



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

TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA
MOBILIDADE

ESTUDO DE CASO: COLAPSO DO EDIFÍCIO REAL CLASS

Giovanni Barroso Santos

ORIENTADOR (A): Prof.^a Ms. Paulo Henrique Menezes Silva

PUBLICAÇÃO:
ANÁPOLIS

2021

Giovanni Barroso Santos

ESTUDO DE CASO: COLAPSO DO EDIFÍCIO REAL CLASS

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil da Mobilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Campus Anápolis, como requisito parcial para conclusão de curso.

Orientador (a): Prof^a. Ms. Paulo Henrique Menezes Silva.

ANÁPOLIS, 2021



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

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: **Giovanni Barroso Santos**

Matrícula: **20161060130013**

Título do Trabalho: **Estudo de caso: Colapso do edifício real class.**

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.

Anápolis, 28/04/2021
Local Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

SANTOS, Giovanni Barroso

S237e Estudo de caso: colapso do edifício Real Class /
Giovanni Barroso Santos – Anápolis: IFG, 2021.
54 p. : il. color.

Orientador: Prof. Me. Paulo Henrique Menezes Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Goiás: Câmpus Anápolis – Engenharia Civil da
Mobilidade, 2021.

1. Estruturas de concreto armado. 2. Estabilidade
estrutural. 3. Parâmetros de instabilidade. 4.
Efeitos de segunda ordem. I. SILVA, Paulo
Henrique Menezes orien. II. Título.

CDD 624.1



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

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

ATA Nº /2021

ATA DA SESSÃO PÚBLICA DE APRESENTAÇÃO E DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

No 3º dia do mês de março do ano de dois mil e vinte e um, às 18:00 horas, por meio de videoconferência realizada via Google Meet (<https://meet.google.com/eix-uxqf-bqa>), foi realizada a sessão pública de apresentação e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso da Graduando **Giovanni Barroso Santos** (matrícula 20161060130013) do curso de Engenharia Civil da Mobilidade, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado de Goiás (IFG), Campus Anápolis. A banca foi composta pelos seguintes membros: Maria Tamara de Moraes Guimarães Silva, Fabrício Henrique Vieira Guimarães e Paulo Henrique Menezes Silva, sob a presidência do último. O trabalho de conclusão de curso tem como título “**ESTUDO DE CASO: COLAPSO DO EDIFÍCIO REAL CLASS**”, da área de Estrutura de Concreto, sob orientação do Prof. Paulo Henrique Menezes Silva. Após a apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso, tendo sido o autor arguido pela Banca Examinadora, a nota obtida foi 10,0 (Dez pontos).

Encerra-se a presente sessão às 19 horas e 30 minutos. Eu, Prof. Paulo Henrique Menezes Silva, dato e assino a presente ata que segue assinada por todos os membros da Banca e pela graduanda.

Prof. Paulo Henrique Menezes Silva

(Assinado eletronicamente)

Profa. Maria Tamara de Moraes Guimarães Silva

(Assinado eletronicamente)

Prof. Fabrício Henrique Vieira Guimarães

Giovanni Barroso Santos
(Graduando)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Maria Tamara de Moraes Guimaraes Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 05/03/2021 22:00:58.
- **Paulo Henrique Menezes Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 05/03/2021 15:15:16.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 05/03/2021. 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: 137698

Código de Autenticação: bf39903eef



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Avenida Pedro Ludovico, s/ nº, Remy Cury, ANÁPOLIS / GO, CEP 75131-457
(62) 3703-3373 (ramal: 3373)

DEDICATÓRIA

Primeiramente a Deus,
E aos Meus Queridos Pais e ao Meu Irmão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e aos meus pais, meu irmão e minha namorada, por ter me dado todo apoio durante todo o curso.

Ao IFG por ter me tornado um profissional melhor desde o curso técnico. A todos professores que passaram pela minha caminhada na instituição e me agregaram muito conhecimento.

Ao meu orientador Ms. Paulo Henrique Menezes por todo conhecimento passado durante as disciplinas ministradas na área de estruturas e durante as orientações para o trabalho.

E por último agradeço a empresa TQS por ter disponibilizado a licença plena do software para realização deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a estabilidade global da estrutura do Edifício Real Class, no qual foi construído em sistema convencional de concreto armado formado por pilares, vigas e lajes. O edifício em estudo entrou em colapso durante sua construção, quando já estava em fase de acabamentos. Para avaliação da Estabilidade Global foram usados os parâmetros impostos pela NBR 6118, o Parâmetro de Instabilidade α e o Coeficiente γ_z . Também foi utilizado o Coeficiente FAVt que é de uso exclusivo do sistema CAD/TQS, e sua formulação é baseada no Coeficiente γ_z , porém são considerados os deslocamentos horizontais devido as cargas verticais. Também foi avaliado as pressões de vento e os deslocamentos máximos no topo da estrutura. Para auxiliar nas análises e cálculos foi utilizado o software comercial CAD/TQS, que é usado para análise estrutural, dimensionamento e detalhamento de estruturas de concreto armado. O software proporciona mais agilidade e cálculos mais refinados durante a realização do projeto, porém cabe ao engenheiro projetista alimentar e avaliar os resultados entregues pelo programa afim de sempre projetar estruturas seguras para se habitar. Durante a realização do trabalho foi possível acompanhar importantes etapas da realização de um projeto utilizando um software, desde o lançamento dos elementos, correção de erros, processamento da estrutura e a análise de resultados. Analisando a concepção estrutural pode-se observar que a locação dos pilares não foi feita de maneira ideal, pensado nas ações de vento no pórtico. Foi feita a proposta de uma nova concepção estrutural para o edifício, com o objetivo de solucionar seu problema de instabilidade. Para isso foi necessário alterar a seção de alguns elementos como pilares e vigas e ainda adicionar um núcleo rígido a estrutura, chegando assim em resultados bem satisfatórios com relação aos Parâmetros de Instabilidade. A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que a estrutura apresentava muita flexibilidade e não era capaz de resistir aos esforços horizontais.

Palavras Chave: Estabilidade global, Parâmetros de instabilidade, Efeitos de segunda ordem, estruturas de concreto armado.

ABSTRACT

The present work aims to evaluate the overall stability of the structure of the Real Class Building, in which it was built in a conventional reinforced concrete system formed by columns, beams and slabs. The building under study collapsed during its construction, when it was already being finished. To assess the Global Stability, the parameters imposed by NBR 6118, the Instability Parameter α and the Coefficient γ_z were used. The FAVt coefficient was also used, which is for the exclusive use of the CAD / TQS system, and its formulation is based on the γ_z coefficient, however horizontal displacements due to vertical loads are considered. Wind pressures and maximum displacements at the top of the structure were also assessed. To assist in the analysis and calculations, the commercial software CAD / TQS was used, which is used for structural analysis, dimensioning and detailing of reinforced concrete structures. The software provides more agility and more refined calculations during the realization of the project, but it is up to the food designer engineer and evaluate the results delivered by the program in order to always design safe structures to live in. During the execution of the work it was possible to follow important stages of the realization of a project using software, since the launch of the elements, correction of errors, processing of the structure and the analysis of results. Analyzing the structural design, it can be seen that the location of the pillars was not done in an ideal way, considering the wind actions on the gantry. A proposal was made for a new structural design for the building, in order to solve its instability problem. For that, it was necessary to change the section of some elements such as columns and beams and also add a rigid core to the structure, thus achieving very satisfactory results in relation to the Instability Parameters. From the results obtained, it can be concluded that the structure had a lot of flexibility and was not able to withstand horizontal efforts.

Keywords: Global stability, Instability parameters, Second order effects, reinforced concrete structures.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente $\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3}$	14
Tabela 2 - Valores do coeficiente γ_{f2}	15
Tabela 3 - Combinações últimas.	16
Tabela 4 - Combinações de serviço.....	17
Tabela 5 - Limites para deslocamentos.	26
Tabela 6 - Cargas de Utilização para Lajes.	31
Tabela 7 - Sobrecarga de Parede.	31
Tabela 8 - Cálculo da Carga para o Reservatório.....	32
Tabela 9 - Ações atuantes na estrutura.	39
Tabela 10 - Combinações ELU.	40
Tabela 11 - Combinações ELS.....	41
Tabela 12 - Valores Calculados de Pressão Dinâmica.	45
Tabela 13 - Parâmetro de estabilidade para os carregamentos simples de vento.....	46
Tabela 14 - Parâmetro de estabilidade para combinações de ELU.	46
Tabela 15 - Parâmetros de instabilidade.....	47
Tabela 16 - Deslocamento máximo no topo da estrutura.	48
Tabela 17 - Parâmetro de estabilidade para os carregamentos simples de vento.....	50
Tabela 18 - Parâmetro de estabilidade para combinações de ELU.	50
Tabela 19 - Parâmetros de instabilidade.....	51
Tabela 20 - Deslocamento máximo no topo da estrutura.	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Edifício Real Class pouco antes do desabamento.	6
Figura 2 - Análise Linear.	11
Figura 3 - Análise Não Linear.	12
Figura 4 - Diagrama tensão deformação do concreto: (a) Linear (b) Não linear.	18
Figura 5 - Barra Vertical com mudança de posição.	19
Figura 6 - Analogia entre o edifício e o pilar em balanço da definição do parâmetro α	21
Figura 7 - Estrutura não simétrica.	23
Figura 8 - Incidência do vento no mesmo sentido do deslocamento.	24
Figura 9 - Vento no sentido oposto ao do deslocamento horizontal devido à carga vertical. ..	25
Figura 10 - Planta de Forma do Pav. Tipo do Edifício Real Class.	28
Figura 11 - Tabela de cobrimentos CAD/TQS.	30
Figura 12 - Interface para Cálculo dos esforços de Vento.	33
Figura 13 - Gráfico das Isopletas.	34
Figura 14 - Categoria de Rugosidade.	35
Figura 15 - Classe da Edificação.	35
Figura 16 - Fator Estatístico.	36
Figura 17 - Cálculo Coeficiente de Arrasto.	37
Figura 18 - Esquema para análise de vento conforme o Sistema CAD/TQS.	38
Figura 19 - Coeficientes de não-linearidade.	38
Figura 20 - Modelo Estrutural Edifício Real Class.	43
Figura 21 - Planta de Forma do Pavimento Tipo.	44
Figura 22 - Planta de Forma do Pavimento Tipo.	49

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	5
1.1.OBJETIVOS	8
1.1.1.Objetivo geral	8
1.1.2.Objetivos específicos.....	8
1.1.ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO.....	8
2.REFERENCIAL TEÓRICO.....	9
2.1.EDIFÍCIOS ALTOS	9
2.2.SOFTWARES APLICADOS A PROJETOS DE ESTRUTURAS.....	9
2.3.ANÁLISE ESTRUTURAL	10
2.3.1.Análise Linear.....	11
2.3.2.Análise Não Linear	12
2.4.AÇÕES ATUANTES NA ESTRUTURA.....	13
2.4.1.Coefficientes de ponderação e Combinações do ELU.....	14
2.4.2.Coefficientes de ponderação e Combinações do ELS	16
2.5.NÃO LINEARIDADE FÍSICA.....	17
2.6.NÃO LINEARIDADE GEOMÉTRICA	18
2.7.ESTABILIDADE GLOBAL	19
2.7.1.Efeitos de Primeira e Segunda ordem.....	20
2.7.2.Parâmetros de instabilidade	20
2.7.2.1.Parâmetro de Instabilidade α	20
2.7.2.2.Coefficiente γ_z	22
2.7.2.3.Fator de amplificação de esforços horizontais de vento – FAVt.....	23
2.8.FATORES QUE INFLUENCIAM NA ESTABILIDADE GLOBAL.....	25
2.9.DESLOCAMENTOS LIMITES.....	26
2.10.APRESENTAÇÃO DO EDIFÍCIO.....	27

3.METODOLOGIA.....	29
3.1.MODELAGEM	29
3.1.1.Propriedades Mecânicas	30
3.1.2.Ações Atuantes	31
3.1.3.Ação do Vento	32
3.1.4.Não Linearidade Física	38
3.1.5.Combinações de Esforços.....	39
3.2.Proposta da Nova Concepção Estrutural	41
4.APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	42
4.1.ESTRUTURA ORIGINAL	42
4.1.1.AÇÕES DO VENTO.....	45
4.1.2.PARÂMETROS DE INSTABILIDADE	45
4.1.3.DESLOCAMENTOS LATERAIS	47
4.2.NOVA CONCEPÇÃO ESTRUTURAL	48
4.2.1.ESTABILIDADE GLOBAL	50
4.2.2.DESLOCAMENTOS LATERAIS	51
5.CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1. INTRODUÇÃO

A demanda por habitação e espaço nas grandes cidades brasileiras tem sido um ponto crítico para o mercado imobiliário devido ao crescimento populacional. A falta de espaço para as construções tem sido um dos maiores problemas, a solução mais utilizada para esse conflito é a construção de edifícios de vários pavimentos. O interesse do mercado por grandes centros, se dá pela busca aos recursos que se aglomeram por lá, como grandes centros comerciais, complexos de medicina, pontos turísticos e também pela segurança que os edifícios demonstram ter. A busca por espaço também obriga os edifícios a serem esbeltos e isso se torna um grande desafio aos projetistas na etapa da concepção estrutural.

Com a elevada altura dos edifícios, a atenção não deve ser dada somente para as cargas verticais na estrutura, mas também para a estabilidade global da edificação, para que a estrutura possa resistir também aos esforços horizontais.

No cálculo das estruturas de edifícios altos, é necessário que o projetista esteja atento ao problema da estabilidade global, pois a estrutura é solicitada simultaneamente por ações verticais e horizontais (PINTO, 1997).

O estudo das ações do vento tem grande importância na etapa da análise estrutural, por ser a principal ação horizontal aplicada na estrutura. Segundo Ribeiro (2005), os esforços gerados pelo vento, podem causar deslocamentos horizontais significativos e com isso gerando momentos fletores de segunda ordem na estrutura. Por isso a estrutura deve ser concebida de maneira a resistir esses esforços e serem suficientemente rígidas para garantir a estabilidade global.

A NBR 6118/2014 indica alguns procedimentos simplificados para a análise da estabilidade global de edifícios, que são o Parâmetro de Instabilidade α e o Coeficiente γ_z . Através desses parâmetros é possível classificar as estruturas entre estruturas de nós fixos e estruturas de nós móveis. Em estruturas de nós fixos é permitido a não consideração dos efeitos globais de segunda ordem. As estruturas de nós móveis, onde os efeitos de segunda ordem ultrapassam 10% dos efeitos da análise de primeira ordem, é obrigatório a consideração dos efeitos globais de segunda ordem.

Existem outros procedimentos usados para a análise de estabilidade global, como o processo P-Delta e o parâmetro FAVt. Sendo o último que foi desenvolvido e é de uso exclusivo do sistema CAD/TQS, a sua formulação é baseada no Coeficiente γ_z . A

diferença é que o FAVt considera não só os deslocamentos horizontais gerados pelas cartas horizontais, mas também os deslocamentos horizontais devido as cargas verticais.

Hoje em dia muito se fala em uso de softwares para elaboração de projetos estruturais, é unanimidade que essa prática otimiza muito o tempo do engenheiro, porém o cuidado deve ser redobrado e deve ser feita uma análise criteriosa sobre os resultados fornecidos pelo programa.

Segundo Moncayo sobre o uso da informática nos projetos estruturais atualmente:

...com o avanço da informática, todos os cálculos complexos e inviáveis para serem realizados no dia a dia dos escritórios são realizados de maneira muito simples, com apenas o apertar de um botão, e devido a essa facilidade de se realizar processamentos, muitos não se preocupam em se aprofundar em tais assuntos, ou por falta de tempo pela correria dos escritórios, ou por achar que não é necessário obter tal conhecimento, o que é um grande erro (MONCAYO, 2011).

Esse trabalho visa o estudo mais aprofundado sobre a análise global de edifícios utilizando o software comercial CAD/TQS, aplicado ao estudo de caso do Edifício Real Class, que entrou em colapso ainda durante sua construção no ano de 2011, na cidade de Belém/PA. A Figura 1 mostra Edifício Real Class antes do acidente ocorrido.

Figura 1 – Edifício Real Class pouco antes do desabamento.



Fonte: (SPERANZA, 2011).

O CAD/TQS é um software comercial utilizado para a análise, dimensionamento e detalhamento de estruturas de concreto armado. Neste trabalho o software será usado para realizar uma análise não linear e obter os fatores de estabilidade global, como o Coeficiente γ_z , o Parâmetro de Instabilidade α , o parâmetro FAVt e os esforços de segunda ordem.

O Edifício Real Class entrou em colapso ainda durante sua construção, quando a obra já estava em fase de acabamento, em um estágio bem avançado. Localizado na área urbana da cidade de Belém/PA, a edificação dispunha de 35 pavimentos, sendo eles: 1 subsolo, térreo, 1º nível, 2º nível, 30 pavimentos tipo e uma cobertura, somando uma altura de 104,7m. O incidente ocorreu às 13 h e 45 min no dia 29 de janeiro de 2011, durante uma tempestade tropical seguida de rajadas de vento de 39,4 m/s. O acidente não atingiu somente a área do edifício, mas também as edificações vizinhas e uma parte da rua. Foram três vítimas fatais, sendo elas dois operários e uma moradora da casa vizinha.

1.1.OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Analisar a estabilidade global do Edifício Real Class utilizando o software comercial CAD/TQS, baseando nos fatores apresentados pela NBR 6118/2014, como o Coeficiente γ_z , o Parâmetro de instabilidade α e o parâmetro FAVt exclusivo do TQS.

1.1.2. Objetivos específicos

- Realizar uma pesquisa bibliográfica a respeito dos tópicos de estabilidade global de edifícios de concreto armado e formas de aplicação utilizando programas computacionais.
- Executar a modelagem do edifício no software TQS e realizar as devidas análises relacionadas a Estabilidade Global da estrutura.
- Avaliar os resultados obtidos da modelagem e do processamento da estrutura por meio dos parâmetros de estabilidade global e propor uma nova concepção estrutural afim de solucionar o problema de estabilidade do Edifício.

1.2.ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho foi dividido em 5 capítulos. O capítulo 1 faz uma introdução ao tema, sendo apresentados relevância do tema seus principais objetivos.

O capítulo 2 apresenta uma abordagem sobre os principais conceitos relacionados a Estabilidade Global de edifícios, bem como os parâmetros necessários para tal avaliação.

O capítulo 3 apresenta a metodologia da pesquisa, descrição do edifício estudado e o lançamento e modelagem da estrutura no CAD/TQS.

O capítulo 4 apresentará os resultados e discussões do processamento global da estrutura da estrutura original e da nova proposta de concepção.

O capítulo 5 apresentará as considerações finais baseadas nos resultados.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1.EDIFÍCIOS ALTOS

A crescente verticalização nos grandes centros urbanos vem chamando a atenção cada vez mais. Segundo Ficher (1994), esse processo só foi capaz de acontecer depois do surgimento de novas técnicas e tecnologias construtivas, como a introdução de materiais com alta resistência e preço baixo, no Brasil o Concreto Armado e nos Estados Unidos o Aço. Também destaca o surgimento do elevador, que proporciona o deslocamento por grandes alturas em muito pouco tempo.

Para Ramires (1998) o processo de verticalização das cidades está ligado à valorização dos espaços, com a construção de grandes edifícios o potencial de aproveitamento do terreno tem um crescimento enorme.

Os grandes edifícios têm sua imagem associada ao poder econômico e desenvolvimento tecnológico, representam status de poder e supremacia. O interesse econômico explica a variação de altura e dimensão das edificações em diferentes cidades pelo mundo (GONÇALVES, 2010). Grandes edifícios na maioria das vezes estão localizados nos grandes centros, isso pela busca aos recursos que lá se localizam, seja ele comercial, turístico ou alguma outra atração que gere interesse a grandes grupos.

Edifícios altos são cada vez mais vistos nas grandes cidades brasileiras e vem se tornando um grande desafio para os projetistas de estruturas. Na concepção estrutural deve-se conceber estruturas capazes de resistir às ações aplicadas sem ultrapassar os deslocamentos admissíveis. Com o avanço da tecnologia surgiram materiais mais resistentes, elevadores sofisticados, softwares que auxiliam em análises mais aprofundadas do comportamento real da estrutura são fatores que contribuem bastante para a construção de edifícios cada vez mais altos e esbeltos (OLIVEIRA, 2009).

2.2.SOFTWARES APLICADOS A PROJETOS DE ESTRUTURAS

Hoje em dia a informática está cada vez mais inserida em nosso cotidiano, sempre presente em atividades corriqueiras do dia a dia, não seria diferente na atuação profissional. A tecnologia a alguns anos se tornou grande companheira do projetista estrutural, otimizando o tempo, proporcionando cálculos complexos sendo feitos por apenas alguns “cliques”. Atualmente é praticamente impossível a elaboração de um projeto de estruturas ser feito de forma 100% manual.

Kimura (2007) cita que quando a ferramenta computacional é usada de maneira responsável e criteriosa, pode trazer enormes vantagens durante o processo de elaboração do projeto, como: produtividade, qualidade e segurança. É possível realizar diversas simulações para o mesmo modelo, trazendo assim uma estrutura mais eficiente e otimizada.

O mesmo autor também comenta que o sistema computacional, por mais elaborado que seja, serve apenas como uma ferramenta para auxiliar, o operador tem como pré-requisito saber como são feitos os cálculos pelo programa.

Neste trabalho foi escolhido para auxílio o software comercial CAD/TQS que é um sistema computacional gráfico usado na elaboração de projetos de estruturas de concreto armado, protendido e alvenaria estrutural. Ele é desenvolvido pela empresa TQS Informática Ltda, que é uma empresa brasileira que atua a mais de 20 anos sempre trazendo inovações tecnológicas para Engenharia de Estruturas. O TQS auxilia em todas as etapas do projeto: concepção estrutural, análise de esforços e flechas, dimensionamento e detalhamento de armaduras e emissão de desenhos.

2.3. ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural é a etapa onde são determinadas as respostas da estrutura frente aos esforços aplicados. É avaliado o comportamento da estrutura com relação aos esforços solicitantes e deslocamentos.

Segunda NBR 6118/2014 que trata do procedimento de projeto de estruturas de concreto armado, a análise estrutural tem o objetivo de determinar os efeitos das ações atuantes na estrutura, para realizar as verificações dos estados limites de serviço e estado limite último. Nesta etapa que é possível estabelecer distribuição dos esforços internos,

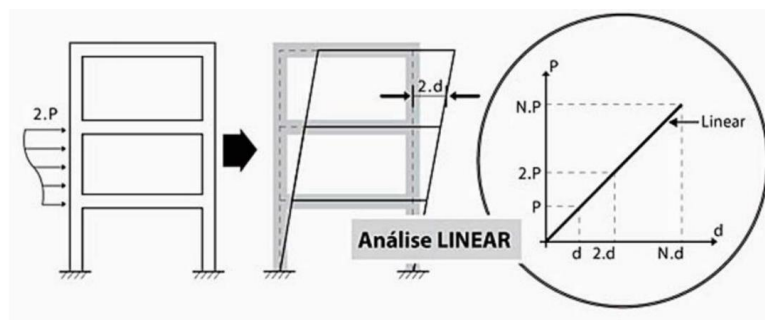
tensões, deformações e deslocamentos, podendo ser feita a análise apenas de uma parte ou da estrutura como um todo.

A mesma norma apresenta alguns métodos de análise: análise linear, análise linear com redistribuição, análise plástica, análise não linear e análise através de modelos físicos. Esses métodos se diferenciam pelo comportamento admitido para os materiais constituintes de estrutura, porém todos eles consideram um deslocamento pequeno da estrutura.

2.3.1. Análise Linear

Na análise linear é feita a consideração que os materiais têm um comportamento elástico-linear, ou seja, a estrutura se desloca de maneira proporcional a intensidade dos carregamentos, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Análise Linear.



Fonte: Kimura (2007).

Podemos observar na Figura 2, que após a aplicação do carregamento $2.P$ tem-se como resposta um deslocamento $2.d$, formando assim uma reta no gráfico força x deformação, caracterizando um comportamento linear. Baseado nisso, há uma relação entre tensão x deformação definida como constante de proporcionalidade, que é chamada de módulo de Elasticidade (E), esse comportamento é regido pela lei de Hooke, definido pela Equação 1.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

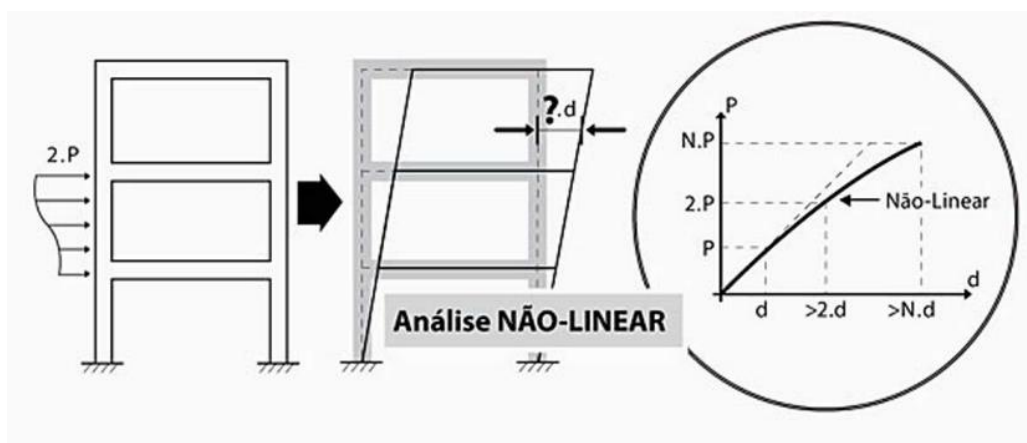
De acordo com a NBR 6118/2014, os resultados obtidos na análise linear são usados para a verificação do estado limite de serviço. Os esforços solicitantes obtidos podem ser usados para nortear o dimensionamento dos elementos estruturais no estado-limite último.

2.3.2. Análise Não Linear

Na análise não linear é considerado que os materiais seguem um comportamento que não tem começo, meio e fim. É necessário que sejam consideradas a geometria e a armadura da estrutura, porque a resposta da estrutura está diretamente ligada a como ele será armada.

Segundo Kimura (2007), o deslocamento resultante não é proporcional ao acréscimo de carga. A resposta da estrutura em relação ao deslocamento tem um comportamento não-linear ao decorrer da aplicação do carregamento.

Figura 3 - Análise Não Linear.



Fonte: Kimura (2007).

Podemos observar na Figura 3, que após a aplicação do carregamento 2.P, o deslocamento obtido é desproporcional na análise não linear. Nessa situação não é possível determinar uma constante de proporcionalidade no gráfico força x deformação.

As condições de equilíbrio, de compatibilidade e de ductilidade devem ser necessariamente satisfeitas, como impõe a NBR 6118/2014. Os resultados obtidos na análise não linear podem ser usados nas verificações de estados limites últimos e estados limites de serviço.

O CAD/TQS executa uma análise não linear geométrica utilizando o método iterativo P-Delta e considera as não linearidades físicas dos elementos a partir de coeficientes de redução como indicado na NBR 6118/2014, neste presente trabalho será utilizado esse método.

2.4.AÇÕES ATUANTES NA ESTRUTURA

De acordo com a NBR 6118/2014 deve-se considerar todas as ações que possam gerar efeitos significativos na estrutura, sendo elas permanentes ou variáveis, ainda levando em conta o possível estado limite, último ou de serviço. Sobre as estruturas usuais de concreto armado atuam predominantemente as cargas horizontais e verticais, sendo as cargas horizontais na grande maioria das vezes ações do vento e desaprumo.

As cargas permanentes consideradas são o peso próprio da estrutura e as cargas adicionais dos elementos constituintes da edificação, como, instalações, revestimentos, paredes, entre outros. As cargas acidentais são as cargas referentes ao uso da edificação, que vai variar de acordo com a tipologia da edificação. Pessoas, veículos, mobiliário são exemplos de cargas variáveis.

Segundo Diniz (2017) em estruturas usuais de concreto armado, a ação horizontal atuante na estrutura é o vento. A ação horizontal é responsável pelo deslocamento inicial da estrutura, de onde surge o efeito da não linearidade geométrica. O desaprumo global é a simulação de possíveis imperfeições que surgem durante o processo construtivo, que podem vir a gerar cargas extras.

De acordo com o item 11.3.3.4.1 da NBR 6118/2014 a consideração do vento e o desaprumo deve seguir os seguintes critérios:

- a) Quando 30% da ação do vento for maior que a ação do desaprumo, considera-se somente a ação do vento.
- b) Quando a ação do vento for inferior a 30% da ação do desaprumo, considera-se somente o desaprumo respeitando a consideração de $\theta_{1\text{mín}}$.
- c) Nos demais casos, combina-se a ação do vento e desaprumo, sem necessidade da consideração do $\theta_{1\text{mín}}$. Nessa combinação, admite-se considerar ambas as ações atuando na mesma direção e sentido como equivalentes a uma ação do vento, portanto, como carga variável artificialmente amplificada para cobrir a superposição.

A comparação pode ser feita com os momentos totais na base da construção e em cada direção e sentido da aplicação da ação do vento, com desaprumo calculado com θ_a , sem a consideração do $\theta_{1\text{mín}}$. Vale lembrar que o desaprumo não deve ser considerado nas verificações do estado limite de serviço.

2.4.1. Coeficientes de ponderação e Combinações do ELU

Os esforços devem ser majorados através do coeficiente γ_f , que é dado pela Equação 2 a seguir, segundo o item 11.7 da NBR 6118/2014.

$$\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f2} \cdot \gamma_{f3} \quad (2)$$

As Tabelas a seguir são usadas para determinação dos parâmetros γ_{f1} , γ_{f2} , γ_{f3} .

Tabela 1 - Coeficiente $\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3}$.

Combinações de ações	Ações							
	Permanentes (g)		Variáveis (q)		Protensão (p)		Recalques de apoio e retração	
	D	F	G	T	D	F	D	F
Normais	1,4 ¹⁾	1,0	1,4	1,2	1,2	0,9	1,2	0
Especiais ou de construção	1,3	1,0	1,2	1,0	1,2	0,9	1,2	0
Excepcionais	1,2	1,0	1,0	0	1,2	0,9	0	0
Onde: D é desfavorável, F é favorável, G representa as cargas variáveis em geral e T é a temperatura. ¹⁾ Para as cargas permanentes de pequena variabilidade, como o peso próprio das estruturas, especialmente as pré-moldadas, esse coeficiente pode ser reduzido para 1,3.								

Fonte: NBR 6118/2014.

Tabela 2 - Valores do coeficiente γ_{f2} .

Ações		γ_{f2}		
		ψ_0	$\psi_1^{1)}$	ψ_2
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ²⁾	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas ³⁾	0,7	0,6	0,4
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
¹⁾ Para os valores de ψ_1 relativos às pontes e principalmente aos problemas de fadiga, ver seção 23. ²⁾ Edifícios residenciais. ³⁾ Edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos.				

Fonte: NBR 6118/2014

As combinações são realizadas para determinar uma envoltória de esforços que possam vir atuar na edificação. O dimensionamento dos elementos no Estado Limite Último (ELU) deve ser realizado em função das envoltórias obtidas para os elementos que compõe a estrutura modelada. As combinações últimas são divididas entre Normais, especiais ou de construção e Excepcionais como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Combinações últimas.

Combinações últimas (ELU)	Descrição	Cálculo das solicitações
Normais	Esgotamento da capacidade resistente para elementos estruturais de concreto armado ¹⁾	$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{eg} F_{egk} + \gamma_q (F_{q1k} + \sum \psi_{oj} F_{qjk}) + \gamma_{eq} \psi_{oe} F_{eqk}$
	Esgotamento da capacidade resistente para elementos estruturais de concreto protendido	Deve ser considerada, quando necessário, a força de protensão como carregamento externo com os valores $P_{k\max}$ e $P_{k\min}$ para a força desfavorável e favorável, respectivamente, conforme definido na seção 9
	Perda do equilíbrio como corpo rígido	$S(F_{sd}) \geq S(F_{nd})$ $F_{sd} = \gamma_{gs} G_{sk} + R_d$ $F_{nd} = \gamma_{gn} G_{nk} + \gamma_q Q_{nk} - \gamma_{qs} Q_{s,\min}$, onde: $Q_{nk} = Q_{1k} + \sum \psi_{oj} Q_{jk}$
Especiais ou de construção ²⁾		$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{eg} F_{egk} + \gamma_q (F_{q1k} + \sum \psi_{oj} F_{qjk}) + \gamma_{eq} \psi_{oe} F_{eqk}$
Excepcionais ²⁾		$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{eg} F_{egk} + F_{q1exc} + \gamma_q \sum \psi_{oj} F_{qjk} + \gamma_{eq} \psi_{oe} F_{eqk}$

Fonte: NBR 6118/2014

2.4.2. Coeficientes de ponderação e Combinações do ELS

Para majoração dos esforços no estado limite de serviço (ELS) é usado o coeficiente de ponderação mostrado na equação 3:

$$\gamma_f = \gamma_{f2} \quad (3)$$

Onde:

γ_{f2} tem valor variável conforme a verificação que se deseja fazer (figura 4):

$\gamma_{f2} = 1$ para combinações raras;

$\gamma_{f2} = \psi_1$ para combinações frequentes;

$\gamma_{f2} = \psi_2$ para combinações quase permanentes.

As combinações do estado limite de serviço foram divididas entre combinações quase permanente, frequentes e raras como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Combinações de serviço.

Combinações de serviço (ELS)	Descrição	Cálculo das solicitações
Combinações quase permanentes de serviço (CQP)	Nas combinações quase permanentes de serviço, todas as ações variáveis são consideradas com seus valores quase permanentes $\psi_2 F_{qk}$	$F_{d, ser} = \Sigma F_{gi,k} + \Sigma \psi_2 F_{qi,k}$
Combinações freqüentes de serviço (CF)	Nas combinações freqüentes de serviço, a ação variável principal F_{q1} é tomada com seu valor freqüente $\psi_1 F_{q1k}$ e todas as demais ações variáveis são tomadas com seus valores quase permanentes $\psi_2 F_{qk}$	$F_{d, ser} = \Sigma F_{gik} + \psi_1 F_{q1k} + \Sigma \psi_2 F_{qik}$
Combinações raras de serviço (CR)	Nas combinações raras de serviço, a ação variável principal F_{q1} é tomada com seu valor característico F_{q1k} e todas as demais ações são tomadas com seus valores freqüentes $\psi_1 F_{qk}$	$F_{d, ser} = \Sigma F_{gik} + F_{q1k} + \Sigma \psi_1 F_{qik}$
Onde: $F_{d, ser}$ é o valor de cálculo das ações para combinações de serviço; F_{q1k} é o valor característico das ações variáveis principais diretas; ψ_1 é o fator de redução de combinação freqüente para ELS; ψ_2 é o fator de redução de combinação quase permanente para ELS.		

Fonte: NBR 6118/2014

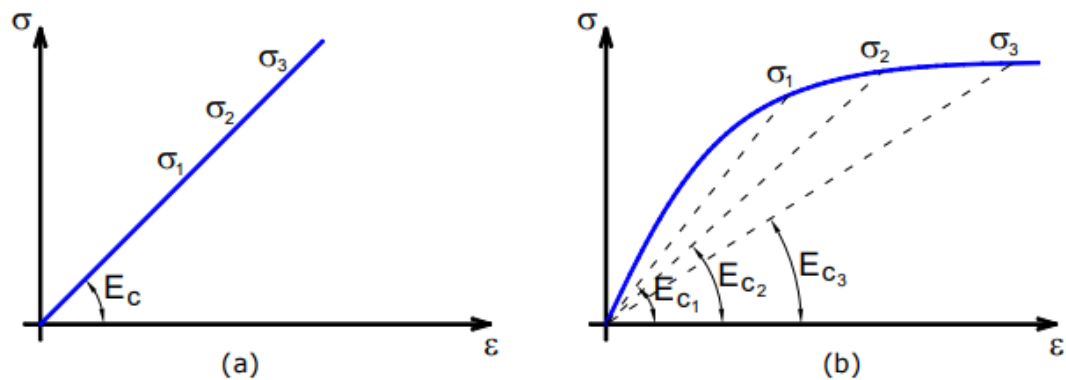
2.5.NÃO LINEARIDADE FÍSICA

A não linearidade física está diretamente ligada ao comportamento dos materiais que constituem a estrutura. No concreto armado efeitos como o de fissuração, da fluência, o escoamento das armaduras, conferem a ele um comportamento não linear (PINTO, 1997).

A Figura 4a mostra um comportamento linear. Na Figura 4b mostra o diagrama que representa um comportamento não linear. A principal diferença na prática entre os dois modelos é a variação do módulo de elasticidade, no comportamento linear ele se mantém constante em todos os pontos.

Observa-se na Figura 4b que para cada tensão (σ_1 , σ_2 , σ_3) aplicada a resposta do concreto é diferente, esse comportamento é pelo fato do módulo de elasticidade não ser constante.

Figura 4 - Diagrama tensão deformação do concreto: (a) Linear (b) Não linear.



Fonte: Moncayo (2011).

2.6.NÃO LINEARIDADE GEOMÉTRICA

As ações provenientes da não linearidade geométrica são aquelas que surgem após a mudança da estrutura de posição, ou seja, após o seu deslocamento. A determinação dos efeitos é realizada por uma análise considerando a posição de equilíbrio da estrutura. Em estruturas altas o efeito é mais intenso, porque a estrutura é solicitada ao mesmo tempo pelos carregamentos verticais e horizontais (PINTO ,1997).

A análise dos efeitos da não linearidade geométrica é feita considerando a estrutura em seu estado deformado, o que é representado na Figura 5 com a linha constante. A cada nova posição de equilíbrio, a estrutura altera sua rigidez.

Figura 5 - Barra Vertical com mudança de posição.



Fonte: Moncayo (2011).

Em estruturas consideradas rígidas tais efeitos são pequenos e podem ser desprezados, já nas estruturas flexíveis os efeitos passam a ser significativos e obrigatoriamente devem ser considerados. Desse modo as estruturas devem ser classificadas em estruturas de nós móveis ou estruturas de nós fixos, para julgar a magnitude dos efeitos de segunda ordem segundo parâmetros indicados pela NBR 6118/2014.

2.7. ESTABILIDADE GLOBAL

Na verificação da Estabilidade Global da estrutura será avaliada a capacidade que a estrutura tem de se deslocar sem entrar em colapso, como resultado da análise, será determinada se a estrutura é de nós móveis ou nós fixos como indicado na NBR 6118/2014.

Segundo Santos (2018), a estabilidade global é um estado no qual a estrutura deve atender e os deslocamentos horizontais e deformações vão dizer se a estrutura é estável ou não. Quanto mais altos e esbeltos os edifícios são, maiores serão os efeitos causados pela ação do vento e vão haver acréscimos de esforços e deslocamentos horizontais.

2.7.1. Efeitos de Primeira e Segunda ordem

Sob o efeito das ações das cargas verticais e horizontais surgem os esforços internos e deslocamentos horizontais no pórtico, obtidos na análise da configuração geométrica original da estrutura, esses são considerados os efeitos de primeira ordem. Os esforços provenientes do deslocamento horizontal no pórtico são chamados de efeitos de segunda ordem (CECCON, 2008).

Segundo o item 15.4.2 NBR 6118/2014 as estruturas de nós fixos são aquelas que os deslocamentos horizontais são pequenos, e por conta disso os efeitos de segunda ordem são desprezíveis, cerca de 10% dos efeitos de primeira ordem. As estruturas de nós móveis são aquelas que os deslocamentos horizontais não são pequenos, e devem ser considerados os efeitos de segunda ordem.

Na realidade as estruturas de nós fixos não são totalmente fixas, ou seja, elas se deslocam, porém seus deslocamentos horizontais são desprezíveis no cálculo. Já as estruturas de nós móveis não são estruturas que se deformam de maneira significativa, no entanto diferente das estruturas de nós fixos, os deslocamentos precisam ser considerados no cálculo (MONCAYO, 2011).

2.7.2. Parâmetros de instabilidade

Visando classificar as estruturas em nós móveis ou fixos, a NBR 6118/2014 sugere alguns parâmetros para verificação da estabilidade global do edifício, que são eles, o Parâmetro de instabilidade α e o coeficiente γ_z .

2.7.2.1. Parâmetro de Instabilidade α

Segundo Bueno (2009), o parâmetro foi determinado em 1967 por Beck e Köning utilizando a teoria de Euler e é utilizado para avaliar se é necessário ou não a consideração dos efeitos de segunda ordem avaliando a rigidez horizontal da estrutura.

A fórmula do parâmetro α é baseada na analogia comparando o comportamento de um edifício e um pilar engastado na base e livre no topo, como mostrado na Figura 6, sua seção é constante e material elástico linear, o pilar é solicitado por uma carga axial constante uniformemente distribuída por toda sua extensão. A rigidez do pilar é igual a soma das rigidezes dos pilares do contraventamento da estrutura (OLIVEIRA, 2002).

Figura 6 - Analogia entre o edifício e o pilar em balanço da definição do parâmetro α .



Fonte: Oliveira (2002).

A formulação é dada por:

$$\alpha = H_{tot} * \sqrt{\frac{N_k}{E_{cs} * I_c}} \quad (4)$$

Onde:

$$\alpha_1 = 0,2 + 0,1 * n \text{ se: } n \leq 3 \quad (5)$$

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

Onde:

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

Htot: é a altura total da estrutura, medida a partir do topo da fundação ou de um nível pouco deslocável do subsolo;

Nk: é o 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. 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 EcsIc de um pilar equivalente de seção constante.

A estrutura é considerada de nós fixos quando $\alpha \leq \alpha_1$.

A NBR 6118/2014 no item 15.5.2 impõe os seguintes limites para α_1 :

O valor-limite $\alpha_1 = 0,6$ é em geral usado para $n \geq 4$, para estruturas usuais de edifícios. Para associações de pilares-parede e para pórticos associados a pilares-parede, adotar $\alpha_1 = 0,6$. No caso de contraventamento constituído exclusivamente por pilares-parede, adotar $\alpha_1 = 0,7$. Quando só houver pórticos, adotar $\alpha_1 = 0,5$.

2.7.2.2. Coeficiente γ_z

Coeficiente γ_z é definido pela NBR 6118/2014 como avaliador da magnitude dos esforços de segunda ordem globais, e é válido somente para estruturas reticuladas de no mínimo 4 andares. Ele pode ser determinado através de uma análise linear de primeira ordem de todos casos de carregamentos avaliados na determinação dos esforços e deslocamentos.

A formulação é dada por:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (7)$$

Onde:

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

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

A estrutura é considerada de nós fixos quando $\gamma_z \leq 1,1$.

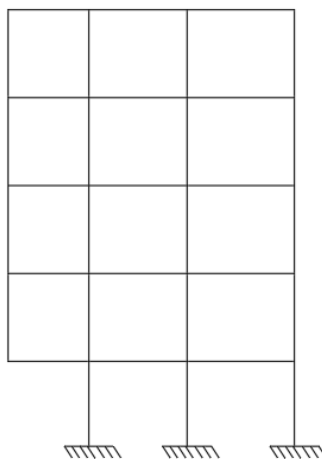
Segundo Oliveira (2002), a principal vantagem do γ_z se dá pelo fato de poder usá-lo na obtenção dos esforços finais, incluindo os esforços de segunda ordem, através da majoração dos esforços de primeira ordem. Segundo Franco e Vasconcelos (1991), o γ_z é um bom majorador até o valor de 1,2 ou mais; segundo Carmo (1995), até 1,3.

2.7.2.3. Fator de amplificação de esforços horizontais de vento – FAVt

O FAVt (Fator de amplificação de esforços horizontais de vento) é um parâmetro específico do sistema CAD/TQS que utiliza a mesma formulação do parâmetro γ_z . A única diferença para o γ_z , é a consideração do deslocamento causado pelas cargas verticais.

Os deslocamentos devidos as cargas verticais aparecem na maioria das vezes em estruturas não simétricas. Um exemplo clássico de estrutura não simétrica é o caso de um edifício onde uma face possui sacadas e outra é uma face lisa como ilustrado na Figura 7. O balanço gerado pelas sacadas provoca um deslocamento oriundo de cargas verticais.

Figura 7 - Estrutura não simétrica.



Fonte: (Autor)

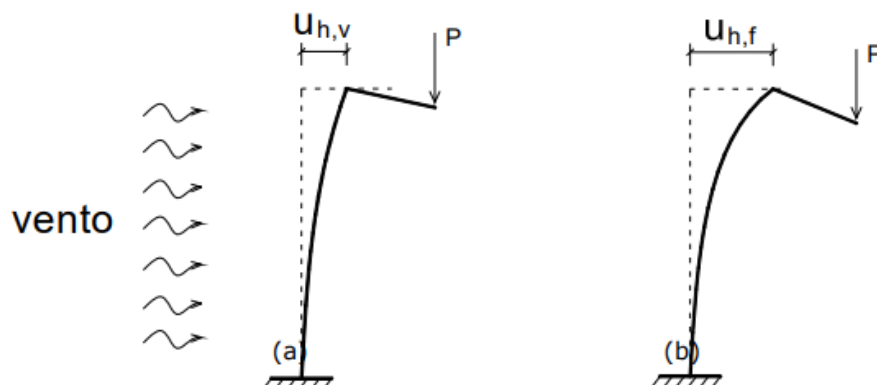
A formulação do FAVt é a seguinte:

$$FAVt = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (8)$$

Em casos onde o edifício é perfeitamente simétrico, os coeficientes FAVt e γ_z terão o mesmo valor, porque o deslocamento horizontal devido as cargas verticais será nulo.

Na situação ilustrada na Figura 8, onde o vento está sendo aplicado no mesmo sentido do deslocamento, neste caso a força do vento está contribuindo para o aumento do deslocamento inicial ($U_{h,v}$) causado pela força aplicada P. Sendo assim o FAVt será maior que o γ_z nesta situação.

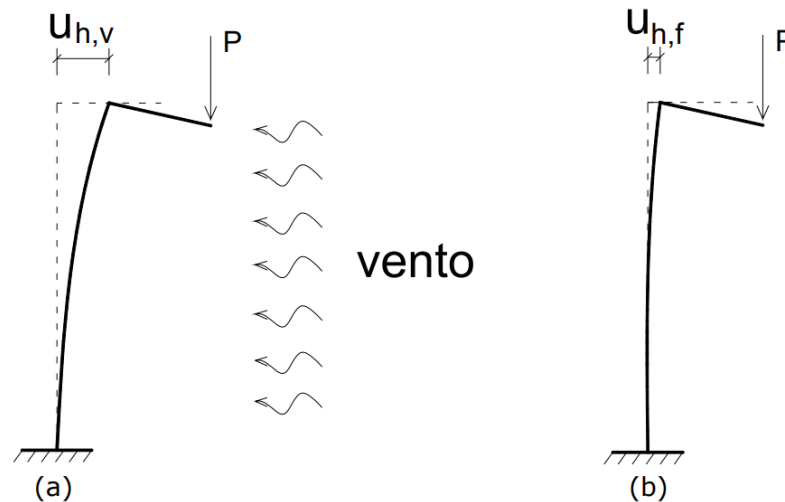
Figura 8 - Incidência do vento no mesmo sentido do deslocamento.



Fonte: Moncayo (2011)

Já na situação mostrada na Figura 9, o vento está sendo aplicado no sentido contrário ao deslocamento, neste caso a força do vento está gerando um deslocamento contrário ao deslocamento inicial ($U_{h,v}$) causado pela força aplicada P, diminuindo o deslocamento horizontal final ($U_{h,f}$) causado pelas ações verticais. Sendo assim o FAVt será menor que o γ_z nesta situação.

Figura 9 - Vento no sentido oposto ao do deslocamento horizontal devido à carga vertical.



Fonte: Moncayo (2011).

2.8.FATORES QUE INFLUENCIAM NA ESTABILIDADE GLOBAL

Segundo Moncayo (2011), os principais fatores que interferem diretamente na estabilidade de edifícios: as ações atuantes, a rigidez dos elementos estruturais, possíveis redistribuições de esforços, interação solo-estrutura e o modelo estrutural adotado. Os principais serão apresentados abaixo.

As principais ações atuantes são as ações horizontais e verticais. As cargas horizontais não geram influência sobre a instabilidade. A força do vento aplicada em uma estrutura irá gerar deslocamentos laterais que combinados com as cargas verticais pode levar ao surgimento de momentos de segunda ordem significativos na estrutura. Por mais que se aumente a magnitude do vento, não vai gerar mudança nos valores dos parâmetros α e γ_z , pois irá gerar um aumento nos momentos de primeira e segunda ordem proporcionalmente, não mudando a razão entre eles (BUENO, 2009).

As cargas verticais tem uma interferência direta na Estabilidade Global, pois quanto maior a sua magnitude, maiores serão os valores dos parâmetros α e γ_z .

A rigidez interfere diretamente na estabilidade global da estrutura. A rigidez influencia diretamente nos deslocamentos laterais gerados pelas cargas horizontais. Quanto mais rígida a estrutura, menores serão os deslocamentos e consequentemente os esforços de segunda ordem também. Em sistemas estruturais convencionais, as lajes não tem grande influência na rigidez do edifício, já os pórticos gerados por vigas e pilares, geram grande interferência na estabilidade global.

2.9.DESLOCAMENTOS LIMITES

O item 13.3 da NBR 6118/2014 aponta que devem ser feitas verificações em serviço do estado-limite de deformações excessivas da estrutura. Os deslocamentos limites são divididos em quatro grupos básicos: aceitabilidade sensorial, efeitos específicos, efeitos em elementos não estruturais e efeitos em elementos estruturais. A Tabela 5 mostra os deslocamentos limites impostos pela norma.

Tabela 5 - Limites para deslocamentos.

Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	$\ell/500$ ^c e 10 mm e $\theta = 0,0017$ rad ^d
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos	Ocorrido após a instalação da divisória	$\ell/250$ ^c e 25 mm
		Movimento lateral de edifícios	Provocado pela ação do vento para combinação frequente ($\psi_1 = 0,30$)	$H/1700$ e $H/850$ ^e entre pavimentos ^f
		Movimentos térmicos verticais	Provocado por diferença de temperatura	$\ell/400$ ^g e 15 mm

Fonte: NBR 6118/2014

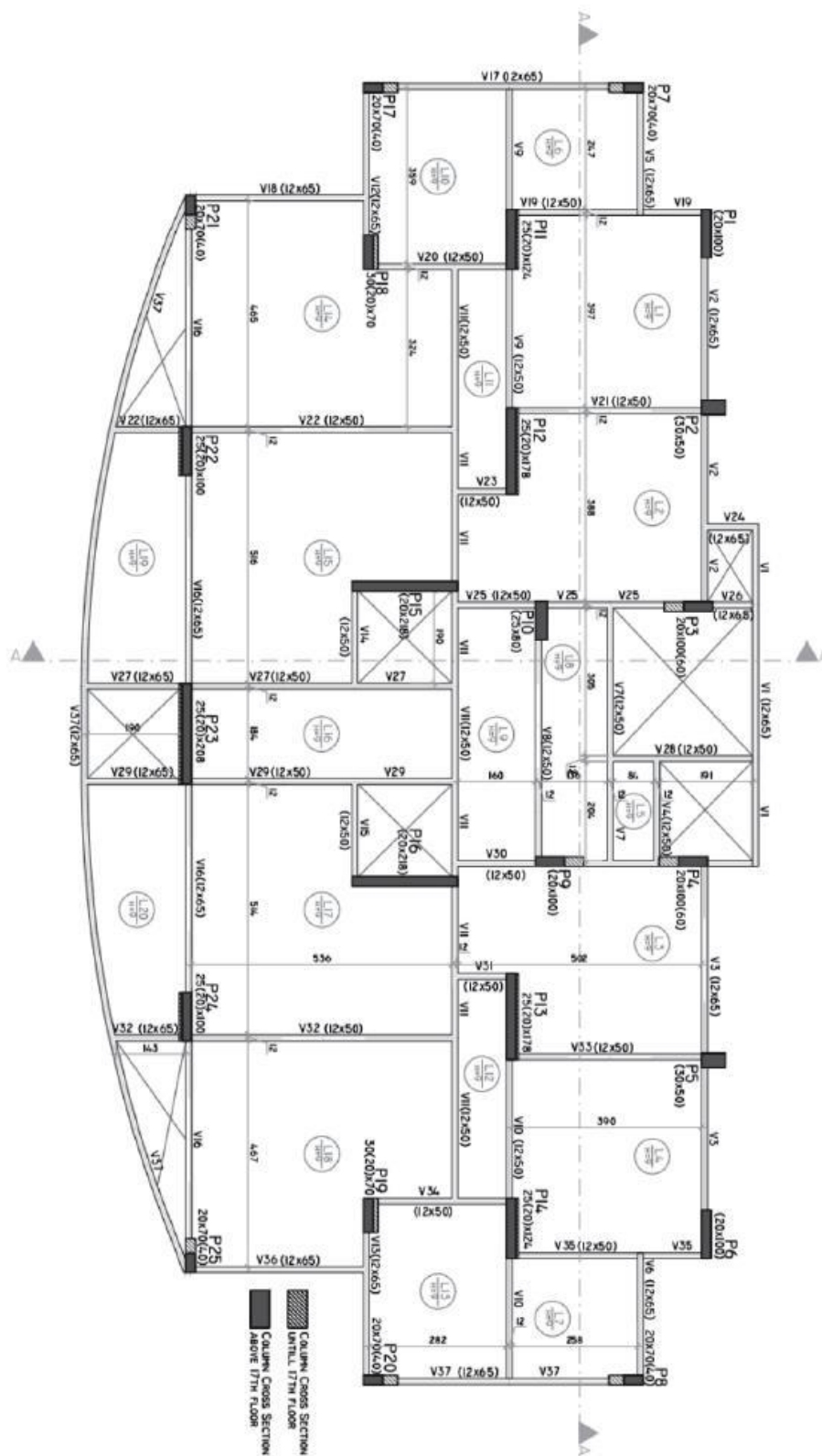
Neste trabalho será verificado o comportamento da estrutura com relação ao Movimento lateral do edifício provocado pela ação do vento para a combinação frequente ($\psi_1 = 0,3$), verificando se atenderá ao deslocamento limite de $H/1700$.

2.10. APRESENTAÇÃO DO EDIFÍCIO

O Edifício Real Class foi construído na parte urbana central de Belém/PA, dispunha de 35 pavimentos, sendo eles: 1 subsolo, térreo, 1º nível, 2º nível, 30 pavimentos tipo e uma cobertura, somando uma altura de 104,7m, com dimensões em planta de 13,9 de largura e 26,8 de comprimento.

O projeto estrutural foi concebido utilizando concreto armado, através de pórticos com lajes maciças convencionais. As vigas possuíam dimensões que variavam de 12x65cm (externas) e 12x50 (internas). A fundação utilizada foi bloco sobre estacas do tipo hélice continua de 60 centímetros de diâmetro e 9 metros de profundidade. O concreto utilizado na superestrutura foi de 35 MPa e 20 MPa para as fundações.

Figura 10 - Planta de Forma do Pav. Tipo do Edifício Real Class.



Fonte: Ribeiro (2018).

3. METODOLOGIA

Este presente trabalho visa avaliar a estabilidade global do Edifício Real Class construído em Concreto Armado, que entrou em colapso durante sua construção, que já estava em fase de acabamento em um estágio de construção muito avançado, no ano de 2011, na cidade de Belém/PA. A avaliação da estabilidade global do edifício será feita utilizando o software comercial CAD/TQS na sua versão 21 UniPro Educacional configurado de acordo com a NBR 6118/2007, versão vigente na época do ocorrido.

Foi avaliado o modelo estrutural em relação a sua estabilidade global, utilizando os parâmetros γ_z e α que são indicados pela NBR 6118 e também foi avaliado o coeficiente FAVt, que é exclusivo do sistema CAD/TQS. Os parâmetros γ_z e FAVt podem ser usados na majoração para obtenção dos esforços finais, sendo considerado os efeitos da não linearidade física e geométrica. Também será verificado a deslocabilidade lateral do edifício frente aos limites normativos.

3.1.MODELAGEM

O modelo estrutural é composto por lajes, vigas e pilares, a análise é feita em um modelo integrando todos os elementos em um pórtico espacial. O modelo escolhido para análise no CAD/TQS é o modelo IV, que faz a integração do pórtico espacial com grelha, flexibilizando conforme critérios.

No modelo IV o edifício é calculado separadamente, primeiro é processado o modelo das lajes representado por grelhas, após isso são obtidas as reações que serão aplicadas no pórtico espacial composto por barras que representam os pilares e as vigas.

Com todos dados do edifício em mãos, iniciou-se a modelagem do edifício no Sistema CAD/TQS. Foi utilizada a mesma concepção estrutural do projeto original do edifício. As etapas dos lançamentos e seus respectivos dados serão descritas nos tópicos abaixo:

3.1.1. Propriedades Mecânicas

Como especificado no projeto original, foi utilizado concreto fck C35 para os elementos da superestrutura (lajes, vigas e pilares). Em relação aos cobrimentos, para a Classe de agressividade II – Urbana, foram utilizados os valores mostrados abaixo na Figura 11:

Figura 11 - Tabela de cobrimentos CAD/TQS.

Cobrimentos em cm	
	Inferior
Lajes em geral	2.5
Lajes protendidas	3.5
Vigas	3
Pilares	3
Fundações	3

Fonte: CAD/TQS.

O CAD/TQS calcula o módulo de elasticidade do concreto a partir do fck inserido utilizando a fórmula abaixo, conforme o item 8.2.8 da NBR 6118/2014:

$$Ec1 = \alpha e \cdot 5600 \cdot fck^{0,5}, \text{ (fck em MPa), para de fck 20 a 50 MPa.} \quad (9)$$

Sendo:

$\alpha e = 1,2$ para basalto e diabásio;

$\alpha e = 1,0$ para granito e gnaisse;

$\alpha e = 0,9$ para calcário;

$\alpha e = 0,7$ para arenito.

3.1.2. Ações Atuantes

Os carregamentos permanentes e variáveis considerados para as lajes foram retirados da NBR 6120/1980 de acordo com sua utilização, o software possui valores pré-estabelecidos de acordo com a norma. As cargas no projeto foram consideradas de acordo com a Tabela 6 para cargas nas lajes e Tabela 7 para sobrecarga de alvenaria.

Tabela 6 - Cargas de Utilização para Lajes.

Tipo	Utilização	Permanente (tf/m ²)	Acidental (tf/m ²)
APART1	Sala/Cozinha/Dormitório	0,1	0,15
ESCADA	Escada	0,1	0,3
CASAMAQ	Casa De Máquinas	0,5	0,2
COBERT	Cobertura	0,15	0,1

Fonte: NBR 6120/1980.

Tabela 7 - Sobrecarga de Parede.

Tipo	Descrição	Permanente (tf/m ²)	Acidental (tf/m ²)
TJVAZ15	Alvenaria de Tijolo Furado c/ 15cm	0,18	0
PARAPEIT	Parapeito de Sacada	0,15	0

Fonte: CAD/TQS.

Para a Consideração da carga do Reservatório, o CAD/TQS não possui uma configuração de carga específica, então foi preciso estimar a carga. Foi prevista uma carga de revestimento de 0,1 tf/m² e uma altura da lâmina d'água igual a 3,40m como mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 - Cálculo da Carga para o Reservatório.

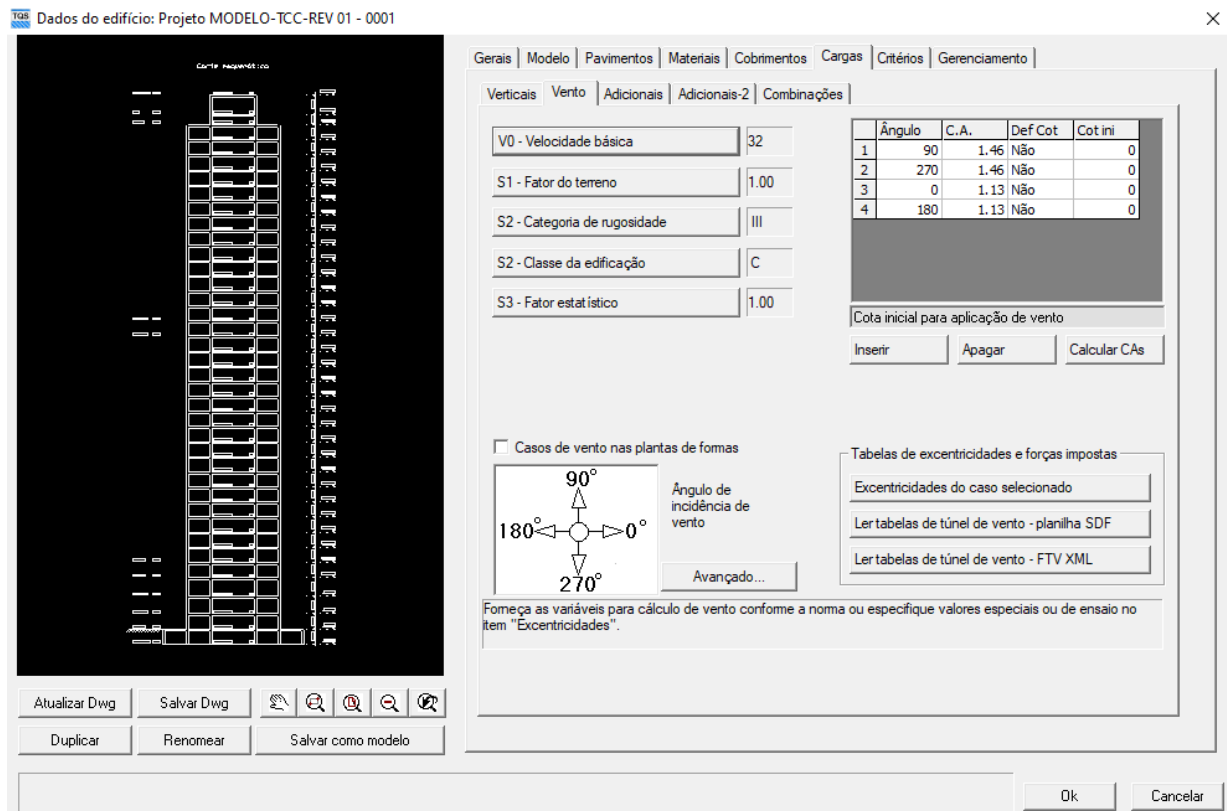
Cálculo carga do reservatório (tf/m ²)	
Revestimento	0,1
Pressão d'água	3,4
Total	3,5

Fonte: Autor

3.1.3. Ação do Vento

Para a consideração dos esforços do vento, seguiu-se as recomendações da NBR 6123/1988. O sistema CAD/TQS possui uma ferramenta própria para cálculo de forças do vento, que deve ser alimentada com os dados do edifício e sua localização geográfica, a sua interface é representada pela Figura 12.

Figura 12 - Interface para Cálculo dos esforços de Vento.

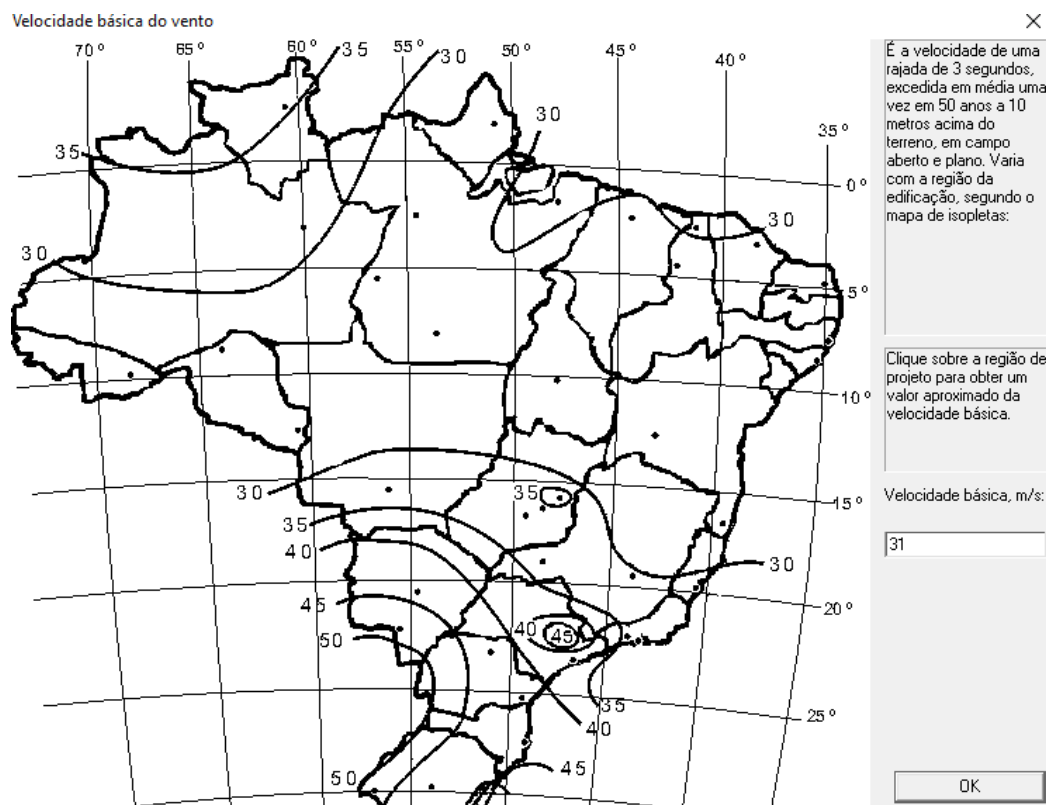


Fonte: CAD/TQS.

Para cálculo do coeficiente de arrasto, foram inseridos os seguintes parâmetros no software:

A velocidade básica do vento para a cidade de Belém/PA é de 31ms/s, de acordo com o gráfico das isopletras mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Gráfico das Isopletas.

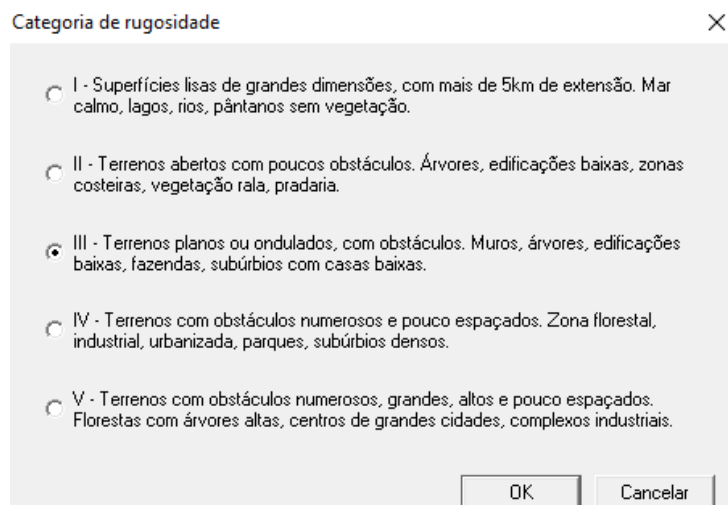


Fonte: CAD/TQS.

O fator topográfico S1 foi considerado igual a 1, por conta de ser uma região plana e sem relevos consideráveis.

A categoria de rugosidade S2 foi definida como categoria III, pelo fato de ser uma região urbanizada, porém com poucos edifícios na região e a edificação foi classificado como C, por ser maior que 50 metros (Figura 14).

Figura 14 - Categoria de Rugosidade.



Dialog box titled "Categoria de rugosidade" with a close button (X) in the top right corner. It contains five radio button options:

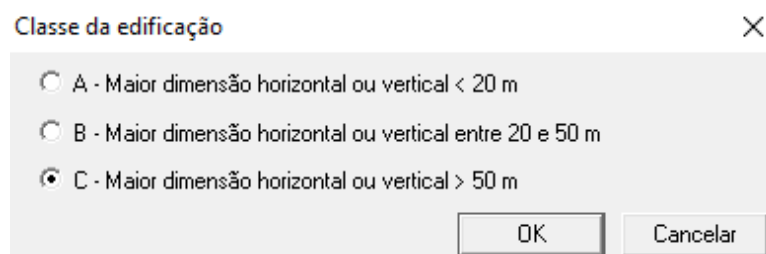
- ☐ I - Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5km de extensão. Mar calmo, lagos, rios, pântanos sem vegetação.
- ☐ II - Terrenos abertos com poucos obstáculos. Árvores, edificações baixas, zonas costeiras, vegetação rala, pradaria.
- ☒ III - Terrenos planos ou ondulados, com obstáculos. Muros, árvores, edificações baixas, fazendas, subúrbios com casas baixas.
- ☐ IV - Terrenos com obstáculos numerosos e pouco espaçados. Zona florestal, industrial, urbanizada, parques, subúrbios densos.
- ☐ V - Terrenos com obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. Florestas com árvores altas, centros de grandes cidades, complexos industriais.

At the bottom right, there are two buttons: "OK" and "Cancelar".

Fonte: CAD/TQS.

A edificação foi classificada como Classe C, por ter altura maior que 50m (Figura 15).

Figura 15 - Classe da Edificação.



Dialog box titled "Classe da edificação" with a close button (X) in the top right corner. It contains three radio button options:

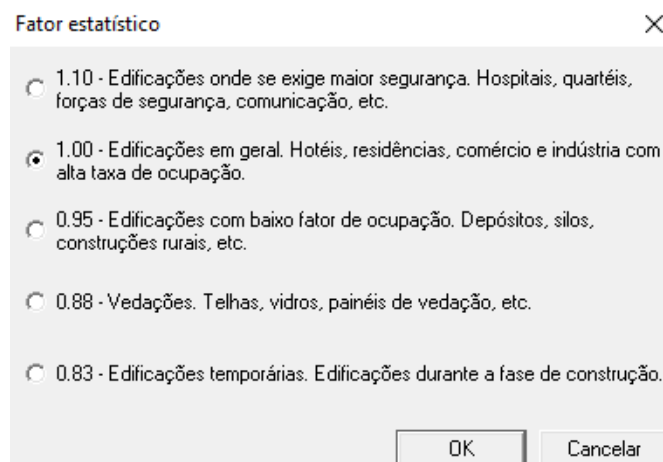
- ☐ A - Maior dimensão horizontal ou vertical < 20 m
- ☐ B - Maior dimensão horizontal ou vertical entre 20 e 50 m
- ☒ C - Maior dimensão horizontal ou vertical > 50 m

At the bottom right, there are two buttons: "OK" and "Cancelar".

Fonte: CAD/TQS.

O fator estatístico S3 foi adotado igual a 1, pelo fato de ser uma edificação para fins residências (Figura 16).

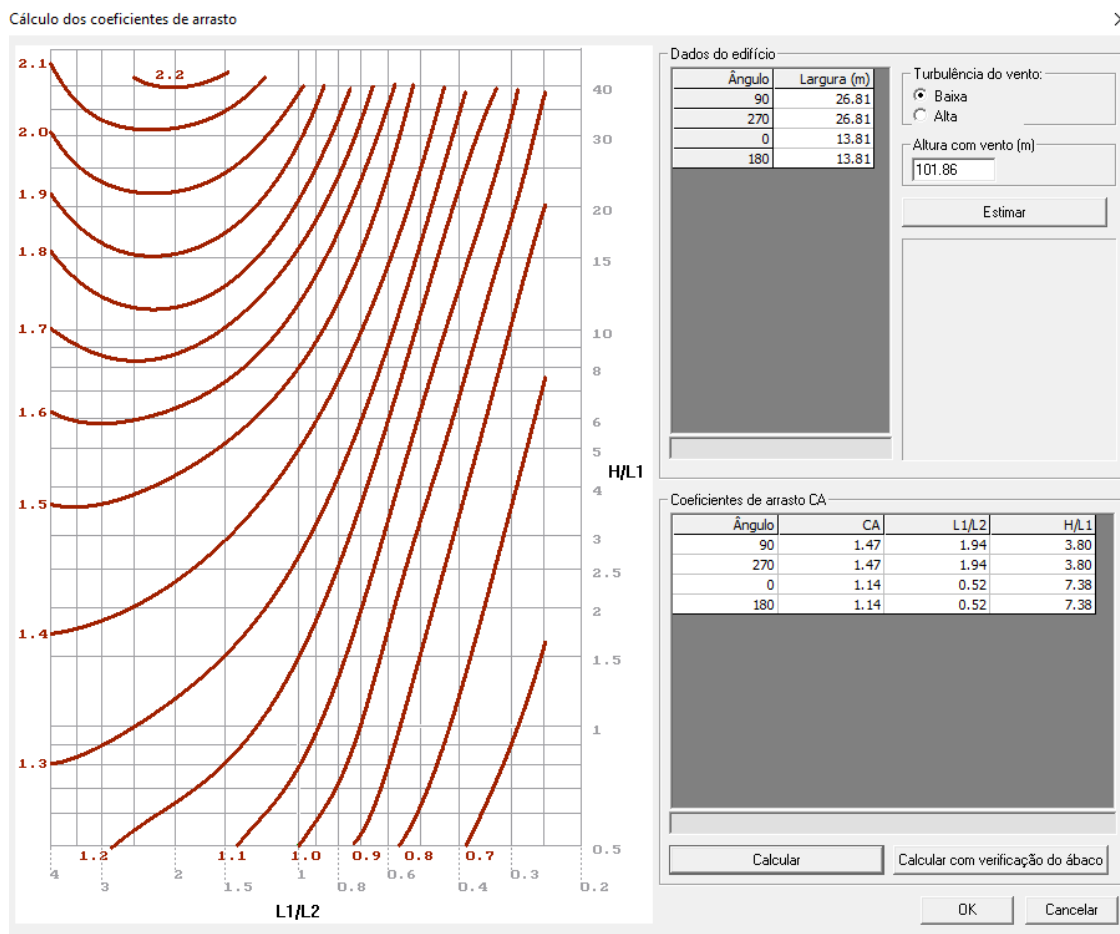
Figura 16 - Fator Estatístico.



Fonte: CAD/TQS.

O software baseado na planta de edificação lançada no modelador estrutural, estima as dimensões das faces do edifício em planta para cálculo do coeficiente de arrasto, conforme mostrado na Figura 17. A turbulência do vento foi considerada baixa, o que implica que o vento incide perpendicularmente nas faces do edifício e que altura total do edifício é maior que o dobro das edificações vizinhas como indica a NBR 6123.

Figura 17 - Cálculo Coeficiente de Arrasto.

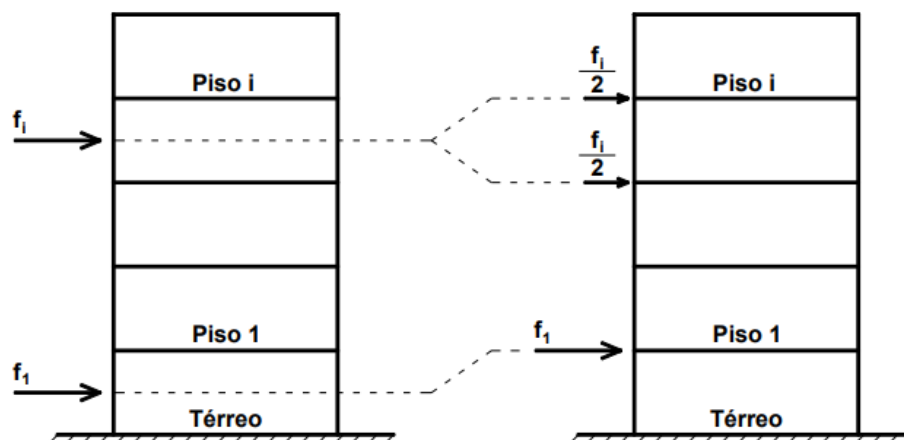


Fonte: CAD/TQS.

Como a edificação tem projeções das faces iguais para as direções de 0° e 180° foram obtidos coeficientes de arrasto iguais, o mesmo aconteceu nas direções de 90° e 270° .

As forças horizontais decorrentes da ação do vento são aplicadas na estrutura através dos nós localizados nos pisos de cada pavimento baseado na sua área de influência. Essa força é dividida em metade para o nó superior e metade para o nó inferior, exceto no primeiro pavimento que a força vai totalmente para o primeiro piso como mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Esquema para análise de vento conforme o Sistema CAD/TQS.



Fonte: Moncayo (2011).

3.1.4. Não Linearidade Física

A NBR 6118 recomenda a redução da rigidez dos elementos através de coeficientes de não linearidade, para a simulação da não linearidade física.

O CAD/TQS tem os coeficientes de não linearidade configurados por *default* como indicado pela norma. Os coeficientes usados para redução da rigidez dos pilares, vigas e lajes está indicado na Figura 19.

Figura 19 - Coeficientes de não-linearidade.

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: CAD/TQS.

3.1.5. Combinações de Esforços

As combinações de esforços são essenciais para a determinação da magnitude dos esforços de cálculo e são definidas para prever a pior situação possível, favorecendo a segurança no dimensionamento.

As ações atuantes foram aplicadas em seus respectivos elementos durante o lançamento estrutural, assim cada parcela de carga permanente ou variável será usada pelo software nos casos e combinações. As cargas utilizadas no projeto pelo software estão listadas na Tabela 9:

Tabela 9 - Ações atuantes na estrutura.

Caso	Prefixo	Descrição
1	TODAS	Todas permanentes e acidentais dos pavimentos
2	PP	Peso Próprio
3	PERM	Cargas permanentes
4	ACID	Cargas acidentais
5	VENT1	Vento (1) 90°
6	VENT2	Vento (2) 270°
7	VENT3	Vento (3) 0°
8	VENT4	Vento (4) 180°

Fonte: CAD/TQS.

No dimensionamento foram utilizadas as combinações ultimas normais, utilizando a equação dada na tabela 11.3 da NBR 6118.

$$F_d = \gamma_g \cdot F_{gk} + \gamma_{eg} \cdot F_{egk} + \gamma_q (F_{q1k} + \sum \Psi_{0j} F_{qjk}) + \gamma_e \cdot \Psi_{oe} \cdot F_{ek}$$

Onde:

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

F_{gk} – representa as ações permanentes diretas;

F_{ek} – representa as ações indiretas permanentes como a retração (F_{egk}) e variáveis como a temperatura (F_{eqk});

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

γ_g – coeficiente de ponderação das ações permanentes no ELU;

γ_q – coeficiente de ponderação das ações variáveis no ELU;

Ψ_0 – coeficiente redutor das ações variáveis secundárias, sendo que Ψ_{0e} corresponde a retração e temperatura.

Neste trabalho, para avaliação da estabilidade global do edifício em estudo, afim de se calcular os parâmetros de estabilidade γ_z , α e FAV_t , utilizaram-se 9 combinações para o estado limite último. Sendo o vento considerado como ação secundária nas combinações de 2 a 5 e sendo considerado a ação principal nas combinações de 6 a 9, como mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Combinações ELU.

Combinação	
Comb 1	(PP+PERM+ACID)*1,4
Comb 2	(PP+PERM+ACID+0.6VENT1)*1,4
Comb 3	(PP+PERM+ACID+0.6VENT2)*1,4
Comb 4	(PP+PERM+ACID+0.6VENT3)*1,4
Comb 5	(PP+PERM+ACID+0.6VENT4)*1,4
Comb 6	(PP+PERM+0.8ACID+VENT1)*1,4
Comb 7	(PP+PERM+0.8ACID+VENT2)*1,4
Comb 8	(PP+PERM+0.8ACID+VENT3)*1,4
Comb 9	(PP+PERM+0.8ACID+VENT4)*1,4

Fonte: CAD/TQS.

A tabela 13.3 da NBR 6118 cita valores limites para realizar a verificação dos deslocamentos no estado limite de serviço, para o deslocamento lateral o limite é dado por $H/1700$.

Para determinação do deslocamento lateral do edifício, foram avaliadas as combinações do estado limite de serviço, minoradas pelo coeficiente de redução para combinações frequentes, apresentadas na Tabela 11:

Tabela 11 - Combinações ELS.

Comb 5	0,3 * Vento 90°
Comb 6	0,3 * Vento 270°
Comb 7	0,3 * Vento 0°
Comb 8	0,3 * Vento 180°

Fonte: CAD/TQS.

3.2.Proposta da Nova Concepção Estrutural

Com o intuito de solucionar o problema da Estabilidade Global da estrutura, foi realizado um estudo para propor uma nova concepção estrutural para o edifício, para isso foi necessário aumentar a rigidez global da estrutura.

A primeira mudança feita foi a rotação de alguns pilares, posicionado seu maior eixo na direção da menor inércia do edifício. Após essa mudança foi processada a estrutura e notou-se uma diminuição nos fatores de estabilidade, mas não o suficiente para a estrutura ser considerada estável.

Prosseguindo com as alterações, foi necessário aumentar a rigidez da maioria dos pilares. Também foi introduzido um núcleo rígido na estrutura, adicionando um pilar em “U” na caixa de elevadores. Com essas alterações houve um grande ganho de estabilidade na estrutura e diminuição dos deslocamentos no topo, porém ainda ultrapassava os limites.

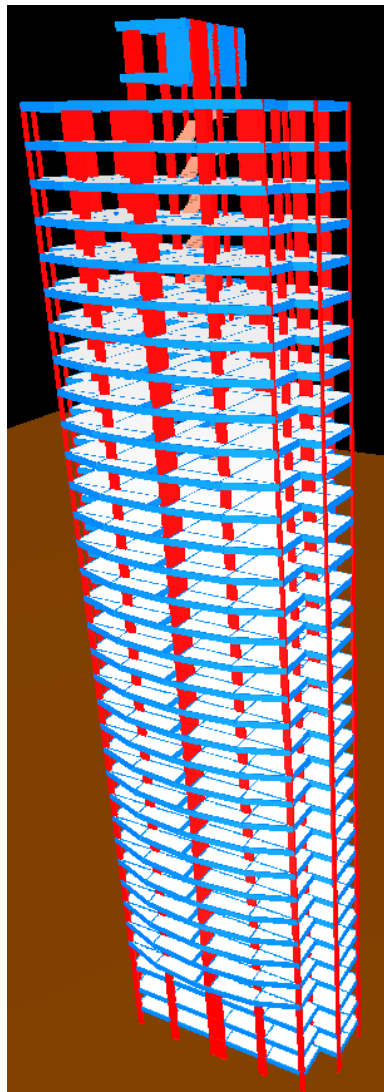
A última mudança feita, foi o aumento na rigidez das vigas, foram alteradas todas as larguras para 20 cm. E as vigas do contorno do edifício tiveram sua altura para 70 cm.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. ESTRUTURA ORIGINAL

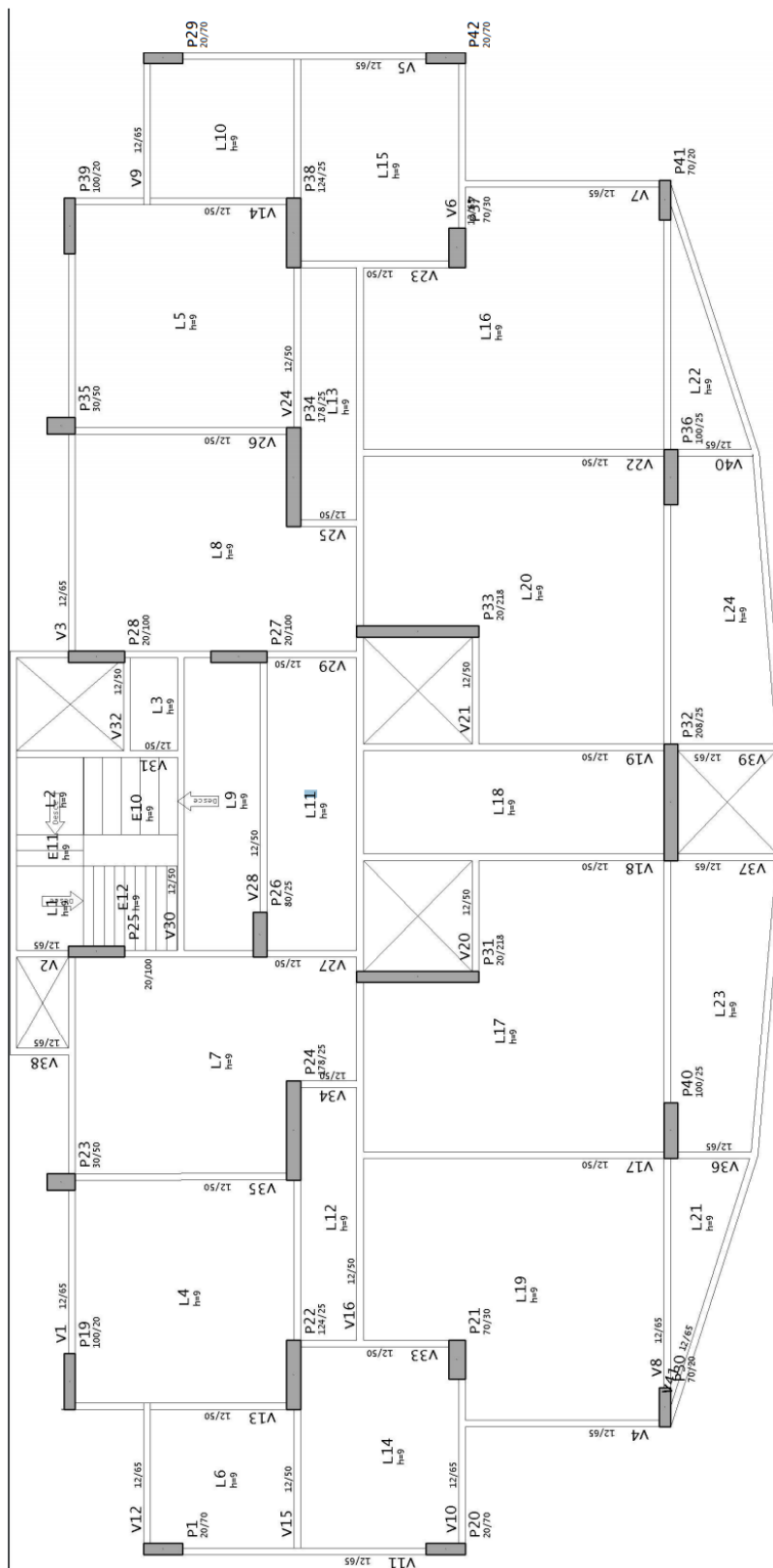
Depois de realizada a modelagem do edifício e adequação de todos os dados e parâmetros da estrutura segundo a NBR 6118, foi feito o processamento global do edifício. Através desse processamento podemos fazer a análise dos resultados e compreender como a estrutura está se comportando. O resultado da modelagem estrutural está apresentado na Figura 20, a seguir:

Figura 20 - Modelo Estrutural Edifício Real Class.



Fonte: CAD/TQS

Figura 21 - Planta de Forma do Pavimento Tipo.



Fonte: CAD/TQS.

4.1.1. AÇÕES DO VENTO

Baseado nos Dados inseridos no programa, foi feito o cálculo do coeficiente de arrasto e da pressão dinâmica que será aplicada na estrutura, na figura 26 está demonstrando os valores de pressão para as direções de 0°, 90°, 180° e 270°.

Tabela 12 - Valores Calculados de Pressão Dinâmica.

Velocidade básica (m/s) 32.0
 Fator topográfico (S1) 1.00
 Categoria de rugosidade (S2) III - Terrenos planos ou ondulados, com obstáculos
 Classe da edificação (S2) C - Maior dimensão horizontal ou vertical > 50 m
 Fator estatístico (S3) 1.00 - Edificações em geral

Caso	Ângulo (graus)	Coef. arrasto	Área (m²)	Pressão (tf/m²)
5	90.0	1.47	2616.3	0.101
6	270.0	1.47	2616.3	0.101
7	0.0	1.14	1356.1	0.079
8	180.0	1.14	1356.1	0.079

Fonte: CAD/TQS.

Podemos observar que a intensidade do vento a 90° e 270° e também a 0° e 180°, por conta de serem faces opostas e com dimensões iguais.

4.1.2. PARÂMETROS DE INSTABILIDADE

O CAD/TQS calcula os parâmetros de instabilidade definidos pela NBR 6118, parâmetro de Instabilidade α e coeficiente γ_z . Também é calculado o Coeficiente FAVt, que é de uso exclusivo do sistema CAD/TQS e utiliza a mesma formulação do coeficiente γ_z , porém, considera também o deslocamento horizontal gerado pelas cargas verticais. Quando valores de FAVt são menores que o γ_z , o TQS considera o maior valor automaticamente, que no caso seria o γ_z . Como configuração padrão o TQS calcula o γ_z apenas para as combinações simples de vento, como mostrado na Tabela 13 abaixo:

Tabela 13 - Parâmetro de estabilidade para os carregamentos simples de vento.

Caso	Ang	M 2°	M 1°	γ_z	α
5	90.0	3931.6	14968.1	1.502	1.444
6	270.0	3931.6	14968.1	1.502	1.444
7	0.0	844.8	6238.9	1.208	1.013
8	180.0	844.8	6238.9	1.208	1.013

Fonte: CAD/TQS.

Para cálculo do coeficiente FAVt são usadas as demais combinações do estado limite último, como apresentado na tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetro de estabilidade para combinações de ELU.

Caso	Ang	M 2°	M 1°	FAVt	α
14	90.0	2403.0	8980.9	1.516	1.457
15	270.0	2314.9	8980.9	1.502	1.430
16	0.0	576.7	3743.3	1.244	1.091
17	180.0	437.1	3743.3	1.208	0.928
18	90.0	3969.8	14968.1	1.510	1.451
19	270.0	3893.4	14968.1	1.502	1.437
20	0.0	907.6	6238.9	1.227	1.056
21	180.0	782.0	6238.9	1.208	0.968
25	90.0	2422.4	8980.9	1.523	1.469
26	270.0	2295.5	8980.9	1.502	1.419
27	0.0	585.7	3743.3	1.249	1.103
28	180.0	428.0	3743.3	1.208	0.913
29	90.0	3988.4	14968.1	1.513	1.458
30	270.0	3874.8	14968.1	1.502	1.430
31	0.0	915.8	6238.9	1.230	1.063
32	180.0	773.8	6238.9	1.208	0.960

Fonte: CAD/TQS.

Em alguns casos, como nas combinações 15, 19, 26 e 30 podemos perceber a adoção do valor do coeficiente γ_z no lugar do FAVt.

Para as direções de 90° e 270° observa que os coeficientes são maiores, por conta do arranjo estrutural do edifício. Nessas direções se tem a maior dimensão em planta, porem a maioria dos pilares foram locados com a menor inércia na direção 90° e 270°. Portanto, por consequência da concepção estrutural houve uma deficiência de rigidez na região mais crítica, onde o vento tem mais incidência por ter uma maior área de influência, se comparado as direções de 0° e 180° onde a área de influência do vento é menor, por ter uma menor dimensão em planta.

Fazendo uma comparação dos valores dos coeficientes de estabilidade em relação aos limites estabelecidos em norma, pode-se concluir que a estrutura é considerada de nós móveis, já que todos os valores são maiores que 1,10. O TQS fixa o valor limite para os coeficientes de estabilidade em 1,2, todos os coeficientes ultrapassaram o limite, como mostrado na Tabela 15.

Tabela 15 - Parâmetros de instabilidade.

Parâmetro	Valor máximo
GamaZ	1,5
FAVt	1,52
Alfa	1,47
Limite	1,30

Fonte: CAD/TQS.

Baseado na análise dos resultados, podemos chegar à conclusão que o sistema estrutural adotado não é considerado estável, a partir desse ponto, no momento do projeto deveria ter se pensado em uma nova concepção estrutural para o edifício.

4.1.3. DESLOCAMENTOS LATERAIS

Para realização da análise dos deslocamentos laterais da estrutura, foram utilizadas as combinações de vento do estado limite de serviço. As combinações utilizadas foram retiradas da NBR 6118 e apresentadas na Tabela 11 deste presente trabalho. Na Tabela 16 está apresentado os resultados obtidos através do processamento da estrutura no CAD/TQS, comparado ao limite normativo.

Tabela 16 - Deslocamento máximo no topo da estrutura.

Caso	dmáx(cm)	desl. relativo	desl. Limite (cm)	Altura
5	19	H/551	6,16	104,74 m
6	19	H/551	6,16	
7	3,73	H/2804	6,16	
8	3,73	H/2804	6,16	

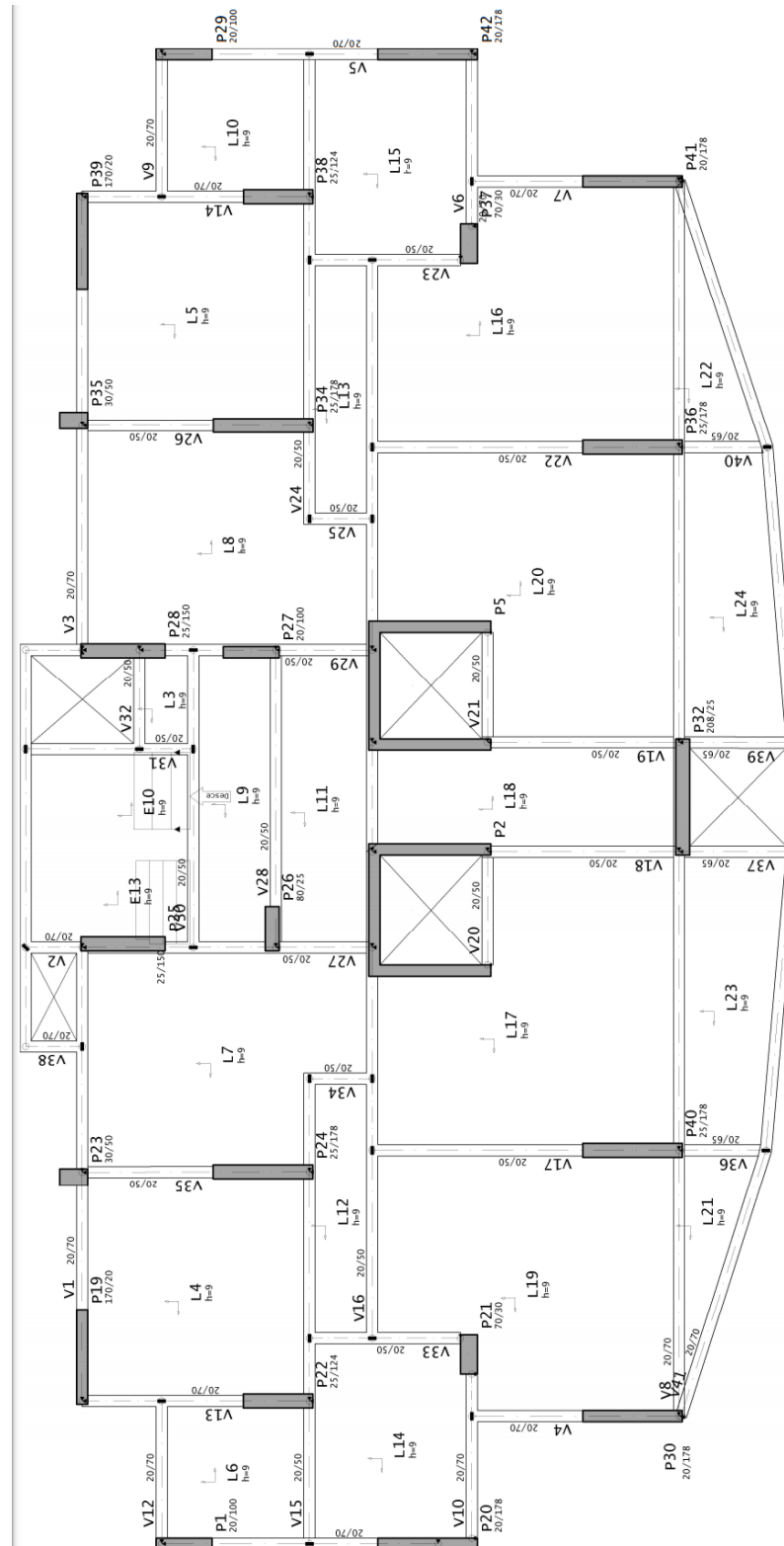
Fonte: CAD/TQS.

Analisando os resultados observa-se maiores deslocamentos para os casos 5 e 6, que avalia o vento nas direções 90° e 270° respectivamente, que são consideradas as direções mais críticas por terem maior incidência do vento. Para os dois casos o deslocamento limite H/1700 estabelecido pela NBR 6118 foi ultrapassado, sendo assim a estrutura reprovada neste quesito por apresentar deslocamento excessivo.

4.2.NOVA CONCEPÇÃO ESTRUTURAL

Após as alterações serem feitas, foi realizado o processamento para que fosse analisado o comportamento da nova estrutura. Com as revisões feitas, a expectativa é que a estrutura tenha um comportamento mais rígido frente aos esforços horizontais. A nova concepção está apresentada na planta de forma a seguir:

Figura 22 - Planta de Forma do Pavimento Tipo.



Fonte: CAD/TQS.

4.2.1. ESTABILIDADE GLOBAL

Para a nova concepção foram avaliados os mesmos parâmetros de estabilidade como na estrutura original e foram obtidos os seguintes resultados para os fatores de Estabilidade Global, apresentados nas tabelas a seguir:

Tabela 17 - Parâmetro de estabilidade para os carregamentos simples de vento.

Caso	Ang	M 2°	M 1°	γ_z	α
5	90.0	1531.9	14969.7	1.150	0.913
6	270.0	1531.9	14969.7	1.150	0.913
7	0.0	613.7	6238.2	1.143	0.849
8	180.0	613.7	6238.2	1.143	0.849

Fonte: CAD/TQS.

Tabela 18 - Parâmetro de estabilidade para combinações de ELU.

Caso	Ang	M 2°	M 1°	FAVt	α
16	90.0	875.7	8981.8	1.150	0.893
17	270.0	962.5	8981.8	1.158	0.932
18	0.0	389.0	3742.9	1.152	0.871
19	180.0	347.3	3742.9	1.143	0.827
20	90.0	1489.4	14969.7	1.150	0.901
21	270.0	1574.4	14969.7	1.155	0.924
22	0.0	632.7	6238.2	1.148	0.861
23	180.0	594.6	6238.2	1.143	0.837
36	90.0	859.2	8981.8	1.150	0.883
37	270.0	979.0	8981.8	1.161	0.942
38	0.0	393.8	3742.9	1.155	0.879
39	180.0	342.5	3742.9	1.143	0.818
40	90.0	1473.5	14969.7	1.150	0.895
41	270.0	1590.3	14969.7	1.156	0.930
42	0.0	637.3	6238.2	1.149	0.865
43	180.0	590.1	6238.2	1.143	0.833

Fonte: CAD/TQS.

Como esperado houve ganho de rigidez na estrutura após as alterações feitas, visto que todos os parâmetros de estabilidade ficaram abaixo do limite normativo (Tabela 19). Grande parte dessa diminuição dos parâmetros é causado pela introdução do núcleo rígido a estrutura que gera um aumento de rigidez considerável.

Tabela 19 - Parâmetros de instabilidade.

Parâmetro	Valor máximo
GamaZ	1,15
FAVt	1,16
Alfa	0,94
Limite	1,30

Fonte: CAD/TQS

A estrutura é considerada de nós móveis pois apresenta parâmetros de instabilidade $> 1,1$, sendo assim se faz necessário a verificação dos efeitos de segunda ordem na estrutura, podendo usar o Coeficiente γ_z ou o FAVt como coeficiente majorador.

4.2.2. DESLOCAMENTOS LATERAIS

Para realização da análise dos deslocamentos laterais da estrutura, foram utilizadas as combinações de vento do estado limite de serviço. Os deslocamentos obtidos estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Deslocamento máximo no topo da estrutura.

Caso	dmáx(cm)	desl. relativo	desl. Limite (cm)	Altura
5	6,3	H/ 1663.7	6,16	104,74 m
6	6,3	H/ 1663.7	6,16	
7	2,01	H/ 5198.5	6,16	
8	2,01	H/ 5198.5	6,16	

Fonte: CAD/TQS

Os deslocamentos obtidos ficaram um pouco acima do limite, porém para fins de estudo os valores foram aceitos. Se comparado com a estrutura original teve uma diminuição de 33% em relação ao deslocamento máximo.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a estabilidade Global do Edifício Real Class frente aos parâmetros normativos: parâmetro de Instabilidade α , coeficiente γ_z e FAV_t , análise de deslocamentos e pressões de vento atuantes e ainda propor uma nova concepção estrutural afim de solucionar o problema da Estabilidade Global.

Para realização do trabalho foi feita uma Revisão Bibliográfica sobre os principais tópicos relacionados a estabilidade global de edifícios, análise estrutural, ações atuantes em estruturas de concreto armado, parâmetros de estabilidade, deslocamentos limites. Também foi preciso realizar um estudo sobre o software CAD/TQS, que foi utilizado para auxiliar nas análises feitas do comportamento da estrutura.

Fazendo uma análise sobre a concepção estrutural do edifício, já era possível se esperar deslocamentos e parâmetros de estabilidade com valores elevados. Observando a locação dos pilares, foi constatado que os principais pilares foram posicionados com sua maior dimensão na direção da maior inércia global do edifício, assim não contribuindo com a rigidez do edifício na direção mais crítica.

Os resultados obtidos na avaliação dos parâmetros de estabilidade, mostraram que a estrutura não possuía rigidez o suficiente frente aos esforços solicitantes. Os valores ultrapassaram o limite aceitável em todos os coeficientes calculados, mostrando que a estrutura apresentava deficiência na concepção do seu núcleo rígido, não resistindo aos esforços horizontais como o vento.

Analisando os deslocamentos laterais do pórtico do edifício foram constatados deslocamentos excessivos, mostrando mais uma vez que a estrutura apresenta grande flexibilidade.

Foi proposta uma nova concepção para estrutura que atendeu os parâmetros de estabilidade, para isso foi necessário enrijecer alguns elementos da estrutura, rotacionar alguns pilares e acrescentar um núcleo rígido.

Vale ressaltar o uso do software como auxílio ao projetista, que é uma ferramenta que aumenta bastante a produtividade de forma assertiva, se usado da maneira certa. Cabe ao projetista fornecer ao software todos os parâmetros da obra necessários para realização dos cálculos e conferência dos critérios adotados, para que os resultados sejam o mais próximo da realidade possível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2007.

BUENO, M. M. E. **Avaliação dos parâmetros de instabilidade global em estruturas de concreto armado**. 2009. 105 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília – DF. 2009

CECCON, J. L. **Análise dos efeitos de segunda ordem em pilares solicitados a flexão oblíqua composta**. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2008.

DINIZ, C. W. S. **Estabilidade global de edifícios considerando a influência da excentricidade na ligação viga-pilar parede**. 2017. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2017

FICHER, S. **Edifícios altos no Brasil**. Espaço e Debates, São Paulo, v24, n.37, p.61-76, 1994.

GONÇALVES, J. C. S. **The environmental performance of tall buildings**. London: Earthscan, 2010.

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

MONCAYO, Wiston Junior Zumaeta. **Análise de segunda ordem global em edifícios com estrutura de concreto armado**. 2011. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 2011.

OLIVEIRA, D. M. **Parâmetros de instabilidade global das estruturas de concreto armado segundo a nova NBR-6118**. 2002. 153p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG. 2002.

OLIVEIRA, J. C. A. **Avaliação da rigidez de pórticos tridimensionais de concreto armado**. 2009. 135p. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia – Universidade de Brasília, Brasília – DF. 2009

PINTO, R. S. **Não linearidade física e geométrica no projeto de edifícios usuais de concreto armado**. 1997. 108p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos -SP. 1997.

RAMIRES, J. C. L. **A cultura do consumo e a produção simbólica dos espaços verticalizados nas cidades brasileiras**. Boletim Goiano de Geografia. Universidade Federal de Goiás. V. 17 – nº 2. p. 27-47. Uberlândia, 1997.

RIBEIRO, R. J. C. OLIVEIRA, D. R. C. (2018). **O colapso do edifício Real Class**. 16p. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. vol.11 no.2. São Paulo - SP. 2018.

SANTOS, T. P. **Comportamento do Sistema estrutural em Edifícios altos de Concreto Armado considerando a influência das modelagens do Núcleo Rígido**. 2018. 177p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Alagoas – AL. 2018.

SPERANZA, S. M. speranzaengenharia.ning.com.br. **Speranza Engenharia**, 2017. Disponível em: < <http://speranzaengenharia.ning.com/page/real-class> >. Acesso em 14 fev. 2021.