

ANÁLISE TÉCNICA DE ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS EM CONCRETO ARMADO, DE 3 A 21 PAVIMENTOS, COM VARIAÇÃO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (RELAÇÃO GEOMÉTRICA, EM PLANTA, DE 1:4)

TECHNICAL ANALYSIS OF ARMED CONCRETE BUILDING STRUCTURES, FROM 3 TO 21 FLOORS, WITH COMPRESSION RESISTANCE VARIATION (1: 4 GEOMETRIC RATIO IN PLANT

LANINI, Tamiris Luiza Soares

Engenheira Civil, Universidade do Estado de Mato Grosso
tamirisluiza_@hotmail.com

PINHEIRO, Roberto Vasconcelos

Professor Adjunto, Engenheiro Civil, Universidade do Estado de Mato Grosso
rpinheiro@unemat.br

CHAHUD, Eduardo

Professor Titular, Engenheiro Civil, Universidade Federal de Minas Gerais
echahud@gmail.com

CHRISTOFORO, André Luis

Professor Adjunto, Engenheiro Civil, Universidade Federal de São Carlos
alchristoforo@gmail.com

LAHR, Francisco Antonio Rocco Lahr

Professor Titular, Engenheiro Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
frocco@sc.usp.br

RESUMO

O presente estudo tem por objetivo a análise técnico-econômica de edifícios de 3 a 21 pavimentos, com aplicação de distintos valores de resistência característica à compressão aos 28 dias (f_{ck}), variando entre 25 e 40 MPa, com relação geométrica, em planta, de 1:4. Estima-se que, por meio dos resultados obtidos, seja possível auxiliar a concepção, o dimensionamento e, principalmente, subsidiar a orçamentação da superestrutura de edifícios em concreto armado que contemplem tal relação geométrica. De posse dos resultados, conclui-se que: (I) o aumento do valor do “ f_{ck} ” implica na redução significativa das dimensões dos elementos dos subsistemas verticais e no consumo de aço; (II) para cada caso analisado (“A” até “F”), as espessuras médias dos pavimentos tipo e o consumo de fôrmas se mantiveram praticamente constantes independentes do aumento do valor de “ f_{ck} ”; (III) a composição de custos mostrou que os sistemas dimensionados com concretos de resistência (C-35) geram menores custos globais.

Palavras-chave: Concepção estrutural, Consumo de materiais e insumos, estruturas de concreto armado

ABSTRACT

This study aimed to technical and economic analysis of buildings 3-21 floors, with application of different characteristic values compressive strength at 28 days (f_{ck}), ranging between 25

and 40 MPa, with geometric relation, in plant of 1:4. It is estimated that by the results obtained it is possible to assist the design and mainly, subsidize the budget of the superstructure of buildings in reinforced concrete that include such geometric relation. With the results, it follows that: (I) increasing the value of the " f_{ck} " implies a significant reduction of the dimensions of the elements of the vertical subsystems and steel consumption; (II) for the analyzed case ("A" to "F") , the average thickness of the flooring type and consumption of molds remained virtually independent of the increase in the value of " f_{ck} " constant; (III) the cost composition showed that systems dimensioned resistance concrete (C -35) produce lower overall costs.

Palavras-chave: Structural design, Consumables and supplies, Reinforced concrete structures

1. INTRODUÇÃO

Devido ao aumento da demanda por moradias, o setor da construção civil tem como desafio maximizar a ocupação das áreas urbanas - por meio da verticalização de edifícios - de modo a reduzir o custo final da edificação, garantindo ainda o bom desempenho estrutural de tais empreendimentos (ARAÚJO, 2010).

Para efeitos de cumprimento de tais requisitos, as indústrias apostaram no avanço da tecnologia dos materiais por meio da produção de concretos com maiores capacidades de resistência. Concretos com resistências maiores proporcionam à superestrutura a redução das seções dos elementos estruturais existentes (ARAÚJO, 2010).

Neste contexto, Silva (2011) estudou a análise técnico-econômica em edifícios de concreto armado de múltiplos pavimentos através da variação do f_{ck} e da área ocupada em planta pelos pilares. Constatou-se que para maiores valores de resistência do concreto houve uma redução no custo dos pilares, bem como ganho de área útil da edificação.

Em relação à análise do consumo de materiais e seus respectivos custos aplicados às estruturas em concreto armado, Costa (2012) comparou duas concepções estruturas distintas – uma com maiores vãos, na ordem de 6,50 metros, e outra composta por menores vãos, na ordem de 4,00 metros. Concluiu-se que a estrutura composta por maiores vãos apresentou acréscimo de 28% no consumo de aço se comparada à estrutura com menores vãos, que apresentou economia de 12% no custo dos insumos.

Quanto à análise comparativa em edifícios em concreto armado, Spohr (2008) estudou sistemas estruturais convencionais comparados aos sistemas de laje nervurada para um edifício composto por escritórios. Constatou-se que o emprego de lajes lisas nervuradas proporciona redução de 18,10% no custo total do sistema estrutural, se comparado ao sistema convencional de lajes maciças.

Deste modo, justifica-se o desenvolvimento de um estudo que analise as distintas

possibilidades de desempenho estrutural de um edifício em função do valor da resistência do concreto utilizado de modo a alcançar seu menor custo global. A respeito da análise estrutural, existem diversos estudos correlatos ao presente artigo, em fase de desenvolvimento na UNEMAT, *Campus* de Sinop, que avaliam parâmetros técnico-econômicos de edifícios em concreto armado, considerando-se: (i) linhas de pilares existentes no edifício, classificando-o quanto à rigidez; (ii) variação da resistência à compressão do concreto; (iii) relação geométrica em planta; e (iv) número de pavimentos da edificação.

Como parte constituinte da pesquisa existente, este projeto analisou parâmetros técnicos-financeiros dos elementos constituintes da superestrutura (vigas, lajes e pilares) de um edifício de múltiplos pavimentos (3 a 21 pavimentos tipo), para quatro distintas classificações de “ f_{ck} ” (25,30,35 e 40 MPa). A relação geométrica em planta se manteve na ordem de 1:4, considerando-se a inserção de um maior número pórticos na menor dimensão - o que difere esta pesquisa das demais elaboradas para tal proporção.

2. MATERIAL AND METHODS

A obtenção dos resultados – análises estruturais globais e locais, dimensionamento, verificação e quantitativo de insumos -, foi realizada por meio do software para projetos estruturais *AltoQi Eberick V9*. Para organização dos resultados, por meio de tabelas e gráficos demonstrativos, empregou-se um software de planilha eletrônica (*Excel*).

Utilizou-se um projeto arquitetônico residencial hipotético, exibido na Figura 1, com relação em planta equivalente à 1:4 – dimensões em torno de 15m por 60m, totalizando uma área de 900,00 m².

Figura 1: Planta do projeto arquitetônico do pavimento tipo

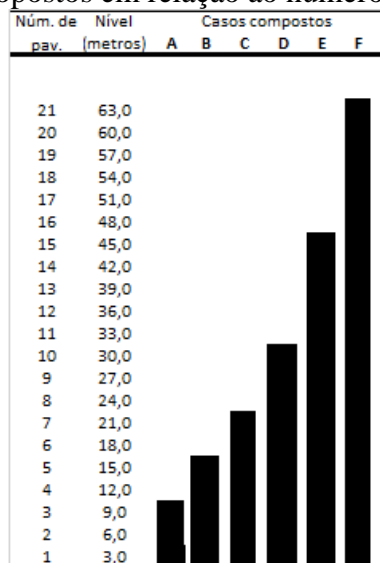


Fonte: O autor, 2016.

Para a geração dos resultados dos parâmetros propostos no presente artigo, considerou-se edifícios com 3, 5, 7, 10, 15 e 21 pavimentos tipo, de modo a estudar o comportamento da estrutura em diferentes casos e como um todo. Para melhor compreensão e exposição dos resultados, estes foram nomeados em Casos A, B, C, D, E e F respectivamente,

como mostra a Figura 2.

Figura 2: Casos propostos em relação ao número de pavimentos tipo

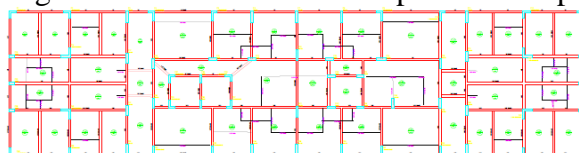


Fonte: O autor, 2016.

Para evitar deslocamentos inaceitáveis – provocados, principalmente, pelo efeito do vento -, a estrutura foi disposta de modo a formar pórticos planos nas duas direções, considerando-se essencialmente a menor dimensão para análise da influência das “linhas de pilares” nos parâmetros técnicos.

A disposição dos pilares iniciou-se pelo contorno da edificação, considerando a rigidez máxima destes na direção mais desfavorável do edifício. Posteriormente, os demais pilares internos foram posicionados, e as vigas foram unidas aos pilares por meio de ligações rígidas, semi-rígidas ou rotuladas, e, em algumas situações, apoiadas entre si. As lajes foram definidas a partir do contorno formado pelas vigas, como mostra a Figura 3, a seguir:

Figura 3: Planta de formas do pavimento tipo



Fonte: O autor, 2016.

As ações verticais, tanto permanentes quanto variáveis, foram definidas em conformidade com as indicações propostas na ABNT NBR 6120:1980. Quanto às ações permanentes, conforme indicado na ABNT NBR 6120:1980, têm-se: peso próprio da estrutura em concreto armado, considerando-se peso específico de 25 kN/m³; paredes com espessura de 15 cm compostas por tijolos furados com peso específico de 13 kN/m³; peso próprio do

acabamento do piso e forro (incluindo revestimento cerâmico, argamassa de assentamento e regularização), equivalente a $0,93 \text{ kN/m}^2$.

As ações variáveis, em conformidade com a ABNT NBR 6120:1980, foram compostas por sobrecargas de utilização, divididas em: $0,5 \text{ kN/m}^2$ - forros sem acesso a pessoas e terraços inacessíveis a pessoas; $1,5 \text{ kN/m}^2$ - dormitórios, salas, cozinhas, banheiros e copa; 2 kN/m^2 - área de serviço, despensa, lavanderia; 3 kN/m^2 - escadas e corredores com acesso ao público. As ações variáveis horizontais, oriundas das forças do vento, foram definidas com base nas indicações preconizadas pela ABNT NBR 6123:1988.

Desse modo, a determinação de tais ações vinculou-se à definição dos seguintes parâmetros: velocidade básica do vento ($V_0=30\text{m/s}$), conforme a região hachurada das isopletas - Figura 4; fator topográfico $S_1=1,0$ (Item 5.2), considerando terreno plano ou ainda fracamente acidentado; fator S_2 (Item 5.3) - para combinação de efeitos da rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura acima do terreno (considerando Categoria III e Classe "C"); fator estatístico $S_3=1,0$ (Item 5.4), considerando Grupo 2. Os Coeficientes de Arrasto (C_a) foram calculados para cada pavimento tipo por meio do ábaco de isopletas da ABNT NBR 6123:1988, considerando-se as alturas relativas a cada pavimento, bem como as dimensões em planta da edificação.

Ainda, em conformidade com a ABNT NBR 6118:2014, definiu-se: agressividade ambiental - Classe II; cobrimento das armaduras (ambientes externos) de 2,5 e 3,0 cm para lajes e pilares/vigas respectivamente; diâmetro máximo do agregado - 19mm; f_{ck} (25, 30, 35 e 40 MPa); f_{yk} (CA50 para vigas e lajes, e CA50 e CA60 para pilares).

Com base nas informações dispostas e com auxílio do software *AltoQi Eberick V9*, os seguintes itens foram localmente verificados: tensões no concreto; dimensionamento das armaduras; deslocamentos verticais (vinculados aos pilares) e deslocamentos horizontais (vinculados às vigas e lajes) dos elementos estruturais componentes. Quanto à análise global da estrutura, verificou-se os efeitos de primeira e segunda ordem, tomados como critério de relevância os coeficientes " α " (parâmetro de instabilidade) e " γ_z " (majoração dos esforços globais finais de 1ª ordem para os de 2ª ordem), bem como o deslocamento global da estrutura.

Quanto às seções transversais dos elementos estruturais, têm-se: vigas variando entre 15x40 a 15x60cm para os Casos A, B e C, e 20x40 a 20x60 para os casos D, E e F; pilares variando entre 15x30cm a 15x80 para os Casos A, B e C, e 20x30 a 25x120 para os Casos D, E e F; as lajes limitaram-se a variação entre 8 e 10cm para todos os Casos.

Ao final, mantiveram-se as seções transversais dos elementos horizontais, variando apenas a espessura das vigas (15cm para os Casos A, B e C, e 20cm para os Casos D, E e F) devido aos esforços gerados pelos efeitos de 2ª ordem. Assim, buscou-se otimizar os elementos verticais por meio da relação momento resistente/momento solicitante (M_{rd}/M_{sd}), próxima de 1,0.

Posteriormente às etapas de dimensionamento – quanto aos estados limites últimos – e verificação – quanto aos estados limites de utilização – dos elementos estruturais, foram obtidos os quantitativos dos seguintes insumos: concreto (m^3), fôrmas (m^2) e aço (kg). A composição do custo de tais insumos se deu por meio dos valores propostos na tabela SINAPI de janeiro de 2016 de Custo de Composições.

De posse do mapeamento e composição de custo dos insumos, realizou-se a determinação dos seguintes parâmetros: consumo de aço ($kg_{aço}/m^3_{concreto}$); consumo de fôrmas ($m^2_{fôrma}/m^3_{concreto}$); espessura média do pavimento, em cm; custo médio da edificação ($R\$/m^2$); e por fim, consumo médio dos insumos, em porcentagem. Ainda, tais parâmetros foram analisados por meio de formulações estatísticas (coeficiente de variação e desvio padrão) de modo a atestar a viabilidade de aplicação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em todos os casos propostos, o consumo de aço, para as lajes, manteve-se praticamente constante independente da variação do número de pavimentos existentes e da resistência do concreto utilizado – com coeficiente de variação dos Casos “A até F” equivalente a 2,5%. Desse modo, pode-se fixar o consumo médio de aço equivalente a $95,6 kg_{aço}/m^3_{concreto}$ para os Casos “A a F”.

Quanto às vigas, os Casos “A a F” englobam duas composições distintas: vigas com espessura de 15cm para os Casos “A, B e C”, e vigas com 20cm de espessura para os Casos “D, E e F”. Tal fato ocorre em razão da necessidade de dimensionar pilares com espessuras de 15 cm - para as composições de menores alturas – de modo a otimizar os componentes do elemento estrutural -, ou ainda, devido a necessidade de aumentar a rigidez do pórtico – para as composições com maiores alturas.

Assim sendo, com base nas composições realizadas e na análise estatística elaborada a partir dos dados obtidos, têm-se que de 3 a 7 pavimentos (“A até C”), o consumo médio de aço equivale a $92,8 kg_{aço}/m^3_{concreto}$, com coeficiente de variação de 4,5%. Por meio de

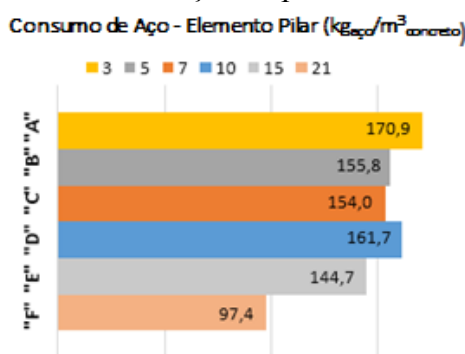
interpolações, tem-se que o consumo médio de aço das vigas para 8 e 9 pavimentos equivale a $86,0 \text{ kg}_{\text{aço}}/\text{m}^3_{\text{concreto}}$, com coeficiente de variação de 0,9%.

Para edifícios de 10 a 15 pavimentos, o consumo médio de aço equivale a $89,6 \text{ kg}_{\text{aço}}/\text{m}^3_{\text{concreto}}$, com coeficiente de variação de 4,2%. Através de interpolações, tem-se que o consumo de aço para estruturas de 16 a 20 pavimentos equivale a $88,0 \text{ kg}_{\text{aço}}/\text{m}^3_{\text{concreto}}$, com coeficiente de variação de 1,0%.

Ao final, edifícios com 21 pavimentos apontam consumo médio de aço de $102,4 \text{ kg}_{\text{aço}}/\text{m}^3_{\text{concreto}}$, com coeficiente de variação de 2,8%, que têm seu aumento justificado pela ação dos efeitos de 2ª ordem – amenizados por meio do aço existente nos elementos estruturais.

O gráfico exposto na Figura 4 apresenta o consumo médio de aço dos pilares para os casos propostos relacionados ao número de pavimentos existentes:

Figura 4: Consumo de aço dos pilares Casos “A até F”



Fonte: O autor, 2016.

Observa-se que o maior consumo de aço para pilares em $\text{kg}_{\text{aço}}/\text{m}^3_{\text{concreto}}$ acontece para a composição média do Caso “A”, com subsequente decréscimo gradual nos Casos “B e C”. Tal fato, como disposto anteriormente, se justifica pelo aumento da seção transversal de tais elementos a medida que o número de pavimentos aumenta, proporcionando menor taxa de armadura constituinte.

Posteriormente, há um acréscimo no consumo de aço para o Caso “D”, e novamente uma redução gradual, justificada pelo aumento da espessura das vigas - que consequentemente aumentam a rigidez do pórtico – e posterior aumento do volume de concreto das seções dos pilares que implicam na redução do consumo de aço.

O consumo de fôrmas para os casos propostos se manteve praticamente constante ao longo da variação do número de pavimentos e resistência à compressão do concreto adotada. Para composições com até oito (8) pavimentos, tem-se consumo médio de fôrmas equivalente

a $13,5 \text{ m}^2_{\text{fôrmas}}/\text{m}^3_{\text{concreto}}$, com coeficiente de variação equivalente a 1,0%. Composições com nove (9) a 21 pavimentos possuem consumo médio de fôrmas equivalente a $12,0 \text{ m}^2_{\text{fôrmas}}/\text{m}^3_{\text{concreto}}$, com coeficiente de variação equivalente a 2,3%.

A espessura média dos pavimentos tipo manteve-se praticamente constante, independentemente do número de pavimentos existentes e do aumento da resistência do concreto, caracterizando coeficiente de variação máximo de 0,5%.

Assim, pode-se fixar a espessura média de edifícios até três (3) pavimentos equivalente a 13cm; de quatro (4) a sete (7) pavimentos igual a 14cm; de oito (8) a 10 pavimentos, 15 cm; de 11 a 15 pavimentos, 16cm; de 16 a 20 pavimentos, 17cm; e ainda, com 21 pavimentos, 18cm.

Quanto ao custo global final da edificação, todas as composições obtiveram melhor viabilidade econômica composta pelo concreto C-35. A Tabela 1 a seguir apresenta os casos compostos e seus respectivos custos globais, em R\$/m².

Tabela 1: Custo total por m² para os Casos “A até F

| CASO COMP. | F _{ck} 25 MPa | F _{ck} 30 MPa | F _{ck} 35 MPa | F _{ck} 40 MPa | Média (R\$/m ²) |
|-----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|
| A | 197,21 | 193,98 | 193,16 | 197,90 | 195,56 |
| B | 203,92 | 202,95 | 200,93 | 205,60 | 203,35 |
| C | 211,37 | 207,41 | 205,60 | 210,56 | 208,73 |
| D | 226,01 | 220,56 | 217,45 | 220,26 | 221,07 |
| E | 241,52 | 234,85 | 226,19 | 231,02 | 233,40 |
| F | 263,04 | 255,58 | 251,96 | 255,34 | 256,48 |
| Média (R\$/m ²) | 223,84 | 219,22 | 215,88 | 220,11 | |

Fonte: O autor, 2016

Com base em tais resultados, verificou-se que o coeficiente de variação para os Casos “A, B, C, D, E e F” propostos se mantiveram em 1,2%, 1,0%, 1,3%, 1,6%, 2,8%, e 1,8%, respectivamente. Visto que, tal relação é considerada relativamente pequena, pode-se adotar, para fins práticos, os seguintes valores médios de custo por metro quadrado: Caso “A” – 195,56 R\$/m²; Caso “B” – 203,35 R\$/m²; Caso “C” – 208,73 R\$/m²; Caso “D” – 221,07 R\$/m²; Caso “E” – 233,40 R\$/m²; e Caso “F” – 256,48 R\$/m².

Em casos de subsídio de uma edificação com número de pavimentos diferente dos casos propostos, poder-se-á interpolar, com base nestes resultados, obtendo o custo médio por metro quadrado para o caso desejado.

4. CONCLUSIONS

Observou-se que para elementos horizontais o consumo de aço se manteve

praticamente constante, independente do aumento da resistência do concreto adotado, com coeficientes de variação equivalentes a 2,5% e 6,2% para lajes e vigas, respectivamente. Quanto aos pilares, verificou-se variação significativa no consumo de aço, reduzida gradualmente à medida que houve aumento na resistência à compressão do concreto – caracterizando coeficiente de variação médio equivalente a 19,8%.

Em relação as espessuras médias dos pavimentos tipo e ao consumo de fôrmas, constatou-se pequenas variações com o aumento da resistência do concreto, consideradas irrelevantes – com coeficiente de variação médio inferior a 1,0%. Entretanto, analisando a estrutura como um todo por meio da comparação das composições “A e F”, tem-se que a espessura média do pavimento tipo apresentou aumento de 27,22%, e o consumo de fôrmas uma redução de 12,0%.

Ainda, a partir dos casos propostos, observou-se uma importante redução dos insumos por meio do aumento da resistência do concreto, de modo a somar na economia global das estruturas propostas. Assim, verificou-se que todos os casos propostos apresentaram melhor viabilidade técnico-econômica por meio do uso do concreto C-35. Tal fato se justifica pelo elevado custo do concreto C-40 na região, o qual se sobrepõe ao custo de aço, ainda que o consumo deste tenha sido reduzido em tais casos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTOQI. [1]. (S.d.). **Sobre o AltoQi Eberick V9**. Acesso em: 10 de agosto de 2015. Disponível em: <<http://www.altoqi.com.br/software/projeto-estrutural/eberickv9#sobre-o-eberick>>.
- ARAÚJO, J. M. (maio de 2010). **Curso de concreto armado**. Rio grande: Dunas. v.2, 4.ed., 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118. **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, maio 2014.
- _____. NBR 6120. **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, nov. 1980.
- _____. NBR 6123. **Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, jun. 1988.
- _____. NBR 8681. **Ações e segurança nas estruturas – Procedimento**. Rio de Janeiro, mar. 2003.
- COSTA, L. **Estudo comparativo entre duas concepções estruturais de um mesmo edifício**. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville/SC, 2012.
- Fusco, P. B. **TECNOLOGIA DO CONCRETO ESTRUTURAL**. São Paulo: Pini, 2008.
- SILVA, R. L. **Projeto estrutural de edifícios com concretos de diferentes resistências à compressão: comparativo de custos**. Trabalho de diplomação, Graduação em Engenharia Civil – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto

Alegre/RS, 2011.

SPOHR, V. H. **Análise comparativa: sistemas estruturais convencionais e estruturas de lajes nervuradas**. Dissertação de Mestrado, Centro de tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria/RS, 2008.