

**CENTRO UNIVERSITÁRIO BRASILEIRO - UNIBRA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

LUCAS NASCIMENTO DE MELO SILVA

**INFLUÊNCIA DO ÍNDICE DE ESBELTEZ DOS PILARES SOBRE OS
PARÂMETROS DE ESTABILIDADE**

**RECIFE
2023**

LUCAS NASCIMENTO DE MELO SILVA

**INFLUÊNCIA DO ÍNDICE DE ESBELTEZ DOS PILARES SOBRE OS
PARÂMETROS DE ESTABILIDADE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Disciplina TCC II do Curso de Engenharia Civil do
Centro Universitário Brasileiro - UNIBRA, como parte
dos requisitos para conclusão do curso.

Orientadora: Prof. Dra. Carolina de Lima França.
Coorientador: Prof. Me. Rodrigo Santos de Oliveira.

RECIFE
2023

Ficha catalográfica elaborada pela
bibliotecária: Dayane Apolinário, CRB4- 2338/ O.

S586i Silva, Lucas Nascimento de Melo.
Influência do índice de esbeltez dos pilares sobre os parâmetros de
estabilidade / Lucas Nascimento de Melo Silva. - Recife: O Autor, 2023.
25 p.

Orientador(a): Dra. Carolina de Lima França.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro Universitário
Brasileiro - UNIBRA. Bacharelado em Engenharia Civil, 2023.

Inclui Referências.

1. Estabilidade global. 2. Efeitos de segunda ordem. 3. Índice de
esbeltez. 4. Parâmetros de estabilidade. I. Centro Universitário Brasileiro.
- UNIBRA. II. Título.

CDU: 624

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus e minha família, a qual sempre me deu suporte e incentivo.

Aos Professores Carolina de Lima França e Rodrigo Santos de Oliveira pela ótima orientação e assistência nessa última etapa da graduação.

Ao Professor do Instituto Federal de Pernambuco Charles Teruhiko Turuda, por ter confiado em minha capacidade durante o ensino médio e ter me provocado à pesquisa científica.

A meu supervisor de estágio Carlos Alberto Barbosa dos Santos e demais integrantes da Coordenação Técnica de Água da Mata Sul - COMPESA, pela paciência e aprendizado repassados a mim durante o estágio supervisionado.

RESUMO

O aumento da densidade demográfica precede a verticalização das construções, resultando em edifícios cada vez mais esbeltos. Deste modo, a análise de estabilidade global torna-se imprescindível. Com o avanço da tecnologia diversos sistemas computacionais tornaram-se capazes de realizar tal análise e, neste trabalho, o software brasileiro de análise e dimensionamento estrutural CAD/TQS será empregue. Neste estudo comparam-se o índice de esbeltez dos pilares com os valores dos parâmetros de estabilidade α , γ_z e FAV_t , este exclusivo do software TQS. Apresenta-se um mesmo edifício porticado com estrutura em concreto armado convencional modelado no software, processado sete vezes com pilares de dimensões e índice de esbeltez diferentes. O objetivo é apresentar os resultados e comparar as variações dos parâmetros de estabilidade global e efeitos de segunda ordem à medida que o índice de esbeltez dos pilares, os maiores responsáveis por manter a estabilidade global dos edifícios, também altera. Conclui-se que pilares classificados como robustos, pouco esbeltos ($\lambda < 40$) para um edifício habitacional porticado são ideais. Pilares com $\lambda > 40$ resultam em altos parâmetros de estabilidade global e efeitos de segunda ordem no edifício.

Palavras-chave: Estabilidade global; Efeitos de segunda ordem; Índice de esbeltez; Parâmetros de estabilidade.

ABSTRACT

The increase in population density precedes the process of verticalization of constructions, resulting in increasingly slender buildings. Therefore, the analysis of global stability becomes indispensable. With the advancement of technology, several computational systems have become capable of conducting such analysis, and in this work, the Brazilian software for structural analysis and design CAD/TQS will be used. In this study, the slenderness index of the columns is compared with the values of stability parameters α , γ_z , and FAV_t , the latter exclusive to the TQS software. The same framed building with a conventional reinforced concrete structure is modeled in the software is presented, processed seven times with columns of different dimensions and slenderness indices. The goal is to present the results and compare the variations in global stability parameters and second-order effects as the slenderness index of the columns, the main contributors to maintaining the overall stability of buildings, also changes. It is concluded that columns classified as robust, with low slenderness ($\lambda < 40$) for a framed residential building, are ideal. Columns with $\lambda > 40$ result in high global stability parameters and second-order effects in the building.

Keywords: Global stability; Second order effects; Slenderness index; Stability parameters.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: Gráfico tensão-deformação.....	12
FIGURA 2: Análise linear.....	13
FIGURA 3: Análise não-linear.....	13
FIGURA 4: Análise de primeira ordem.....	15
FIGURA 5: Análise de segunda ordem.....	15
FIGURA 6: Cargas uniformemente distribuídas.....	18
FIGURA 7: Deslocamento devido às cargas.....	18
FIGURA 8: Iterações do processo P-Delta.....	19
FIGURA 9: Exemplo prático.....	21
FIGURA 10: Deslocamento gerado pelo esforço horizontal.....	22
FIGURA 11: Deslocamento causado por esforços verticais.....	23
FIGURA 12: Substituição de carga excêntrica.....	23
FIGURA 13: Posição final da estrutura.....	24
FIGURA 14: Entrada de dados para cálculo de esforço devido ao vento.....	27
FIGURA 15: Mapa de velocidade básica do vento no Brasil.....	28
FIGURA 16: Coeficientes de não linearidade física.....	29
FIGURA 17: Vista ortogonal do edifício.....	30
FIGURA 18: Planta de forma.....	30
GRÁFICO 1: Índice de esbeltez x parâmetros de estabilidade.....	33

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Classificação dos pilares quanto ao índice de esbeltez.....	20
TABELA 2: Parâmetros de estabilidade.....	24
TABELA 3: Distribuição de cargas por laje.....	26
TABELA 4: Cargas por área de parede.....	26
TABELA 5: Seção dos pilares de cada caso.....	31
TABELA 6: Parâmetros de estabilidade de todos os casos.....	31
TABELA 7: Variação do parâmetro α	32
TABELA 8: Variação entre γz e FAVT.....	32

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos.....	11
1.1.1 Objetivos gerais.....	11
1.1.2 Objetivos específicos.....	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Análise linear.....	12
2.2 Análise não-linear.....	13
2.3 Não linearidade geométrica.....	14
2.4 Não linearidade física.....	14
2.5 Parâmetros de estabilidade.....	15
2.6 Parâmetro de Instabilidade Alfa (α).....	16
2.7 Parâmetro γz	16
2.8 Coeficiente FAVT.....	17
2.9 Coeficiente $RM2M1$ ($P-\Delta$).....	18
2.10 Índice de esbeltez (λ).....	19
2.11 Exemplo prático das diferenças entre γz e FAVT.....	21
3 MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 Descrição do modelo estrutural	25
3.1.1 Características do modelo estrutural.....	25
3.1.2 Características da estrutura.....	25
3.1.3 Ações na estrutura.....	26
3.1.4 Ações do vento.....	26
3.2 Discretização do Modelo estrutural.....	28
3.2.1 Considerações.....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

O aumento exponencial da população somado ao encarecimento do m² incentiva a verticalização dos edifícios, tornando necessários estudos mais aprofundados relativos ao desequilíbrio estrutural.

A análise de estabilidade global e edifícios é a etapa onde se avalia a capacidade resistente da estrutura frente aos carregamentos e deformações que vem a sofrer. O objetivo é fornecer parâmetros para os cálculos de Estado Limite de Serviço (ELS) e Estado Limite Último (ELU) a fim de garantir que a estrutura permaneça em equilíbrio (MONCAYO, 2011).

Considera-se que projetos de edifícios em concreto armado moldado in loco apresentam não-linearidade física, por apresentar deformações não proporcionais à intensidade da tensão recebida, e não-linearidade geométrica, que diz respeito à mudança da estrutura no espaço quando sob efeito de carregamentos (PINTO, 1997).

Ao analisar uma estrutura em sua configuração indeformada obtém-se a análise de primeira ordem, no entanto, após resistir às cargas iniciais a estrutura se desloca, o que altera a distribuição de carregamentos internos e externos, gerando novos esforços que são chamados efeitos de segunda ordem (MONCAYO, 2011). Para estimar tais efeitos é usado processos aproximados e a NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta alguns desses parâmetros. Vários fatores influenciam a análise de segunda ordem global, sendo os pilares os maiores responsáveis por manter a estabilidade global dos edifícios.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a influência do índice de esbeltez dos pilares nos parâmetros de estabilidade α e γ_z , $FAVt$.

1.1.2 Objetivos Específicos

- o Realizar levantamento bibliográfico básico sobre métodos de análises de estruturas em concreto armado e parâmetros de estabilidade global para servir de base teórica ao leitor;

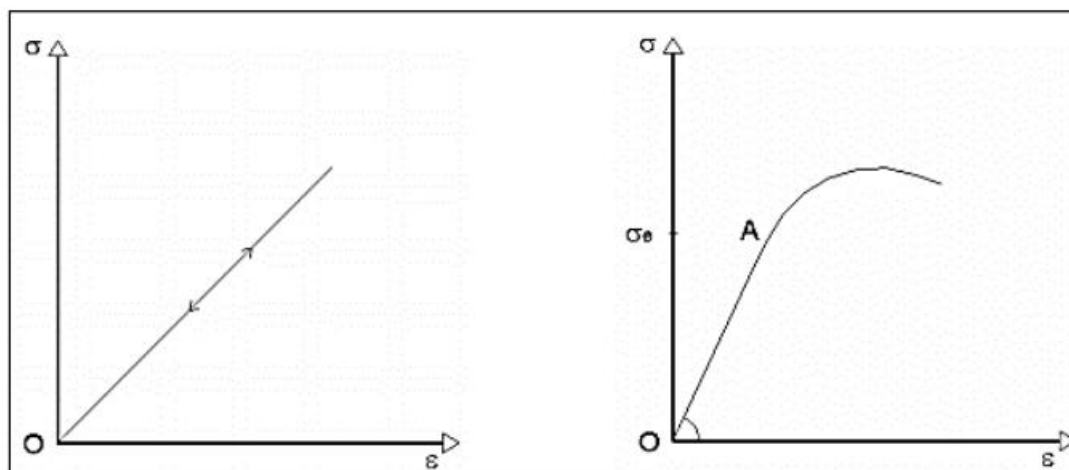
- o Esclarecer os conceitos dos parâmetros γ_z , utilizado em Norma para análise de estabilidade global e o parâmetro FAVT, exclusivo do sistema computacional TQS;
- o Modelar a estrutura com o uso do software e comparar os parâmetros de estabilidade global à medida em que o índice de esbeltez dos pilares é alterado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Análise Linear

Em uma análise linear considera-se que a relação da tensão-deformação do material é uma constante proporcional, denominada de módulo de elasticidade (E). Robert Hooke, cientista inglês, foi o primeiro a demonstrar experimentalmente essa relação. Todo material apresenta comportamento elástico, isto é, mesmo após sofrer certa tensão voltam ao seu estado inicial, mas apenas até um certo ponto, como visto na figura 1.

Figura 1: Gráfico tensão-deformação

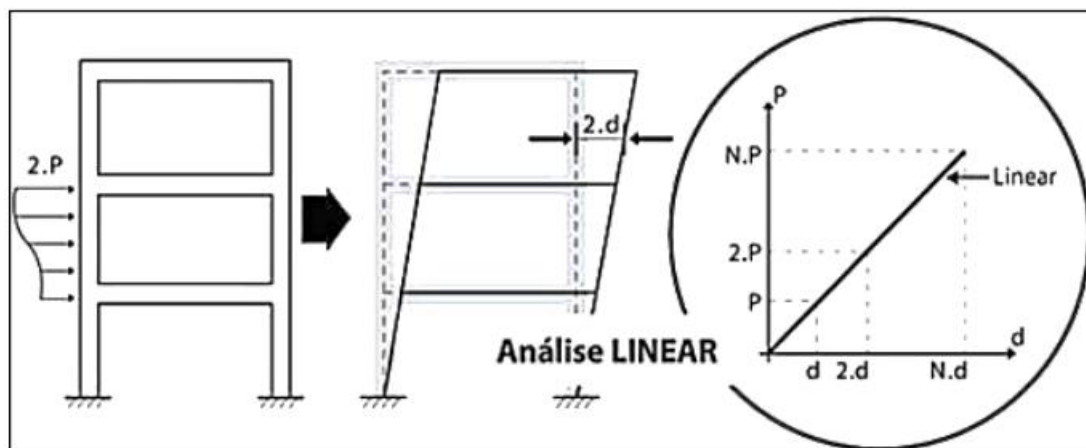


Fonte: Fontes (2005).

O primeiro gráfico da figura acima representa o perfeito comportamento linear elástico do material, isto é, a deformação é proporcional à tensão sofrida. O segundo gráfico representa o material que tem comportamento linear até a tensão σ_e , onde deixa de ser linear.

O comportamento de uma estrutura numa análise linear é proporcional às tensões aplicadas, isto é, o deslocamento da estrutura é proporcional aos esforços sofridos pela estrutura. Kimura (2007) ilustra esse efeito na figura 2.

Figura 2: Análise linear



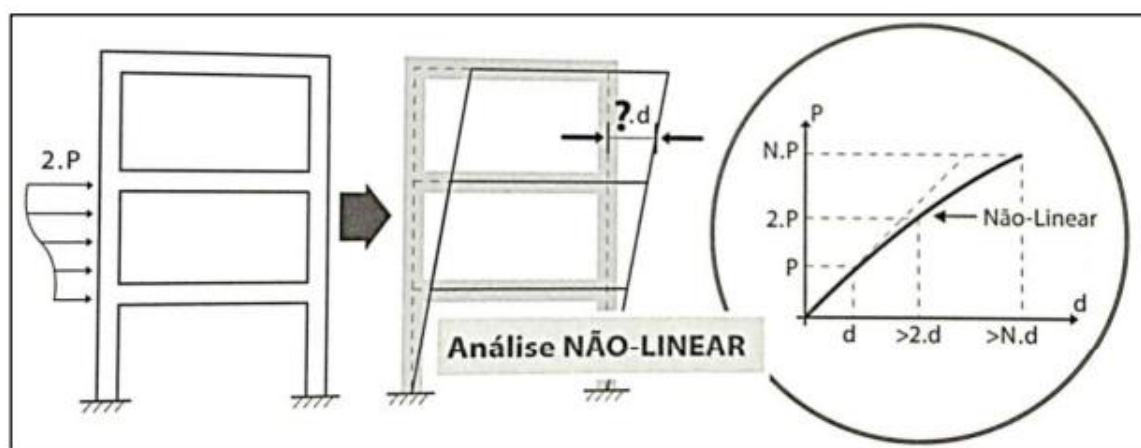
Fonte: Kimura (2007)

Percebe-se que o deslocamento “2.d” é proporcional à tensão “2.P”.

2.2 Análise não-linear

Kimura (2007) explica que a análise não-linear é basicamente uma forma de avaliação onde o deslocamento da estrutura não é proporcional aos esforços aplicados. A figura 3 ilustra essa situação.

Figura 3: Análise não-linear



Fonte: Kimura (2007)

O deslocamento da estrutura é desproporcional frente aos esforços “2.P”, como visto na figura 3, logo, não é possível estabelecer uma constante proporcional de tensão-deformação em análises não lineares.

O concreto armado apresenta comportamento não-linear por não ser possível definir uma constante de tensão-deformação proporcional, sendo a lei de Hooke inválida para a análise.

Segundo Fontes (2005), o comportamento não-linear do concreto armado se deve à duas não-linearidades: Não-linearidade Geométrica (NLG) e Não-linearidade Física (NLF). Os efeitos que a NLG e NLF geram numa estrutura são chamados de efeitos de segunda ordem. Para a realização da análise dos efeitos de segunda ordem alguns sistemas computacionais existentes facilitam e otimizam o tempo do projetista (PINTO, 2002).

2.3 Não-linearidade Geométrica

A NLG diz respeito à mudança da estrutura no espaço. Toda estrutura durante sua execução sofre deformações, mesmo que pequenas, e este deslocamento representa o comportamento não-linear (KIMURA, 2007).

Ao considerar o efeito não-linear geométrico, os esforços, principalmente, nos pilares, podem sofrer alterações significativas dos momentos fletores devido aos deslocamentos (FONTES, 2005).

Segundo a NBR 6118:2014 Tanto a NLG, quanto a NLF, devem ser consideradas na análise da estabilidade global.

2.4 Não-linearidade Física

A caracterização da NLF no concreto armado deve-se às propriedades intrínsecas dos materiais. Os materiais constituintes do concreto armado sob aplicação de carregamentos se comportam de maneira não linear. O concreto é afetado pelos efeitos da fissuração e fluência, enquanto o aço, apesar de possuir um comportamento mais regular, é afetado pelo efeito de escoamento (LINS, 2013).

O comportamento não linear físico do concreto armado deve ser considerado para a obtenção de uma análise mais realista de um projeto, pois a NLF influencia significativamente a rigidez dos elementos.

O item 15.7.3 da NBR 6118:2014 descreve considerações do efeito da NLF projetos de estruturas reticulares em concreto armado com no mínimo 4 pavimentos. A consideração consiste em minorar a rigidez à flexão dos elementos para

compensação do comportamento não linear do concreto armado. Os valores de rigidez a serem considerados são:

Lajes: $(EI)_{sec} = 0,3 E_{ci} I_c$;

Vigas com $A_{s'} \neq A_s$: $(EI)_{sec} = 0,4 E_{ci} I_c$;

Vigas com $A_{s'} = A_s$: $(EI)_{sec} = 0,5 E_{ci} I_c$;

Pilares: $(EI)_{sec} = 0,8 E_{ci} I_c$

Onde:

$(EI)_{sec}$ = rigidez secante minorada;

I_c = momento de inércia da seção bruta do concreto, inclui-se as mesas colaborantes, quando for o caso;

E_{ci} = módulo de deformação inicial do concreto.

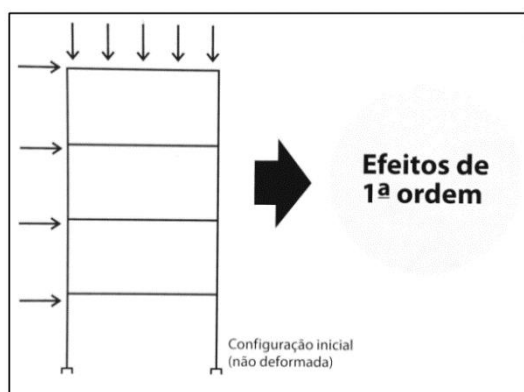
A_s : área da seção transversal da armadura longitudinal de tração

$A_{s'}$: área da seção transversal da armadura longitudinal de compressão.

2.5 Parâmetros de estabilidade

A NBR 6118 (ABNT, 2014) em seu item 15.4.2 classifica as estruturas quanto aos efeitos de segunda ordem em nós fixos e nós móveis. É considerada de nós fixos quando os efeitos globais de segunda ordem são inferiores à 10% dos efeitos de primeira ordem globais (figura 4), e podem ser desprezados para efeitos de cálculo, e é considerada de nós móveis quando os efeitos de segunda ordem superam 10% dos efeitos globais de primeira ordem (figura 5), e devem ser considerados para efeitos de cálculo.

Figura 4 - Análise de primeira ordem



Fonte: Kimura (2007)

Figura 5 - Análise de segunda ordem



Fonte: Kimura (2007)

Segundo Moncayo (2011) “Tratando-se de pilares, quanto mais esbeltos, mais necessária se torna a análise de segunda ordem global, pois são eles os maiores responsáveis por manter a estabilidade global dos edifícios”, logo, pode-se inferir que quanto menor a área da seção transversal do pilar e/ou maior seu comprimento de flambagem, mais instável será o edifício.

2.6 Parâmetro de Instabilidade Alfa (α)

O parâmetro α que foi deduzido em 1967 por Beck e König, baseado na teoria de Euler, e foi definido como parâmetro de instabilidade por Franco (1985), avalia a estabilidade global dos edifícios, porém não estima os efeitos de segunda ordem. Este parâmetro não deve ser usado em análises de estruturas consideravelmente assimétricas ou que sob cargas verticais apresentem deslocamento considerável. Na prática ele é menos usado que o coeficiente γ_z , pois este além de classificar a estrutura quanto aos nós também estima os efeitos globais de segunda ordem (MONCAYO, 2011).

O valor de α é comparado a um valor α_1 , de modo que se $\alpha < \alpha_1$, a estrutura é considerada de nós fixos, e se $\alpha \geq \alpha_1$, de nós móveis (MONCAYO, 2011). O valor de α_1 é prescrito no item 15.5.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014) e é definido pela estrutura de contraventamento do edifício. Neste trabalho a estrutura de contraventamento é composta exclusivamente por pórticos, logo, o valor de $\alpha_1 = 0,5$.

2.7 Parâmetro γ_z

O parâmetro γ_z é oriundo de tecnologia brasileira, e foi desenvolvido por Franco e Vasconcelos (1991). De acordo com os itens 15.5.3 e 15.7.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014), os valores de γ_z serão considerados se respeitarem a condição $1,0 < \gamma_z \leq 1,1$, onde a estrutura é considerada de nós fixos e os efeitos de segunda ordem podem ser desprezados, e $1,1 < \gamma_z \leq 1,3$, valor limite que classifica a estrutura como nós móveis.

Valores de γ_z inferiores à 1,0 são incoerentes e valores acima de 1,3 indicam instabilidade elevada tornando a estrutura impraticável (MONCAYO, 2011). De acordo com a referida norma os esforços finais (1ª ordem + 2ª ordem) podem ser estimados pela multiplicação dos carregamentos horizontais de primeira ordem, na

combinação de esforços classificada, por $0,95.\gamma_z$, desde que respeite a condição $\gamma_z \leq 1,3$.

O coeficiente γ_z está prescrito na NBR 6118:2014 tendo sua utilização validada para edifícios com no mínimo 4 pavimentos. O valor de γ_z é dado pela expressão da equação 1:

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

Onde:

$\Delta M_{tot,d}$ é o somatório dos momentos de todas as forças horizontais da combinação considerada, com seus valores de cálculo, em relação à base da estrutura;

$M_{1,tot,d}$ é a soma dos produtos de todas as forças verticais atuantes na estrutura, na combinação considerada, com seus valores de cálculo, pelos deslocamentos horizontais de seus respectivos pontos de aplicação, obtidos da análise de primeira ordem.

No item 15.3.1, a NBR 6118 (ABNT, 2014) sugere ainda uma majoração de segurança para os efeitos de segunda ordem onde são usados os coeficientes $\frac{\gamma_f}{\gamma_{f3}}$ na majoração dos esforços, com $\gamma_{f3} = 1,1$. O valor de γ_f é obtido através da multiplicação das parcelas $\gamma_{f1}.\gamma_{f2}.\gamma_{f3}$ encontrados na seção 11.7 da Norma. O software TQS considera a multiplicação dos esforços por $\frac{\gamma_f}{\gamma_{f3}}$ em favor da segurança.

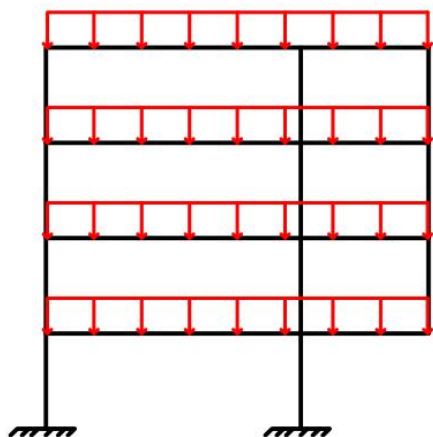
2.8 Coeficiente FAVt

O coeficiente *FAVt* (Fator de amplificação de esforços horizontais ou de vento) é um parâmetro exclusivo do sistema CAD/TQS. Sua formulação é semelhante à do γ_z , mas se diferencia por levar em consideração os deslocamentos horizontais causados por esforços verticais. O parâmetro *FAVt*, semelhantemente ao coeficiente γ_z , também estima os esforços de segunda ordem ao majorar os esforços de primeira ordem multiplicando por $0,95.FAVt$.

Os deslocamentos horizontais gerados por forças verticais são encontrados em grande parte das construções atualmente, onde as estruturas não são simétricas. Por exemplo, um hotel de 5 andares na orla da praia que possui todas as suas sacadas voltadas para o mar. Essas sacadas representam balanços e geram

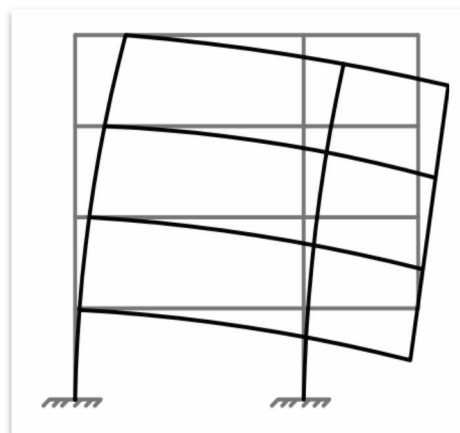
momentos que provocam o deslocamento horizontal devido às cargas verticais. As figuras 6 e 7 demonstram esse caso.

Figura 6 - Cargas uniformemente distribuídas



Fonte: Autoria própria

Figura 7 - Deslocamento devido às cargas



Fonte: Autoria própria

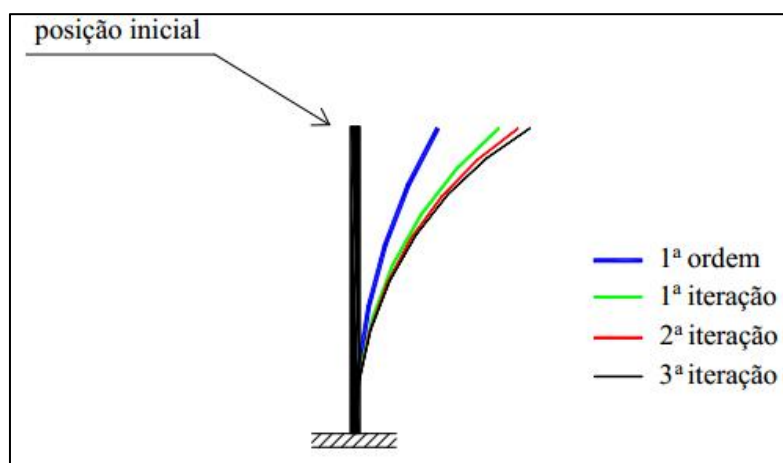
Quando os deslocamentos horizontais provocados por cargas verticais atuam no sentido do vento, $FAVt$ é maior que γz . Em situações contrárias, isto é, quando os deslocamentos horizontais oriundos das cargas verticais atuam em sentido oposto ao do vento (favorecendo a estabilidade), $FAVt$ é menor que γz . Caso o edifício seja perfeitamente simétrico o γz e o $FAVt$ serão idênticos (MONCAYO, 2011).

O software TQS adota o coeficiente $FAVt$ para majorar os esforços de primeira ordem, entretanto, quando na análise da combinação considerada o vento atua em favor da estabilidade, o Sistema Computacional adota automaticamente o γz .

2.9 Coeficiente $RM2M1$ (P- Δ)

Segundo Cicolin (2007), o processo P-Delta é o mais conhecido e refinado para uma análise de segunda ordem global. Lima (2001) afirma que tal processo é formado pela obtenção das deformações e carregamentos horizontais pela análise iterativa de sucessivos acréscimos de esforços aplicados na estrutura, como mostrado na figura 8.

Figura 8 - Iterações do processo P-Delta



Fonte: Lima (2001)

Não restrito apenas às estruturas de concreto armado, P-Delta é um efeito que ocorre em qualquer estrutura onde os elementos estão submetidos a forças axiais, ou seja, forças na direção longitudinal da peça. Pode-se dizer que é um processo que relaciona a carga axial “P” com o deslocamento horizontal “ Δ ” (LOPES, 2005).

Obtido através do deste processo, o coeficiente RM2M1 representa os esforços de segunda ordem em relação aos da primeira. Por ser uma análise não-linear, obtém-se esforços finais que já consideram os efeitos da não-linearidade geométrica, e a avaliação da estabilidade é realizada pós-análise, através do coeficiente (MONCAYO, 2011).

2.10 Índice de esbeltez (λ)

Sendo um dos principais parâmetros se tratando de estabilidade das estruturas, o índice de esbeltez dos pilares se refere exclusivamente às dimensões da peça e está diretamente relacionado à segurança da estrutura (SCADELAI, 2004). O pilar é dimensionado com esbeltez adequada para evitar flambagem ao sofrer esforços de compressão. Basicamente, o índice de esbeltez em peças de concreto armado é um parâmetro do cálculo que avalia o quão suscetível está o pilar de sofrer flambagem, garantindo a eficiência e equilíbrio frente ao ELS e ELU.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) aborda na seção 15.8 as considerações acerca do índice de esbeltez e o define como a razão entre o comprimento de flambagem e o raio de giração do pilar. O índice de esbeltez é dado pela equação 2:

$$\lambda = \frac{le}{i} \quad (2)$$

Onde:

λ : Índice de esbeltez;

le : Comprimento equivalente ou comprimento de flambagem;

i : Raio de giração (m)

O raio de giração é dado pela equação 3:

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (3)$$

Onde:

I : Momento de inércia;

A : Área da seção transversal.

Deste modo, fica evidente que quanto maior o índice de esbeltez de um pilar, mais instável o edifício é e maiores serão seus os efeitos de segunda ordem dessa estrutura.

A classificação dos pilares quanto ao índice de esbeltez pode ser visto na tabela 1.

Tabela 1: Classificação dos pilares quanto ao índice de esbeltez

Índice de esbeltez	Classificação
$0 < \lambda \leq 40$	Pilar robusto, pouco esbelto
$40 < \lambda \leq 90$	Pilar esbelto
$90 < \lambda \leq 140$	Pilar muito esbelto
$140 < \lambda \leq 200$	Pilar excessivamente esbelto
$\lambda < 200$	Não pode ser considerado um pilar

Fonte: Autoria própria, 2023.

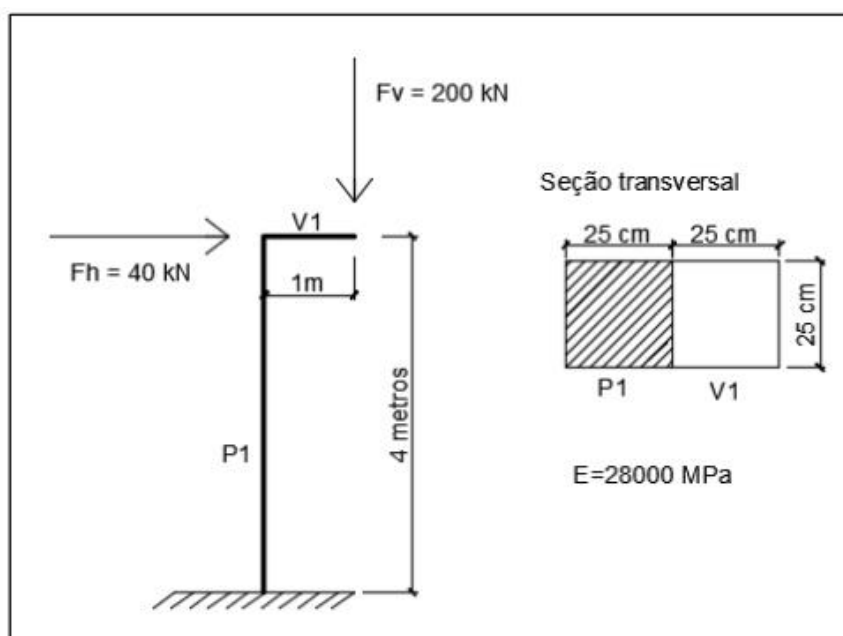
Neste trabalho utiliza-se o software TQS para analisar a influência do índice de esbeltez dos pilares nos parâmetros de estabilidade global α , γ_z , e FAVT.

2.11 Exemplo prático das diferenças entre γz e FAVt

Foi realizado um pequeno exemplo das diferenças práticas no cálculo do γz e FAVt, demonstrando as formas de obtenção de seus cálculos, exemplo este similar ao proposto por Moncayo (2011).

Seja um pilar, em concreto armado, engastado na base e com viga em balanço, com carregamentos verticais e horizontais conforme a figura 9.

Figura 9: Exemplo prático



Fonte: Autoria própria (2023).

O deslocamento da peça gerado pelo esforço horizontal pode ser obtido através da equação (4) da linha elástica para este caso:

$$U_{h,h} = \frac{F_h \cdot L^3}{(3 \cdot E \cdot I)} \quad (4)$$

Onde:

$U_{h,h}$ = deslocamento horizontal causado pela ação horizontal (m);

E = módulo de elasticidade (MPa);

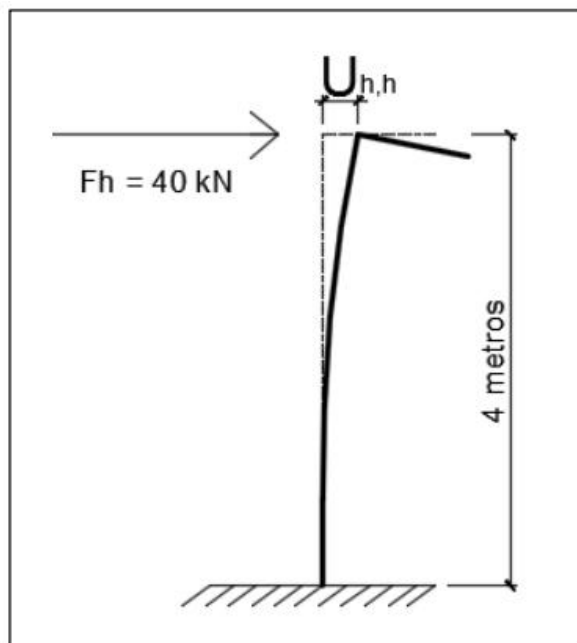
I = momento de inércia da seção (m⁴);

L = comprimento da barra (m);

F_h = força horizontal (tf).

A figura 10 mostra o deslocamento gerado pelo esforço horizontal:

Figura 10: Deslocamento gerado pelo esforço horizontal



Fonte: Autoria própria (2023).

Para a obtenção do $U_{h,v}$ substituiu-se a carga excêntrica por um momento no topo do pilar (figura 12), desse modo, através da equação (5) foi obtido o deslocamento horizontal causado pelos esforços da mesma direção. A figura 11 mostra o deslocamento.

$$U_{h,v} = \frac{M_d \cdot L^2}{(2 \cdot E \cdot I)} \quad (5)$$

Onde:

$U_{h,v}$ = deslocamento horizontal causado pela carga vertical (m);

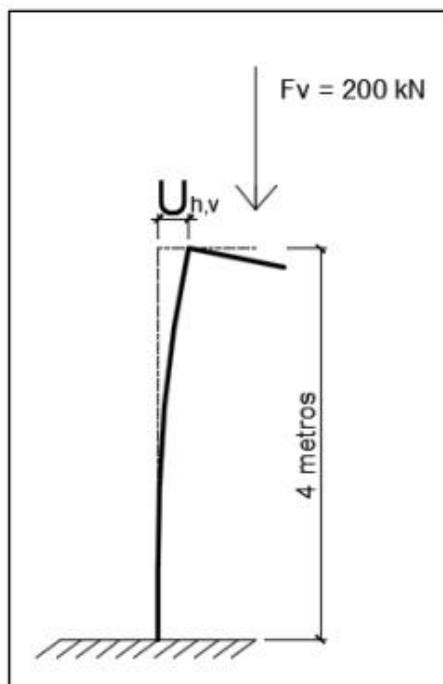
E = módulo de elasticidade (MPa);

I = momento de inércia da seção (m^4);

L = comprimento da barra (m);

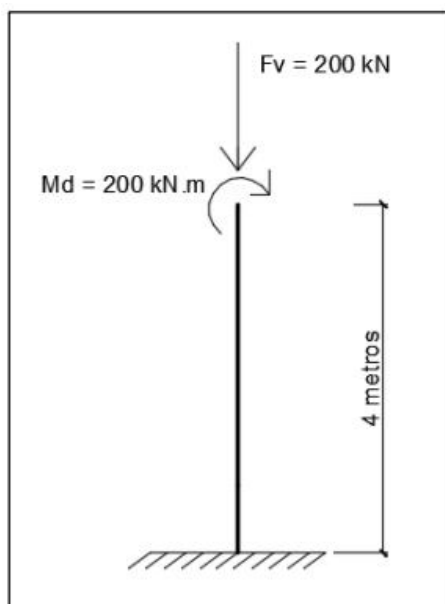
M_d = força horizontal (tf).

Figura 11: Deslocamento causado por esforços verticais



Fonte: Autoria própria (2023).

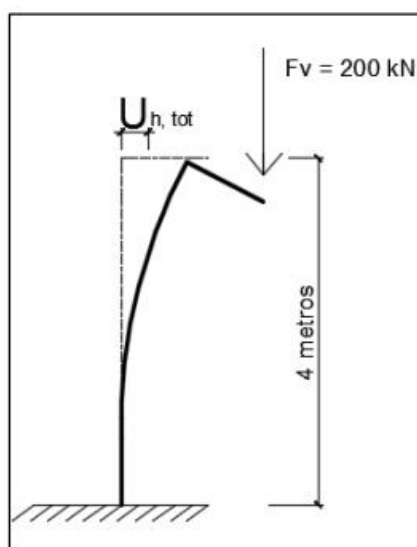
Figura 12: Substituição de carga excêntrica



Fonte: Autoria própria (2023).

Para o cálculo do parâmetro FAVT, a posição final da barra que representa a viga pode ser observada na figura 13, e a tabela 2 mostra o resultado dos cálculos com cada um dos parâmetros de estabilidade.

Figura 13: Posição final da estrutura



Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 2 - Parâmetros de estabilidade

Parâmetro	$U_{h,h}$	$U_{h,v}$	M_{1tot}	ΔM_{tot}	Valor final
Gama-Z	0,0936	-	160	18,72	1,175
FAVT	0,0936	0,1755	160	53,83	1,746

Fonte: Autoria própria (2023).

Ao observar a tabela 1 percebe-se que ao considerar o deslocamento horizontal devido aos esforços verticais o parâmetro de estabilidade global aumenta consideravelmente. No exemplo, o valor de FAVT é 48,6% superior ao de γ_z . Numa análise fria considerando apenas γ_z como parâmetro de estabilidade, o projetista consideraria o parâmetro para fins de majoração dos efeitos de segunda ordem, pois $1,1 \leq \gamma_z \leq 1,3$, no entanto, ao considerar os deslocamentos horizontais oriundos dos esforços verticais com o coeficiente FAVT, a peça seria considerada excessivamente instável.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho trata-se de uma revisão bibliográfica combinado com uma pesquisa experimental.

A pesquisa durou seis semanas e as principais bibliografias utilizadas foram as NBRs 6123 (ABNT, 1988), 6118 (ABNT, 2014) e 6120 (ABNT, 2019), as dissertações e teses foram buscadas nos sites SciElo, Periódicos Capes e Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP (Universidade de São Paulo), com busca pelos seguintes termos: “estabilidade global”, “parâmetros de estabilidade”, “efeitos de segunda ordem”, “efeitos de primeira ordem”, “índice de esbeltez dos pilares” e “estabilidade global em softwares”.

3.1 Descrição do modelo estrutural

Com o uso do software CAD/TQS foi projetado um edifício de 5 pavimentos com sua estrutura de contraventamento sendo composta por pórticos de pilares e vigas, e pé-direito de 3,5 metros, resultando em um comprimento de flambagem de 4,0 metros, para pronunciar a influência do índice de esbeltez nos parâmetros de estabilidade. Utilizando o software estrutural CAD/TQS, foi feita a análise da estabilidade global em um edifício com estrutura em concreto armado convencional.

3.1.1 Características do modelo estrutural

Trata-se de um pequeno edifício com térreo e mais quatro andares, totalizando 5 pavimentos. O prédio possui alvenaria de vedação em todas as suas faces externas e também sobre as divisões internas entre as lajes.

As cargas acidentais foram colocadas de modo aleatório, porém dentro do que se considera razoável para um prédio comercial ou habitacional.

Após todas as características do empreendimento definidas e utilizando a planta baixa em sobreposição foi, então, lançado no software TQS o modelo estrutural.

3.1.2 Características da estrutura

A classe de agressividade ambiental III foi a escolhida, resultando em uma resistência característica do concreto à compressão ≥ 30 MPa e cobrimento mínimo de 40 milímetros para vigas e pilares, 35 milímetros para lajes e 40 milímetros para

elementos em contato com o solo definidos de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014).

3.1.3 Ações na estrutura

O software TQS já apresenta a opção de considerar as cargas permanentes e variáveis de acordo com a NBR 6120 (ABNT, 2019). As cargas sobre as lajes são apresentadas na tabela 3, enquanto as cargas das paredes são apresentadas na tabela 4.

Tabela 3: Distribuição de cargas por laje

Tipo	Descrição	Permanente (tf/m ²)	Acidental (tf/m ²)
APART	Sala/Cozinha/Dormitório	0,1	1,5
COMERC	Área de uso comercial	0,2	0,3

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 4: Cargas por área de parede

Tipo	Descrição	Permanente (tf/m ²)	Acidental (tf/m ²)
BLOCO14	Alvenaria de bloco cerâmico c/14 cm	0,18	-
PARAPEIT	Parapeito de sacada	0,15	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Utilizando os valores que constam nas tabelas 3 e 4, foi modelado no software o projeto estrutural.

3.1.4 Ações do vento

O software disponibiliza em sua interface de fácil compreensão a opção de selecionar as recomendações da NBR 6123 (ABNT, 1988) bem como os demais critérios relacionados à geografia do terreno onde se construirá o edifício. A figura 14 demonstra a interface para dados de entrada.

Figura 14: Entrada de dados para cálculo de esforço devido ao vento

	Ângulo	C.A.	Def Cot	Cot ini
1	90	1.25	Não	0
2	270	1.25	Não	0
3	0	1.16	Não	0
4	180	1.16	Não	0

Fonte: TQS Informática (2023)

Para cálculo de coeficiente de arrasto o software fornece algumas opções de parâmetros:

V0 - Velocidade básica do vento: 45 m/s. A curva de velocidade básica do vento foi definida como alta para pronunciar a mudança nos parâmetros de instabilidade, o mapa da curva de velocidade é mostrado na figura 15;

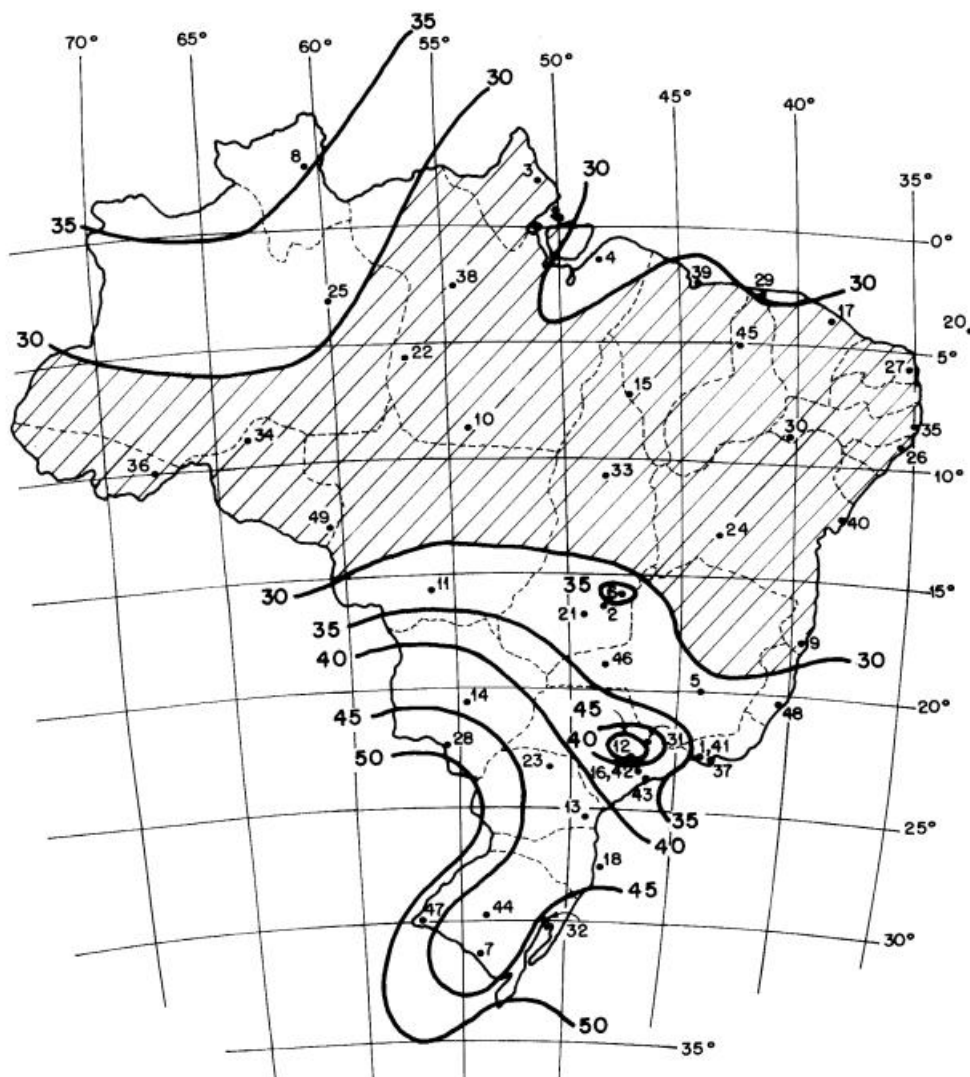
S1 – Fator do relevo no terreno: fator em que considera a variação do relevo do terreno. Adotado o valor igual a 1.00, terreno plano ou fracamente acidentado;

S2 – Categoria de rugosidade IV: terreno com obstáculos numerosos e pouco espaçados. Zona florestal, industrial, urbanizada, parques e subúrbios densos;

S2- Classe da edificação: referente à maior dimensão horizontal ou vertical da edificação. São três classes: classe A para edifícios menos de 20 m, B para edifícios com dimensões entre 20 e 50 metros, e C para edifício com uma das dimensões acima de 50 metros. A edificação ficou enquadrado na classe B para o exemplo;

S3 – Fator estatístico relacionado ao grau de segurança requerido para o ambiente: valor considerado 1.00. Edificações em geral, hotéis, residências, comércio e indústria com alta taxa de ocupação.

Figura 15: Mapa de velocidade básica do vento no Brasil



Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988).

3.2 Discretização do Modelo estrutural

O arranjo estrutural é composto por pilares, vigas e lajes, com a análise realizada por modelo de integração de tais elementos em pórtico espacial. No software, foi adotado o modelo IV - Modelo de vigas e pilares, flexibilizado conforme critérios.

No Modelo IV as vigas e pilares são representadas por barras que simulam a estrutura. Estes recebem os carregamentos horizontais e verticais. As lajes são consideradas diafragmas rígidos, não sofrendo efeitos dos esforços horizontais, apenas dos esforços verticais (TQS Informática, 2023).

As ligações viga-pilar foram consideradas rígidas e os pilares engastados nas fundações. Os efeitos construtivos foram desconsiderados.

Segundo a TQS Informática, nesse modelo a forma de integração entre lajes e o pórtico espacial acontece pela transferência de carga das lajes para as vigas. As lajes são simuladas pelo método de grelhas e as barras das grelhas transferem os esforços para as vigas, constituindo a integração dos elementos no pórtico.

As lajes são de concreto maciço, vigas e lajes de concreto armado. As dimensões dos pilares permaneceram iguais em todas as prumadas para cada análise.

3.2.1 Considerações

Para considerar a não linearidade física do concreto no pórtico espacial através do software, é aplicado coeficientes de rigidez dos elementos. O software assume critérios prescritos no item 15.7.3 da NBR 6118:2014 conforme a figura 16. Tais coeficientes podem ser alterados desde que haja justificativa técnica.

Figura 16: Coeficientes de não linearidade física

Coeficiente de não-linearidade física p/ vigas	0.4
Coeficiente de não-linearidade física p/ pilares	0.8
Coeficiente de não-linearidade física p/ lajes	0.3

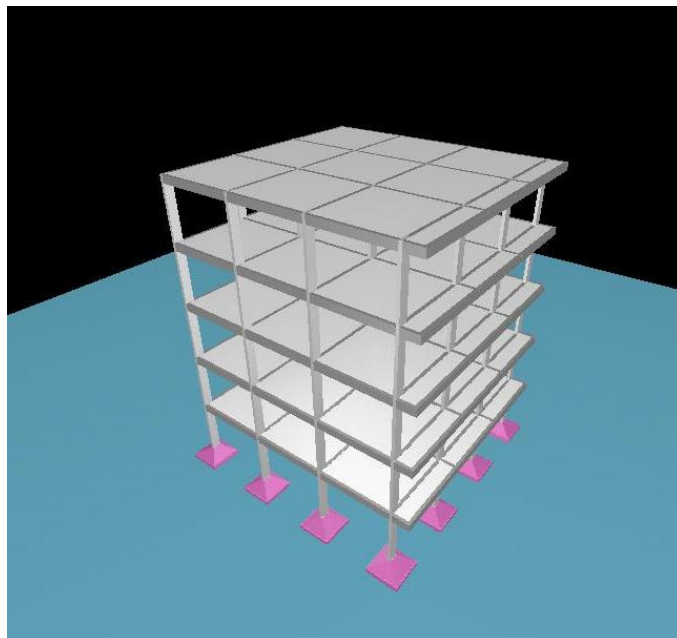
Fonte: TQS Informática, v. 21.4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o processamento o arranjo estrutural apresenta térreo mais 4 pavimentos tipo. A altura total do edifício foi de 20 metros.

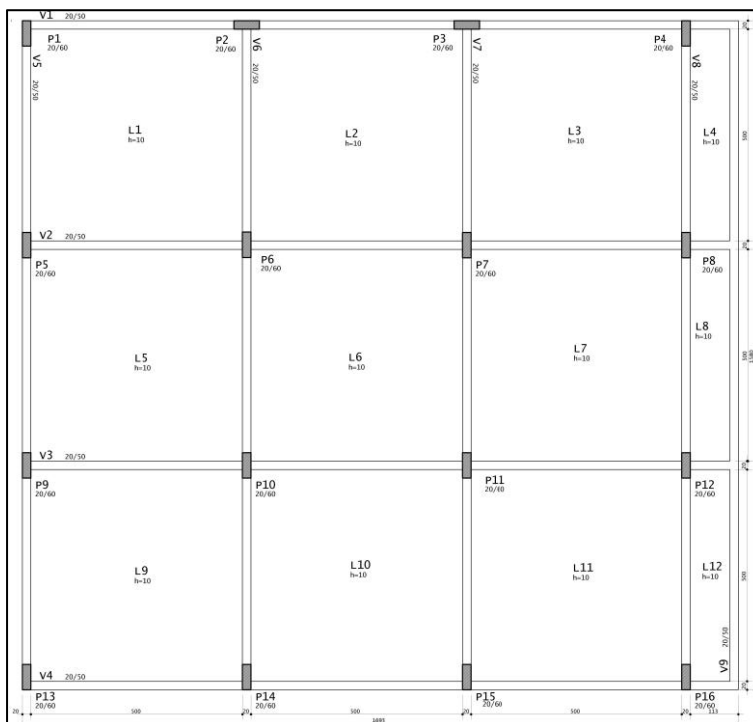
As dimensões das vigas e pilares foram padronizadas. As vigas apresentam seção padronizada de 20cm x 50cm que se repetem em cada um dos sete casos processados, enquanto a seção dos pilares foi alterada para cada um dos casos. O edifício pode ser visto tridimensionalmente na figura 17 e a planta de forma pode ser vista na figura 18.

Figura 17: Vista ortogonal do edifício



Fonte: TQS Informática, v. 21.4.

Figura 18: Planta de forma



Fonte: TQS Informática, v. 21.4.

A tabela 5 apresenta a seção dos pilares e o índice de esbeltez para cada um dos casos processados no software TQS.

Tabela 5: Seção dos pilares de cada caso

Processamento	Base (m)	Altura (m)	Esbeltez (λ)
Caso 1	0,20	0,60	23,09
Caso 2	0,20	0,50	27,71
Caso 3	0,20	0,40	33,77
Caso 4	0,20	0,35	38,11
Caso 5	0,20	0,30	43,88
Caso 6	0,20	0,25	51,96
Caso 7	0,20	0,20	64,09

Fonte: Autoria própria, 2023.

Após os processamentos de todos os casos foi extraído os dados relevantes para este estudo e criado a tabela 6 expondo os resultados. Foram selecionados os parâmetros sempre para o pior caso.

Tabela 6: Parâmetros de estabilidade de todos os casos

Processamento	Esbeltez (λ)	α	γ_z	FAVT
Caso 1	23,09	0,719	1,127	1,132
Caso 2	27,71	0,773	1,152	1,159
Caso 3	33,77	0,849	1,193	1,202
Caso 4	38,11	0,899	1,224	1,233
Caso 5	43,88	0,961	1,267	1,279
Caso 6	51,96	1,071	1,356	1,371
Caso 7	64,09	1,218	1,518	1,539

Fonte: Autoria própria, 2023.

O edifício do estudo tem sua estrutura de contraventamento composta exclusivamente por pórticos, logo, segundo o item 15.5.2 da NBR 6118:2014, os valores de α devem ser menores que α_1 para que a estrutura seja considerada de nós fixos, sendo $\alpha_1 = 0,5$. Nota-se que desde o caso de menor índice de esbeltez (caso 1) a estrutura já é classificada como de nós móveis, tanto pelo parâmetro de

instabilidade α , quanto pelos parâmetros γz e FAVT. A tabela 7 mostra a variação do parâmetro α em relação aos casos processados.

Tabela 7: Variação do parâmetro α

Processamento	Esbeltez (λ)	α	Variação
Caso 1	23,09	0,719	-
Caso 2	27,71	0,773	8,873%
Caso 3	33,77	0,849	9,832%
Caso 4	38,11	0,899	5,889%
Caso 5	43,88	0,961	6,897%
Caso 6	51,96	1,071	11,446%
Caso 7	64,09	1,218	13,725%

Fonte: Autoria própria, 2023.

Ao analisar a tabela 7 percebe-se que a variação do parâmetro α não é linear e o alto valor do parâmetro evidencia a alta instabilidade nos casos de maior índice de esbeltez.

Vale ressaltar que a variação do caso 4 em relação ao caso 3 foi menor que a do caso 3 em relação ao caso 2 porque a partir do caso 3 os pilares tinham a altura de sua seção diminuída em apenas 5 centímetros, ao invés de 10 centímetros como nos casos 1, 2 e 3.

O parâmetro FAVT foi criado e é exclusivo do software TQS, enquanto o parâmetro γz , também fruto de tecnologia brasileira, é o parâmetro previsto na Norma Brasileira de Projetos de Estruturas de Concreto 6118:2014. A tabela 8 mostra a diferença entre os dois parâmetros em cada caso processado.

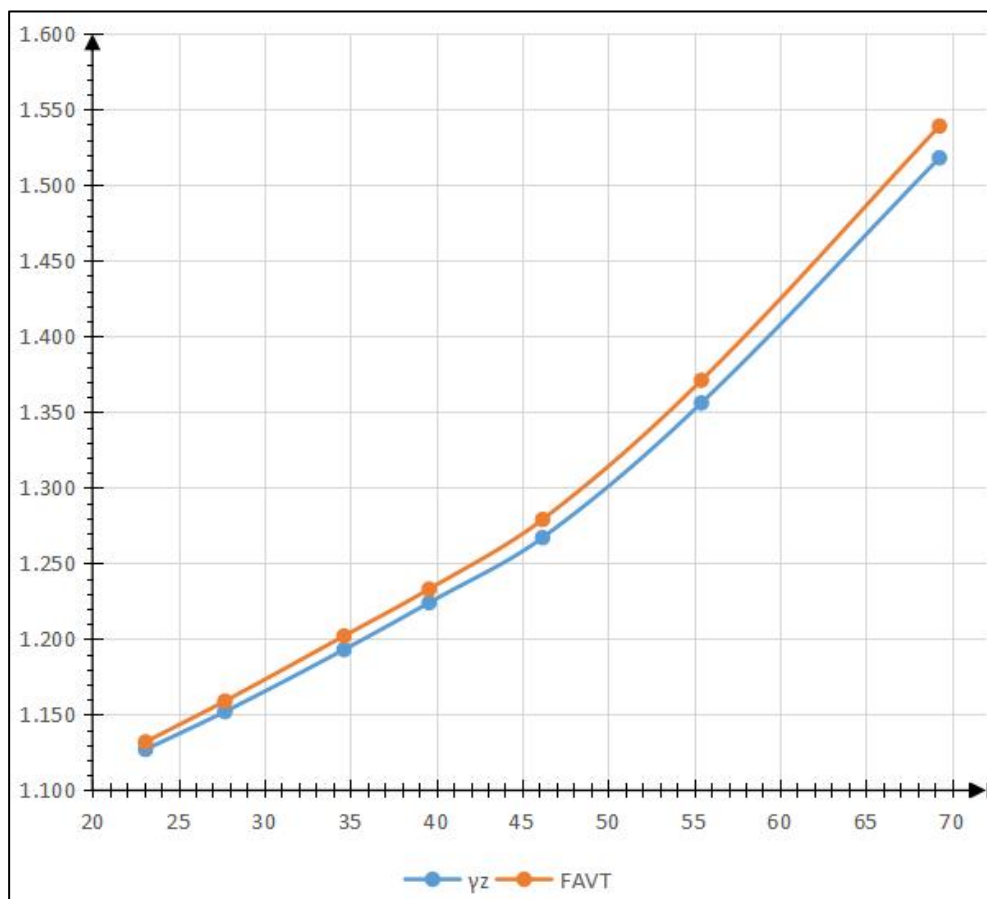
Tabela 8: Variação entre γz e FAVT

Processamento	Esbeltez (λ)	γz	FAVT	Variação
Caso 1	23,09	1,127	1,132	0,444%
Caso 2	27,71	1,152	1,159	0,608%
Caso 3	33,77	1,193	1,202	0,754%
Caso 4	38,11	1,224	1,233	0,735%
Caso 5	43,88	1,267	1,279	0,947%
Caso 6	51,96	1,356	1,371	1,106%
Caso 7	64,09	1,518	1,539	1,383%

Fonte: Autoria própria, 2023.

O gráfico 1 apresenta a influência do índice de esbeltez sobre os parâmetros de estabilidade γ_z e FAVT.

Gráfico 1: Índice de esbeltez x parâmetros de estabilidade



Fonte: Autoria própria, 2023.

Com o aumento do índice de esbeltez a diferença entre o parâmetro FAVT e γ_z foi se expandindo. Nos casos de pilares com índice de esbeltez < 40 (robusto, pouco esbelto) a diferença é inferior a 1% pode ser desprezada. Também vale ressaltar que a variação entre o caso 4 e 3 foi menor que a variação entres o casos 3 e 2, pois a partir do caso 3 a altura da seção dos pilares passou a ser diminuída em 5 centímetros.

Nos casos de índice de esbeltez > 40 (pilar esbelto) a diferença entre os parâmetros de estabilidade ultrapassam 1% (exceto no caso 5), e deveriam ser levados em conta pelo projetista.

No entanto, nestes casos de maior índice de esbeltez os valores dos parâmetros são maiores que 1,3, o que indica alta instabilidade e provável inexequibilidade do projeto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pilares com índice de esbeltez robustos, pouco esbeltos ($\lambda < 40$) apresentam a melhor situação para o equilíbrio estrutural, próximo ao limite do que se considera um projeto exequível, com o parâmetro de estabilidade global $\gamma z < 1,3$.

Para os casos com índice de esbeltez classificados como esbeltos ($40 < \lambda < 90$), exceto o caso 5 cujo índice de esbeltez é 46,19, os parâmetros de estabilidade global demonstram alta instabilidade e provável inexecuibilidade, de tal modo que alterar o índice de esbeltez dos pilares para classificações ainda mais esbeltas sequer se fez necessário para este estudo.

Em questão de segurança o parâmetro FAVT mostrou-se mais apropriado, o que era esperado por conta de seu próprio conceito. O parâmetro γz , método já muito estudado, também mostrou resultados suficientes não contendo variações consideráveis em relação ao parâmetro FAVT para os casos exequíveis.

O parâmetro FAVT é diretamente influenciado pelas cargas verticais, deste modo, a depender do modo de uso da edificação pode ser necessário diminuir ainda mais a esbeltez dos pilares, a fim de propiciar segurança e equilíbrio à estrutura.

Em projetos arquitetônicos contemporâneos, onde os pilares estão cada vez mais esbeltos e os vãos e balanços maiores, o parâmetro FAVT mostra-se mais indicado por indicar a maior influência das peças mais esbeltas.

A incorporação do software como suporte para o projetista mostra-se competente para projeção e análise estrutural, pois os resultados das tensões atuantes na estrutura são rapidamente conhecidas. Vale ressaltar que é imprescindível ao projetista estudos aprofundados acerca dos critérios de entrada do projeto para que a modelagem seja o mais fidedigna possível à estrutura real.

Concluiu-se que, apesar dos pilares serem classificados quanto a esbeltez em quatro categorias, por segurança da estrutura e do próprio projetista, desde o pré-dimensionamento de estruturas de concreto armado é sugerido que os pilares não possuam índice de esbeltez acima da primeira classificação, isto é, superior a 40, com o intuito de garantir a estabilidade do edifício e segurança aos usuários.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

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 6123 – Forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

CARMO, Regina. Maria. Dos Santos. Efeitos de segunda ordem em edifícios usuais de concreto armado. 1995. 112 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP. 1995. Disponível em: < <http://goo.gl/tnvIT1> > Acessado 04/07/2023

CICOLIN, Luiz Antonio Betin. Estabilidade em edifícios de concreto armado em lajes planas. 2007. 84 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 2007. Disponível em: < <http://goo.gl/zFcmOv> > Acessado em 07/07/2023

FRANCO, M. (1985). Problemas de estabilidade nos edifícios de concreto armado. In: Reunião Anual do Ibracon: Colóquio sobre Estabilidade Global das Estruturas de Concreto Armado, São Paulo, 1985. Anais...

FONTES, Fernando Fernandes. Análise estrutural de elementos lineares segundo a NBR 6118:2003. 2005. 120fls. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 2005. Disponível em: < <http://goo.gl/SL7544> > Acessado em 21/08/2023

KIMURA, Alio. Informática aplicada em estruturas de concreto armado: cálculos de edifícios com o uso de sistemas computacionais. 1º Ed. São Paulo: Editora PINI LTDA, 2007.

LIMA, Juliana Soares. Verificações da punção e da estabilidade global de edifícios de concreto: desenvolvimento e aplicação de recomendações normativas. 2001. 225p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 2001. Disponível em: < <http://goo.gl/vPpDB1> > Acessado em 12/08/2023

LINS, Fernando de Faria Vacchio. Contribuição à avaliação da estabilidade global e pré-dimensionamento de pórticos planos em concreto pré-moldado. 2013. 203f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 2013. Disponível em: < <http://goo.gl/u6wC1m> > Acessado em 15/08/2023

MONCAYO, Wiston Junior Zumaeta. Análise de segunda ordem global em edifícios com estrutura de concreto armado. 2011. 221 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 2011. Disponível em: < <http://goo.gl/vi1k2A> > Acessado em 02/07/2023

PINTO, Rivelli da Silva. Análise não-linear das estruturas de contraventamento de edifícios em concreto armado. 2002. 189p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP. 2002. Disponível em: < <http://goo.gl/yQr2Dr> > Acessado em 27/09/2023

SCADELAI, Murilo Alessandro. Dimensionamento de pilares de acordo com a NBR 6118:2003. 2004. 136p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 2004.

TQS INFORMÁTICA LTDA. Sistema CAD-TQS – Suporte para o usuário. São Paulo, 2014. Disponível em: < <http://www.tqs.com.br/> > Acessado dia 07/07/2023

WORDELL, Fernando. Avaliação da instabilidade global de edifícios altos. 2003. 91 f. Dissertação de mestrado - Mestrado Profissionalizante em Engenharia da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, RS. 2003. Disponível em: < <http://goo.gl/qwipVB> > Acessado em 12/08/2023