

ESTUDO DO PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE LAJES, VIGAS E PILARES DE CONCRETO

Thaís Victória Garcia Pelizaro¹

Jesiel Cunha²

RESUMO

O pré-dimensionamento de uma estrutura consiste em uma estimativa inicial das dimensões das seções transversais dos elementos estruturais. Uma maneira de abordar este problema é usar fórmulas simplificadas originadas da resistência dos materiais e da teoria das estruturas. Neste artigo foram estudados reajustes em fórmulas de pré-dimensionamento já existentes no meio técnico. Estes reajustes foram estudados a partir das dimensões de estruturas de edifícios existentes, sendo possível analisar e melhorar a funcionalidade das equações de acordo com a prática. Foram utilizados no estudo alguns projetos estruturais já executados. As proposições tiveram como base as normas brasileiras referentes ao tema. Para confirmar a eficácia das novas formulações, foi realizado um estudo do dimensionamento (realizado pelo programa de cálculo CYPECAD[®]) de uma edificação, na qual as seções dos elementos foram obtidas utilizando as novas fórmulas propostas para pré-dimensionamento. Os resultados mostraram ser possível utilizar formulações simplificadas para o pré-dimensionamento.

Palavras-chave: pré-dimensionamento – projeto arquitetônico – projeto estrutural.

ABSTRACT

The pre-design consists of initial estimate dimensions of the cross sections of structural elements. One way to approach this problem is to use simplified formulas derived from strength of the materials and structural theory. In this paper readjustments were made in pre-design formulas already existing. These readjustments were made from the dimensions of existing building structures. The functionality of the equations according to practice has been made. In this study some structural projects were used provided by structural engineers. The propositions were based on the Brazilian standards. A study was carried out to confirm the efficacy of the new formulations. In this study the design of a building structure was carried out by CYPECAD[®] (commercial software for structural design), in which cross sections of the elements were obtained using the new formulas proposed for pre-design. The results showed that it is possible to use simplified formulations for pre-design.

Keywords: pre-design – architectural design – structural design

¹ Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Uberlândia

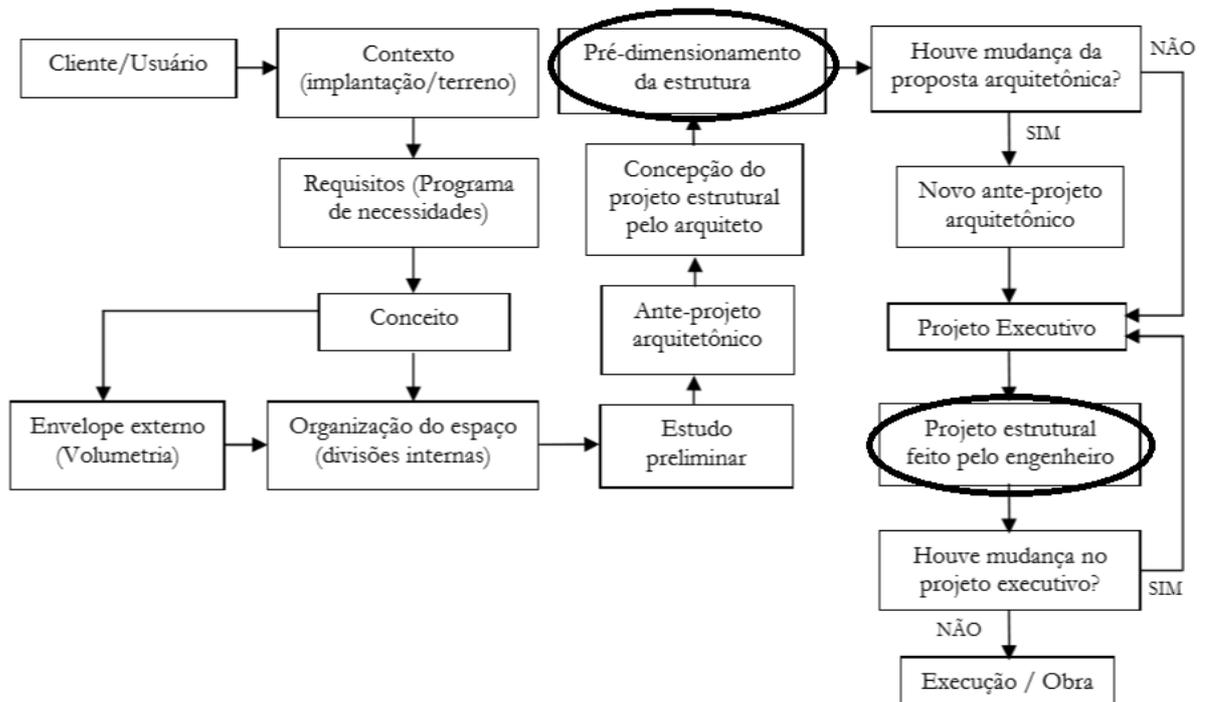
² Professor Titular da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia

1 INTRODUÇÃO

Considerar a interação entre o projeto estrutural e o arquitetônico é imprescindível para qualquer estrutura. O cálculo e o dimensionamento de uma estrutura de concreto dependem diretamente da elaboração do projeto arquitetônico. No entanto, muitas vezes ao elaborar o projeto, o arquiteto considera muito superficialmente tal interação, sendo clara a separação de ambas. Assim, é importante que existam meios e ferramentas que correlacionem tais concepções.

A Figura 1 mostra as etapas da concepção do projeto arquitetônico e sua interação com o projeto estrutural e o pré-dimensionamento.

Figura 1 – Etapas da concepção do projeto arquitetônico e pré-dimensionamento.



Fonte: Melo (2013).

Neste trabalho foram estudadas formulações simplificadas de pré-dimensionamento inicialmente propostas pelo meio técnico, que foram ajustadas por meio de comparações com projetos estruturais já executados na prática, fornecidos por alguns engenheiros estruturais da cidade de Uberlândia-MG. Posteriormente, foi realizado o pré-dimensionamento de um edifício de 4 pavimentos no CYPECAD[®] com as novas fórmulas de propostas, a fim de validá-las.

2 METODOLOGIA

As obras da literatura mais atuais e utilizadas para o pré-dimensionamento trazem métodos para realização deste, em geral por meio de processos de análises gráficas, que levam a uma faixa muito grande de variação da dimensão das peças, e poucas delas consideram fatores que influenciam de maneira significativa no resultado final, como condição de apoio, carregamento, geometria etc. dificultando a obtenção de valores mais próximos dos previstos pelo dimensionamento (MELO, 2013).

A metodologia aplicada neste estudo foi baseada em aproximações, onde o pré-dimensionamento é realizado com base em formulações simplificadas, mas que consideram diversos fatores, como área de contribuição para obtenção dos carregamentos, Resistência Característica do Concreto à Compressão (f_{ck}), posição do elemento estrutural e número de pavimentos tipo da edificação analisada, concepção estrutural, vão e condições de apoio de vigas e lajes. As metodologias para cada elemento analisado, pilar, viga e laje, estão descritas a seguir.

2.1 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE PILARES

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, item 14.4.1.2, pilares são elementos lineares de eixo reto, usualmente dispostos na vertical, em que as forças axiais de compressão são preponderantes. Além de transmitir os carregamentos da estrutura para a fundação, os pilares são solicitados por esforços de flexão, advindos de ações de vento, por exemplo.

Para dimensionamento dos pilares consideram-se os esforços solicitantes de cálculo, que incluem os momentos fletores, esforços cortantes e axiais. No caso de pré-dimensionamento o cálculo se baseia em funções simplificadas.

A primeira estimativa da seção transversal de pilares pode ser feita por meio da seguinte formulação (CUNHA, 2014):

$$A_c = \left(\frac{N_d}{\sigma_{id}} \right) \times \gamma_{corr} \quad (1)$$

onde:

A_c : área da seção transversal do pilar (cm^2); N_d : carregamento de cálculo do pilar; γ_{corr} : coeficiente de correção, a fim de considerar os esforços solicitantes de flexão no pilar, com valores presentes na Tabela 1; σ_{id} : tensão ideal de cálculo do concreto.

Tabela 1 – Coeficientes de correção.

Posição do pilar	Coefficiente γ_{corr}
Intermediário	1,5
Extremidade	2
Canto	4

Fonte: Cunha (2014).

Os coeficientes de correção serão estudados e ajustados por meio de comparação com projetos existentes executados na prática.

A tensão ideal de cálculo é equacionada em função da taxa de armadura, resistência de cálculo do concreto e resistência de cálculo de aço para deformação de 0,2 %. Para esse trabalho foi considerado aço CA-50 e taxa de armadura de 2%. A tensão ideal de cálculo vale:

$$\sigma_{id} = 0,85 f_{cd} + \rho (f_{sd} - 0,85f_{cd}) \quad (2)$$

onde $\rho = A_s/A_c$: taxa de armadura; f_{cd} : resistência de cálculo do concreto; $f_{sd} = 420$ MPa (CA-50): resistência de cálculo do aço para deformação de 0,2 %.

Substituindo-se os valores na expressão (2), obtém-se os resultados da Tabela 2.

Tabela 2 – Tensão ideal de cálculo.

f_{ck} (MPa)	20	25	30	35	40	45	50
σ_{id} (kgf/cm ²)	203	233	263	293	322	352	382

Fonte: Cunha (2014).

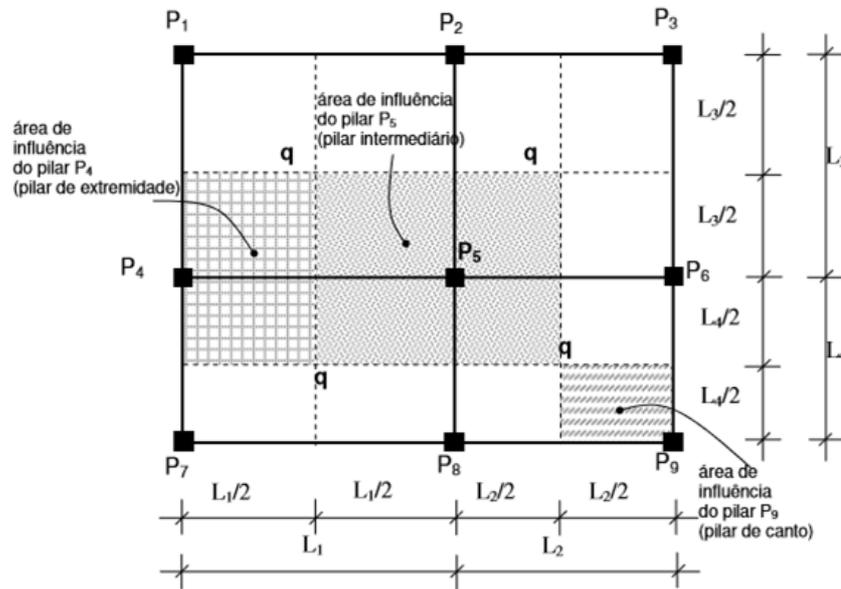
Para estimativa do esforço axial de cálculo no pilar (N_d), foi utilizada a Equação 3.

$$N_d = 1,4 \times A_i \times [q_T \times (n_p + 0,7) + q_c] \quad (3)$$

sendo 1,4 o coeficiente de majoração da ação; A_i : área de influência do pilar do pavimento tipo; q_T : carregamento do pavimento tipo por unidade de área; q_c : carregamento do telhado por unidade de área; n_p : número de pavimentos tipo acima da seção a ser pré-dimensionada e o valor 0,7 corresponde ao percentual da carga da laje de forro em relação à laje de piso.

A determinação da área de influência varia de acordo com a disposição do pilar, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Áreas de influência de pilares.



Fonte: Melo (2013).

Segundo a ABNT NBR 6118:2014 a seção transversal de pilares e pilares-parede maciços, qualquer que seja a sua forma, não pode apresentar dimensão menor que 19 cm. Em casos especiais, permite-se a consideração de dimensões entre 19 cm e 14 cm, desde que se multipliquem os esforços solicitantes de cálculo a serem considerados no dimensionamento por um coeficiente adicional γ_n , de acordo com o indicado na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficiente de majoração do carregamento.

b cm	≥ 19	18	17	16	15	14
γ_n	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25

onde
 $\gamma_n = 1,95 - 0,05 b$;
 b é a menor dimensão da seção transversal, expressa em centímetros (cm).

NOTA O coeficiente γ_n deve majorar os esforços solicitantes finais de cálculo quando de seu dimensionamento.

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

Para fins de pré-dimensionamento, pode-se considerar, de maneira aproximada, os seguintes valores para os carregamentos (q_T) em pavimentos de edifícios (CUNHA, 2014):

- Laje maciça ou nervurada, com paredes em blocos de concreto: 1500 kgf/m²;
- Laje maciça ou nervurada, com paredes em tijolos cerâmicos: 1200 kgf/m²;

- Laje nervurada com blocos leves (EPS): 1000kgf/m²;
- Lajes não maciças com paredes em gesso acartonado: 800 kgf/m².

Para o carregamento da cobertura (q_c), podem ser considerados os seguintes valores (incluído o carregamento de vento) (CUNHA, 2014):

- Telhas de concreto, com madeiramento: 150 kgf/m²;
- Telhas cerâmicas, com madeiramento: 120 kgf/m²;
- Telhas de fibrocimento, com madeiramento: 50 kgf/m²;
- Telhas de aço e estrutura de aço: 50 kgf/m²;
- Telhas de alumínio e estrutura de aço: 40 kgf/m²;
- Telhas de alumínio e estrutura de alumínio: 30 kgf/m².

Ainda que bastante simplificado em relação à ABNT NBR 6118:2014, o procedimento de pré-dimensionamento exposto pode apresentar variações, uma vez que as áreas de influência, por exemplo, podem ser tomadas de maneiras diferentes.

No presente trabalho prevê-se encontrar fatores de correção semelhantes aos pré-estabelecidos na Tabela 1. Foram extraídos os valores da área de influência dos pilares em projetos fornecidos por projetistas estruturais. A partir dessa área foram calculados seus carregamentos, conforme Equação 3. Posteriormente, calcularam-se as áreas de seção transversal dos pilares, de acordo com a Equação 1. O objetivo é verificar os fatores de correção pré-estabelecidos, fazendo-se a comparação com as áreas da seção transversal dos pilares obtidas por meio de projetos estruturais fornecidos por projetistas estruturais, ou seja, áreas que foram calculadas segundo a ABNT NBR 6118:2014.

2.2 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE VIGAS

Em estruturas de edifícios as vigas têm a finalidade de servir de apoio para as lajes, suportar as paredes ou ações de outras vigas, absorvendo estes carregamentos e distribuindo-os aos pilares. Além disso, as vigas podem formar pórticos rígidos juntamente com os pilares, garantindo a segurança pela ação do vento, assegurando a estabilidade global (CUNHA, 2014).

Segundo a ABNT NBR 6118:2014 a seção transversal das vigas não pode apresentar largura menor que 12 cm e a das vigas-parede, menor que 15 cm. Estes limites podem ser reduzidos, respeitando-se um mínimo absoluto de 10 cm em casos excepcionais, sendo obrigatoriamente respeitadas as seguintes condições:

a) Alojamento das armaduras e suas interferências com as armaduras de outros elementos estruturais, respeitando os espaçamentos e cobrimentos estabelecidos na norma ABNT NBR 6118:2014;

b) Lançamento e vibração do concreto de acordo com a ABNT NBR 14931:2004.

Segundo Cunha (2014) pode-se adotar os seguintes valores para a largura de vigas:

- $b_w = 12 \text{ cm}$ (vão $\leq 4 \text{ m}$);
- $b_w = 20 \text{ cm}$ ($4 \text{ m} < \text{vão} \leq 8 \text{ m}$);
- $b_w = 25 \text{ a } 30 \text{ cm}$ (vão $> 8 \text{ m}$).

No entanto, em muitos casos, a largura da viga deve ser escolhida de maneira que ela fique embutida na alvenaria. Alturas das vigas devem, se possível, ser padronizadas em dimensões múltiplas de 5 cm. Vigas contínuas devem manter a mesma seção transversal nos vários tramos, sempre que possível.

O método aqui estudado foi o “Método do Vão Ponderado” proposto por Cunha (2014), que pode ser observado na Tabela 4. Esse método leva em conta a posição da viga no projeto estrutural, bem como se ela serve de apoio a outras vigas, propondo uma fórmula com altura da viga (h) baseada em seu vão (L).

Tabela 4 – Fórmulas de pré-dimensionamento usando o Método do Vão Ponderado.

Caso	Posição da viga	Dá apoio a outra(s) viga(s)	Fórmula
1	Central	Sim	$h = 14\% L$
2	Central	Não	$h = 10\% L$
3	Periférica	Sim	$h = 10\% L$
4	Periférica	Não	$h = 9\% L$

Fonte: Cunha (2014).

A Equação 4, proposta por Melo (2013) é utilizada para encontrar o vão utilizado nas fórmulas descritas na Tabela 4 para vigas de vários tramos.

$$L = \frac{(L_{adjacente} + L_{adjacente\ maior})}{2} \quad (4)$$

Para confirmar a eficiência da Equação 4, foram consideradas diversas vigas com diferentes tramos e comprimentos, com um mesmo carregamento permanente linear distribuído em cada viga e calculado seu momento máximo aproximado pela Equação 5, considerando L como o vão da viga, calculado pela Equação 4.

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{q \times L^2}{8} \quad (5)$$

onde q é o carregamento linear distribuído.

Neste processo, há a transformação de uma viga hiperestática de múltiplos tramos em uma viga fictícia equivalente de apenas um tramo. A ideia é encontrar uma situação estrutural simples, que facilite o pré-dimensionamento (viga biapoiada). Neste caso, os esforços máximos (momentos fletores) calculados nesta viga deverão ser próximos da viga com vários tramos.

Posteriormente, foram calculados os momentos máximos reais dessas vigas com auxílio do *software* de análise estrutural de pórticos planos Ftool (2016). Os valores foram analisados, comparando-se os momentos fornecidos pelo *software* Ftool e os obtidos pela Equação 5. Os valores foram próximos, comprovando a funcionalidade da Equação 4 para obtenção dos vãos em vigas de vários tramos, considerando vãos usuais. Apenas propõe-se um fator de correção de 1,25 para a mesma em caso específico com maior vão na região central da viga, sendo a diferença do maior vão e o maior vão adjacente a ele superior a 3 m (Equação 6). Assim, resumindo, têm-se:

- Se $L_{maior} - L_{adjacente\ maior} \leq 3\ m$, então:

$$L = \frac{(L_{maior} + L_{adjacente\ maior})}{2}$$

- Se $L_{maior} - L_{adjacente\ maior} > 3\ m$, então:

- Para vão maior na extremidade da viga:

$$L = \frac{(L_{maior} + L_{adjacente\ maior})}{2}$$

- Para vão maior na região central da viga:

$$L = \frac{(L_{maior} + L_{adjacente\ maior})}{2} \times 1,25 \quad (6)$$

2.3 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE LAJES

As lajes são elementos estruturais que suportam diretamente os carregamentos verticais dos pavimentos, o que causa solicitação predominante de flexão. Segundo a norma ABNT NBR 6118:2014, para lajes maciças os limites de espessura a serem respeitados são:

- 7 cm para cobertura não em balanço;
- 8 cm para lajes de piso não em balanço;
- 10 cm para lajes em balanço;
- 10 cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30 kN;
- 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30 kN.

As lajes podem trabalhar estruturalmente em uma ou duas direções e, conseqüentemente, ser armadas em uma ou duas direções, respectivamente. Quando armadas em uma direção são calculadas como vigas apoiadas ou contínuas. Quando armadas em duas direções são calculadas como placas, pela teoria da elasticidade.

A solução da classificação é definida com:

- $0,5 \leq \frac{l_y}{l_x} \leq 2$ para lajes armadas em duas direções;
- $\frac{l_y}{l_x} < 0,5$ ou $\frac{l_y}{l_x} > 2$ para lajes armadas em uma direção.

sendo l_x o menor vão da laje e l_y o maior.

O método aqui estudado foi o “Método do Vão” proposto por Cunha (2014), que toma como referência o vão da laje (L) para pré-dimensionamento da espessura (h). Tem-se:

- Laje maciça armada em duas direções: $L/40 \leq h \leq L/32$;
- Laje maciça armada em uma direção: $L/38 \leq h \leq L/30$.

O valor de L pode ser tomado como a média dos vãos em lajes armadas em duas direções, e em lajes armadas em uma direção, L será o menor vão.

O valor de h a ser calculado deve levar em conta principalmente dois aspectos: carregamento e condição de apoio da laje. Quanto maior o carregamento, maior deverá ser a espessura da laje. A Tabela 5 foi proposta por Cunha (2014) para definição do nível de carregamento. Tomou-se por base para definição dos valores de carregamento a norma ABNT NBR 6118:2014.

Tabela 5 – Relação entre os tipos de carregamento e o ambiente a ser construído.

Carga	Local
Pequena	Edifícios residenciais; Escritórios
Média	Escola; Garagens e estacionamentos; Lojas; Restaurantes
Grande	Bibliotecas; Casa de máquinas; Depósitos

Fonte: Cunha (2014).

É sugerido que sejam adotados os valores extremos de h para carregamentos pequenos e grandes, e o valor médio de h para carregamentos médios.

Com relação às condições de apoio Cunha (2014) propôs a Tabela 6. Quanto mais favorável a condição de apoio, ou seja, quanto mais bordas engastadas, menor é a espessura da laje.

Tabela 6 – Classificação para condições de apoio.

Condição de apoio	Descrição
Favorável	Três ou quatro bordas engastadas; Duas bordas engastadas e duas apoiadas.
Regular	Três ou quatro bordas apoiadas; Uma borda engastada e duas ou três apoiadas.
Desfavorável	Laje em balanço; Laje com dois bordos livres.

Fonte: Cunha (2014).

Em função da condição de solicitação da laje (nível dos esforços solicitantes) e da consequente altura requerida, é sugerido que sejam adotados os valores extremos de h para condições de apoio favorável e desfavorável, e o valor médio de h para condição de apoio regular.

3 ESTUDO DE CASO

Com relação aos pilares buscou-se encontrar um fator de correção da Equação 1 que fornecesse resultados mais próximos do dimensionamento final. Para este estudo foi necessário conhecer as dimensões finais dos pilares dos projetos analisados, visto que esses valores são necessários para o estudo, de acordo com a metodologia descrita no item 2.1. Nas vigas buscou-se encontrar uma relação entre altura e vãos para os 4 casos descritos no item 3.2. Para as lajes buscou-se encontrar uma relação entre altura e vãos, levando em consideração os tipos de carregamentos e as condições de apoio. Em todos os casos o estudo foi realizado com base em comparações com projetos já executados, sendo propostos ajustes nas formulações apresentadas.

Foram utilizados 9 projetos de 3 projetistas diferentes da cidade de Uberlândia-MG. Para pilares foram considerados os projetos 1 a 4, para as vigas os projetos de 1 a 7, e para as lajes os projetos de 1 a 9.

3.1 ESTUDO DE PILARES

Levando-se em consideração que as formulações simplificadas aqui apresentadas são mais efetivas em edifícios com número maior de pavimentos, foram tomados quatro projetos que variam de nove a quinze pavimentos. Todos os projetos são de paredes com tijolos furados. Nos projetos 1, 2 e 4 foi utilizado concreto com $f_{ck}=25$ MPa, e no projeto 3 foi utilizado concreto com $f_{ck}=20$ MPa.

O estudo foi realizado partindo-se da Equação 1. Os valores de carregamento q_T e q_c considerados para as quatro estruturas foi de 1200 kgf/m^2 (lajes maciças com paredes de tijolos cerâmicos) e 150 kgf/m^2 (telhas de concreto, com madeiramento), respectivamente.

Com o valor de N_d calculado, usou-se a Equação 1 e as áreas das seções transversais dos pilares foram obtidas dos projetos estruturais fornecidos pelos engenheiros projetistas, sendo assim possível calcular o coeficiente de correção, por meio de comparação com as seções reais dos projetos.

Os valores encontrados para pilar de canto, pilar de extremidade e pilar intermediário estão apresentados nas Tabelas 7, 8 e 9, respectivamente.

Tabela 7 – Coeficiente de correção para pilar de canto.

	Ac do projeto (cm²)	N_d (kgf)	Tensão ideal (kgf/cm²)	Fator de correção
Projeto 1 (9 pavimentos)	1250	109074	233	2,670
Projeto 4 (9 pavimentos)	720	50867	233	3,298
	1140	56968	233	4,663
	1140	108265	233	2,453
	720	68439	233	2,451
Projeto 3 (12 pavimentos)	1000	74710	203	2,717
Projeto 2 (15 pavimentos)	1600	125432	233	2,972

Fonte: autor.

Tabela 8 – Coeficiente de correção para pilar de extremidade.

	Ac do projeto (cm²)	N_d (kgf)	Tensão ideal (kgf/cm²)	Fator de correção
Projeto 1 (9 pavimentos)	1250	161108	233	1,808
	1250	159582	233	1,825
Projeto 2 (9 pavimentos)	1875	182504	233	2,394
Projeto 3 (12 pavimentos)	2000	162825	203	2,494
	2000	159278	203	2,549
	2000	160754	203	2,526
	2000	165531	203	2,453
	2000	191733	203	2,118
	2000	186026	203	2,182
Projeto 4 (15 pavimentos)	2250	277956	233	1,886
	2000	237519	233	1,962

Fonte: autor.

Tabela 9 – Coeficiente de correção para pilar intermediário.

	Ac do projeto (cm²)	N_d (kgf)	Tensão ideal (kgf/cm²)	Fator de correção
Projeto 1 (9 pavimentos)	1500	298892	233	1,169
	1250	219299	233	1,328
	1250	230793	233	1,261
	1250	174982	233	1,664
	1250	224292	233	1,298
Projeto 2 (9 pavimentos)	1875	306872	233	1,424
	1500	266152	233	1,313
	1425	229213	233	1,449
	1800	229591	233	1,827
	2375	369606	233	1,497
Projeto 3 (12 pavimentos)	2000	287171	203	1,414
	2000	284904	203	1,425

	2000	269995	203	1,504
	2000	253288	203	1,603
	1400	181619	203	1,565
Projeto 4 (15 pavimentos)	2400	465518	233	1,201
	2500	491601	233	1,185
	2400	407736	233	1,371
	2500	404660	233	1,439
	3000	585631	233	1,194
	2700	513269	233	1,226
	3000	504256	233	1,386
	2500	420997	233	1,384
	2250	391332	233	1,339
	2700	394352	233	1,595
	2700	538903	233	1,167
	2250	439171	233	1,194

Fonte: autor.

Com os resultados obtidos foi estabelecida uma média aritmética dos valores, que permitiram obter novos valores dos coeficientes de correção para cada um dos três tipos de pilares, mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores propostos para os coeficientes de correção.

Pilar de canto	3,4
Pilar de extremidade	2,2
Pilar intermediário	1,4

Fonte: autor.

Cabe lembrar que os fatores de correção obtidos para realizar o pré-dimensionamento dos pilares consideraram outros esforços no pilar (como momento fletor e esforço cortante devidos a ação de vento, por exemplo), pois foram obtidos de edifícios de altura em que as ações horizontais são de grandeza considerável.

3.2 ESTUDO DE VIGAS

Para o estudo de formulações de pré-dimensionamento de vigas foram utilizados 7 projetos estruturais.

Foram medidos os vãos e alturas das vigas dos projetos fornecidos e analisadas as posições das vigas e se servem de apoio a outra(s) viga(s). Foram determinados os valores da relação altura (h) e comprimento do vão (L). Os resultados para cada caso estão nas Tabelas 11

(caso 1), 12 (caso 2), 12 (caso 3) e 14 (caso 4). As células em laranja foram os valores desconsiderados por apresentarem um desvio padrão maior que 25% entre os valores considerados. Isto ocorreu, provavelmente devido a aproximações nas alturas das vigas por razões construtivas ou arquitetônicas. Além disso, algumas vigas podem ter tido suas seções uniformizadas, técnica utilizada na concepção do projeto estrutural.

Tabela 11 – Pré-dimensionamento de vigas: resultados para o caso 1, dimensões em cm.

Caso 1 (central, dá apoio a outras vigas)				
	Viga	h	L	h/L
Projeto 2	V405	60	443	0,1354
	V411	60	497	0,1207
	V416	40	388	0,1031
	V438	60	452	0,1327
	V447	60	505	0,1188
Projeto 5	V226	61	315	0,1937
	V305	50	297	0,1684
Projeto 6	V409	70	390	0,1795
Projeto 1	V13	50	415	0,1205
	V19	60	522	0,1149
	V20	60	562	0,1068
	V15	60	247	0,2429
Projeto 4	V14	60	363	0,1653
Projeto 7	V209	65	456	0,1425
	V208	65	524	0,1240
Projeto 3	V320	60	398	0,1508

Fonte: autor.

Tabela 12 – Pré-dimensionamento de vigas: resultados para o caso 2, dimensões em cm.

Caso 2 (central e não dá apoio a outras vigas)				
	Viga	h	L	h/L
Projeto 2	V408	40	292	0,1370
Projeto 3	V224	65	446	0,1457
	V212	65	449	0,1448
	V219	40	244	0,1639
Projeto 6	V405	60	512	0,1172
	V406	60	522	0,1149
	V419	70	432	0,1620
	V413	60	573	0,1047
Projeto 1	V12	40	192	0,2083
	V31	40	262	0,1527
Projeto 4	V32	60	422	0,1422

	V29	40	412	0,0971
	V30	60	499	0,1202
	V36	30	203	0,1478
Projeto 7	V219	45	334	0,1347
	V205	41	330	0,1242
	V219	45	378	0,1190
Projeto 5	V310	60	470	0,1277
	V307	35	324	0,1080
	V326	46	380	0,1211
	V404	70	711	0,0985

Fonte: autor.

Tabela 13 – Pré-dimensionamento de vigas: resultados para o caso 3, dimensões em cm.

Caso 3 (periférica, dá apoio a outras vigas)				
	Viga	h	L	h/L
Projeto 3	V308	75	406	0,1847
	V311	50	373	0,1340
Projeto 6	V426	60	440	0,1364
Projeto 1	V38	40	262	0,1527
Projeto 4	V17	60	571	0,1051
	V21	60	495	0,1212
Projeto 7	V222	45	498	0,0904
Projeto 5	V424	50	489	0,1022

Fonte: autor.

Tabela 14 – Pré-dimensionamento de vigas: resultados para o caso 4, dimensões em cm.

Caso 4 (periférica, sem apoio a outras vigas)				
	Viga	h	L	h/L
Projeto 2	V401	60	378	0,1587
	V402	60	292	0,2055
	V407	60	300	0,2000
	V428	40	489	0,0818
Projeto 3	V201	80	528	0,1515
	V215	80	746	0,1072
Projeto 6	V402	70	425	0,1647
	V417	70	450	0,1556
	V415	70	580	0,1207
	V410	60	510	0,1176
Projeto 1	V1	60	562	0,1068
	V3	60	522	0,1149
Projeto 4	V18	60	502	0,1195
	V42	60	422	0,1422
	V25	60	422	0,1422

Projeto 7	V301	40	400	0,1000
	V202	41	373	0,1099
	V211	41	438	0,0936
Projeto 5	V301	70	609	0,1149
	V302	35	396	0,0884
	V306	35	324	0,1080
	V313	46	420	0,1095

Fonte: autor.

Depois de estudados e analisados os resultados de cada caso, as formulações obtidas para pré-dimensionamento de vigas estão descritas na Tabela 15. Os valores diferem ligeiramente daqueles propostos inicialmente na Tabela 4.

Tabela 15 - Fórmulas propostas de pré-dimensionamento de vigas.

Caso	Posição da viga	Dá apoio a outra(s) viga(s)?	Fórmula
1	Central	Sim	$h=13,5\% L$
2	Central	Não	$h=11,5\% L$
3	Periférica	Sim	$h=11,5\% L$
4	Periférica	Não	$h=10,5\% L$

Fonte: autor.

3.3 ESTUDO DE LAJES

No estudo de formulações de pré-dimensionamento de lajes foram utilizados 9 projetos estruturais. Primeiramente, as lajes foram divididas em lajes armadas em duas direções e lajes armadas em uma direção. Em seguida foram analisadas as condições de apoio de cada laje (favorável, regular ou desfavorável) e verificados os tipos de carregamentos atuantes nas lajes (pequena, média ou grande), de acordo com Tabelas 5 e 6, respectivamente. Foram consideradas somente lajes de formato regular (retangular). Construiu-se a Tabela 16 com os resultados para lajes armadas em duas direções. As células em laranja foram os valores desconsiderados, por apresentarem um desvio padrão maiores que 25% entre os valores considerados.

Tabela 16 – Resultados para lajes armadas em duas direções, dimensões em cm.

Armada em 2 direções						
	Laje	Carregamento	Cond. de apoio	h	L	Relação L/h
Projeto 2	L7	Pequena	Favorável	10	359	35,90
	L11	Pequena	Favorável	8	240	30,00
Projeto 5	L4	Pequena	Favorável	14	605	43,21
	L3	Pequena	Favorável	10	375	37,50

Projeto 1	L10	Pequena	Regular	14	394	28,14
	L19	Pequena	Favorável	12	457	38,08
	L20	Pequena	Favorável	12	503	41,92
	L14	Pequena	Favorável	12	691	57,58
Projeto 4	L5	Pequena	Regular	12	457	38,08
	L13	Pequena	Favorável	12	523	43,58
	L9	Pequena	Regular	12	362	30,17
	L27	Pequena	Favorável	12	518	43,17
	L26	Pequena	Favorável	12	443	36,92
Projeto 7	L23	Pequena	Favorável	12	457	38,08
	L12	Pequena	Favorável	12	379	31,58
	L14	Pequena	Favorável	10	430	43,00
	L15	Pequena	Favorável	10	332	33,20
Projeto 6	L8	Pequena	Favorável	14	430	30,71
	L2	Pequena	Regular	14	343	24,50
	L1	Pequena	Favorável	12	290	24,17
Projeto 9	L20	Pequena	Favorável	16	499	31,19
Projeto 3	L201	Média	Favorável	12	400	33,33
	L212	Média	Favorável	12	456	38,00
	L211	Média	Favorável	12	370	30,83
Projeto 8	L403	Pequena	Regular	8	545	68,13
	L413	Pequena	Favorável	8	346	43,25
	L407	Pequena	Favorável	8	225	28,13

Fonte: autor.

Para as lajes armadas em uma direção os valores encontrados foram muito divergentes entre si, devido a questões de arquitetura e construção, bem como uniformizações de seções, sendo muitos valores descartados. Os resultados estão apresentados na Tabela 17, somente os valores das células em verde foram considerados.

Tabela 17 - Resultados para lajes armadas em uma direção, dimensões em cm.

Laje armada em 1 direção						
	Laje	Carregamento	Cond. de apoio	h	L	Relação L/h
Projeto 2	L3	Pequena	Favorável	8	135	16,88
Projeto 5	L9	Pequena	Desfavorável	10	145	14,50
Projeto 1	L11	Pequena	Favorável	12	242	20,17
	L15	Pequena	Regular	12	279	23,25
	L1	Pequena	Favorável	12	408	34,00
Projeto 4	L6	Pequena	Regular	12	215	17,92
	L30	Pequena	Regular	12	184	15,33
Projeto 7	L16	Pequena	Regular	10	152	15,20
Projeto 6	L18	Pequena	Favorável	10	190	19,00
Projeto 9	L11	Pequena	Favorável	10	218	21,80

A norma ABNT NBR 6118:2014 não permite pilar com seção transversal de área inferior a 360 cm², por isso as seções mínimas adotadas foram de 19 x 19 cm. Para os pilares P13, P15, P18 e P20 destacados na Tabela 18 foram adotadas seções de 45 cm por questões arquitetônicas. Nos demais pilares procurou-se adotar seções mais uniformes e múltiplas de 5 cm, com exceção das seções com 19 x 19 cm.

Tabela 18 – Resultados do pré-dimensionamento de pilares.

	A _i (m ²)	q _T (kgf/m ²)	n _p	q _c (kgf/m ²)	N _d (kgf)	σ _{id}	Fator corr.	A _c (cm ²)	b (cm)	h (cm)	Dimensões adotadas	
											b (cm)	h (cm)
P1	2,66	1200	4	150	18433,8	233	3,4	268,9911	19	14,16	19	19
P2	4,47	1200	4	150	30977,1	233	2,2	292,4876	19	15,39	19	19
P3	4,46	1200	4	150	30907,8	233	2,2	291,8333	19	15,36	19	19
P4	4,46	1200	4	150	30907,8	233	2,2	291,8333	19	15,36	19	19
P5	4,47	1200	4	150	30977,1	233	2,2	292,4876	19	15,39	19	19
P6	2,66	1200	4	150	18433,8	233	3,4	268,9911	19	14,16	19	19
P7	9,56	1200	4	150	77493,4	233	2,2	731,697	19	38,51	19	40
P8	15,85	1200	4	150	128480	233	1,4	771,9834	19	40,63	19	45
P9	11	1200	4	150	89166	233	1,4	535,7614	19	28,2	19	30
P10	11	1200	4	150	89166	233	1,4	535,7614	19	28,2	19	30
P11	15,85	1200	4	150	128480	233	1,4	771,9834	19	40,63	19	45
P12	9,56	1200	4	150	77493,4	233	2,2	731,697	19	38,51	19	40
P13	8,87	1200	4	150	71900,2	233	1,4	432,0185	19	22,74	19	45
P14	6,49	1200	4	150	52607,9	233	1,4	316,0992	19	16,64	19	19
P15	8,87	1200	4	150	71900,2	233	1,4	432,0185	19	22,74	19	45
P16	9,56	1200	4	150	77493,4	233	2,2	731,697	19	38,51	19	40
P17	15,52	1200	4	150	125805	233	1,4	755,9106	19	39,78	19	40
P18	5,32	1200	4	150	43123,9	233	3,4	629,2761	19	33,12	19	45
P19	2,81	1200	4	150	22777,9	233	2,2	215,0699	19	11,32	19	19
P20	4,83	1200	4	150	39152	233	3,4	571,3164	19	30,07	19	45
P21	15,52	1200	4	150	125805	233	1,4	755,9106	19	39,78	19	40
P22	9,56	1200	4	150	77493,4	233	2,2	731,697	19	38,51	19	40
P23	2,47	1200	4	150	17117,1	233	3,4	249,7774	19	13,15	19	19
P24	4,14	1200	4	150	28690,2	233	2,2	270,8946	19	14,26	19	19
P25	1,63	1200	4	150	11295,9	233	3,4	164,8329	19	8,675	19	19
P26	1,63	1200	4	150	11295,9	233	3,4	164,8329	19	8,675	19	19
P27	4,14	1200	4	150	28690,2	233	2,2	270,8946	19	14,26	19	19
P28	2,47	1200	4	150	17117,1	233	3,4	249,7774	19	13,15	19	19

Fonte: autor.

Tabela 19 – Resultados do pré-dimensionamento de vigas.

VIGAS PAVIMENTO TIPO E FORRO				Dimensões adotadas (cm)	
Viga	Caso	L (cm)	h (cm)	b	h
V301	4	484	50,82	12	55
V302	3	523	54,915	12	55
V303	4	484	50,82	12	55
V304	2	430	49,45	12	50
V307	4	268	28,14	12	30
V308	2	187	21,505	12	30
V310	2	430	49,45	12	50
V311	4	268	28,14	12	30
V312	4	403	42,315	12	50
V314	4	406	42,63	12	50
V315	4	406	42,63	12	50
V316	2	293	33,695	12	40
V317	4	485	50,925	12	50
V320	2	485	55,775	12	55
V321	2	485	55,775	12	55
V323	3	305	35,075	12	40
V325	3	240	27,6	19	30
V326	4	305	32,025	12	40
V327 = V329	2	485	55,775	12	55
V332	4	485	50,925	12	50

Fonte: autor.

Para as vigas procurou-se adotar seções transversais semelhantes e com pouca variação para o pavimento, por questão de uniformização e economia de fôrmas.

Tabela 20 – Resultados do pré-dimensionamento de lajes.

LAJES PAVIMENTO TIPO E FORRO					h adotado (cm)
Laje	Carregamento	Cond. de apoio	L (cm)	h (cm)	
L1=L3	Pequena	Regular	351	10,03	12
L2	Pequena	Regular	371,5	10,61	12
L4=L8	Pequena	Favorável	585,5	15,40	16
L5=L7	Pequena	Favorável	340	9,44	12
L6	Pequena	Favorável	450,5	11,86	12
L9=L12	Pequena	Regular	355,5	10,16	12
L10=L11	Pequena	Favorável	285	8,14	12

Fonte: autor.

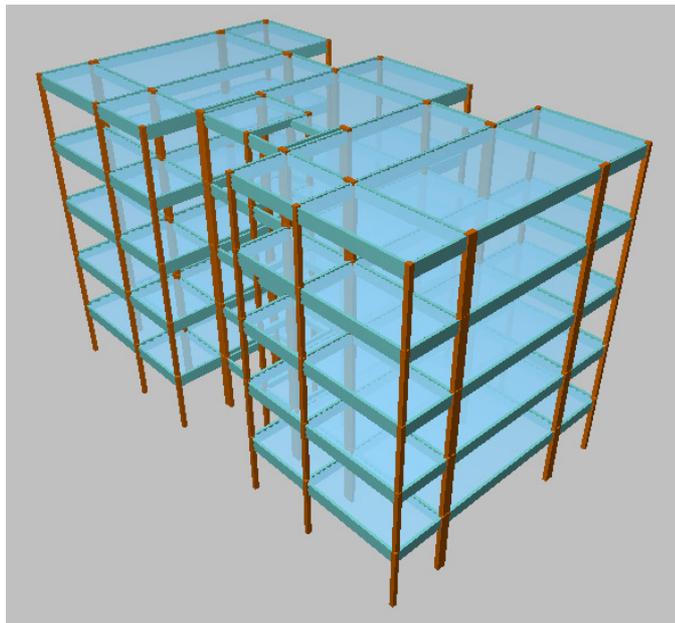
Em lajes se busca adotar uma única altura para todo o pavimento, optou-se por uniformizar as alturas para a maioria do pavimento em 12 cm. Foi escolhido o valor de 12 cm para englobar também a laje L6, utilizando uma altura a favor da segurança, embora seja um valor um

pouco mais distante das demais lajes, que deram resultados próximos de 10 cm. Para o pavimento tipo o maior valor de altura encontrado para as lajes foi de 15,41 cm, sendo esse valor distante das demais alturas calculadas. Foram adotadas para as lajes L4 e L8 uma altura de 16 cm, diferente das outras.

3.5 DIMENSIONAMENTO VIA CYPECAD[®]

As dimensões encontradas para pilares, vigas e lajes na Seção 5 foram lançadas no programa de cálculo estrutural CYPECAD[®], obtendo-se a Figura 4, onde é apresentada a estrutura em perspectiva tridimensional.

Figura 4 – Estrutura em 3D fornecida pelo CYPECAD[®].



Fonte: CYPECAD[®] (2016).

Após lançados todos os elementos e os carregamentos, foi realizado o processamento da obra, que é o momento em que o CYPECAD[®] faz o cálculo e dimensionamento da estrutura, considerando todos os esforços e os limites definidos pelas Normas Brasileiras.

Os resultados com relação aos pilares, vigas e lajes foram analisados pelo programa e estão descritos na sequência.

3.6 RESULTADOS PARA PILARES

Para melhor compreensão dos resultados, as verificações com relação aos pilares estão sintetizadas na Tabela 21.

Tabela 21 – Resumo das verificações nos pilares.

PILARES						
	Seção pré-dimensionamento (altura h em cm)	Seção adotada (cm)	Estado limite de ruptura relativo ao esforço cortante	Estado limite de ruptura frente a solicitações normais	Armadura mínima e máxima	Disposições relativas às armaduras
P1	14,16	19 x 19	Atende	Atende	Atende	Atende
P2	15,39	19 x 19	Atende	Atende	Atende	Atende
P3	15,36	19 x 19	Atende	Atende	Atende	Atende
P4	15,36	19 x 19	Atende	Atende	Atende	Atende
P5	15,39	19 x 19	Atende	Atende	Atende	Atende
P6	14,16	19 x 19	Atende	Atende	Atende	Atende
P7	38,51	19 x 40	Atende	Atende	Atende	Atende
P8	40,63	45 x 19	Atende	Atende	Atende	Atende
P9	28,20	30 x 19	Atende	Atende	Atende	Atende
P10	28,20	30 x 19	Atende	Atende	Atende	Atende
P11	40,63	45 x 19	Atende	Atende	Atende	Atende
P12	38,51	19 x 40	Atende	Atende	Atende	Atende
P13	22,74	19 x 45	Atende	Atende	Atende	Atende
P14	16,64	19 x 19	Atende	Atende	Atende	Atende
P15	22,74	19 x 45	Atende	Atende	Atende	Atende
P16	38,51	19 x 40	Atende	Atende	Atende	Atende
P17	39,78	40 x 19	Atende	Atende	Atende	Atende
P18	33,12	19 x 45	Atende	Atende	Atende	Atende
P19	11,32	19 x 19	Atende	Atende	Atende	Atende
P20	30,07	19 x 45	Atende	Atende	Atende	Atende
P21	39,78	40 x 19	Atende	Atende	Atende	Atende
P22	38,51	19 x 40	Atende	Atende	Atende	Atende
P23	13,15	19 x 19	Atende	Atende	Atende	Atende
P24	14,26	19x 19	Atende	Atende	Atende	Atende
P25	8,68	19x 19	Atende	Atende	Atende	Atende
P26	8,68	19x 19	Atende	Atende	Atende	Atende
P27	14,26	19x 19	Atende	Atende	Atende	Atende
P28	13,15	19x 19	Atende	Atende	Atende	Atende

Fonte: autor.

V311	28,14	12 x 30	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	
V312	42,32	12 x 50	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	
V314	42,63	12 x 50	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	
V315	42,63	12 x 50	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	
V316	33,70	12 x 40	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	
V317	50,93	12 x 50	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	14 x 60
V320	55,78	12 x 55	Atende	Atende	Atende	Atende	Não Atende	Não Atende	14 x 60
V321	55,78	12 x 55	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	
V323	35,08	12 x 40	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	
V325	27,60	12 x 30	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	
V326	32,03	12 x 40	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	
V327	55,78	12 x 55	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	
V329	55,78	12 x 55	Atende	Atende	Atende	Atende	Não Atende	Não Atende	14 x 60
V332	50,93	12 x 50	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	14 x 60

Fonte: autor.

Foram feitas as seguintes considerações:

- Verificação do estado limite de ruptura relativo ao esforço cortante refere-se à norma ABNT NBR 6118:2014, artigos 17.4.1.1, 17.4.2.2 e 18.3.3.2;
- Verificação do estado limite de ruptura frente a solicitações normais refere-se à norma ABNT NBR 6118:2014, artigos 11.3.3.4.3, 15.8 e 17;
- Verificação do controle da fissuração por meio da limitação da abertura estimada das fissuras refere-se à norma ABNT NBR 6118:2014, artigo 17.3.3.2;
- Verificação da armadura mínima e máxima refere-se à norma ABNT NBR 6118:2014, artigo 17.3.5.3;
- Verificação das disposições relativas às armaduras refere-se à norma ABNT NBR 6118:2014, artigos 13.2.2 e 18.3.2.2.

Os erros acusados pelo programa eram em relação à flecha diferida no tempo das vigas. Optou-se por alterar as seções para 14 x 60 cm nas vigas V10 (V317), V11 (V320), V17 (V329) e V18 (V332) do Grupo 1 (pavimento tipo).

3.8 RESULTADOS PARA LAJES

Para melhor compreensão dos resultados, as verificações com relação às lajes estão sintetizadas na Tabela 23, onde a flecha é o critério mais importante para verificação da altura adotada para as lajes.

Tabela 23 – Resumo das verificações nas lajes com armadura gerada pelo dimensionamento via CYPECAD®.

LAJES					
	Seção pré-dimensionamento (altura h em cm)	Seção adotada (cm)	Flecha máxima (cm)	Flecha máxima permitida (cm)	Satisfaz condição de flecha?
L1=L3	10,03	12	0,354	1,040	Atende
L2	10,61	12	0,475	1,040	Atende
L4=L8	15,41	16	1,007	1,884	Atende
L5=L7	8,75	12	0,848	1,324	Atende
L6	11,86	12	0,341	1,648	Atende
L9=L12	10,16	12	0,308	0,960	Atende
L10=L11	8,14	12	0,044	0,960	Atende

Fonte: autor.

Para análise da flecha diferida no tempo em lajes foi tomado como parâmetro a flecha máxima permitida (a_t) descrita na norma ABNT NBR 6118:2014 e apresentada na seguinte equação:

$$a_t = \frac{L_x}{250}$$

onde L_x é o vão teórico menor.

Analisando os resultados percebe-se que as flechas máximas atendem com folga ao critério de flecha máxima em todos os casos, sendo possível ainda diminuir as alturas propostas na Tabela 10.

4 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos pode-se observar que é possível fazer um bom pré-dimensionamento de uma estrutura com formulações simplificadas, de forma a facilitar e agilizar o trabalho do arquiteto e do engenheiro, gerando assim maior compatibilidade entre os projetos arquitetônico e estrutural.

Um procedimento importante adotado no desenvolvimento deste trabalho foi a comparação com estruturas de edificações existentes, dimensionadas de acordo com as Normas Brasileiras em vigor, proporcionando um ajuste das fórmulas por meio de uma análise dos resultados de cálculo estrutural executado na prática.

Quando realizado o cálculo e dimensionamento da estrutura via CYPECAD[®] os resultados obtidos foram satisfatórios para o pré-dimensionamento realizado com as novas formulações propostas, necessitando de poucos ajustes.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931**: Execução de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

CUNHA, J. **Estruturas de concreto armado**. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, 198 p. Apostila, 2014.

CYPECAD[®], v 2015.k: CYPE Ingenieros. Conjunto de programas. 1 CD-ROM, 2015.

ENGEL, H. **Sistemas de estructuras**. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S.A., 2001.

FTOOL - Interactive-Graphics Program for Structural Analysis. Developed by Luiz Fernando Martha, 2016.

MELO, P.R. **Pré-dimensionamento de estruturas de madeira, de aço e de concreto para auxílio à concepção de projetos arquitetônicos**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.