38,90	19,65
V6	Mxz + (kNm)	2,30	8,16
	Mxz - (kNm)	6,40	17,64
	V + (kN)	8,00	36,68
	V - (kN)	12,00	8,03
V7	Mxz + (kNm)	1,80	9,12
	Mxz - (kNm)	28,30	14,32
	V + (kN)	15,60	15,74
	V - (kN)	26,60	29,81
V8	Mxz + (kNm)	13,70	7,28
	Mxz - (kNm/m)	21,80	6,26
	V + (kN/m)	27,20	13,45
	V - (kN/m)	31,20	14,57
V9	Mxz + (kNm)	11,50	21,47
	Mxz - (kNm)	16,30	19,25
	V + (kN)	21,10	40,42
	V - (kN)	24,40	18,5
V10	Mxz + (KNm)	1,70	2,85
	Mxz - (KNm)	0,60	7,30
	V + (KN)	8,50	15,00
	V - (KN)	7,40	0,00
V11	Mxz + (KNm)	13,80	7,19
	Mxz - (KNm)	25,00	16,04
	V + (KN)	33,70	23,65
	V - (KN)	42,40	30,26
V12	Mxz + (KNm)	19,56	16,3
	Mxz - (KNm)	12,79	27,1
	V + (KN)	19,03	36,8
	V - (KN)	23,34	31,000
V13	Mxz + (KNm)	31,30	15,93
	Mxz - (KNm)	52,90	13,74
	V + (KN)	45,90	18,31
	V - (KN)	53,90	25,66

Tabela A.4: Comparação dos momentos fletores e esforço normal dos pilares da residência

Pilar	Lance	Direção	Mbase (kNm)		Mtopo (kNm)		Nk,total (kN)	
			Simplificado	Sap2000	Simplificado	Sap2000	Simplificado	Sap2000
P1	1°	X	1,50	3,68	1,60	9,14	63,07	119,70
		Y	6,50	6,80	17,00	11,14		
	2°	X	1,50	8,33	0,80	5,44	18,70	48,41
		Y	14,4	14,97	10,30	15,20		
P2	1°	X	3,20	6,38	14,60	8,48	53,77	38,73
		Y	0,30	0,75	1,30	1,23		
	2°	X	14,40	15,34	10,30	14,85	26,23	7,09
		Y	0,50	0,29	1,00	0,43		
P3	1°	X	1,00	2,75	2,90	1,69	8,63	14,43
		Y	0,20	0,41	0,20	1,23		
P4	1°	X	4,50	2,43	1,40	1,96	9,03	15,27
		Y	1,20	0,36	1,80	1,40		
	1°	X	2,00	3,15	12,10	6,19	66,97	230,31
		Y	2,50	1,75	2,50	3,26		
P5	2°	X	3,70	6,27	0,80	10,27	63,77	121,82
		Y	4,90	6,12	2,20	5,46		
	3°	X	1,10	3,09	1,40	4,80	15,03	21,15
		Y	6,20	0,57	2,70	2,00		
P6	1°	X	0,10	2,37	1,20	9,36	36,03	166,83
		Y	3,20	0,93	1,21	2,15		
P7	1°	X	10,40	8,68	2,00	21,52	30,83	120,91
		Y	1,04	3,07	1,04	6,01		
P8	1°	X	2,20	4,67	15,40	10,01	57,43	73,97
		Y	12,50	1,41	0,10	3,05		
P9	1°	X	0,50	5,67	10,80	9,92	60,23	203,30
		Y	1,50	1,92	0,60	3,83		
	1°	X	0,60	1,24	9,60	0,29	48,17	72,00
		Y	0,10	1,83	1,62	4,48		
P10	2°	X	9,10	8,42	2,30	8,16	30,44	36,55
		Y	1,02	8,60	1,02	7,56		
	1°	X	1,20	5,23	0,70	8,75	21,77	143,66
		Y	1,32	1,63	1,32	3,74		
P11	2°	X	1,20	4,80	2,00	4,95	18,14	73,88
		Y	1,59	6,43	1,59	4,93		
P12	1° e 2°	X	5,50	0,89	5,50	2,19	23,015	10,83
		Y	6,70	1,36	0,89	1,91		
P13	1° e 2°	X	0,20	0,40	0,30	0,38	33,815	45,36
		Y	0,50	6,40	1,30	10,34		
	1°	X	0,40	1,67	6,60	0,32	69,97	93,27
		Y	0,90	1,76	15,90	2,89		
P14	2°	X	6,60	17,49	1,50	27,85	69,44	59,11
		Y	11,20	2,49	33,60	1,56		

Tabela A.5: Continuação da comparação dos momentos fletores e esforço normal dos pilares da residência

Pilar	Lance	Direção	Mbase (kNm)		Mtopo (kNm)		Nk,total (kN)	
			Simplificado	Sap2000	Simplificado	Sap2000	Simplificado	Sap2000
P15	1°	X	3,70	1,32	10,90	3,79	83,07	95,16
		Y	10,20	4,48	15,80	8,42		
P16	2°	X	10,90	8,85	6,10	8,06	38,84	42,69
		Y	20,30	14,04	14,90	13,83		
P17	2°	X	14,00	7,52	7,00	6,50	19,84	31,23
		Y	0,80	2,19	1,00	0,91		
P18	2°	X	14,00	1,76	7,00	2,37	15,44	13,136
		Y	1,40	2,95	2,00	2,06		
P19	2°	X	2,50	3,47	1,60	4,03	63,18	13,67
		Y	53,90	0,01	41,10	1,58		
P20	2°	X	20,00	40,08	18,40	20,91	47,64	48,82
		Y	1,60	1,59	1,60	0,71		
P21	2°	X	0,40	8,33	21,90	3,84	139,47	178,25
		Y	23,70	3,90	1,90	1,96		
P22	2°	X	4,00	1,75	1,70	6,89	15,73	20,65
		Y	1,30	0,54	4,50	0,70		
P23	3°	X	1,40	11,84	12,20	14,58	53,84	47,41
		Y	1,81	0,08	1,81	1,41		
P24	2°	X	9,70	4,60	4,00	0,45	15,23	13,3
		Y	1,40	0,39	0,80	0,38		
P25	3°	X	12,60	5,92	3,90	1,56	14,73	15,12
		Y	0,70	1,59	0,90	0,41		