

1 INTRODUÇÃO

1.1 HISTÓRICO SOBRE ANÁLISE DA ESTABILIDADE GLOBAL

Tão importante quanto garantir a segurança nos projetos estruturais, é dever do projetista de estrutura avaliar se a estrutura projetada é viável ou não. Um estudo de viabilidade do projeto estrutural começa com a escolha dos materiais adequados, passando pela avaliação da técnica construtiva mais indicada e a compatibilidade com a mão de obra disponível. Segundo a NBR 6118:2003, a estrutura é considerada segura quando são confirmadas as hipóteses de cálculo, admitidas na fase de projeto, atendendo as premissas da norma. Desta forma torna-se evidente a preocupação com a correta especificação dos materiais e a escolha de técnicas construtivas coerentes com a localidade onde a obra está inserida.

A presença de edifícios altos está cada vez mais frequente nos grandes centros urbanos e desafiam a cada dia os projetistas de estruturas, na concepção de arranjos estruturais eficientes, capazes de suportar ações que lhes são impostas com deslocamentos admissíveis. Os avanços obtidos com a tecnologia dos materiais, projetos mais sofisticados de elevadores e o surgimento de ferramentas computacionais voltadas para avaliação de desempenho estrutural são alguns dos fatores que viabilizam a construção de concepções cada vez mais altas e esbeltas (Oliveira, 2009).

Segundo Carvalho e Pinheiro (2009), as estruturas, mesmo as mais simples, estão sempre sujeitas, além das ações gravitacionais, às ações laterais decorrentes, principalmente, por efeito de ventos. No caso de estruturas de grande altura ou que têm relação entre a altura e maior dimensão em planta grande, esses efeitos se tornam mais importantes e podem, inclusive, desencadear situações de instabilidade do edifício. Dessa forma, embora em algumas situações as estruturas tenham rigidez suficiente para que possam ser desprezados os efeitos de segunda ordem devidos à instabilidade global, ainda assim, é preciso avaliar se as ações de vento são significativas e necessitam ser consideradas no cálculo.

Sabe-se que o projeto e execução de um edifício alto é uma tarefa extremamente laboriosa e que deve ser tratada com muita responsabilidade e planejamento. No que tange ao projeto estrutural, muitos fatores devem ser levados em consideração de forma a prever o comportamento destes edifícios frente a diversas ações que lhes são impostas.

A avaliação da rigidez destas torres, sobretudo da estabilidade global, é de suma importância para viabilizá-las. Alguns fatores como os efeitos de segunda ordem, a consideração da ação do vento, efeitos de abalos sísmicos e a interação solo-estrutura que, normalmente, são negligenciados em projetos de menor porte, são itens essenciais que possibilitarão a construção de um edifício alto de forma segura e econômica.

Nos últimos dez anos, a crescente verticalização dos grandes centros fez com que o estudo da estabilidade global dos edifícios se tornasse tema principal de diversas dissertações de mestrado e teses de doutorado. A Figura 1.1 mostra alguns dos edifícios mais altos do mundo construídos na última década deixando clara a evolução ao longo dos anos da relação esbeltez versus altura dos edifícios.

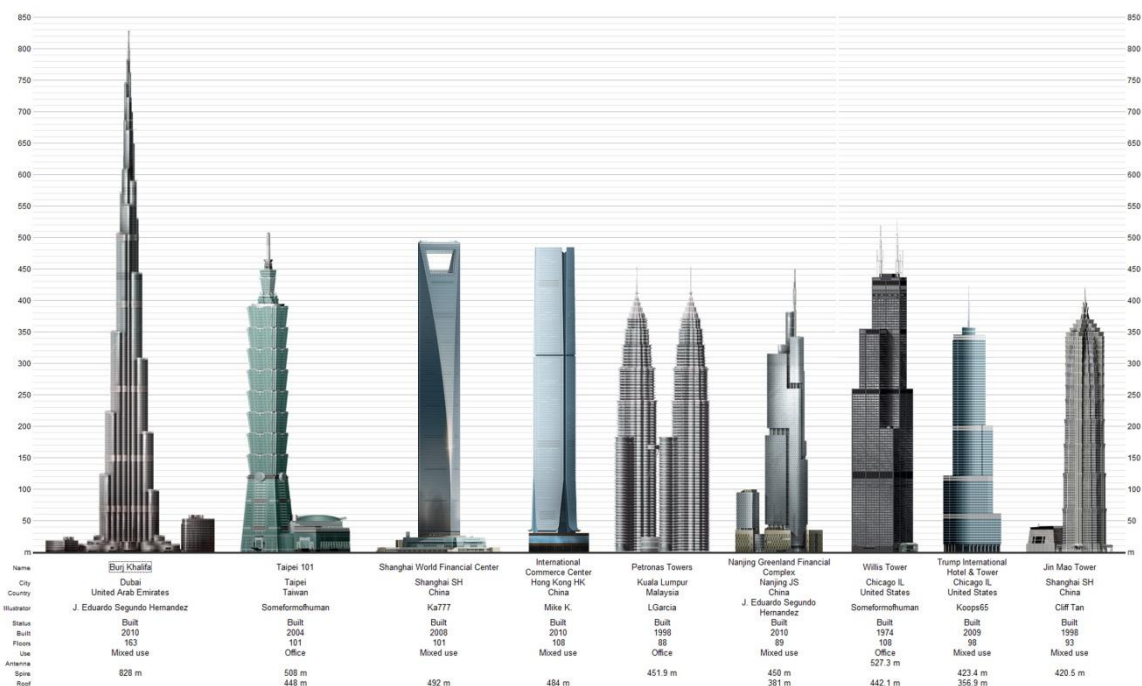


Figura 1.1 – Edifícios Altos do Mundo (fonte: Council on Tall Buildings and Urban Habitat)

No Brasil, o edifício mais alto atualmente é o *Mirante do Vale* construído em 1960, em São Paulo, com 170 m de altura. Em construção podemos citar o *Infinity Coast Tower*, com 240 m de altura, o *Sky Tower*, com 210 m e o *Alameda Jardins Residence* com 170 m de altura todos eles na cidade de Balneário Camboriú. Analisando os edifícios mais altos do mundo (Figura 1.1) com os do Brasil (Figura 1.2), segundo o Conselho de Prédios Altos e Habitação Urbana (CTBUH, na sigla em inglês), não há nenhum representante brasileiro entre os cem primeiros listados, isto se deve devido que edifício alto é muito caro, além de

problemas de gabarito (plano diretor) e cone de aproximação, por isto não há edifícios altos no Brasil.

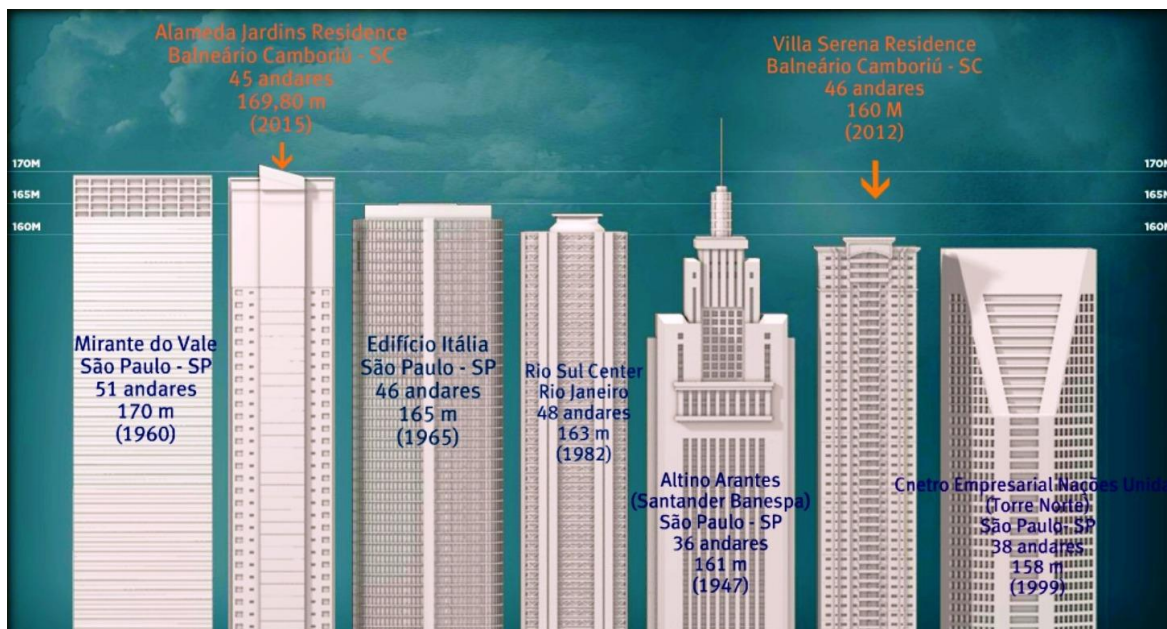


Figura 1.2 – Edifícios mais Altos do Brasil (fonte: www.imoveisembalneariocamboriu.blogspot.com)

Baseado nesta vertente verticalização dos grandes centros urbanos juntamente com a ousadia dos projetos arquitetônicos, pé-direito duplo, fachadas em vidros (pele de vidro), o estudo da estabilidade global precisa ser realizado de maneira criteriosa. Como já citado, é um assunto de bastante interesse pelos pesquisadores, mas que ainda assim é um enigma em diversos aspectos como: pé-direito diferenciado entre pavimentos, variações bruscas de rigidez, transição de pilares em vigas, estruturas deslocáveis com cargas verticais, torções no pórtico espacial e recalques não uniformes nas fundações.

Através desta retrospectiva no âmbito da estabilidade global de edifícios, este trabalho buscará estudar alguns dos pontos levantados anteriormente, como o aspecto de pé-direito diferente entre pavimentos e de redução brusca de rigidez entre pavimentos.

1.2 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

As cidades do outrora denominado “Terceiro Mundo”, sobretudo na América Latina e mais especificamente no Brasil, passaram por transformações significativas no Século XX, relacionadas às novas manifestações da materialidade. Essas manifestações foram resultado da tendência de novas formas de morar, identificadas nos edifícios de vários pavimentos. A especificidade para o Brasil se destaca na inversão do local de moradia da população brasileira, que passou a ser urbana e, junto a essa inversão, surgiu ou se manifestou com maior evidência o papel do incorporador/ promotor imobiliário, que, por meio do valor de troca, concentrou seus investimentos na construção de edifícios. O fenômeno da verticalização, uma vez manifesto, passou a fazer parte dos estudos e investigações acadêmicas, na área da engenharia estrutural, do planejamento urbano, entre outras.

O Brasil na década de 60 ficou nos holofotes do mundo em relação às inovações tecnológicas na engenharia principalmente na área do concreto armado e protendido, com obras principalmente em Brasília, onde se erguia a nova Capital Federal. A maioria das obras eram edificações como monumentos históricos e edificações de pequeno porte.

Segundo dados históricos, tratando-se de edifícios altos no Brasil, edifícios que ultrapassaram a marca dos 100 m de altura tiveram início na década de 20, como o Edifício *A Noite*, construído no Rio de Janeiro em 1928, com 103 m e 24 pavimentos, considerado o edifício mais alto do mundo em concreto armado, na época, calculado por Emilio Baumgart. Hoje o considerado mais alto do Brasil é o edifício *Mirante do Vale* construído em São Paulo em 1960, com 170 m de altura e 51 andares (Figura 1.3).



a) Edifício A Noite, 1928.



b) Edifício Mirante do Vale, 1960.

Figura 1.3 – Edifícios mais Antigo e mais Alto do Brasil

A idéia de se estudar os edifícios altos no âmbito da engenharia estrutural é justamente com a preocupação de como estão sendo tratados os assuntos da estabilidade global. Atualmente os projetos arquitetônicos estão com concepções cada vez mais ousadas em relação aos sistemas estruturais, chamados edifícios inteligentes, fachadas de vidro, pé-direito diferenciados, vãos maiores, tudo buscando, além do diferencial para o mercado imobiliário, a economia, tanto na fase de construção quanto na fase de utilização. Outro aspecto que hoje impulsiona as inovações nos projetos arquitetônicos é a questão da sustentabilidade, inteiramente ligada à economia, meio ambiente e a questão social.

Quando se fala em edifícios inteligentes a primeira coisa que vem à cabeça são os processos de automação que eles devem incluir, mas edifícios inteligentes são muito mais que isso, eles mexem com a arquitetura de uma cidade, com seu urbanismo, seu paisagismo, enfim, com a vida das pessoas. Para projetá-los não há um simples processo de disposição, pensa-se em diversas questões para que se torne uma arquitetura agradável que dê facilidade aos seus usuários. Além disso, o edifício inteligente não deve ser tratado como um ambiente isolado da cidade, mas como um ambiente que tenha uma relação dinâmica com o exterior e seu entorno para não se tornar um agente invasor e deteriorador do espaço urbano.

Um edifício inteligente deve ser concebido assim em sua etapa de projeto estrutural de modo a estar apto a receber todos os subsistemas necessários para a automação de processos e sua devida integração, oferecendo ainda facilidades de integração, controle, gerenciamento e manutenção, além de oferecer um ambiente prático e confortável aos seus usuários.

A partir dos novos conceitos dos partidos arquitetônicos, sistemas estruturais diferentes, vidros nas fachadas, pés-direitos diferenciados, ambientes internos maiores, as adaptações estruturais para atender estas solicitações tiveram que ser repensadas, como mudanças no lançamento estrutural, aplicação de novas tecnologias nos materiais de construção e uma abordagem mais criteriosa para a estabilidade global dos edifícios.

O pé-direito duplo traz enormes vantagens para o ambiente, pois melhora a ventilação e a iluminação do espaço, principalmente quando utilizado com fachadas envidraçadas que aumentam a área de irradiação da luz natural. O pé-direito duplo ainda proporciona a criação de ambientes diferenciados e personalizados no vão superior, o mezanino, além de causar um forte apelo estético.

Na estrutura, economia pode ser gerada através da redução da resistência característica do concreto dos pilares ao longo do edifício e também através da redução da seção dos pilares ao longo da edificação. As condições de redução são determinadas a partir do lançamento estrutural, onde o projetista de estrutura determina as condições de carregamentos e demais ações a serem impostas na estrutura.

O pé-direito duplo especificamente deve ser muito bem analisado estruturalmente não no item de economia, pois se trata de uma concepção da arquitetura, mas no quesito da estabilidade global, pois os pilares têm comprimentos muito superiores aos dos demais pavimentos da edificação. Deve ser realizada uma análise criteriosa no dimensionamento dos pilares, principalmente se forem pilares da torre do edifício e/ou se participam diretamente do contraventamento da estrutura.

Afinal, o grande dilema deste trabalho, que será pormenorizado nos objetivos gerais e específicos, é estudar o problema da brusca variação de rigidez dos edifícios entre pavimentos, através de alterações nas seções dos pilares, variação de f_{ck} e/ou pé-direito duplo. Estes problemas serão analisados através das respostas geradas pelos parâmetros simplificados de estabilidade global (α e γ_z), juntamente com uma análise de segunda ordem, via método $P-\Delta$, acoplando a análise a não-linearidade física.

Essas três variações na tipologia estrutural, segundo Laranjeiras (2013), podem ser sintetizadas em uma só, se questionarmos se é válido usar o coeficiente γ_z em estruturas de edifícios em que a rigidez dos pilares, definida por $E_c \times I/h$, varia de um andar para o outro,

sendo E_c o módulo de elasticidade, função de f_{ck} , I o momento de inércia da seção bruta do pilar e h a distância entre pisos.

A grande questão é quais as limitações para a utilização destes parâmetros? Principalmente o coeficiente γ_z , uma vez que a NBR 6118:2003 estabelece apenas uma restrição para o uso do coeficiente γ_z , que o edifício tenha pelo menos quatro andares e que este coeficiente, por outro lado, encontra irrestrita aplicação nos programas de cálculo (Laranjeiras, 2013).

1.3 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS DO TRABALHO

Como objetivos gerais, este trabalho se propõe a contribuir na avaliação da estabilidade global de edifícios de concreto armado considerando o aspecto tridimensional dos pórticos, o lançamento estrutural e as ações atuantes. Será feita uma análise numérica de modelos no sistema computacional SAP2000 utilizando o modelo de grelhas para as lajes e pórtico espacial para as vigas e pilares. Serão modelados e estudados cinco edifícios com tipologias estruturais diversas: lajes convencionais, nervuradas e planas, iniciando-se com 10 pavimentos e indo até 24 pavimentos, caracterizando edifícios baixos, médios e altos. Serão assim determinados os parâmetros de instabilidade simplificados da NBR 6118:2003 (α e γ_z) e realizada uma análise de segunda ordem rigorosa através do método $P-\Delta$.

Como objetivos específicos pretende-se investigar o comportamento estrutural dos edifícios propostos nos objetivos gerais inserindo as seguintes variações na tipologia estrutural:

1. Mudança de seção transversal dos pilares, ao longo da altura do edifício;
2. Alteração da resistência característica do concreto, f_{ck} , dos pilares ao longo da altura da edificação, buscando a interferência na rigidez dos pilares através da variação do módulo de elasticidade;
3. Modelos estruturais contendo pé-direito duplo.

Correlacionar os coeficientes de estabilidade global (α e γ_z) com os efeitos de segunda ordem via $P-\Delta$, dos modelos convencionais em relação aos modelos com variações na tipologia estrutural.

1.4 METODOLOGIA E HIPÓTESES BÁSICAS

A fim de atingir os objetivos propostos buscou-se inicialmente uma revisão bibliográfica sobre as referências que tratam de assuntos pertinentes a este trabalho como efeitos de segunda ordem em edifícios, parâmetros de instabilidade, não-linearidades físicas e geométricas e modelagem numérica.

São cinco os modelos analisados no trabalho, três deles estudados por França (1985) e dois por Oliveira (2009). Os resultados foram obtidos pelos pesquisadores usando sistemas analíticos próprios, onde tiveram como objetivo encontrar e comparar resultados sobre os parâmetros de instabilidade (α e γ_z) e o método $P-\Delta$.

Para este trabalho foram modelados os três edifícios estudados por França (1985). Trata-se do mesmo edifício geometricamente falando, com mesmas dimensões em planta e altura, variando apenas a tipologia estrutural adotada, um com laje maciça, outro com laje nervurada e o último com laje plana, todos com 12 pavimentos tipo. Os outros dois modelos, estudados por Oliveira (2009), correspondem a um edifício simétrico (nas direções x e y) com 10 pavimentos tipo e o outro edifício com 24 pavimentos tipo constituídos de estrutura convencional com formatos diferentes nas direções x e y . Todos os edifícios foram modelados no SAP2000.

Para cada modelo analisado foram feitas as três variações na tipologia estrutural propostas nos objetivos específicos. Para cada alteração na tipologia foram reanalisados: os carregamentos gravitacionais, os carregamentos horizontais (vento) e a combinação utilizada. Em todos os modelos, incluindo os com alterações na tipologia estrutural, foram considerados as não-linearidades, física e geométrica e os efeitos de segunda ordem de maneira criteriosa, através do processo $P-\Delta$.

Para a consideração da redução da seção dos pilares ao longo da estrutura, foi adotado como critério de projeto uma única redução de seção a partir do sexto pavimento e consideradas para todos os cinco modelos estudados. O critério para definição da nova seção do pilar foi baseado na leitura dos diagramas de esforços normais e com os resultados dos esforços, realizado um pré-dimensionamento do pilar, adotando inicialmente uma seção arbitrária de acordo com os limites impostos pela NBR 6118:2003. O pré-dimensionamento dos pilares foi considerado à compressão centrada com taxa de

armadura igual a 1% e resistência característica do concreto igual para todos os lances do pilar, 30 MPa.

Para a variação do f_{ck} dos pilares ao longo da edificação, foi considerado como hipótese básica de projeto a variação da resistência a partir do sexto pavimento (assim como a variação da seção dos pilares), reduzindo no trecho da variação a resistência do concreto de 30 MPa para 25 MPa. Com a redução do f_{ck} nos pilares, foi necessário um novo pré-dimensionamento do pilar (no lance onde houve a redução do f_{ck}) para verificar se a seção com alteração na resistência a compressão suporta os esforços empregados.

A consideração para o pé-direito duplo nos modelos de estudo foi apenas no pavimento térreo, onde a partir do modelo convencional foi suprimido o primeiro pavimento tipo. Como o comprimento dos pilares dobrou, foram considerados o pré-dimensionamento dos pilares à compressão centrada, taxa de armadura igual a 1% e f_{ck} igual ao dos demais pavimentos tipos, 30 MPa.

Nos modelos não foram consideradas alterações nas seções transversais das lajes e vigas nem do concreto desses elementos.

1.5 APRESENTAÇÃO DOS CAPÍTULOS

Uma vez feita neste capítulo uma breve análise histórica com os principais resultados envolvendo o campo da estabilidade global de alguns sistemas, a apresentação do problema incluindo os aspectos arquitetônicos e estabelecidos os principais objetivos, gerais e específicos juntamente com a metodologia aplicada e as hipóteses básicas para a obtenção destes, no capítulo 2 será feita uma revisão bibliográfica de assuntos pertinentes ao trabalho e serão descritos os fundamentos teóricos utilizados nas análises numéricas, como parâmetro α , o coeficiente γ_z e o método $P-\Delta$. Ainda nesse capítulo será feito um breve estudo sobre a não-linearidade física e a geométrica com alguns parâmetros a serem verificados. No capítulo 3 será realizado um estudo sobre o produto de rigidez EI , realizando uma abordagem sobre o módulo de elasticidade, momento de inércia e de qual maneira foi considerado o EI no presente trabalho.

Os modelos estudados juntamente com as alterações na tipologia estrutural proposta nos objetivos são apresentados no quarto capítulo. No capítulo 5 são apresentadas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.