



# UNIARA

## Universidade de Araraquara

ANÁLISE DE SEGUNDA ORDEM EM PILARES DE CONCRETO ARMADO

SECOND ORDER ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE PILLARS

ANÁLISIS DE SEGUNDO ORDEN SOBRE PILARES DE HORMIGÓN ARMADO

Stefani Caroline de Oliveira <sup>1</sup>, José Eduardo Quaresma <sup>2</sup>, Gerson De Marco <sup>3</sup>

<https://doi.org/10.47820/recima21.v3i12.2509>

PUBLICADO: 12/2022

### RESUMO

A estabilidade global é muito importante na avaliação de estruturas de concreto armado. Este trabalho visou avaliar a influência das ações do vento na estabilidade das estruturas, além de estudar a melhor forma de posicionar os pilares de forma a conferir maior rigidez aos projetos. Para tanto, foram propostas situações em que dois parâmetros foram analisados na avaliação da estabilidade global de estruturas: o parâmetro de instabilidade  $\alpha$  e o coeficiente  $\gamma z$ . Com esses dois parâmetros, foi determinado se a estrutura precisa ou não levar em consideração os efeitos globais de segunda ordem, gerados principalmente pelos deslocamentos horizontais (ação do vento) e pela falta de retilinidade das estruturas. Com a obtenção dessas duas variáveis, é possível determinar o melhor posicionamento dos pilares e assim chegar a um arranjo estrutural que permita maior rigidez e onde os efeitos globais de segunda ordem (deslocamentos horizontais) possam ser desprezados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ação do vento. Concreto armado. Estabilidade global. Estruturas.

### SUMMARY

Overall stability is very important in the evaluation of reinforced concrete structures. This work aimed to evaluate the influence of wind actions on the stability of structures, in addition to studying the best way to position the pillars in order to give greater rigidity to the projects. For this purpose, situations were proposed in which two parameters were analyzed in the evaluation of the overall stability of structures: the instability parameter  $\alpha$  and the  $\gamma z$  coefficient. With these two parameters, it was determined whether or not the structure needs to take into account the second-order global effects, generated mainly by horizontal displacements (wind action) and the lack of retilinity of the structures. By obtaining these two variables, it is possible to determine the best positioning of the pillars and thus arrive at a structural arrangement that allows greater rigidity and where the second-order global effects (horizontal displacements) can be disregarded.

**KEYWORDS:** Wind action. Reinforced concrete. Global stability. Structures.

### RESUMEN

La estabilidad general es muy importante en la evaluación de estructuras de hormigón armado. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar la influencia de las acciones del viento en la estabilidad de las estructuras, además de estudiar la mejor manera de posicionar los pilares para dar mayor rigidez a los proyectos. Para ello, se propusieron situaciones en las que se analizaron dos parámetros en la evaluación de la estabilidad global de las estructuras: el parámetro de inestabilidad  $\alpha$  y el coeficiente  $\gamma z$ . Con estos dos parámetros, se determinó si la estructura necesita o no tener en cuenta los efectos globales de segundo orden, generados principalmente por los desplazamientos horizontales (acción del viento) y la falta de retilinidad de las estructuras. Al obtener estas dos variables, es posible determinar el mejor posicionamiento de los pilares y así llegar a una disposición estructural que permita una mayor rigidez y donde se puedan descuidar los efectos globales de segundo orden (desplazamientos horizontales).

**PALABRAS CLAVE:** Acción del viento. Hormigón armado. Estabilidad global. Estructuras.

<sup>1</sup> Graduando do Curso de Engenharia Civil da Universidade de Araraquara- UNIARA. Araraquara-SP.

<sup>2</sup> Orientador. Docente Curso de Engenharia Civil da Universidade de Araraquara- UNIARA. Araraquara-SP.

<sup>3</sup> Coorientador. Docente Curso de Engenharia Civil da Universidade de Araraquara- UNIARA. Araraquara-SP.

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, como em muitas outras áreas, a engenharia passou por grandes mudanças, principalmente na engenharia de projetos e na construção civil. Técnicas de otimização de peso e forma, desenvolvimento de equipamentos experimentais, tecnologia da informação e modelos numéricos eficientes contribuíram para a criação de construções mais econômicas e aerodinâmicas, e edifícios mais altos e ambiciosos.

Questões que antes causavam problemas para os engenheiros agora assumem importância fundamental em projetos estruturais. Entre essas questões, duas que se destacam em particular são a análise de estabilidade e a avaliação de efeitos de segunda ordem.

Quando se estuda o equilíbrio estrutural, levando em consideração a configuração deformada, ocorre uma interação entre as forças existentes e os deslocamentos, produzindo esforços adicionais. Nessas condições, surgem os chamados efeitos de segunda ordem. Esses efeitos podem ser extremamente importantes em algumas estruturas, enquanto em outras podem não precisar ser levados em consideração.

Se os efeitos de segunda ordem forem significativos, uma análise de segunda ordem deve ser realizada. Como essa análise muitas vezes é incompatível com demandas práticas como considerações de tempo, os engenheiros têm buscado desenvolver processos simplificados capazes de prever o comportamento de estruturas de segunda ordem.

Os coeficientes  $\gamma_2$  e  $B_2$ , comumente empregados em estruturas de concreto armado e aço, podem ser utilizados para avaliar efeitos de segunda ordem e fornecer uma estimativa dos esforços finais de uma estrutura - desde que seus valores não ultrapassem certos limites.

Neste ponto, vale ressaltar uma característica importante do coeficiente  $\gamma_2$ : ao contrário do coeficiente  $B_2$ , ele possui apenas um valor para toda a estrutura, embora, conforme diversos estudos (CARMO, 1995; LIMA JUNIOR, 2003; OLIVEIRA *et al*, 2014) demonstraram, os efeitos de segunda ordem sofrem variações ao longo de toda a altura do edifício.

Análise da estabilidade global de estruturas de concreto armado é realizado tendo em conta o posicionamento dos pilares e a sua seção transversal. A estabilidade global seria o estudo dos efeitos que causam instabilidade nas estruturas. Essas ações geralmente são resultado de forças horizontais que atuam sobre a estrutura, decorrentes principalmente da ação do vento e do desaprumo da estrutura.

Nos últimos anos, edifícios mais altos foram construídos. Essa é a realidade principalmente nas grandes cidades, onde os terrenos geralmente são mais valorizados. Essa valorização resulta em um melhor aproveitamento desses terrenos, principalmente pelas grandes construtoras, levando ao surgimento de prédios cada vez mais altos.

Essa realidade, aliada a concepções arquitetônicas “futuristas”, muitas vezes tornam essas estruturas excessivamente esbeltas, desencadeando a instabilidade dessas estruturas. A par desta necessidade de construção de edifícios cada vez maiores, a ação do vento sobre as estruturas torna-se um fator de grande importância na análise da estabilidade global das estruturas de concreto armado. Em edificações, onde a altura é muito mais relevante do que suas dimensões horizontais, a força do vento torna-se um agente causador de instabilidade nas estruturas. E essa força tornou-se cada vez

mais importante. E isso se deve principalmente às mudanças climáticas que estão ocorrendo em nosso planeta.

Assistimos a tempestades cada vez mais intensas e frequentes, onde muitas vezes percebemos a fragilidade dos nossos edifícios. Levando em consideração esses dois fatores, qual seria a melhor forma de posicionar os pilares, para que a estrutura de concreto armado tenha estabilidade? E qual é a interferência se mudarmos as dimensões dos pilares?

O objetivo geral é verificar como é realizada a análise da estabilidade global de uma estrutura de concreto armado, a partir de um projeto genérico, no qual serão calculados os esforços que atuam de forma a gerar instabilidade na estrutura, principalmente através da análise de segunda ordem. A partir deles descubra a melhor forma de distribuir os pilares na estrutura, bem como a melhor seção capaz de dar estabilidade à estrutura.

Os objetivos específicos foram: Determinar as ações do vento que estão atuando na estrutura; Dimensionar os deslocamentos horizontais causados pela força do vento atuando na estrutura; Determinar a estabilidade global da estrutura usando pilares retangulares de diferentes seções transversais; Determine a estabilidade geral da estrutura para essas mesmas colunas, mas com um significado diferente; Avalie os resultados obtidos para que possam ser comparados, possibilitando entender a melhor forma de posicionar os pilares.

Pelo exposto acima, verificamos a importância do estudo da análise de segunda ordem em estruturas de concreto armado. Para que um projeto tenha sucesso, além de atender as necessidades dos clientes, eles devem ser seguros, duráveis e economicamente viáveis. E o estudo de estruturas afeta diretamente o cumprimento desses requisitos. E para isso, a disposição da estrutura torna-se de fundamental importância para que as estruturas tenham estabilidade.

A importância deste trabalho se justifica, pois quando optamos por uma determinada seção de pilares e disposição da estrutura, ela pode estar mais sujeita à instabilidade ou não, devido às circunstâncias e ações a que este edifício está sujeito. Quando conseguirmos estabelecer um parâmetro para melhor distribuir os pilares, poderemos projetar de forma que as estruturas tenham estabilidade e rigidez de forma segura e economicamente viável.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 AÇÕES DO VENTO E ESTABILIDADE DE CONSTRUÇÕES**

Nos últimos anos, o avanço computacional e o aprimoramento da tecnologia dos materiais levaram ao projeto de edifícios esbeltos mais suscetíveis aos efeitos globais de segunda ordem. O aprimoramento dos processadores dos computadores também permitiu análises estruturais mais complexas que não eram avaliadas no passado por causa dos recursos computacionais limitados. Junto a isso, o uso de concretos de alta resistência permite a construção de edificações mais altas e, conseqüentemente, mais flexíveis (MONCAYO, 2011).

Estruturas mais altas estão sujeitas a forças horizontais maiores, devido à carga de vento. A combinação dessas forças com carregamentos verticais resulta em maiores deslocamentos dos nós estruturais e, conseqüentemente, aumento significativo do momento fletor em seus elementos. Portanto, a estrutura deve ser avaliada em sua forma deformada. As forças adicionais desta análise

são conhecidas como momentos de segunda ordem. Para garantir a segurança estrutural, essa não linearidade geométrica deve ser considerada na análise de estabilidade estrutural (CUNHA; MENDES, 2020).

Além disso, os pórticos de concreto armado apresentam um comportamento material não linear. A fissuração do concreto, a fluência do concreto e o escoamento do vergalhão são conhecidos como não linearidades físicas do material. O deslocamento lateral excessivo deve ser verificado considerando não linearidades geométricas e materiais.

Uma opção para a análise de segunda ordem é adaptar a matriz de rigidez (K) para incluir efeitos de segunda ordem. Neste método, a matriz de rigidez (K) é composta pela matriz de rigidez elástica (KE) e matriz de rigidez geométrica (KG); este problema é normalmente resolvido através de métodos incrementais iterativos. Em estruturas com múltiplos graus de liberdade, no entanto, o método incremental tem alto custo computacional (BUENO; LORIGGIO, 2016).

Portanto, métodos diretos e simplificados são preferidos à análise de segunda ordem. Esses métodos adotam aproximações e simplificações para descrever o comportamento estrutural; sua eficiência depende da seleção das variáveis mais importantes e sua influência no comportamento estrutural. Embora esses procedimentos sejam simplificados, eles podem ser aplicados rapidamente e fornecem resultados satisfatórios.

Rutenberg propôs uma abordagem direta para obter os efeitos globais de segunda ordem. A matriz de rigidez é modificada através da inserção de contraventamentos fictícios e pilares com área de seção transversal negativa e rigidez à flexão, respectivamente. Os elementos fictícios simulam a matriz de rigidez geométrica, que inclui efeitos de segunda ordem enquanto o equilíbrio é verificado. Assim, uma análise linear pode ser realizada e nenhuma iteração é necessária.

Métodos simplificados também estão incluídos nos padrões de projeto de muitos países. A norma americana AISC/LRFD introduz os coeficientes B1 e B2 para avaliar efeitos de segunda ordem em estruturas de aço. As forças de segunda ordem são obtidas por meio de análise linear e são amplamente utilizadas por engenheiros de projeto de estruturas metálicas. Para definir o requisito de análise de segunda ordem, a ABNT NBR 6118:2014 (2014) adota os parâmetros simplificados  $\alpha$  e  $\gamma_z$ . O parâmetro  $\alpha$  classifica a estrutura como *nonsway* ou *sway frames*. Os efeitos globais de segunda ordem podem ser desprezados para o último.

O coeficiente  $\gamma_z$ , além de fornecer uma classificação quanto à suscetibilidade estrutural a efeitos de segunda ordem, também é utilizado para estimar forças de segunda ordem por meio de análises de primeira ordem. A ABNT NBR 6118:2014 permite que a não linearidade do material seja considerada aplicando-se fatores de redução à rigidez do elemento. Ele estima a variação da rigidez dos elementos estruturais e assume valores diferentes para cada tipo de elemento (BUENO; LORIGGIO, 2016).

O coeficiente  $\gamma_z$  é calculado assumindo que a falta de estabilidade ocorrerá apenas lateralmente sem componente rotacional. Estruturas cujo centro de massa não corresponde ao centro de rigidez, entretanto, podem apresentar como primeiro modo de estabilidade o modo torcional. Neste caso, a análise de estabilidade com este coeficiente pode não ser suficiente para avaliar a integridade

estrutural. Portanto, para aplicar o coeficiente  $\gamma_z$ , os modos de estabilidade também devem ser avaliados (CUNHA; MENDES, 2020).

A estabilidade global dos edifícios é influenciada principalmente pela rigidez lateral e cargas verticais aplicadas. Com base nisso, Statler *et al.*, (2016) demonstraram que é possível avaliar a suscetibilidade da estrutura aos efeitos globais de segunda ordem utilizando o período natural de vibração em estruturas de aço.

Recentemente, Reis *et al.*, (2017) apresentou o desenvolvimento do parâmetro  $\chi_T$  simplificado. Este parâmetro utiliza o período natural de vibração para estimar momentos fletores considerando efeitos não lineares. Para contabilizar os efeitos globais de segunda ordem, os momentos de primeira ordem são amplificados em pórticos de concreto armado. As análises realizadas por Reis *et al.*, (2017), entretanto, aplicaram o parâmetro  $\chi_T$  apenas em estruturas com simetria em planta e sem variação de rigidez ao longo de sua altura. Essas características divergem completamente da maioria das construções.

No Brasil, os projetos de planta baixa geralmente são assimétricos, o que leva a: (i) estruturas assimétricas, que possuem excentricidade entre o centro de massa e o centro de rigidez e tornam a estrutura vulnerável a forças de torção significativas, (ii) variação vertical da rigidez ao longo do edifício altura causada pela mudança brusca na geometria entre dois andares ou mudança na área da seção transversal, (iii) elementos de contraventamento não paralelos ou não simétricos aos eixos principais, e, (iv) estruturas com planta múltipla que não possuem a mesma projeção (BUENO; LORIGGIO, 2016).

Assim, é essencial, para validar o parâmetro  $\chi_T$ , que um maior número de análises seja realizada considerando modelos estruturais com características semelhantes a edifícios existentes. Além disso, os resultados obtidos por Reis *et al.*, (2017) apresentou valores conservadores para as colunas críticas nos modelos avaliados. Portanto, uma melhoria nos métodos de amplificação de momento devido a efeitos globais de segunda ordem deve ser investigada (CUNHA; MENDES, 2020).

No campo da dinâmica estrutural, a superposição modal é comumente usada. A resposta total da estrutura é obtida superpondo a resposta para cada forma de modo. Portanto, o parâmetro  $\chi_T$  pode ser melhorado considerando modos de vibração mais altos.

O uso crescente de resistências de concreto cada vez mais altas, combinado com cálculos mais precisos executados por computadores cada vez mais poderosos, permitiu o projeto de estruturas mais esbeltas. No dimensionamento de pilares esbeltos busca-se sempre o máximo aproveitamento da resistência dos materiais (concreto e aço). Uma das consequências de uma esbelteza elevada é a maior probabilidade de atingir um estado limite de instabilidade (CUNHA; MENDES, 2020).

O comportamento de pilares esbeltos de concreto armado é complexo porque envolve não linearidade física (relação constitutiva do concreto e rigidez variável da seção transversal em função das tensões e nível de fissuração) e não linearidade geométrica (deslocamentos laterais do pilar geram momentos fletores adicionais, que contribuem para o aumento deslocamentos laterais, e assim por diante). Tais não linearidades requerem que a solução geral seja um processo iterativo, em função de passos de carga crescente. A literatura técnica e as normas apresentam diversos procedimentos aproximados e gerais para o dimensionamento de pilares esbeltos de concreto armado. Tais procedimentos devem ser validados com base em resultados experimentais.

### 3. METODOLOGIA

Essa pesquisa se trata de um estudo de natureza qualitativa, já que a pretensão não é de quantificar os dados, mas analisá-los os sentidos e significados. Conforme Minayo (2019) a pesquisa qualitativa:

Se preocupa, nas ciências sociais, com um nível de realidade que não pode ser quantificado. Ou seja, ela trabalha com o universo de significados, motivos, aspirações, crenças, valores e atitudes, o que corresponde a um espaço mais profundo das relações, dos processos e dos fenômenos que não podem ser reduzidos à operacionalização de variáveis (MINAYO, 2011).

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica para identificar estudos que tratam do tema investigado. Esse tipo de pesquisa é elaborado por meio de trabalhos já executados por outros autores, cujos interesses conferidos; eram os mesmos. Gil (2019) aponta as suas vantagens afirmando que:

A principal vantagem da pesquisa bibliográfica reside no fato de permitir ao investigador a cobertura de uma gama de fenômenos muito mais ampla do que aquela que poderia pesquisar diretamente. Esta vantagem se torna particularmente importante quando o problema de pesquisa requer dados muito dispersos pelo espaço. A pesquisa bibliográfica também é indispensável nos estudos históricos. Em muitas situações, não há outra maneira de conhecer os fatos passados senão com base em dados secundários (GIL, 2019, p. 22).

Para conhecer a produção do conhecimento acerca do tema foi realizado um levantamento bibliográfico nas bases de dados eletrônicas. Os critérios de inclusão do uso dos artigos serão:

- 1) estudos publicados dentro do recorte temporal de 2000 a 2021;
- 2) estudos com conteúdo dentro da temática estabelecida;
- 3) artigos na Língua Portuguesa e em inglês;
- 4) artigos originais.

Os critérios de exclusão do uso dos artigos serão:

- 1) Estudos de revisão;
- 2) estudos indisponíveis na íntegra;
- 3) estudos com erros metodológicos;
- 4) estudos repetidos
- 5) estudos que não aponta resultado para os resultados.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1. ESTABILIDADE GLOBAL E EFEITOS DE 2ª ORDEM EM PILARES DE CONCRETO ARMADO

##### 4.1.1 Efeitos de 2ª ordem

Estruturas sob a ação de cargas horizontais e verticais atingem o equilíbrio estático em uma condição deformada. Com essa deformação, as cargas passam a ter excentricidade gerando esforços adicionais na estrutura. Em um processo iterativo, esses esforços adicionais geram novos deslocamentos, que provocam novas excentricidades de carga e conseqüentemente novos esforços

adicionais, repetidamente até que as novas deformações diferem pouco das anteriores, onde se entende que um equilíbrio foi alcançado.

Essas solicitações adicionais que surgem nas estruturas são o que caracterizam os efeitos de segunda ordem.

Segundo a NBR6118 (2003, p. 93) “Efeitos de 2ª ordem são aqueles que se somam aos obtidos em uma análise de primeira ordem (na qual a estrutura é estudada na configuração geométrica inicial), quando a análise de equilíbrio passa a ser realizada considerando a configuração deformada”.

Os efeitos de segunda ordem são classificados como globais quando afetam a estrutura como um todo e estão associados ao deslocamento dos nós dessa estrutura sob a ação de cargas horizontais e verticais. Em pilares de concreto armado devido à instabilidade devido à flambagem ou à não retidão de seus eixos, surgem os chamados efeitos locais de segunda ordem.

Segundo a NBR6118 (2003, pág. 94): “Em pilares de parede (simples ou mistos) pode haver uma região que apresente não linearidade maior que o eixo do pilar como um todo. Nessas regiões, surgem efeitos maiores de 2ª ordem, chamados de efeitos localizados de 2ª ordem”

#### **4.1.2 Classificação das Estruturas**

Análise da Estabilidade Global de Estruturas de Concreto Armado Segundo Melges (2009), as estruturas de edificações podem ser classificadas, de acordo com sua rigidez, em contraventadas e não contraventadas.

Estruturas contraventadas são aquelas que possuem uma subestrutura de contraventamento rígida o suficiente para absorver praticamente todas as cargas horizontais. Os nós dessas estruturas, em geral, apresentam pequenos deslocamentos horizontais, portanto, é possível dispensar a consideração de efeitos globais de segunda ordem, constituídos pelos esforços adicionais decorrentes desses deslocamentos. Neste caso, a estrutura é dita não deslocável ou com nós fixos.

Por outro lado, estruturas não contraventadas, também conhecidas como estruturas deslocáveis ou nós móveis, possuem pouca rigidez em relação a ações horizontais e efeitos globais de 2ª ordem devem ser obrigatoriamente considerados. Enquanto os efeitos globais de 2ª ordem estão associados ao deslocamento dos nós, os efeitos locais de 2ª ordem estão associados à não linearidade dos eixos da barra. Portanto, em estruturas com nós fixos, deve-se considerar apenas o efeito local de 2ª ordem. Em estruturas de nós móveis, os efeitos locais e globais de 2ª ordem devem ser considerados.

#### **4.1.3 Análise de Estruturas de Nós Fixos**

Segundo Carvalho & Pinheiro (2009), em estruturas com nós fixos, é permitido considerar cada elemento comprimido separadamente, como uma barra ligada nas extremidades aos demais elementos estruturais que ali competem, onde os esforços obtidos pela análise dos estrutura realizada de acordo com a teoria de primeira ordem.

Sob a ação de forças horizontais, a estrutura é sempre calculada como deslocável. O fato de a estrutura ser classificada como uma estrutura de nó fixo não precisa considerar os esforços

globais de segunda ordem. Segundo Oliveira (2002), sabe-se que todas as estruturas são móveis. Porém, em algumas estruturas, mais rígidas, os deslocamentos horizontais dos nós são pequenos e, conseqüentemente, os efeitos globais de segunda ordem têm pouca influência nos esforços totais, podendo, portanto, ser desprezados. Essas estruturas são chamadas de estruturas de nós fixos. Nestes casos, as barras podem ser calculadas separadamente, com suas extremidades ligadas, onde são aplicados os esforços obtidos pela análise de primeira ordem.

#### 4.1.4. Análise de Estruturas de Nós Móveis

Segundo Carvalho & Pinheiro (2009), em estruturas com nós móveis, a análise deve levar em conta os efeitos da não linearidade geométrica e da não linearidade física. No projeto, os efeitos globais e locais de 2ª ordem são obrigatoriamente considerados.

Segundo Oliveira (2002), a não linearidade física expressa a aplicação da Lei de Hooke, estando diretamente relacionada ao comportamento do material. No caso do concreto, a formação e abertura de fissuras levam à perda de proporcionalidade entre tensões e deformações antes mesmo que o limite de proporcionalidade seja atingido.

O comportamento físico não linear dos materiais afeta a rigidez das seções transversais, e essa alteração não pode ser desprezada em uma análise de segunda ordem, pois os deslocamentos laterais da estrutura estão intimamente relacionados com a rigidez dos membros constituintes.

A análise da não linearidade geométrica deve ser levada em consideração sempre que ocorrerem mudanças significativas na geometria. A interação de forças verticais com deslocamentos horizontais torna a estrutura cada vez mais distante de sua posição não perturbada e uma nova posição de equilíbrio, se houver, é alcançada.

Segundo Carvalho & Pinheiro (2009), em estruturas formadas por pilares e vigas na forma de pórticos, é possível determinar um pilar equivalente que tenha a mesma resistência do pórtico. Usando um software como o ftool, é possível determinar o deslocamento no topo do quadro gerado a partir de uma força horizontal aplicada ao quadro. Com o valor do deslocamento é possível descobrir a rigidez equivalente do pórtico através da

seguinte fórmula:  $(E.I)_{\text{pilar}} = F.H^3 / 3.\delta_{\text{pórtico}}$

Onde:

F: força horizontal aplicada.

H: altura da edificação ou pórtico.

(E.I): rigidez equivalente do pórtico.

$\delta$ : deslocamento do pórtico.

Segundo a NBR 6118 (2003), o deslocamento máximo no topo de uma edificação é calculado pela seguinte fórmula: Análise da Estabilidade Global de Estruturas de Concreto Armado

$\delta_{\text{max}} = H_{\text{tot}}$

1.700

Onde:

H<sub>tot</sub>: Altura total da Edificação



## 4.2 PARÂMETROS DE INSTABILIDADE

### 4.2.1 Parâmetro de Instabilidade $\alpha$

Segundo Carvalho & Pinheiro (2009), uma estrutura reticulada poderá ser considerada como sendo de nós fixos se seu parâmetro de instabilidade  $\alpha$ , calculado pela fórmula abaixo, for menor que  $\alpha_1$ .

$$\alpha = H_{tot} \cdot \sqrt{N_k / (E_c \cdot I_c)}$$

$$\alpha_1 = 0,2 + 0,1 \cdot n \text{ se } n \leq 3$$

$$\alpha_1 = 0,6 \text{ se } n \geq 4$$

onde:

$n$ : número de andares acima da fundação ou de um nível pouco deslocável do subsolo.

$H_{tot}$ : altura total da estrutura, medida a partir do topo da fundação ou de um nível pouco deslocável do subsolo.

$N_k$ : somatório de todas as cargas verticais atuantes na estrutura, com seu valor característico.

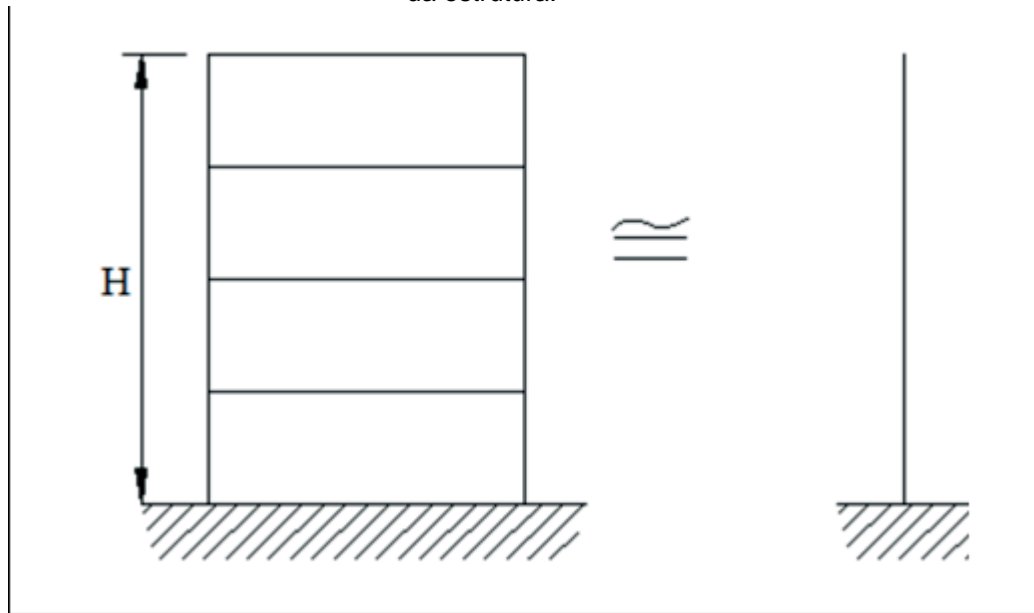
$E_c \cdot I_c$ : somatório das rigidezes de todos os pilares na direção considerada; no caso de estruturas de pórticos, de treliças ou mistas, ou com pilares de rigidez variável ao longo da estrutura, permite-se considerar produto de rigidez  $E_c \cdot I_c$  de um pilar equivalente de seção constante; o valor de  $E$  (módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial), e o valor de  $I$  deve ser calculado considerando as seções brutas dos pilares.

Para determinar a rigidez equivalente, proceda da seguinte forma: calcule o deslocamento do topo da estrutura de contraentamento, sob a ação da carga característica horizontal; calcula-se a rigidez equivalente de uma seção constante, fixa na base e livre no topo, com a mesma altura  $H$ , tal que, sob a ação da mesma carga, sofre o mesmo deslocamento no topo.

Segundo Oliveira (2002), o parâmetro de instabilidade  $\alpha$  constitui uma medida do deslocamento horizontal da estrutura, avaliando sua sensibilidade a efeitos de segunda ordem. Acima de um certo limite de  $\alpha$ , a estrutura é classificada como nós móveis, sendo necessário considerar as tensões adicionais que surgem na configuração deformada.

A formulação relativa a este parâmetro baseia-se na analogia entre o comportamento do edifício e o de um pilar fixado na base e livre no topo, de seção constante e material elástico linear, submetido a uma carga axial uniformemente distribuída ao longo de sua extensão. altura.

Fig. 1. A rigidez deste pilar seria equivalente à soma das rigidezes dos pilares de contraventamento da estrutura.



**Figura 2** – Analogia entre a Estrutura e o Pilar em Balanço.  
**Fonte:** Oliveira (2002).

Segundo Oliveira *apud* Vasconcellos (1985) o módulo de rigidez pode ser calculado através da soma das rigidezes de pilares isolados apenas no caso de estruturas pré-moldadas, alvenaria portanto ou estruturas com núcleos muito rígidos. Nas estruturas reticuladas dos edifícios, há uma solidez entre as vigas e os pilares, resultando em um aumento considerável da rigidez. Se esse aumento não for considerado, o valor de  $\alpha$  encontrado será muito conservador.

Uma forma de evitar a adoção errônea do valor de  $EI$  é tomá-lo como a rigidez equivalente de um pilar em balanço, que sofre o mesmo deslocamento no topo da estrutura em estudo, sob a ação das mesmas forças.

#### 4.2.2 Coeficiente de majoração dos esforços globais finais de 1ª ordem para obtenção dos finais de 2ª ordem $\gamma_z$

Segundo a NBR-6118 (2003), o coeficiente  $\gamma_z$  que avalia a importância dos esforços de segunda ordem globais, é válido para estruturas reticuladas de no mínimo quatro andares. Pode ser determinado a partir dos resultados de uma análise linear de primeira ordem, para cada caso de carregamento.

O valor de  $\gamma_z$  para cada combinação de carregamento é dado pela expressão:  
 Análise da Estabilidade Global de Estruturas de Concreto Armado

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \left( \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1tot,d}} \right)}$$

**Figura 3:** Fórmula  $\gamma_z$   
**Fonte:** NBR-6118 (2003)

Onde:

$M_{1,tot,d}$  é o momento de tombamento, ou seja, a soma dos momentos de todas as forças horizontais da combinação considerada, com seus valores de projeto, em relação à base da estrutura;  $\Delta M_{tot,d}$  é a soma dos produtos de todas as forças verticais atuantes na estrutura, na combinação considerada, com seus valores de projeto, pelos deslocamentos horizontais de seus respectivos pontos de aplicação, obtidos a partir da análise de 1ª ordem. Considera-se que a estrutura possui nós fixos se a condição for obedecida:  $\gamma z \leq 1,1$ .

Segundo Oliveira (2002), através de uma análise linear das ações horizontais, pode-se calcular o momento de primeira ordem  $M_1$  em relação à base da estrutura, bem como os deslocamentos horizontais de seus nós. Esses deslocamentos, combinados com as ações verticais, provocam o surgimento de aumentos nos momentos  $\Delta M_2$ , levando a novos deslocamentos. Esse processo ocorre sucessivamente em várias etapas, ou iterações, gerando incrementos de momentos cada vez menores. Se a estrutura for estável, esses aumentos diminuem até se tornarem praticamente nulos.

Analogamente ao parâmetro de instabilidade  $\alpha$ ,  $\gamma z$  pode ser usado para classificar estruturas (nós fixos ou móveis). Lembrando que os efeitos de segunda ordem podem ser negligenciados desde que não representem um acréscimo superior a 10% dos respectivos esforços de primeira ordem, uma estrutura pode ser classificada como de nós fixos se apresentar  $\gamma z \leq 1,1$ .

O levantamento teórico conceitual fundamentado nesta pesquisa trouxe as principais peculiaridades existentes do modelo estrutural de pórticos associados e pórticos planos isolados em uma edificação de concreto armado. As etapas identificadas desde a concepção estrutural passando pela definição das cargas, modelação, avaliação e validação do Modelo, seguidas do pré-dimensionamento à análise de estabilidade global, permitiram uma melhor análise dos parâmetros de estabilidade.

Embora o dimensionamento e o detalhamento da estrutura estejam interligados, as etapas descritas acima não foram utilizadas. Porque não eram necessários para a análise da estabilidade global ou para a estimativa de efeitos de segunda ordem. Segundo estudiosos, o modelo de pórticos planos surge como uma evolução do modelo de vigas contínuas, onde as interações entre vigas e pilares são consideradas por meio de barras localizadas no mesmo plano.

Essa interação envolve o uso desse modelo para análise de ações horizontais. Por ser um modelo de fácil interpretação, é frequentemente utilizado para analisar a estabilidade de edificações quando se tem um programa de processamento de pórticos planos.

Observou-se que dentre os principais efeitos causados pelo vento nas edificações está o deslocamento horizontal dos nós dos pórticos que as estruturam, sendo o vento uma das principais ações que contribuem para o surgimento dos efeitos globais de 2ª ordem.

Considerando tanto as esquadrias associadas quanto as isoladas e considerando que o efeito do vento foi considerado maior que o desaprumo nas edificações em estudo, constatou-se que elas se mantiveram dentro dos limites pré-estabelecidos pela norma de deslocamento horizontal, e os pilares não precisa ser redimensionado.

Os procedimentos descritos na NBR 6118 para consideração dos efeitos globais de 2ª ordem foram determinados pelo parâmetro de estabilidade  $\gamma z$  proposto pela NBR 6118. Verificou-se durante

este estudo que este parâmetro tem sido utilizado com mais frequência do que o parâmetro  $\alpha$  por permitir que uma estimativa dos esforços globais finais de 2ª ordem é obtido de forma simplificada, como foi feito no pórtico 2 com vento a 90° no prédio de 6 pavimentos.

Pode-se dizer que o parâmetro  $\alpha$  está caindo em desuso. Ao analisar a não linearidade física dos elementos (concreto e aço) observou-se através da norma NBR 6118 que ela já deve ser um quesito, obrigatoriamente, considerado nos cálculos de estabilidade. Nessa perspectiva, verificou-se que a norma concretiza o fato por meio da redução da rigidez dos elementos que compõem a estrutura.

O pré-dimensionamento dos elementos estruturais foi identificado como um dos primeiros problemas que um engenheiro estrutural se depara, uma vez que a secção dos elementos estruturais depende dos esforços solicitados, que por sua vez só podem ser determinados a partir de uma geometria inicial. Ou seja, um pré-dimensionamento bem feito evitará processos de redimensionamento que possam ser necessários após as análises de deslocabilidade limite e estabilidade global. Sua importância está relacionada ao fato de serem os principais responsáveis por conferir rigidez à estrutura para enfrentar ações horizontais.

O processo aproximado das áreas de influência utilizado para pré-dimensionamento dos pilares e pré-dimensionamento de lajes e vigas, observando os valores recomendados pela NBR6118(2003) e recomendações técnicas, levou a resultados satisfatórios, pois não foi necessário redimensionar a estrutura.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação cumpriu o seu papel, na medida em que atingiu os objetivos propostos e forneceu o embasamento necessário para responder à problemática colocada sobre o tema da estabilidade global de edifícios de concreto armado e a avaliação dos efeitos de 2ª ordem. Constatou-se que o parâmetro mais utilizado atualmente para esta análise é o  $\gamma z$ , idealizado pelos brasileiros Augusto Franco Carlos de Vasconcelos e Mário Franco.

Tem a vantagem de permitir a avaliação dos efeitos globais de 2ª ordem a partir dos resultados de uma análise linear de 1ª ordem, além disso, a correlação que existe entre a parte decimal de  $\gamma z$  e a quantificação desses efeitos em relação aos efeitos de primeira ordem.

Como resultado deste estudo, surgiu a hipótese que norteou a pesquisa: A prática usual do modelo estrutural de quadro associada maximiza a estabilidade geral de um edifício de concreto reforçado quando confrontado com sistemas estruturais com pórticos planos isolados. Isso pode ser confirmado para o edifício de 10 pavimentos, pois os casos mais extremos encontrados no pórtico 2 em 90° com  $\gamma z = 1,093$  e pórtico 3 em 0° com  $\gamma z = 1,099$  foram maiores que os dos pórticos associados, ou seja, os quadros associados adicionaram rigidez à estrutura.

Porém, em relação aos edifícios de 8 e 6 andares, a hipótese não pode ser confirmada porque para o pórtico 1 a 90° tivemos  $\gamma z = 1,048$  e  $\gamma z = 1,041$  respectivamente, enquanto no pórtico associado foram encontrados os seguintes valores  $\gamma z = 1,051$  e  $\gamma z = 1,047$ .

Em uma análise mais detalhada da tabela 58 ou dos gráficos que representam a variação de  $\gamma z$ , observamos que esse fato pode estar relacionado à baixa rigidez do pórtico 2 a 90°, pois em ambos os edifícios apresentaram valores elevados,  $\gamma z = 1,093$  e  $\gamma z = 1,108$  respectivamente.

No edifício de 6 pavimentos, o pórtico de 2ª ordem a 90º teve seus efeitos de 2ª ordem superiores a 10% dos efeitos de 1ª ordem, sendo assim uma estrutura de nós móveis; após a análise não linear aproximada descrita na NBR6118, verificou-se que eles já representavam os efeitos globais finais de 2ª ordem neste quadro.

Embora esses efeitos tenham sido significativos, não foi necessário redimensionar os pilares porque  $\gamma_z = 1,108 < 1,3$ . Temos como indício das consequências geradas pelos resultados apresentados anteriormente que se um dos pórticos tiver rigidez muito menor em relação aos demais pórticos que compõem a estrutura do edifício, adotando-se o modelo de pórticos associados onde a laje atua como um diafragma rígido redistribuindo os esforços horizontais entre os pórticos, a instabilidade desse pórtico também se espalhará para os demais, influenciando diretamente no resultado da análise de estabilidade global.

Como a rigidez dos pilares é determinada no lançamento estrutural, a inclusão desta etapa na metodologia foi de fundamental importância para aproximar o resultado da pesquisa do que realmente ocorre nas análises de estabilidade realizadas pelos engenheiros estruturais no cálculo.

Ainda temos que, partindo do fato de que os três edifícios são metodologicamente equivalentes e as ações normal e do vento são maiores na construção de pavimentos, a intuição nos levaria à concepção de que os efeitos de segunda ordem seriam mais acentuados nos mesmos. Porém, esses efeitos foram maiores no prédio de 6 pavimentos, contrariando a intuição.

Sugere-se para futuras pesquisas o estudo do parâmetro alfa, embora tenha menor utilidade prática, pois não é possível avaliar os efeitos globais finais de segunda ordem como o parâmetro  $\gamma_z$  permite, seria de grande valor teórico. Não foi considerado neste estudo devido às limitações de tempo. Com a utilização de sistemas computacionais mais elaborados, os mesmos estudos também podem ser realizados comparando os modelos de pórticos planos associados ao modelo de pórticos espaciais.

Seria interessante realizar outros estudos em que seja feita uma separação entre o peso próprio dos elementos estruturais e a carga acidental para que sejam geradas outras combinações de ação para os edifícios. Por fim, podem ser feitos cálculos para avaliar a força do vento e fora de prumo a fim de verificar qual causa o maior momento na base do edifício.

As ações do vento constituem um parâmetro muito importante na avaliação da estabilidade global de estruturas de concreto armado. Percebemos que o vento, principalmente em prédios mais altos, provoca um deslocamento horizontal da estrutura considerável e não pode ser ignorado.

As situações propostas de disposição dos pilares nos mostraram a importância de posicionamento correto da estrutura. Concluímos que existe uma posição preferencial para ser usado quando estamos usando pilares retangulares, e que isso proporciona uma maior rigidez e estabilidade da estrutura. A alteração das dimensões das seções dos pilares também é de grande relevância. Para mudamos a seção dos pilares experimentou um aumento na acomodação da estrutura, por menor que seja qual seria essa mudança.

Sugestões para Trabalhos Futuros: Avaliar a estabilidade global de estruturas de concreto armado utilizando seções de pilares não retangulares; usar diferentes seções de pilares na estrutura. utilizar pilares retangulares e quadrados ao mesmo tempo, por exemplo, além de utilizar pilares com dimensões diferentes ao mesmo tempo; avaliar estruturas de outras formas, que não sejam apenas

retangulares; Análise de Estabilidade Global de Estruturas de Concreto Armado; utilizar algum tipo de *software* que possibilite a realização de um maior número de simulações; variar a resistência do concreto para avaliar a estabilidade geral das estruturas de concreto armado.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Forças devido ao vento em edifícios. Rio de Janeiro, 1988, 66p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devido ao vento em edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança em estruturas Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004, 18p.

BUENO, J. R.; LORIGGIO, D. D. Análise de efeitos de 2ª ordem: estudo de caso. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9, p. 494-501, 2016.

CARMO, R. M. S. **Efeitos de segunda ordem em edifícios usuais de concreto armado**. 1995, Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

CARNEIRO, Francisco; MARTINS, João Guerra. **Análise de Estruturas: Contraventamento de Edifícios**. [S. l.: s. n.], 2008. Disponível em: <http://www2.ufp.pt/~jguerra/PDF/Estruturas/Contraventamento%20de%20Estruturas.pdf>. Acessado em: 9 set. 2022.

CARVALHO, Roberto Chust; PINHEIRO, Libânio Miranda. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. Rio de Janeiro: Pini, 2009.

CHAMBERLAIN, Zacarias. **Ações do Vento em Edifícios**. Passo Fundo: UPF, s. d. Disponível em: [http://usuarios.upf.br/~zacarias/acoes\\_vento.pdf](http://usuarios.upf.br/~zacarias/acoes_vento.pdf). Acessado em: 9 set. 2022.

CUNHA, R. N.; MENDES, Ludmilson Abritta; AMORIM, D. L. N. F. Proposta de critério simplificado para estimar efeitos de segunda ordem em edifícios de concreto armado. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, p. 200-211, 2020.

LIMA JÚNIOR, H. C. **Avaliação da ductilidade de pilares de concreto armado submetidos à flexo-compressão reta com e sem adição de fibras metálicas**. 2003. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2003.

MELGES, José Luiz Pinheiro. **Estabilidade Global**: Notas de Palestra. São Paulo: Universidade Estadual Paulista, 2009.

MONCAYO, Winston Junior Zumaeta. **Análise de segunda ordem global em edifícios com estrutura de concreto armado**. 2011. Dissertação (Mestrado) – USP, São Carlos, 2011.

OLIVEIRA, D. M.; SILVA, N. A.; OLIVEIRA, P. M.; RIBEIRO, C. C. Evaluation of second order moments in reinforced concrete structures using the  $\gamma_z$  and B2 coefficients. RIEM - **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 7, n. 3, p. 329-348, 2014.

OLIVEIRA, Danielle Meireles. **Parâmetros Globais de Instabilidade de Estruturas de Concreto Armado conforme a nova NBR-6118**. 2002. 153f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

PITTA, Alfredo Azzi João. **Ações devidas ao vento em edifícios**. São Carlos: EDUFSCar, 2001.

REBAP. **Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Protensão**. Lisboa: INCM, 1983.

REIS, D. G.; SIQUEIRA, G. H.; VIEIRA Jr., L. C. M.; ZIEMIAN, R. D. Simplified approach based on the natural period of vibration for considering second-order effects on reinforced concrete frames. **International Journal of Structural Stability and Dynamics**, v. 18, n. 5, 2017.

STATLER, D. E.; ZIEMIAN, R. D.; ROBERTSON, L. E. The natural period as an indicator of second-order effects. *In*: **Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council**, 2017.