

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

SAVYO LIMA FERREIRA DA SOLEDADE SILVA

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE INSTABILIDADE GLOBAL PARA
EDIFÍCIOS

Jataí
2025



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS JATAÍ

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia - Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho apresentado em evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome completo do autor: SAVYO LIMA FERREIRA DA SOLEDADE SILVA

Matrícula: 20211020260293

Título do trabalho: AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE INSTABILIDADE GLOBAL PARA EDIFÍCIOS

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
- ☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
- ☐ Outra justificativa: _____.

Declaração de distribuição não-exclusiva

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material

cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;

- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

_____, ____/____/____.

Local

Data

(Assinado Eletronicamente)

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Documento assinado eletronicamente por:

- **Savyo Lima Ferreira da Soledade Silva**, 20211020260293 - Discente, em 18/12/2025 18:04:17.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 24/11/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 719587

Código de Autenticação: a560e29ec2



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Av. Presidente Juscelino Kubitschek,, 775, Residencial Flamboyant, JATAÍ / GO, CEP 75804-714
(64) 3514-9580 (ramal: 9580)

SAVYO LIMA FERREIRA DA SOLEDADE SILVA

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE INSTABILIDADE GLOBAL PARA
EDIFÍCIOS**

Trabalho apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Mônica Maria Emerenciano Bueno

Jataí
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)

Silva, Savyo Lima Ferreira da Soledade.

Avaliação dos parâmetros de instabilidade global para edifícios [manuscrito] / Savyo Lima Ferreira da Soledade Silva. - Jataí: IFG, Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, 2025.

xlvi; 47 f.; il.

Orientadora: Prof.^a. Dr.^a. Mônica Maria Emerenciano Bueno.

Inclui referências.

1. Parâmetros de instabilidade global. 2. Coeficiente γ_z . 3. Análise não linear. 4. Efeitos de segunda ordem. 5. Estruturas de nós móveis. I. Bueno, Mônica Maria Emerenciano. II. IFG, Câmpus Jataí. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Téc.: Aquisição e Tratamento da Informação.
Bibliotecária – Rosy Cristina Oliveira Barbosa Sabino – CRB 1/2380 – Câmpus Jataí. Cód. F072/2025-2.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS JATAÍ

Folha de Aprovação

SAVYO LIMA FERREIRA DA SOLEDADE SILVA

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE INSTABILIDADE GLOBAL PARA EDIFÍCIOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Monografia defendida e aprovada, em 24 de novembro de 2025, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Profa. Doutora Mônica Maria Emerenciano Bueno

Presidente da banca / Orientadora

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Doutor Fabrício Ribeiro Bueno

Membro interno

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Engenheiro Civil João Marcello Souza de Moraes

Membro externo

Prefeitura de Jataí

Jataí – GO

2025

Documento assinado eletronicamente por:

- **Fabricio Ribeiro Bueno**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 19/12/2025 15:36:52.
- **João Marcello Souza de Moraes**, João Marcello Souza de Moraes - 214205 - Engenheiro civil - Ifg - Câmpus Jataí (10870883000306), em 19/12/2025 14:42:25.
- **Monica Maria Emerenciano Bueno**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 19/12/2025 14:28:24.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 24/11/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 719584

Código de Autenticação: d0f7547e39



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Av. Presidente Juscelino Kubitschek,, 775, Residencial Flamboyant, JATAÍ / GO, CEP 75804-714
(64) 3514-9580 (ramal: 9580)

AGRADECIMENTO

À Deus, por todas as suas infinitas bênçãos, por guiar meus passos e iluminar meu caminho, fortalecendo-me nas fases de dificuldade e concedendo-me perseverança e sabedoria para superar os desafios.

Agradeço profundamente aos meus pais, Anaídes Lima Ferreira Silva e Célio da Soledade Silva, pela presença constante em minha vida, oferecendo apoio, confiança e incentivo, elementos essenciais para que eu pudesse enfrentar as adversidades e conquistar meus objetivos ao longo de minha trajetória.

Ao meu irmão e colega de turma, Marcello Lima Ferreira da Soledade Silva, pela valiosa colaboração, especialmente pelo suporte durante os estudos, que foi fundamental para a conclusão deste curso.

Aos meus familiares e amigos, pelo encorajamento e pela participação, direta ou indireta, nesta fase significativa da minha vida.

À minha orientadora, Mônica Maria Emerenciano Bueno, pela paciência e didática exemplares, sempre demonstrando disponibilidade e dedicação ao me auxiliar em todas as etapas da execução deste trabalho.

À equipe do software TQS, pela gentileza em fornecer a licença do programa de análise estrutural, ferramenta fundamental para a realização deste projeto com precisão e eficiência.

RESUMO

SILVA, S. L. F. S. (2025). **Avaliação dos parâmetros de instabilidade global para edifícios**. 47 p. Trabalho de conclusão de curso Bacharelado em Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Jataí, 2025.

Com o avanço das tecnologias e dos métodos de análise estrutural, as construções deixaram de ser avaliadas por procedimentos simplificados, passando a utilizar modelos mais precisos e realistas do comportamento dos materiais e das estruturas. Esse progresso viabilizou edificações com geometrias mais complexas, maior diversidade arquitetônica e aumento significativo em altura e área útil, resultando em projetos mais eficientes e com melhor aproveitamento dos espaços.

A NBR 6118 (ABNT, 2023) define os critérios para a verificação da estabilidade global por meio dos parâmetros γ_z e α , essenciais na avaliação dos efeitos de segunda ordem. As análises não lineares representam de forma mais fiel o comportamento estrutural, sobretudo quando há deformações horizontais geradas por ações laterais. Quando essas deformações interagem com cargas verticais, surgem os efeitos de segunda ordem, cuja consideração adequada é fundamental para garantir segurança e desempenho.

Este trabalho tem como objetivo analisar uma edificação de múltiplos pavimentos submetida a diferentes modificações estruturais, a fim de determinar seu grau de instabilidade global por meio do parâmetro γ_z e verificar a necessidade de considerar os efeitos de segunda ordem no dimensionamento. Os resultados mostram que a estabilidade global depende principalmente da geometria da estrutura e da distribuição de rigidez entre seus elementos. O aumento do f_{ck} apresenta efeito limitado, enquanto alterações geométricas, especialmente, o aumento das seções dos pilares, mostram-se significativamente mais eficazes na melhoria da estabilidade.

Palavras-chave: Parâmetros de instabilidade global. Coeficiente γ_z . Análise não linear. Efeitos de segunda ordem. Estruturas de nós móveis.

ABSTRACT

SILVA, S. L. F. S. (2025). **Evaluation of global instability parameters for buildings**. 47 p. Final course work Bachelor's Degree in Civil Engineering, Federal Institute of Education, Science and Technology of Goiás. Jataí, 2025.

With the advancement of technologies and structural analysis methods, constructions have ceased to be evaluated by simplified procedures, and have begun to use more precise and realistic models of the behavior of materials and structures. This progress has enabled buildings with more complex geometries, greater architectural diversity, and a significant increase in height and usable area, resulting in more efficient projects with better use of space.

NBR 6118 (ABNT, 2023) defines the criteria for verifying global stability using the parameters γ_z and α , which are essential in evaluating second-order effects. Nonlinear analyses represent structural behavior more faithfully, especially when there are horizontal deformations generated by lateral actions. When these deformations interact with vertical loads, second-order effects arise, the proper consideration of which is fundamental to ensuring safety and performance.

This work aims to analyze a multi-story building subjected to different structural modifications, in order to determine its degree of global instability using the parameter γ_z and to verify the need to consider second-order effects in the design. The results show that overall stability depends primarily on the geometry of the structure and the stiffness distribution among its elements. Increasing f_{ck} has a limited effect, while geometric changes, especially increasing the cross-sections of the columns, prove to be significantly more effective in improving stability.

Keywords: Global instability parameters. γ_z coefficient. Nonlinear analysis. Second-order effects. Mobile node structures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Palácio do Catete.....	15
Figura 1.2 – Edifício Kingdom Park Residence	15
Figura 2.1 – Diagrama tensão-deformação.....	19
Figura 2.2 – Curva tensão-deformação do aço.....	20
Figura 2.3 – Curva tensão-deformação do concreto.....	21
Figura 2.4 – Estádios de deformação do concreto armado.....	23
Figura 2.5 – Estrutura de nós fixos.....	24
Figura 2.6 – Estrutura de nós móveis.....	25
Figura 2.7 – Tipos de efeitos de 2º ordem.....	26
Figura 2.8 – Imperfeições geométricas.....	29
Figura 3.1 – Planta de fôrma do edifício 1.....	33
Figura 3.2 – Planta de fôrma do edifício 2.....	33
Figura 3.3 - Pilares: P7, P8, P9.....	38
Figura 3.4 - Pilares: P5, P8, P11.....	39
Figura 4.1 – Coeficiente γ_z do edifício 1.....	40
Figura 4.2 – Coeficiente γ_z do edifício 2.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1– Carregamentos verticais.....	35
Tabela 3.2 – Carregamentos horizontais.....	35
Tabela 3.3 – Combinações do TQS/CAD.....	36
Tabela 4.1 – Coeficiente γ_z do edifício 1.....	41
Tabela 4.2 – Coeficiente γ_z do edifício 2.....	42
Tabela 4.3 – Comparativo estrutural entre o edifício 1 e o edifício 2.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABESC	Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ELS	Estado-Limite de Serviço
ELU	Estados-Limite Último
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira
NLF	Não linearidade física
NLG	Não linearidade geométrica
TQS/CAD	Programa computacional para análise de estruturas de concreto armado

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Parâmetro de estabilidade global de estruturas
γ_z	Coefficiente de avaliação dos efeitos globais de segunda ordem
P- Δ	Efeitos globais da NLG/ Método para obter os momentos finais de 2ª ordem
σ	Representa a tensão
ϵ	Representa a deformação específica
σ_E	Limite de elasticidade
σ_p	Limite de escoamento
σ_r	Limite de resistência
$\sigma_{rup'}$	Tensão de ruptura real
σ_s	Tensão no aço
ϵ_s	Deformação específica do aço
f_{yk}	Tensão de escoamento característica do aço
f_{yd}	Tensão de escoamento de cálculo do aço
ϵ_{yd}	Deformação correspondente ao início do escoamento de cálculo
σ_c	É tensão de compressão no concreto
ϵ_c	É deformação específica do concreto
f_{ck}	É resistência característica do concreto
f_{cd}	É resistência de cálculo do concreto
$0,85 f_{cd}$	É tensão máxima convencional de cálculo

ϵ_{c2}	É deformação no pico da curva
ϵ_{cu}	É deformação última (ruptura do concreto)
Htot	Altura total da estrutura, medida a partir do topo da fundação ou de um nível pouco deslocável do subsolo
Nk	Somatório de todas as cargas verticais atuantes na estrutura (a partir do nível considerado para o cálculo de Htot), com seu valor característico
EcsIc	Representa o somatório dos valores de rigidez de todos os pilares na direção considerada
M1,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 cálculo, em relação à base da estrutura
$\Delta M_{tot,d}$	Soma do produto 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 1ª ordem
θ_{1min}	Desaprumo de um elemento vertical contínuo mínimo
θ_a	É o ângulo de desaprumo global equivalente da estrutura, obtido a partir de θ_1 considerando o número de pavimentos (n);
Fd	É o valor de cálculo das ações para combinação última
Fgk	Representa as ações permanentes diretas
Fek	Representa as ações indiretas permanentes, como a retração (Fegk), e as variáveis, como a temperatura (Feqk)
Fqk	Representa as ações variáveis diretas, das quais Fq1k é escolhida como principal

$\gamma_g, \gamma_{eg}, \gamma_q, \gamma_{eq}$	São os coeficientes de segurança aplicados às ações
ψ_{0j}, ψ_{0e}	São os fatores de combinação, utilizados para ponderar a participação ações variáveis nas combinações de cálculo

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 JUSTIFICATIVA.....	16
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1 Objetivo Geral.....	17
1.2.2 Objetivos Específicos.....	17
CAPÍTULO 2 REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1 COMPORTAMENTO NÃO LINEAR.....	18
2.2 NÃO LINEARIDADE FÍSICA E GEOMÉTRICA.....	22
2.3 ESTADOS LIMITES.....	22
2.3.1 Estados limites últimos.....	22
2.3.2 Estados limites de serviço.....	22
2.4 ESTÁDIO DE FLEXÃO DO CONCRETO ARMADO.....	23
2.4.1 Estádio I.....	23
2.4.2 Estádio II.....	24
2.4.3 Estádio III.....	24
2.5 EFEITOS DE SEGUNDA ORDEM: LOCAL, GLOBAL E LOCALIZADO.....	24
2.6 PARÂMETROS DE INSTABILIDADE GLOBAL: ALFA E GAMMA-Z.....	26
2.7 FATORES QUE INFLUENCIAM NA ESTABILIDADE.....	28
2.7.1 Ações atuantes.....	28
2.7.1.1 Ações horizontais.....	28
2.7.1.2 Ações verticais.....	30
2.7.2 Rigidez.....	30
2.7.3 Interação solo-estrutura.....	30
CAPÍTULO 3 METODOLOGIA.....	32
3.1 APRESENTAÇÃO DAS EDIFICAÇÕES.....	32
3.2 COMBINAÇÕES DE CARREGAMENTO.....	34
3.3 CARREGAMENTOS.....	34
3.3.1 Carregamento vertical.....	34

3.3.2 Carregamento horizontal.....	35
3.4 COMBINAÇÕES DE CARREGAMENTO CONSIDERADAS NO SOFTWARE TQS/CAD.....	36
3.5 DADOS PARA O DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA.....	37
CAPÍTULO 4 RESULTADOS.....	40
4.1 EDIFÍCIO 1.....	40
4.2 EDIFÍCIO 2.....	41
4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS EDIFÍCIOS 1 E 2.....	43
CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
REFERÊNCIAS.....	46

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

Segundo o ABESC (GIL, 2024), no ano de 2022, o Brasil produziu 43 milhões de metros cúbicos de concreto, movimentando cerca de 26 bilhões de reais no mercado da construção civil. Isso demonstra que as estruturas de concreto armado são amplamente executadas no país. Ao longo dos séculos, as construções feitas com esse sistema construtivo se tornaram cada vez mais complexas, pois, antes, as edificações apresentavam poucos pavimentos, muitos pilares e vigas, e os muros de vedação eram preenchidos com alvenaria para que as normas de resistência fossem atendidas, como é o caso do Palácio do Catete, construído em 1867, situado na cidade do Rio de Janeiro.

Atualmente, com o intuito de garantir mais área útil, economia de material e criar novos estilos arquitetônicos, as construções se tornaram mais altas, com seções de pilares menores, sendo comum que os muros de vedação sejam feitos com vidro ou drywall. Um exemplo disso é o Edifício Kingdom Park Residence, construído em 2021, situado na cidade de Goiânia.

Dessa forma, ao longo do tempo, os cálculos de dimensionamento estrutural passaram por uma série de atualizações e aprimoramentos, especialmente no que se refere à verificação do deslocamento da estrutura. Essas mudanças foram motivadas pela necessidade de acompanhar as novas demandas construtivas, a evolução das técnicas de projeto e a incorporação de métodos mais precisos de análise. A Figura 1.1 apresenta o Palácio do Catete, ao passo que a Figura 1.2 exhibe o edifício Kingdom Park Residence.

Figura 1.1 – Palácio do Catete



Fonte: MACRI (2017)

Figura 1.2 – Edifício Kingdom Park Residence



Fonte: SIM INCORPORADORA (2018)

Na análise estrutural de edifícios de múltiplos pavimentos, os efeitos associados à rigidez da estrutura são classificados em duas categorias. Quando se considera que os nós permanecem indeformáveis, trata-se de efeitos de primeira ordem. Já em construções mais esbeltas ou flexíveis, em que os nós apresentam deslocamentos significativos, os efeitos de segunda ordem tornam-se relevantes. O comportamento das edificações em concreto armado é influenciado por diversos fatores que impactam diretamente sua resposta às ações externas, destacando-se a não linearidade física e geométrica, a ação dos ventos, a assimetria dos carregamentos e os desaprumos inevitáveis de execução.

A norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2023) – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento estabelece os critérios de análise considerando tanto a configuração geométrica inicial quanto a deslocada da estrutura, aplicáveis a edificações de pequeno, médio e grande porte. A verificação da estabilidade global pode ser conduzida por métodos simplificados, baseados nos parâmetros de instabilidade α e γ_z , ou por abordagens mais avançadas, como o método P- Δ e a análise de segunda ordem detalhada (OLIVEIRA, 2009).

Nesse contexto, o uso de programas computacionais especializados, como o TQS/CAD e o Eberick da AltoQi, torna-se indispensável para a engenharia civil contemporânea. Esses softwares incorporam, progressivamente, critérios normativos em seus processamentos, permitindo modelagens mais realistas e dimensionamentos estruturais mais precisos. Assim, asseguram o atendimento às exigências da NBR 6118 (ABNT, 2023) e contribuem para maior produtividade, qualidade e segurança nas obras em concreto armado.

1.1 JUSTIFICATIVA

Segundo dados do IBGE (BELANDI, 2024), a proporção de brasileiros que viviam em apartamentos subiu de 7,6%, em 2000, para 8,5% em 2010, chegando a 12,5% em 2022, enquanto cerca de 84,8 % residiam em casas nesse último ano. Esse crescimento reflete o fenômeno da verticalização urbana, impulsionado pelo aumento populacional nas cidades e pela necessidade de otimizar o uso do solo, reduzindo a distância entre moradia, serviços e áreas de lazer. Como resultado, observa-se uma crescente demanda por edifícios altos e esbeltos, principalmente em grandes centros urbanos, como estratégia para atender às dinâmicas populacionais e conter a valorização excessiva dos imóveis.

A ação dos ventos representa o principal carregamento horizontal capaz de comprometer a estabilidade de estruturas elevadas. Entretanto, a assimetria geométrica das edificações deve ser cuidadosamente considerada, pois pode intensificar os efeitos do vento e potencializar deslocamentos laterais significativos (WORDELL, 2003). Para que os edifícios alcancem múltiplos pavimentos sem prejuízos à segurança, funcionalidade e estética, torna-se indispensável a análise adequada dos efeitos de segunda ordem.

A norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2023) propõe dois parâmetros simplificados para a avaliação da instabilidade global: o parâmetro de instabilidade α e o coeficiente γ_z , ambos empregados como critérios de verificação dos efeitos globais de segunda ordem. Dentre eles, o γ_z assume papel de destaque nacional devido à sua ampla adoção em softwares de cálculo estrutural, como o Eberick da AltoQi e o TQS/CAD. Sua relevância decorre da aplicabilidade prática e da eficaz aproximação dos momentos fletores nos pilares, sem demandar elevado grau de detalhamento na modelagem geométrica da estrutura.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

A finalidade deste projeto é analisar o comportamento de duas edificações com múltiplos pavimentos a partir dos parâmetros de instabilidade global no programa TQS/CAD.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar, com o auxílio do software TQS/CAD, a influência das variações no f_{ck} , nas dimensões das seções (largura e altura) e na posição dos pilares sobre o coeficiente de instabilidade global γ_z em dois edifícios de múltiplos pavimentos.
- Estudar como os efeitos de segunda ordem atuam em dois edifícios com vários andares;
- Fazer comparações entre os resultados, com o propósito de identificar a melhor situação de estabilidade global, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023);

CAPÍTULO 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, serão abordados os conceitos relacionados à estabilidade global de estruturas de concreto armado, com foco na verificação dos parâmetros de instabilidade global.

2.1 COMPORTAMENTO NÃO LINEAR

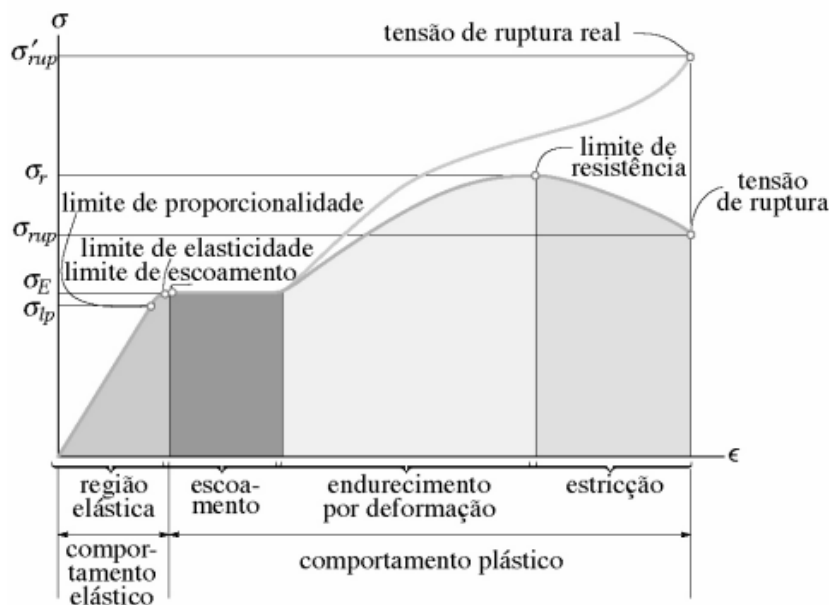
A elasticidade é uma das propriedades fundamentais dos materiais, definida como a capacidade de um corpo retornar à sua forma e dimensões originais após a aplicação e subsequente remoção de esforços externos, tais como tração ou compressão. Este comportamento é essencial para o desempenho estrutural, garantindo que as peças resistam às solicitações sem deformações permanentes. Segundo Botelho (2015, p.124), “E (módulo de elasticidade) é, portanto, a principal característica de um material, no tocante à sua deformabilidade (alongamento ou encurtamento), quando este está sendo esticado (tracionado) ou apertado (comprimido)”. No diagrama tensão-deformação, a elasticidade manifesta-se na forma de uma relação linear e proporcional entre tensão e deformação, na qual o incremento da tensão resulta em um aumento proporcional da deformação. Este comportamento é descrito matematicamente pela lei de Hooke.

A linearidade do comportamento é válida apenas dentro da denominada zona elástica, que corresponde à faixa de solicitações em que o material não apresenta deformações permanentes. Quando a tensão aplicada excede o limite elástico, o material transita para a zona elástico-plástica, onde a proporcionalidade entre tensão e deformação deixa de ser mantida. Nesta região, o material começa a escoar, ocorrendo rearranjos microestruturais internos que permitem deformações significativas mesmo sob pequenas variações de tensão. Esse fenômeno caracteriza o comportamento não linear do material, tornando indispensável sua consideração para a análise estrutural, sobretudo em projetos submetidos a cargas axiais elevadas.

Compreender a transição da zona elástica para a zona plástica é fundamental para o dimensionamento seguro de elementos estruturais. Na engenharia civil, o conhecimento preciso desses limites permite definir a capacidade de carga, prever possíveis falhas e otimizar o uso do material, evitando tanto a subutilização quanto o colapso estrutural. Além disso, o estudo detalhado do comportamento não linear é importante para o desenvolvimento de métodos de análise avançados, que consideram o escoamento progressivo do material e a

redistribuição interna de esforços, oferecendo uma avaliação mais realista da resposta estrutural frente a carregamentos complexos. A Figura 2.1 ilustra a deformação de um material quando submetido a uma tensão.

Figura 2.1 – Diagrama tensão-deformação



Fonte: HIBBELER (2000)

Em que:

Eixo vertical (σ): Representa a tensão (força por unidade de área),

Eixo horizontal (ϵ): Representa a deformação específica (mudança no comprimento por unidade de comprimento),

Limite de elasticidade (σ_E): Ponto que, se ultrapassado, o material começa a sofrer deformação plástica (permanente). Se a tensão for removida antes deste ponto, o material retorna à sua forma original,

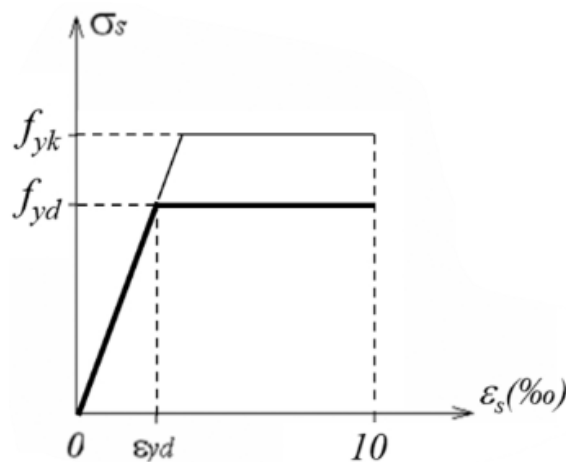
Limite de escoamento (σ_{lp}): Ponto a partir do qual o material começa a deformar-se plasticamente sem um aumento significativo da tensão,

Limite de resistência (σ_r): A tensão máxima que o material pode suportar. Também conhecido como tensão máxima de tração,

Tensão de ruptura real (σ_{rup}'): Tensão no momento da fratura, calculada usando a área de seção transversal real que diminui devido à estricção.

Ao tratar do concreto armado, as análises não lineares representam melhor a realidade dos seus deslocamentos, já que a estrutura é composta por aço e concreto, materiais que apresentam comportamentos distintos diante dos esforços aplicados. Quando uma viga é submetida a uma carga vertical, as fibras no meio do vão, da parte inferior, passam a ser tracionadas, enquanto as da região superior sofrem compressão. O aço tem como função principal resistir à tração, pois, nas vigas, as fissuras surgem justamente na zona tracionada, onde o concreto possui baixa resistência; o metal alonga-se até atingir o escoamento. A Figura 2.2 apresenta o comportamento simplificado das barras de aço tracionadas, cuja deformação última é limitada a 10 ‰ (equivalente a 10 mm por metro), conforme estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2023).

Figura 2.2 – Curva tensão-deformação do aço



Fonte: KIMURA (2022)

Em que:

σ_s : Tensão no aço;

ϵ_s : Deformação específica do aço;

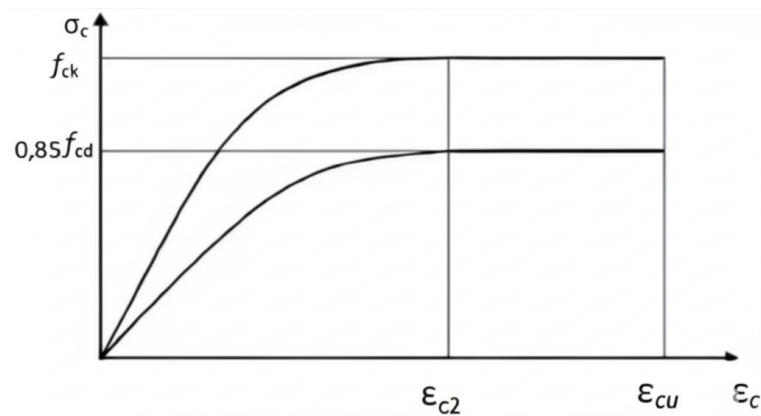
f_{yk} : Tensão de escoamento característica do aço;

f_{yd} : Tensão de escoamento de cálculo do aço;

ϵ_{yd} : Deformação correspondente ao início do escoamento de cálculo.

Por sua vez, o concreto se encarrega de suportar a compressão por meio do encurtamento das fibras superiores. No caso dos pilares, a flexão não é a principal causa do aparecimento de fissuras; a compressão predomina, já que esses elementos devem suportar o peso das cargas verticais que incidem sobre eles. A Figura 2.3 mostra a curva tensão-deformação do concreto ao serem submetidos aos esforços solicitantes de compressão.

Figura 2.3 – Curva tensão-deformação do concreto



Fonte: KIMURA (2022)

σ_c é tensão de compressão no concreto;

ϵ_c é deformação específica do concreto;

f_{ck} é resistência característica do concreto;

f_{cd} é resistência de cálculo do concreto;

$0,85 f_{cd}$ é tensão máxima convencional de cálculo;

ϵ_{c2} é deformação no pico da curva;

ϵ_{cu} é deformação última (ruptura do concreto).

Dessa forma, o concreto, por ser altamente resistente a esse tipo de solicitação, faz com que as fissuras sejam mais frequentes em vigas do que em pilares.

2.2 NÃO LINEARIDADE FÍSICA E GEOMÉTRICA

O comportamento não linear de uma estrutura de concreto armado pode ser classificado em duas categorias distintas: não linearidade física (NLF) e não linearidade geométrica (NLG). A NLG manifesta-se quando a estrutura apresenta deslocamentos significativos que alteram sua configuração original, de modo que a posição inicial não é recuperada em virtude das tensões aplicadas. Nessa condição, as ações e reações distribuem-se de forma não proporcional ao longo dos elementos estruturais. Por sua vez, a NLF está associada às propriedades constitutivas dos materiais, refletindo a maneira como o aço e o concreto respondem às solicitações, considerando-se os fenômenos de fissuração, plastificação e variação do módulo de elasticidade (BUENO, 2014).

2.3 ESTADOS LIMITES

Os estados limites estão diretamente relacionados ao desempenho de uma edificação projetada para uma finalidade específica, visto que toda estrutura deve atender aos requisitos de durabilidade, segurança e funcionalidade, garantindo tanto a integridade física dos usuários quanto a vida útil prevista no projeto. Quando tais critérios não são satisfeitos, considera-se que a construção atingiu o estado limite, o qual se subdivide em duas categorias: o Estado Limite Último (ELU) e o Estado Limite de Serviço (ELS) (CAMACHO, 2008).

2.3.1 Estados limites últimos

O ELU corresponde à condição de ruptura ou colapso estrutural, caracterizando o ponto em que a edificação perde sua capacidade resistente. Por essa razão, ao ser identificado em uma construção, impõe-se a paralisação imediata, parcial ou total da estrutura (CAMACHO, 2008).

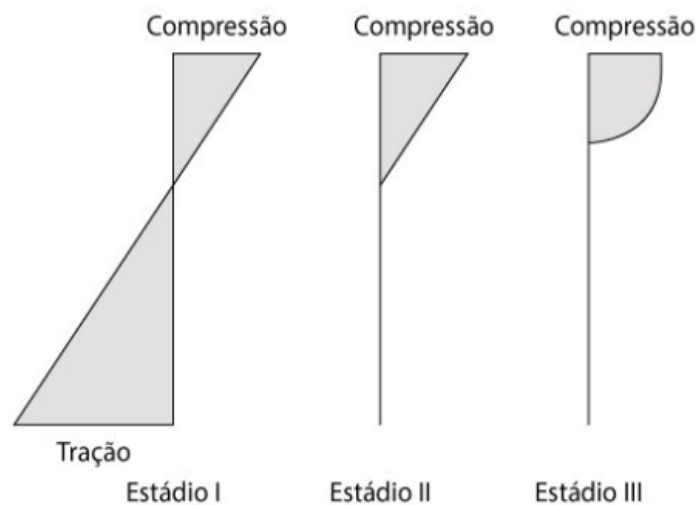
2.3.2 Estados limites de serviço

O ELS manifesta-se quando a estrutura apresenta comprometimento da durabilidade e do desempenho funcional, resultando em problemas como redução do conforto dos usuários, prejuízos estéticos e limitações na sua utilização (CAMACHO, 2008).

2.4 ESTÁDIO DE FLEXÃO DO CONCRETO ARMADO

Os estádios de flexão simples de uma viga vão se caracterizando na medida em que uma força vertical é aplicada de forma crescente na mesma, até chegar no ELU. Esse caminho vai definir os Estádio I, Estádio II e Estádio III do concreto armado. A Figura 2.4 ilustra cada um deles.

Figura 2.4 – Estádios de deformação do concreto armado



Fonte: MOURA (2019)

Compreender o ELU e o ELS é essencial para o dimensionamento seguro e eficaz de elementos estruturais em concreto armado. O ELU assegura que a capacidade resistente da estrutura não seja excedida, reduzindo o risco de colapso. Por sua vez, o ELS garante desempenho adequado em termos de funcionalidade e durabilidade, controlando aspectos como fissuração, deformações excessivas e vibrações, conforme estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2023).

2.4.1 Estádio I

O Estádio I ocorre quando uma ação de baixa intensidade é aplicada à viga, produzindo deformações proporcionais ao carregamento. Por isso, o comportamento estrutural nessa fase é considerado linear.

2.4.2 Estádio II

O Estádio II é marcado pela fissuração do concreto tracionado, fazendo com que a armadura assumam a tração. O aço pode entrar em regime não linear, enquanto o concreto comprimido ainda trabalha de forma quase linear.

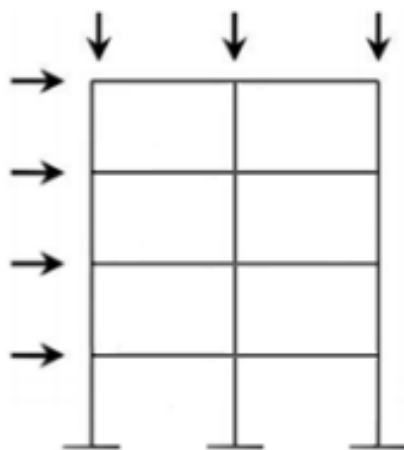
2.4.3 Estádio III

Quando o concreto comprimido atinge sua resistência máxima, seu comportamento deixa de ser linear, e as tensões se redistribuem devido à plastificação (KIMURA, 2022). No Estádio III, o comportamento tanto do aço quanto do concreto é não linear, indicando o ELU, e marca o fim da ductilidade da estrutura, com risco de colapso.

2.5 EFEITOS DE SEGUNDA ORDEM: LOCAL, GLOBAL E LOCALIZADO

Ao analisar uma estrutura a qual seus carregamentos horizontal e vertical não são capazes de provocar grandes deformações, os efeitos de primeira ordem devem ser considerados, observados na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Estrutura de nós fixos



Fonte: GONÇALVES (2017)

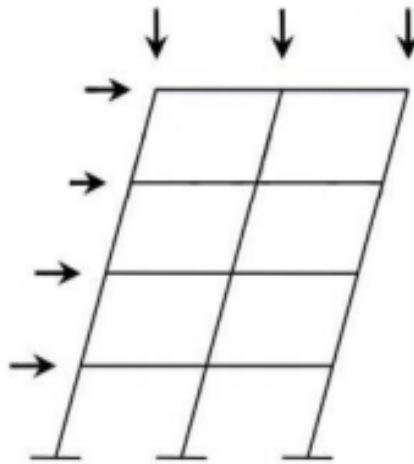
Porém Chinem (2010, p.21) faz a seguinte observação:

O fato de existir uma mudança de alinhamento no eixo vertical dos pilares implica na existência de uma excentricidade de aplicação das cargas verticais, o que faz com que os deslocamentos horizontais sejam maiores do que quando da análise sobre a

estrutura indeformada. Assim, quando a análise do equilíbrio passa a ser efetuada considerando a configuração deformada, surgem os efeitos de 2ª ordem, que se somam aos obtidos numa análise de 1ª ordem, em que a estrutura é calculada na configuração geométrica inicial (indeformada).

A Figura 2.6 ilustra os efeitos de segunda ordem.

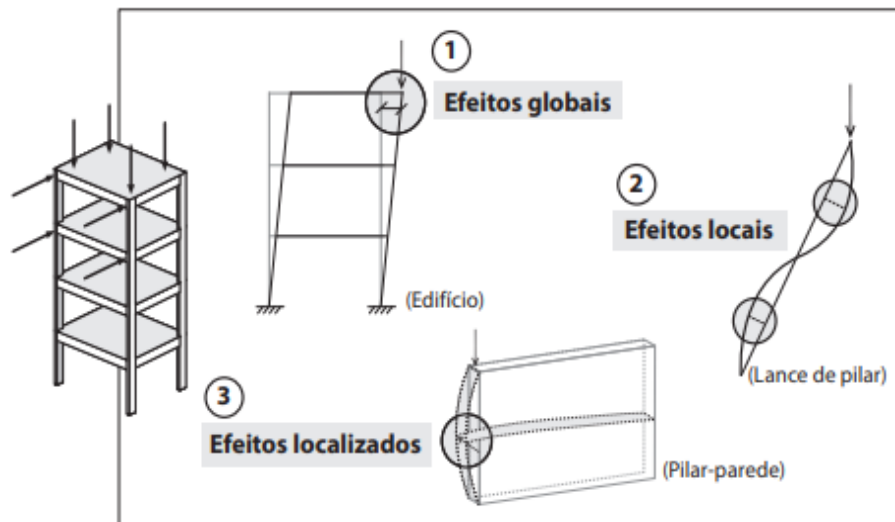
Figura 2.6 – Estrutura de nós móveis



Fonte: GONÇALVES (2017)

Para fins de dimensionamento estrutural, os efeitos de segunda ordem podem ser classificados em três categorias: locais, localizados e globais. Os efeitos locais correspondem a fenômenos restritos a um elemento estrutural específico, como no caso de um pilar submetido simultaneamente à compressão e à flexão, tanto na região da base quanto no topo. Os efeitos localizados referem-se a deformações concentradas em uma porção delimitada da estrutura, como em pilares-parede, nos quais a combinação de flexão e compressão ocasiona deslocamentos diferenciais entre suas extremidades. Por sua vez, os efeitos globais relacionam-se ao comportamento do sistema estrutural como um todo, sendo exemplificados pela ação do vento atuando de maneira simultânea sobre pilares e vigas, influenciando a resposta integrada da estrutura (KIMURA, 2007). A Figura 2.7 ilustra cada um dos efeitos de segunda ordem.

Figura 2.7 – Tipos de efeitos de 2º ordem



Fonte: KIMURA (2007)

2.6 PARÂMETROS DE INSTABILIDADE GLOBAL: ALFA E GAMA-Z

Os parâmetros de instabilidade global são coeficientes utilizados pela NBR 6118 (ABNT, 2023) para trazer mais segurança, qualidade e conforto para as edificações com múltiplos pavimentos feitos com concreto armado. O parâmetro alfa foi criado em 1967 por Beck e Köni, com o intuito de avaliar a estabilidade da estrutura. A expressão 1 mostra a fórmula da NBR 6118 (ABNT, 2023) para o cálculo do parâmetro de estabilidade global alfa, então se α for menor que α_1 a estrutura pode ser considerada de nós fixos:

$$\alpha = H_{\text{tot}} \cdot \sqrt{\frac{N_k}{E_{cs} I_c}} \quad (1)$$

Em que:

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

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

Em que:

n é o número de níveis de barras horizontais (andares) acima da fundação ou de um nível um pouco deslocável do subsolo;

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

N_k é o somatório de todas as cargas verticais atuantes na estrutura (a partir do nível considerado para o cálculo de H_{tot}), com seu valor característico;

E_{csIc} representa o somatório dos valores de rigidez 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 altura, pode ser considerado o valor da expressão E_{csIc} de um pilar equivalente de seção constante.

O valor limite de $\alpha_1 \leq 0,6$ quando $n \geq 4$ pavimentos é, em geral, aplicável a maioria das estruturas de edifícios segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023).

O fator γ_z foi proposto por Franco e Vasconcelos (1991), com o objetivo de avaliar a estabilidade global de edificações de concreto armado, fornecendo um critério prático para identificar a influência de efeitos de 2ª ordem nas estruturas. A NBR 6118 (ABNT, 2023) usa, atualmente, a expressão 2. Quando o valor de γ_z é menor ou igual a 1,10, os efeitos de 2ª ordem podem ser considerados desprezíveis, permitindo simplificações no cálculo estrutural sem comprometer a segurança.

$$\gamma_z = \frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}\right)} \quad (2)$$

Em que:

$M_{1,tot,d}$ é o momento de tombamento, ou seja, a soma dos momentos de todas as forças horizontais da combinação considerada, com seus valores de cálculo, em relação à base da estrutura;

$\Delta M_{1,tot,d}$ é a soma do produto 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 1ª ordem.

Este parâmetro será verificado neste trabalho para avaliar se há necessidade de considerar os efeitos de segunda ordem presentes na estrutura.

2.7 FATORES QUE INFLUENCIAM NA ESTABILIDADE

A estabilidade global de uma estrutura é influenciada por diversos fatores que afetam diretamente seu comportamento deformacional e a interação entre seus elementos estruturais. Alterações nas condições de carregamento ou nas propriedades geométricas e mecânicas podem modificar os deslocamentos relativos entre os nós, resultando em variações nos parâmetros de instabilidade global. Os fatores como as cargas atuantes (verticais e horizontais), f_{ck} , a configuração e o arranjo dos pilares e vigas no projeto, bem como a interação solo–estrutura. Podem ocasionar modificações mais ou menos significativas nos coeficientes de estabilidade, sendo fundamental considerá-los na análise estrutural.

2.7.1 Ações atuantes

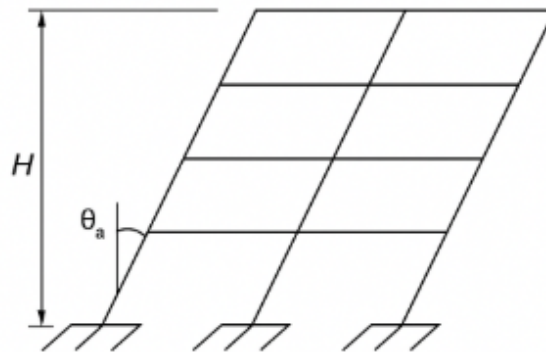
As ações atuantes sobre uma edificação podem ser classificadas em verticais e horizontais.

2.7.1.1 Ações horizontais

As principais solicitações horizontais que incidem sobre as estruturas, especialmente as decorrentes da ação do vento e das imperfeições geométricas, como o desaprumo, devem ser devidamente incorporadas às análises de estabilidade estrutural. Ademais, outras formas de ações horizontais relevantes, tais como cargas sísmicas e vibrações dinâmicas oriundas de máquinas, também requerem consideração específica no processo de dimensionamento. (FREITAS, 2015)

Para tanto, a NBR 6118 (ABNT, 2023) estabelece que, na análise global de estruturas reticuladas, independentemente da presença de contraventamento, as imperfeições geométricas devem ser introduzidas explicitamente, sob a forma de um ângulo de inclinação mínimo, conforme critérios específicos de nós fixos ou móveis. A Figura 2.8 ilustra o ângulo formado pela estrutura e o solo, com o surgimento destas ações atuantes.

Figura 2.8 – Imperfeições geométricas



Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2023)

Para o cálculo deste ângulo se faz necessário o uso da expressão 3.

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \frac{1}{100 \sqrt{H}} \\ \theta_a &= \theta_1 \sqrt{\frac{1 + 1/n}{2}}\end{aligned}\quad (3)$$

Onde:

$\theta_{1min} = 1/300$ para estruturas reticuladas e imperfeições locais;

$\theta_{1máx} = 1/200$;

H é a altura total da edificação, expressa em metros (m);

θ_a é o ângulo de desaprumo global equivalente da estrutura, obtido a partir de θ_1 considerando o número de pavimentos (n);

n é o número de prumadas de pilares no pórtico plano.

A NBR 6118 (ABNT, 2023) faz uma série de considerações para ações de vento e desaprumo:

a) Se 30 % da ação do vento for superior à ação do desaprumo, adota-se exclusivamente a ação do vento na análise estrutural.

b) Caso a ação do vento seja menor que 30 % da ação do desaprumo, considera-se apenas o desaprumo, desde que se observe o valor mínimo do ângulo de imperfeição geométrica (θ_{1min}), conforme definido pela norma.

c) Quando nenhum dos casos anteriores se aplica, realiza-se a combinação das ações de vento e desaprumo, sem necessidade de aplicar θ_{1min} . Essa combinação pode presumir ambas as ações como equivalentes à ação do vento (considerada carga variável), que deve ser artificialmente ampliada para contemplar sua superposição.

2.7.1.2 Ações verticais

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), as ações verticais sobre uma estrutura se dividem em permanentes e acidentais. As cargas permanentes, que incluem o peso próprio da estrutura, revestimentos, contrapiso e alvenaria, caracterizam-se por atuarem de forma constante ao longo da vida útil da edificação. Em contraste, as cargas acidentais, ou variáveis, são aquelas associadas ao uso da edificação e podem variar conforme a sua destinação funcional.

2.7.2 Rigidez

A rigidez de uma edificação reflete sua capacidade de resistir a deformações causadas por forças externas, mantendo sua forma estática. Por isso, é essencial levar em conta essa característica ao avaliar os deslocamentos da estrutura. Como o concreto armado permite diversas configurações estruturais, o que fica evidente nas plantas baixas, cada arranjo exige uma análise específica quanto à rigidez. Isso é especialmente verdade em sistemas como pórticos (vigas e pilares), pilares-parede isolados ou combinações desses elementos (FREITAS, 2015).

2.7.3 Interação solo-estrutura

Segundo Diniz (2024, p.7), “o sistema estrutural de uma edificação é composto por dois componentes principais: a superestrutura (lajes, vigas e pilares) e a infraestrutura (fundação), que conecta a superestrutura ao solo, transferindo as cargas.”. A análise da interação solo-estrutura considera que tanto a estrutura superior quanto o solo deformável contribuem para a resposta global do edifício, desmontando a ideia de que as fundações sejam completamente rígidas.

Complementarmente, a análise da interação solo-estrutura sob os olhares de Moncayo (2011, p.85) pode ser entendida como:

Na atualidade ainda é comum considerar a análise da superestrutura separadamente da infraestrutura. Admitindo-se o edifício engastado no solo como se o este fosse um corpo extremamente rígido e que não sofra deformação, obtêm-se as reações nesses engastes e tais reações são repassadas para o engenheiro de fundações, para que ele tenha condições de realizar o projeto da infraestrutura. Porém, na realidade, o solo não se comporta dessa maneira. Ele não é um corpo indeformável, o que torna de grande importância a consideração da interação solo-estrutura, e assim levar em conta a deformabilidade da fundação.

Reconhecer a deformabilidade do solo possibilita modelos mais realistas e confiáveis, prevenindo redistribuições inesperadas de esforços. Assim, o dimensionamento torna-se mais preciso e seguro, reduzindo falhas e patologias estruturais.

CAPÍTULO 3 METODOLOGIA

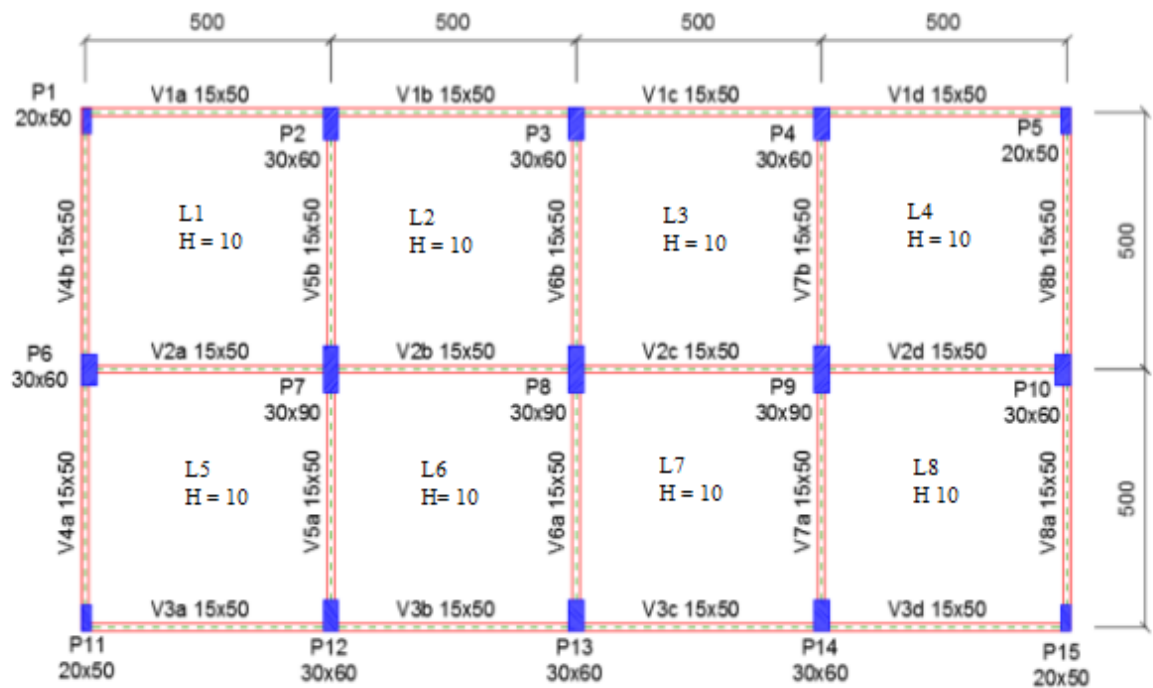
De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), a consideração dos efeitos de segunda ordem é obrigatória apenas quando esses efeitos provocam um acréscimo superior a 10% nos esforços internos da estrutura, conforme indicado pelo parâmetro de instabilidade global γ_z . Esse parâmetro tem como finalidade quantificar a influência das deformações da estrutura sob ação das cargas, permitindo avaliar se o comportamento global permanece dentro dos limites de estabilidade aceitáveis. Assim, quando o valor de γ_z for menor ou igual a 1,10, os efeitos de segunda ordem podem ser desconsiderados no dimensionamento, uma vez que sua influência é insignificante. Entretanto, para valores entre 1,10 e 1,30, esses efeitos devem obrigatoriamente ser levados em conta, pois já representam um acréscimo relevante nas solicitações internas. Caso o parâmetro ultrapasse 1,30, a estrutura é classificada como instável, exigindo a revisão completa do projeto e a reavaliação das condições de rigidez e segurança.

Neste estudo, a análise dos efeitos de segunda ordem será conduzida utilizando o software TQS/CAD, que possibilita a modelagem tridimensional e o cálculo preciso das estruturas. As simulações compreenderão variações no valor do f_{ck} , alterações na geometria da edificação, com modificações nas dimensões e proporções das seções dos pilares, bem como mudanças na disposição dos pilares e na configuração das cargas permanentes e variáveis. As combinações de carregamento serão aplicadas nos edifícios modelo de quatro pavimentos, de modo a avaliar a influência dessas variáveis no comportamento global das estruturas e na variação do parâmetro γ_z .

3.1 APRESENTAÇÃO DAS EDIFICAÇÕES

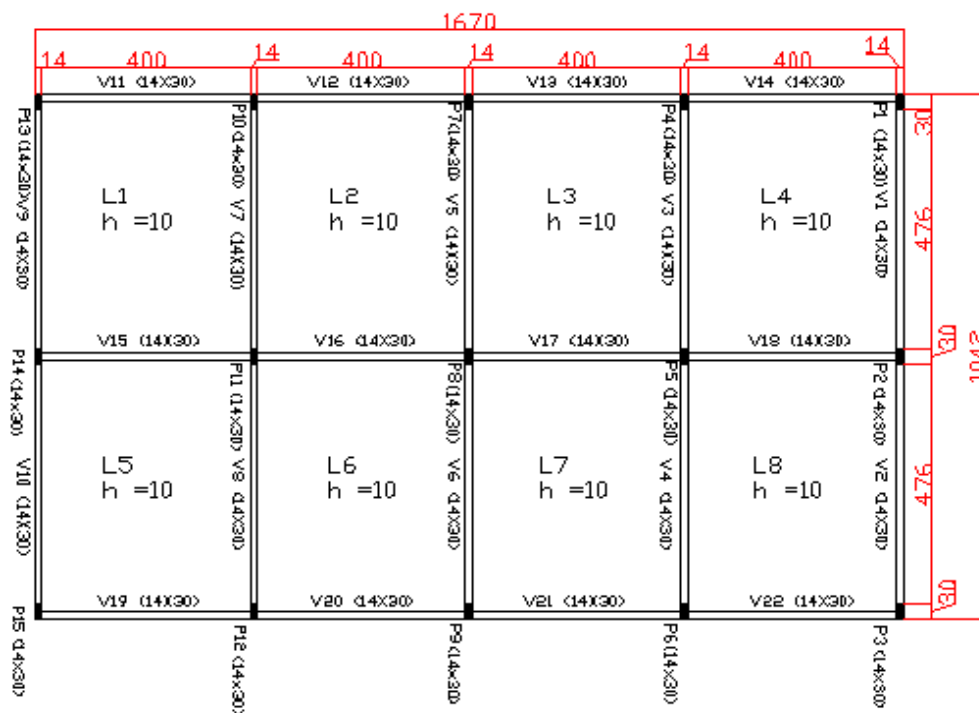
Para a execução deste trabalho, foi adotada duas plantas de formas: do edifício 1 estudada por MENDES (2016) apresentada na Figura 3.1 e o edifício 2 por MELO (2023) vista na Figura 3.2, elas possibilitam a identificação da geometria dos elementos e a definição precisa da posição dos pilares, vigas e lajes, fornecendo as informações necessárias para a avaliação do comportamento global da edificação.

Figura 3.1 – Planta de fôrma do edifício 1



Fonte: MENDES (2016)

Figura 3.2 – Planta de fôrma do edifício 2



Fonte: MELO (2023)

3.2 COMBINAÇÕES DE CARREGAMENTO

A NBR 6118 (ABNT, 2023) estabelece três expressões para o cálculo das combinações últimas de ações, classificadas como normais, especiais ou de construção e excepcionais. No presente trabalho, será adotada a expressão (4), correspondente às combinações últimas normais, para a realização das análises estruturais.

$$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{\varepsilon g} F_{\varepsilon gk} + \gamma_q (F_{q1k} + \sum \psi_{0j} F_{qjk}) + \gamma_{\varepsilon q} \psi_{0\varepsilon} F_{\varepsilon qk} \quad (4)$$

Onde:

F_d : é o valor de cálculo das ações para combinação última;

F_{gk} : representa as ações permanentes diretas;

$F_{\varepsilon k}$: representa as ações indiretas permanentes, como a retração ($F_{\varepsilon gk}$), e as variáveis, como a temperatura ($F_{\varepsilon qk}$);

F_{qk} : representa as ações variáveis diretas, das quais F_{q1k} é escolhida como principal;

$\gamma_g, \gamma_{\varepsilon g}, \gamma_q, \gamma_{\varepsilon q}$: são os coeficientes de segurança aplicados às ações;

$\psi_{0j}, \psi_{0\varepsilon}$: são os fatores de combinação, utilizados para ponderar a participação das ações variáveis nas combinações de cálculo.

3.3 CARREGAMENTOS

3.3.1 Carregamento vertical

Na Tabela 3.1 estão definidos os valores das cargas verticais considerados no dimensionamento da edificação.

Tabela 3.1– Carregamentos verticais

Elementos	Cargas permanentes	Cargas acidentais
Laje (tipo)	Peso próprio: 25 KN/m ³	Edifício comercial - corredores dentro de unidades autônomas: 2,5 KN/m ²
Laje (cobertura)	Peso próprio: 25 KN/m ³	Terraço - sem acesso ao público: 3 KN/m ²
Viga (tipo)	Peso próprio: 25 KN/m ³	-
	Alvenaria de tijolo furado C/15	
Viga (cobertura)	Peso próprio: 25 KN/m ³	
	Alvenaria de tijolo furado C/15	
Pilar	Peso próprio: 25 KN/m ³	
	Revestimento: 3 cm	

Fonte: AUTORIA PRÓPRIO (2025)

3.3.2 Carregamento horizontal

Os carregamentos horizontais das edificações foram definidos na Tabela 3.2, destacando-se que apenas a classe das edificações apresentou variação.

Tabela 3.2 – Carregamentos horizontais

Parâmetro	Descrição	Valor utilizado	Especificação
V0	Velocidade básica	35 m/s	Jataí - GO
S1	Fator do terreno	1,00	Considera as características do relevo do terreno
S2	Categoria de rugosidade	III	Terrenos planos ou ondulados, com obstáculos. Muros, árvores, edificações baixas, fazendas, subúrbios com casas baixas

	Classe do edifício 1	B	Maior dimensão horizontal ou vertical entre 20 e 50m
	Classe do edifício 2	A	Maior dimensão horizontal ou vertical menor que 20m
S3	Fator estático	1,00	Edificações para residências, hotéis, comércios, indústrias. Estruturas ou elementos estruturais desmontáveis com vistas à reutilização. Vedações de edificações do grupo 3 (telhas, vidros, painéis de vedação).

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2025)

3.4 COMBINAÇÕES DE CARREGAMENTO CONSIDERADAS NO SOFTWARE TQS/CAD

Na Tabela 3.3 são apresentadas as combinações propostas pelo software TQS/CAD para a verificação dos estados limites último e de serviço da edificação original.

Tabela 3.3 – Combinações do TQS/CAD

Caso	Prefixo	Título
5	VENT1	Vento (1) 90°
6	VENT2	Vento (2) 270°
7	VENT3	Vento (3) 0°
8	VENT4	Vento (4) 180°

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2025)

3.5 DADOS PARA O DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA

Para analisar em quais condições edifícios de múltiplos pavimentos apresentam maior estabilidade, foram realizadas variações no f_{ck} , na posição e na seção dos pilares. A análise foi conduzida por meio da verificação do coeficiente de estabilidade γ_z , utilizando o software TQS/CAD. É importante salientar que o f_{ck} das edificações será igual a 25MPa para todos os casos exceto para o caso em que definirei um novo valor para ele.

A seguir estão as características que não sofrem alterações no edifício 1:

- Posição e seção dos pilares: P1, P2, P3, P4, P5, P6, P10, P11, P12, P13, P14, P15;
- Posição e seção das vigas (cm): (15X50);
- Altura do pé direito (m): 2,8;
- Velocidade básica do vento (m/s): 35;
- Número de pavimentos: 4

A seguir estão as características que não sofrem alterações no edifício 2:

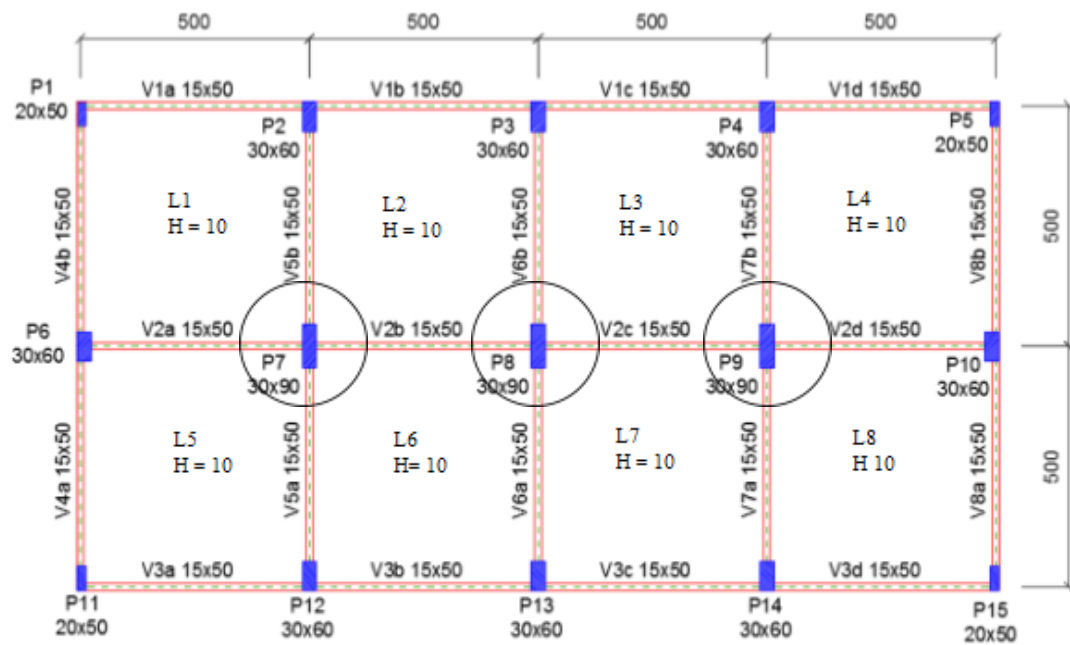
- Posição e seção dos pilares: P1, P2, P3, P4, P6, P7, P9, P10, P12, P13, P14, P15;
- Posição e seção das vigas (cm): (14X30);
- Altura do pé direito (m): 2,8;
- Velocidade básica do vento (m/s): 35;
- Número de pavimentos: 4

A seguir as características que sofreram alterações no edifício 1:

- Posição e seção dos pilares: P7, P8, P9;

Na Figura 3.4 foram circulados, na planta de forma, os pilares que foram alterados.

Figura 3.3 - Pilares: P7, P8, P9



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2025)

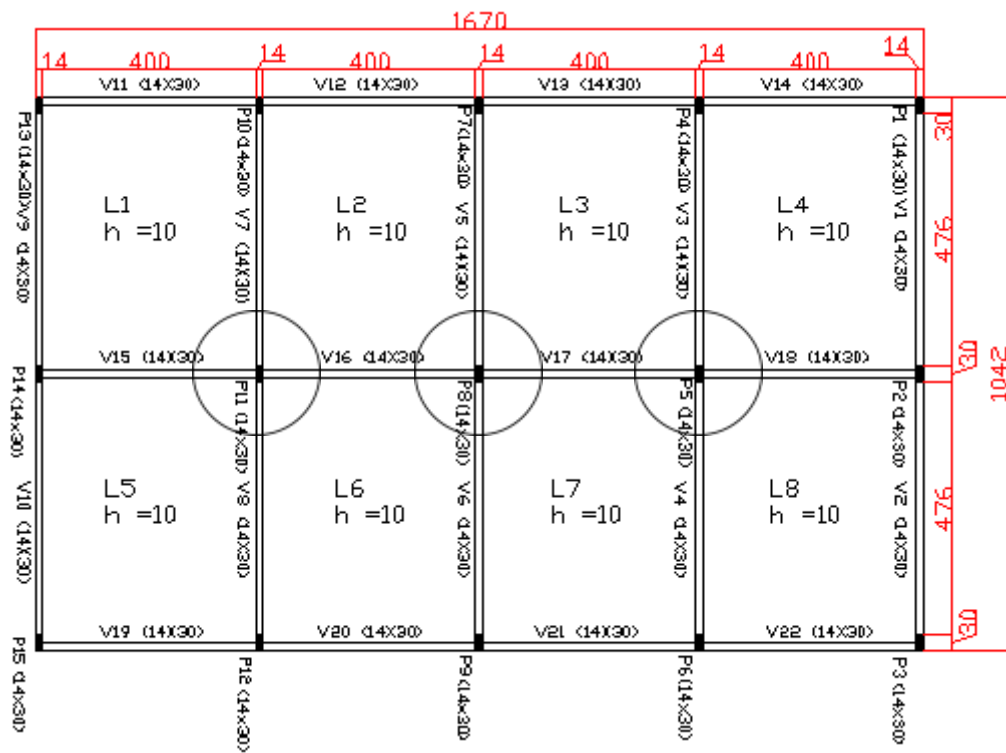
- Fck da estrutura: C25

A seguir as características que sofreram alterações no edifício 2:

- Posição e seção dos pilares: P5, P8, P11;

Na Figura 3.5 foram circundados, na planta de forma, os pilares que foram alterados.

Figura 3.4 - Pilares: P5, P8, P11



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2025)

- Fck da estrutura: C25

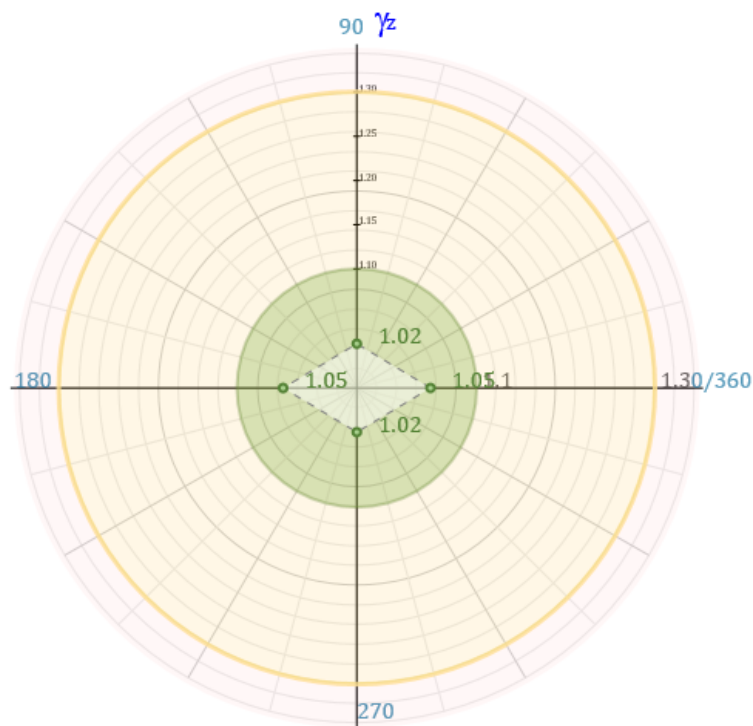
CAPÍTULO 4 RESULTADOS

A avaliação da estabilidade global dos dois modelos estruturais permitiu compreender de forma clara como o f_{ck} e o tamanho da seção e a distribuição dos pilares influenciam o coeficiente γ_z . Os resultados extraídos do TQS mostram comportamentos estruturais bastante distintos entre as duas edificações analisadas, evidenciando que pequenas variações geométricas modificam significativamente a sensibilidade da estrutura aos efeitos de segunda ordem.

4.1 EDIFÍCIO 1

O edifício 1, em sua configuração original dimensionada no TQS, apresenta o parâmetro γ_z inferior a 1,1, indicando que a estrutura possui nós fixos. Esse resultado é ilustrado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Coeficiente γ_z do edifício 1



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2025)

Na Tabela 4.1 os valores de γ_z permaneceram entre 1,01 e 1,05, independentemente das alterações propostas. Isso confirma que a edificação apresenta comportamento de nós fixos segundo os critérios da NBR 6118 (ABNT, 2023).

Tabela 4.1 – Coeficiente γ_z do edifício 1

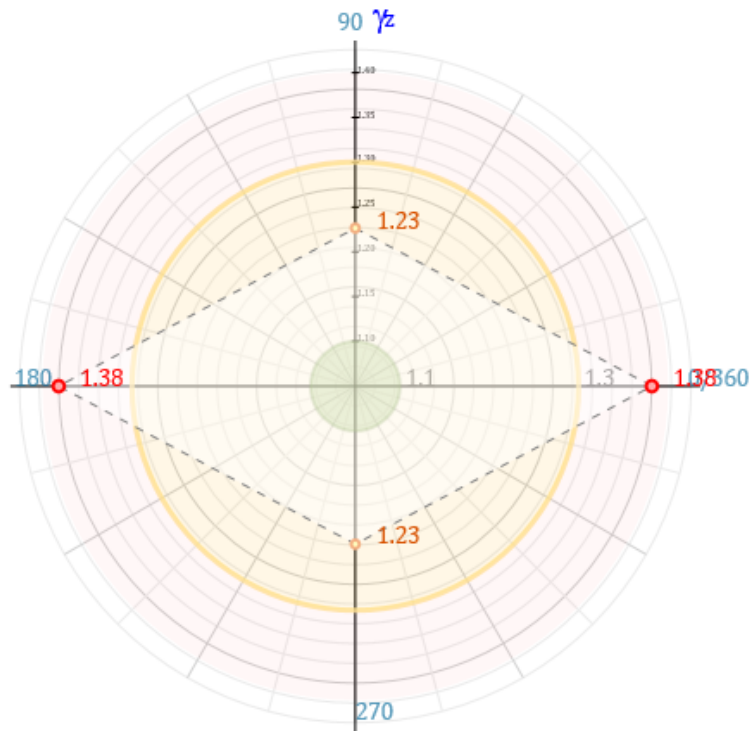
Vento	Estrutura original	Fck = 50	Pilares centrais posicionados na horizontal	Pilares centrais com seção (30X60)
0°	1,05	1,03	1,02	1,05
90°	1,02	1,01	1,02	1,02
180°	1,05	1,03	1,02	1,05
270°	1,02	1,01	1,02	1,02

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2025)

Mesmo alterações importantes, como aumento do fck ou mudança na seção dos pilares centrais, geraram apenas variações marginais. Isso indica que a rigidez inicial da estrutura já era suficiente e que a modificação desses elementos não altera significativamente o comportamento global. A estrutura é intrinsecamente estável. As alterações geométricas e mecânicas apenas confirmam essa estabilidade, não desempenhando papel determinante no comportamento global.

4.2 EDIFÍCIO 2

O edifício 2 apresentou γ_z inicial igual a 1,38, caracterizando um sistema estrutural com nós móveis e sujeita a efeitos globais de segunda ordem consideráveis. Ilustrado na Figura 4.2

Figura 4.2 – Coeficiente γ_z do edifício 2

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2025)

Os valores do coeficiente γ_z , decorrentes das variações propostas na metodologia, estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Coeficiente γ_z do edifício 2

Vento	Estrutura original	Fck = 50	Pilares centrais posicionados na horizontal	Pilares centrais com seção (30X60)
0°	1,38	1,38	1,38	1,21
90°	1,23	1,1	1,23	1,08
180°	1,38	1,38	1,38	1,21
270°	1,23	1,1	1,23	1,08

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2025)

O edifício 2 original tem comportamento estrutural frágil diante de ações horizontais e exige medidas corretivas. Dentre as soluções propostas, o aumento da seção dos pilares centrais foi o que se aproximou de uma estrutura a um nível de estabilidade aceitável.

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS EDIFÍCIOS 1 E 2

A comparação revela que os dois edifícios, embora similares em número de pavimentos e carregamentos, apresentam comportamentos estruturais completamente distintos devido às diferenças no arranjo e dimensões dos elementos estruturais. Como observado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Comparativo estrutural entre o edifício 1 e o edifício 2

Edifício	Situação original	Melhor modificação	Impacto principal
Edifício 1	γ_z entre 1,02 e 1,05 - Estável	Nenhuma alteração significativa	Estrutura naturalmente rígida
Edifício 2	γ_z entre 1,23 e 1,38 - Instável	Aumentar seção dos pilares	Aumenta rigidez lateral

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2025)

A análise evidencia que a geometria da estrutura e a distribuição de rigidez horizontal são fatores decisivos para a estabilidade global. Embora o aumento do f_{ck} contribua para a redução dos deslocamentos, sua influência é inferior à proporcionada por alterações geométricas, principalmente, o aumento das seções dos pilares.

CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve por objetivo analisar a influência do f_{ck} , do posicionamento dos pilares e das dimensões de suas seções sobre os parâmetros de instabilidade global de duas edificações modeladas no software TQS/CAD. As simulações realizadas permitiram compreender, com precisão, o efeito de cada variável sobre a rigidez global das estruturas e sobre a magnitude dos efeitos de segunda ordem, avaliados por meio do coeficiente γ_z .

No edifício 1, todas as configurações examinadas apresentaram valores de γ_z inferiores a 1,10, classificando a estrutura como de nós fixos e evidenciando condição satisfatória de estabilidade global. Tal comportamento decorre da configuração geométrica original, que já proporciona rigidez adequada, motivo pelo qual as modificações propostas aumento do f_{ck} , mudança na posição dos pilares ou ampliação de suas seções não resultaram em alterações significativas no parâmetro γ_z .

Em contraposição, o edifício 2 apresentou, em sua configuração inicial, γ_z igual a 1,38 na direção x, caracterizando elevada instabilidade global e acentuada sensibilidade aos efeitos de segunda ordem. Entre as intervenções analisadas, o aumento das seções dos pilares centrais foi a medida que produziu maior incremento de rigidez lateral, reduzindo o γ_z para aproximadamente 1,21 e atendendo aos limites de aceitabilidade estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2023). O aumento do f_{ck} e o reposicionamento dos pilares também contribuíram para a redução do coeficiente, embora com menor eficácia.

Os resultados permitem concluir que, embora o f_{ck} exerça influência sobre o módulo de elasticidade do concreto, e, consequentemente, sobre os deslocamentos horizontais, são as modificações geométricas notadamente o redimensionamento dos pilares que promovem incrementos mais significativos de rigidez lateral. Assim, em edificações mais suscetíveis aos efeitos globais de segunda ordem, recomenda-se priorizar soluções que envolvam a alteração da geometria dos elementos estruturais, de modo a assegurar desempenho compatível com os requisitos normativos.

Constata-se, portanto, que a estabilidade global das edificações está intrinsecamente relacionada à distribuição das rigidezes e à configuração geométrica do sistema estrutural. Ressalta-se, ainda, a importância da avaliação do coeficiente γ_z nas etapas iniciais de concepção arquitetônica e estrutural, uma vez que ajustes relativamente simples na disposição

dos pilares podem evitar a ocorrência de instabilidades significativas. As análises realizadas corroboram que a aplicação criteriosa das normas técnicas, aliada ao uso de ferramentas computacionais adequadas, contribui para o desenvolvimento de projetos estruturais mais seguros, eficientes e alinhados às práticas consolidadas da engenharia contemporânea.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações – procedimento. Rio de Janeiro, 2019.

BELANDI, Caio. **Censo 2022: Cerca de oito a cada dez pessoas moravam em casas, mas cresce a proporção de moradores em apartamentos**. (2024). Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/39239-censo-2022-cerca-de-oito-a-cada-dez-pessoas-moravam-em-casas-mas-cresce-proporcao-de-moradores-em-apartamentos>. Acesso em: 08 de Julho de 2025.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos; MARCHETTI, Osvaldemar. **Concreto armado eu te amo**. 8. ed. São Paulo: Blucher, 2015. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 29 ago 2025.

BUENO, M. M. E. **Avaliação dos Parâmetros de Instabilidade Global em Estruturas de Concreto Armado**. 2009. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

BUENO, M. M. E. **Estudo de valores aproximados de rigidez equivalente para vigas e pilares para análises não-lineares em estruturas de concreto armado de pequeno porte**. 2014. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

CAMACHO, Jefferson S. **Introdução ao estudo do concreto armado**. 2008. Apostila. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista – Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2008.

CHINEM, R.M. **Avaliação da estabilidade global de edifícios**. 2010. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

DINIZ, A. C. N. (2024). **Análise da influência da interação solo-estrutura na determinação de esforços para o cálculo estrutural**. 65p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2024.

FRANCO, M.; VASCONCELLOS, A. C. **Practical assessment of second order effects in tall buildings**. In: COLLOQUIUM ON THE CEB-FIP MC90, 1991, Rio de Janeiro. Proceedings... Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1991. p. 307-324.

FREITAS, F. C. de. **Avaliação da estabilidade global de edifícios com e sem elementos de contraventamento**. 186p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2015.

GIL, Pedro. **Mercado do concreto movimenta R\$30 bilhões no ano**. (2024). Disponível em: <https://veja.abril.com.br/coluna/radar-economico/mercado-do-concreto-movimenta-r-30-bilhoes-no-ano/>. Acesso em: 08 de Julho de 2025.

GONÇALVES M. M. O. **Análise dos efeitos de segunda ordem em pilares de concreto armado aplicando o método dos elementos finitos**. 2017. Trabalho de conclusão de curso Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro . 2017.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**, 3.º Ed., Editora Livros Técnicos e Científicos, 2000.

KIMURA, Alio. **Informática aplicada a estruturas de concreto armado**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2018. 429 p.

KIMURA, Alio et al. (ed.). **Estruturas de concreto armado: capítulos básicos b1 a b9**. 1. ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2022. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 18 ago 2025.

MACRI, Marcus. **As águias do Palácio do Catete**. (2011). Disponível em: <https://museudarepublica.museus.gov.br/as-aguias-do-palacio-do-catete/>. Acesso em: 08 de Julho de 2025.

MELO, E. G. V. **Avaliação da estabilidade global em edifícios de concreto armado: parâmetro de instabilidade α e coeficiente γ_z** . Trabalho de conclusão de curso Bacharelado em Engenharia Civil, Instituto Federal Goiano. Rio Verde. 2023.

MENDES, E. J. **Análise de edifícios considerando a interação solo-estrutura**. Trabalho de conclusão de curso Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2016.

MONCAYO, W. J. Z. **Análise de segunda ordem global em edifícios com estrutura de concreto armado**. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, p. 221. 2011.

MOURA, José. **Compreenda os Três Estádios de Deformação do Concreto Armado [Guia Completo]**. (2019). Disponível em: <https://www.guiadaengenharia.com/estadios-deformacao-concreto/>. Acesso em: 20 de Agosto de 2025.

OLIVEIRA, J. C. A. de. **Avaliação da rigidez de pórticos tridimensionais de concreto armado**. Tese de doutorado em Estruturas e Construção Civil. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2009.

SIM INC. **Setor Nova Suíça em Goiânia: Conheça o Kingdom Park Residence**. (2023). Disponível em: <https://blog.siminc.com.br/setor-nova-suica-em-goiania-conheca-o-kingdom-park-residence/>. Acesso em: 10 de Setembro de 2025.

WORDELL, F. **Avaliação da instabilidade global de edifícios altos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.