

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

LUCAS SOARES SANTOS DO NASCIMENTO

**SOBRE OS PARÂMETROS DE INSTABILIDADE
GLOBAL E AS RELAÇÕES ENTRE O ALFA E O
GAMA-Z**

JOÃO PESSOA

2023

LUCAS SOARES SANTOS DO NASCIMENTO

**SOBRE OS PARÂMETROS DE INSTABILIDADE
GLOBAL E AS RELAÇÕES ENTRE O ALFA E O
GAMA-Z**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal da Paraíba (UFPB), como
parte das exigências para a obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Prof. José Marcilio Filgueiras Cruz

João Pessoa

2023

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

N244s Nascimento, Lucas Soares Santos do.
SOBRE OS PARÂMETROS DE INSTABILIDADE GLOBAL E AS
RELAÇÕES ENTRE O ALFA E O GAMA-Z / Lucas Soares Santos
do Nascimento. - João Pessoa, 2023.
70 f.

Orientação: José Marcício Filgueiras Cruz.
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. parâmetro Alfa, coeficiente Gama-Z, estrutural.
I. Cruz, José Marcício Filgueiras. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 624(043.2)

FOLHA DE APROVAÇÃO

LUCAS SOARES SANTOS DO NASCIMENTO

SOBRE OS PARÂMETROS DE INSTABILIDADE GLOBAL E AS RELAÇÕES
ENTRE O ALFA E O GAMA-Z

Trabalho de Conclusão de Curso em 12/06/2023 perante a seguinte Comissão Julgadora:

José Marcelo Filgueiras Cruz APROVADO
José Marcelo Filgueiras Cruz
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Enildo Tales Ferreira APROVADO
Enildo Tales Ferreira
UFPB

Carlos Antônio Taurino de Lucena APROVADO
Carlos Antônio Taurino de Lucena
UFPB

Prof. Pablo Brilhante de Sousa
Matricula Sinape: 1483214
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Civil

RESUMO

NASCIMENTO, Lucas. **SOBRE OS PARÂMETROS DE INSTABILIDADE GLOBAL E AS RELAÇÕES ENTRE O ALFA E O GAMA-Z**. 2023, 70 pág. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2023.

Nos últimos anos, tem havido uma mudança no padrão de construção de edifícios, com uma tendência para estruturas cada vez mais esbeltas. Razão pela qual, essas edificações estão mais sujeitas aos efeitos de segunda ordem, o que requer uma análise cuidadosa por parte dos engenheiros estruturais. Para simplificar essa análise complexa, os parâmetros de instabilidade global têm sido utilizados como uma alternativa para verificar os efeitos globais de segunda ordem de forma mais simplificada. Neste trabalho, será discutido mais detalhadamente o parâmetro Gama-Z e o seu relacionamento com o parâmetro Alfa. Para alcançar esse objetivo, discutiu-se a formulação, cálculo e aplicação do Coeficiente γ_z em função do parâmetro alfa com base em estudos e conclusões de alguns autores ao longo do tempo.

Palavras-chave: edifícios esbeltos, efeitos de segunda ordem, parâmetro Alfa, parâmetro Gama-Z, análise estrutural.

ABSTRACT

NASCIMENTO, Lucas. **ON THE GLOBAL INSTABILITY PARAMETERS AND THE RELATION BETWEEN ALFA AND GAMA-Z.** 2023, 70 pág. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2023.

In recent years, there has been a shift in the construction pattern of buildings, with a growing trend towards slender structures. However, these buildings are more susceptible to second-order effects, necessitating careful analysis by structural engineers. To simplify this complex analysis, global instability parameters have been employed as an alternative for a more streamlined assessment of second-order global effects. This study focuses on a detailed discussion of the Gama-Z parameter and its relationship with the Alfa parameter. The aim is to explore the formulation, calculation, and application of the γ_z coefficient in relation to the Alfa parameter, based on studies and conclusions drawn from various authors over time.

Keywords: slender buildings, second-order effects, Alfa parameter, Gama-Z parameter, structural analysis.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Nosso Senhor Jesus Cristo, à sua mãe, a Virgem Maria e ao seu pai adotivo, São José.

A São Josemaria Escrivá, a São José de Cupertino e a São João Bosco.

Ao meu pai Joelson, à minha mãe Christiane e ao meu irmão Gabriel.

À toda minha família pelo apoio desmedido durante o período da graduação.

À minha namorada Cecília.

Ao professor José Marcilio Filgueiras Cruz pela orientação e suporte durante a elaboração deste trabalho.

A todos os professores, colegas de curso e funcionários que contribuíram com minha formação.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 4.1 - Estrutura de nós fixos e estrutura de nós móveis
- Figura 4.2 - Problema de estabilidade de 1ª espécie ou de bifurcação do equilíbrio
- Figura 4.3 - Problema de estabilidade de 2ª espécie ou de carga última
- Figura 4.4 - Problema de estabilidade de 3ª espécie ou de ponto limite
- Figura. 4.5 - Diagrama tensão x deformação (material não- linear)
- Figura 4.6 - Efeitos globais de segunda ordem
- Figura 4.7 - Efeito da não-linearidade geométrica
- Figura. 4.8 - Elementos estruturais verticais de contraventamento e contraventado
- Figura 5.1 - Fachadas frontal e lateral.
- Figura 5.2 – Planta de fôrma do pavimento tipo
- Figura 5.3 - Definição do Sistema Estrutural de Contraventamento da direção Y
- Figura 5.4 - Definição do Sistema Estrutural de Contraventamento da direção X
- Figura 5.6 - Ábaco de correlação do alfa com o gama z
- Figura 5.6a- Ábaco de correlação do alfa com o gama z
- Figura 5.7 - Ábaco de correlação do alfa com o gama z
- Figura 5.7a - Ábaco de correlação do alfa com o gama z
- Figura 5.8 - Tabela 3.10, página:62, de Cruz et al (2021)
- Figura 5.9 - Planta do pavimento tipo
- Figura 5.10 Planta de fôrma
- Figura 5.11 - SECy
- Figura 5.12 - Pórtico do SECy
- Figura 5.13 planta baixa do pavimento tipo
- Figura 5.14 Lançamento da estrutura
- Figura 5.15 SEC da direção Y
- Figura 5.16 Pórtico do SECy

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Efeito do vento na direção Y e na direção X

Tabela 5.2 - Elementos para o cálculo do $M_{1,tot,d,y}$

Tabela 5.3 Elementos para o cálculo do $\Delta M_{1,tot,d,y}$

Tabela 5.4 Elementos para o cálculo do $M_{1,tot,d,x}$

Tabela 5.5 Elementos para o cálculo do $\Delta M_{1,tot,d,x}$

Tabela 5.6 -Efeito do vento na direção Y

Tabela 5.7 - Elementos para o cálculo do $M_{1,tot,d,y}$

Tabela 5.8 - Elementos para o cálculo do $\Delta M_{1,tot,d,y}(\text{kNm})$

Tabela 5.9 - Deslocamento horizontal no topo e inércia do pilar equivalente

Tabela 6.1 - Valores do Gama-Z obtidos através de diferentes expressões

Tabela 6.2 - Erros em percentual - Carmo/Márcio Fonte

Tabela 6.3 Erros em percentual

LISTA DE SIMBOLOS

α – Parâmetro de instabilidade global alfa

γ_z – Coeficiente de Majoração dos Esforços Globais de 1ª ordem

γ_{fv} - Ponderação das ações verticais

λ – Fator de carga crítica

λ_{geo} - Índice de esbeltez geométrico

$M_{1,tot,d}$ - Soma dos momentos das forças horizontais

$\Delta M_{tot,d}$ - Soma dos momentos das forças verticais

$\Delta M_{tot,d}$ - Soma do momento entre força vertical e deslocamento horizontal

$M_{1,tot,d}$ - Momento de tombamento

a_h - Deslocamento horizontal decorrente de ações horizontais

a_v - Deslocamento horizontal decorrente de ações verticais

As' - Armadura de compressão, para vigas com armadura dupla.

As - Armadura de tração

B_y - Projeção horizontal da edificação

D - Vetor de deslocamentos

E_c – Módulo de elasticidade

e – Excentricidade

EI – Rigidez a flexão

EI_k - Somatório dos valores de rigidez de todos os pilares na direção considerada

E_{ci} - Módulo de deformação tangente inicial

E_{cs} - Módulo de elasticidade secante

f_r – Fator de redução

F_h - Força horizontal

F_v - Força vertical

f_{Req} - Fator de redução equivalente

f_{ck} – Resistência característica à compressão do concreto

f_{yk} – Resistência ao escoamento do aço

H - Altura total da estrutura

I - Momento de inércia da seção bruta de concreto

I - Inércia reduzida

I - Inércia da seção bruta

NBR – Norma Brasileira Registrada

NLF – Não Linearidade Física

E_c – Módulo de elasticidade

NLG – Não Linearidade Geométrica

NLFG - comportamento não-linearidade físico e geométrico da estrutura

Mpa – Mega Pascal

P_{cr} – Carga crítica

P_k - Carga axial qualquer

H - Altura total da estrutura

SEC – Sistema Estrutural de Contraventamento

V_o – Velocidade básica do vento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. Objetivo Geral.....	15
2.2. Objetivo Principal.....	15
2.2.1. Objetivos Específicos.....	15
3. METODOLOGIA DO TRABALHO.....	16
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
4.1. Carga do vento.....	17
4.2. Carga do desaprumo.....	18
4.3. Carga de gravidade.....	19
4.4. Os problemas de estabilidade.....	19
4.5. Não Linearidade.....	22
4.5.1. Não linearidade física.....	23
4.5.2. Não linearidade geométrica.....	26
4.6. Combinação de cargas.....	28
4.7. Parâmetro de verificação de estabilidade/ instabilidade global.....	29
4.7.1 Parâmetro de instabilidade global alfa.....	30
4.7.2. Coeficiente Gama-Z.....	31
4.8. RELAÇÕES ENTRE O PARÂMETRO α E O COEFICIENTE γ_z	32
4.8.1. AS CORREÇÕES DOS VALORES DOS PARÂMETROS α E γ_z	34
5. APLICAÇÕES.....	35
5.1. APLICAÇÃO 1.....	35
5.1.1. Avaliação do parâmetro α segundo as direções X e Y definidas na projeção horizontal da edificação, com a aplicação da expressão recomendada na ABNT NBR 6118:2014.....	36
5.1.1.1. Estimativa do Parâmetro de Instabilidade Global Alfa na direção Y:.....	37
5.1.1.2. Estimativa do Parâmetro Alfa na direção X.....	39
5.1.2. Avaliação do γ_z a partir do carregamento devido ao vento e do carregamento vertical estimado utilizado na avaliação do α . Com a aplicação da expressão recomendada na ABNT NBR 6118:2014.....	40
5.1.2.1. Cálculo do Gama-Z da direção Y.....	41
5.1.2.2. Cálculo do Gama-Z da direção X.....	42
5.1.3. Avaliação do γ_z a partir do parâmetro α	44
5.1.4. Avaliação do α a partir do parâmetro α , do f_{ck} , e do f_{Req}	45
5.2. APLICAÇÃO 2.....	48
5.2.1. Avaliação do parâmetro α segundo a direção Y definida na projeção horizontal da edificação, com a aplicação da expressão recomendada na ABNT NBR 6118:2014.....	50
5.2.1.1 Estimativa do Parâmetro de Instabilidade Global Alfa na direção Y:.....	51
5.2.2. Avaliação do γ_z a partir do carregamento devido ao vento e do carregamento vertical estimado utilizado na avaliação do α . Com a aplicação da expressão	

recomendada na ABNT NBR 6118:2014.....	52
5.2.3. Cálculo do Gama-Z da direção Y.....	53
5.2.4. Avaliação do γ_z a partir do parâmetro α	54
5.2.5. Avaliação do γ_z a partir do parâmetro α , do f_{ck} , e do f_{Req}	55
5.3. APLICAÇÃO 3.....	56
5.3.1. Avaliação do parâmetro α segundo a direção Y definida na projeção horizontal da edificação, com a aplicação da expressão recomendada na ABNT NBR 6118:2014.....	57
5.3.1.1 Estimativa do Parâmetro de Instabilidade Global Alfa na direção Y.....	58
5.3.2. Avaliação do γ_z a partir do carregamento devido ao vento e do carregamento vertical estimado utilizado na avaliação do α . Com a aplicação da expressão recomendada na ABNT NBR 6118:2014.....	59
5.3.2.1. Cálculo do Gama-Z da direção Y.....	60
5.3.3. Avaliação do γ_z a partir do parâmetro α	60
5.3.4. Avaliação do γ_z a partir do parâmetro α , do f_{ck} , e do f_{Req}	61
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	63
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
REFERÊNCIAS.....	68

1.INTRODUÇÃO

Existe uma tendência global, especialmente nos grandes centros urbanos, de edifícios cada vez mais altos e com elevado índice de esbeltez geométrica (relação entre a altura e menor dimensão da projeção horizontal do edifício). Essa demanda pode ser justificada por diferentes motivos, sendo os principais: os avanços nos softwares de cálculo estrutural, a escassez de terrenos juntamente com seu elevado valor, as novas tecnologias dos materiais e os projetos arquitetônicos mais inovadores.

“Quanto mais alta e esbelta a estrutura, mais suscetível ela será às ações horizontais, que são provocadas de forma significativa pelo efeito do vento, que por sua vez pode causar esforços adicionais à estrutura.” (SILVA, 2020, p.14). Por isso, é fundamental projetar estruturas que sejam seguras e eficientes, capazes de resistir adequadamente às ações verticais (como o peso próprio e as sobrecargas aplicadas) e horizontais (como empuxos e ações do vento). De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, uma estrutura é considerada segura quando as hipóteses de cálculo adotadas na fase de projeto são confirmadas, seguindo as premissas estabelecidas na norma.

O objetivo dos sistemas estruturais é oferecer estabilidade e rigidez aos edifícios. Por isso, a verificação da estabilidade global deve ser um dos primeiros e mais importantes aspectos considerados pelo projetista de estruturas. Quando essa análise é feita corretamente, a estrutura pode resistir e redistribuir os efeitos das deslocabilidades de forma segura, garantindo o seu bom desempenho durante sua vida útil.

Portanto, a estabilidade global e os efeitos de segunda ordem são temas cruciais na concepção dos projetos estruturais, especialmente em edifícios altos e esbeltos. É fundamental que esses aspectos sejam cuidadosamente analisados pelos engenheiros calculistas para garantir a eficiência da estrutura ao longo de sua vida útil, evitando prejuízos de qualquer natureza. É importante destacar que, quanto mais esbelta a edificação, mais significativos são os efeitos dos deslocamentos laterais.

Com a utilização de materiais mais resistentes, como o concreto e o aço, respectivamente, com elevado F_{ck} e F_{yk} , os elementos estruturais das edificações esbeltas podem apresentar seções com dimensões muito reduzidas, o que os torna mais sensíveis aos esforços horizontais e aos efeitos de torção, que são em geral responsáveis pelos chamados efeitos de segunda ordem.

Os efeitos de segunda ordem são esforços adicionais aos de primeira ordem, decorrentes do deslocamento horizontal da estrutura sob ação de cargas verticais e horizontais. Sua análise

é essencial para evitar patologias e colapso da edificação, levando, quase sempre, a análise da estrutura considerando o comportamento não linear dos materiais e a configuração deformada na análise do equilíbrio. Softwares especializados são utilizados para realizar análises mais sofisticadas.

A NBR ABNT 6118:2014 recomenda dois parâmetros para a verificação de deslocabilidade/indeslocabilidade lateral das estruturas. Estes parâmetros utilizados na verificação da estabilidade global visam classificar a estrutura em dois tipos: de nós fixos ou móveis. No primeiro caso, a estrutura é quase indeslocável horizontalmente, enquanto no segundo, os deslocamentos são consideráveis e, conseqüentemente, os efeitos de segunda ordem também. A estabilidade global da estrutura é diretamente proporcional à sua rigidez em relação às ações que promovem os esforços de segunda ordem. Ou seja, quanto mais rígida for a estrutura, menores serão os deslocamentos horizontais e, quanto maiores os efeitos de segunda ordem na estrutura, maior será sua deslocabilidade.

Os procedimentos de verificação de estabilidade horizontal em projetos estruturais são complexos e sofisticados, o que pode tornar o processo de cálculo muito dispendioso. Para simplificar essa tarefa, foram criados parâmetros de verificação de estabilidade global que possibilitam um processo de cálculo menos oneroso. A ABNT NBR 6118 recomenda dois desses parâmetros desde a sua atualização de 2003: o parâmetro de instabilidade global Alfa e o coeficiente Gama-Z. Embora simplificados, estes parâmetros fornecem resultados bastante confiáveis.

É fácil notar que o cálculo do Parâmetro Alfa é relativamente simples em comparação com outros parâmetros e permite aos engenheiros calculistas de estruturas classificar as estruturas em deslocáveis ou não. Enquanto isso, o Coeficiente Gama-Z que também ajuda os engenheiros nessa tomada de decisão, fornecendo informações sobre a magnitude dos efeitos de segunda ordem e permitindo uma avaliação da importância desses efeitos em relação aos efeitos de primeira ordem.

Tendo em vista que o Coeficiente Gama-Z fornece maiores informações para o calculista que o Parâmetro Alfa, embora este seja de determinação mais fácil e rápida que aquele, estudiosos do problema apresentaram, ao longo dos anos, equações que possibilitam avaliar o Gama-Z em função do Alfa. Várias funções de correlação entre o Alfa e o Gama-Z são apresentadas na bibliografia sobre este tema. Assim, funções quadráticas e cúbicas dentre outras passaram a ser utilizadas para a obtenção do Gama-Z em função do Alfa.

Dada a importância cada vez maior da qual se reveste a obtenção do Coeficiente Gama-Z, tomou-se como objetivo secundário a validação de duas dessas funções, a de Carmo

(1995) e a de Mário Corrêa e Márcio Ramalho (1995), de correlação bem como a validação das funções de correlação apresentadas por CRUZ, 2021 que representa o objetivo principal deste TCC.

2. OBJETIVOS

A correlação matemática entre os parâmetros alfa e gama z já havia sido sugerida por diversos autores, porém foi em Carmo (1995) que se determinou uma expressão polinomial do terceiro grau, que relaciona os dois parâmetros. Essa expressão foi obtida a partir da análise de uma amostra de sessenta pares alfa-gama-z.

Em Zumaeta Moncayo (2011, p. 72) e em Freitas, Luchi e Ferreira (2016, p. 205), é mencionado que em 1995, Mário Corrêa e Márcio Ramalho propuseram uma equação polinomial quadrática, que correlaciona o coeficiente Gama-Z com o parâmetro alfa.

Em Cruz (2021) novas relações foram apresentadas. Desta feita o Coeficiente Gama-Z é obtido em função do Parâmetro Alfa, do F_{ck} do concreto e do fator de redução equivalente F_{Req} .

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) é discutir a formulação, cálculo e aplicação do Coeficiente γ_z em função do parâmetro alfa com base em estudos e conclusões de alguns autores ao longo do tempo.

2.2. Objetivo Principal

O objetivo principal é validar os resultados obtidos através das relações entre o Parâmetro Alfa e o Coeficiente Gama-Z sugeridas em (CRUZ e Col., 2021).

2.2.1. Objetivos Específicos

Como objetivos específicos tem-se: proceder a validação de duas funções de correlação encontradas na bibliografia pertinente.

3. METODOLOGIA DO TRABALHO

Para atingir os objetivos propostos, inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica, sendo consultados vários trabalhos que tratam do assunto da estabilidade global, isto é, dos parâmetros de instabilidade, dos efeitos de 2ª ordem nas estruturas, como também das correlações entre o Parâmetro α e o Coeficiente γ_z .

Na sequência, foram utilizadas funções já estabelecidas por outros autores, anteriores ao ano de 2021), para cada caso estudado e analisado as fórmulas que relacionam o Coeficiente γ_z com o Parâmetro α

Tendo em vista isso, utilizou-se, em projetos de estruturas já existentes, as fórmulas propostas na norma para o cálculo do Parâmetro α e o Coeficiente γ_z , em seguida calculou-se o γ_z em função do α a partir das fórmulas propostas pelos autores supracitados, Mário Corrêa e Márcio Ramalho (1995), Carmo (1995) e Cruz et al (202), com o objetivo de validá-las.

É importante registrar que para a obtenção dos valores do Gama-Z associados ao conjunto de valores especificados do Alfa se deu através da utilização da Planilha Microsoft Excel 2010.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Carga do vento

Sobre os efeitos do vento nas estruturas a ABNT NBR 6118:2014, subitem 11.4.1.2 assim recomenda: “Os esforços solicitantes relativos à ação do vento deve ser considerados e recomenda-se que sejam determinados de acordo com o prescrito pela ABNT NBR 6123, permitindo-se o emprego de regras simplificadas previstas em Normas Brasileiras específicas.”

Logo se vê que a carga do vento em edifícios é um tema relevante na engenharia estrutural, já que estruturas altas e esbeltas são especialmente suscetíveis a estes efeitos. Pois esta ação pode causar danos significativos à estrutura se não for adequadamente considerada no projeto.

Para calcular a carga do vento em edifícios, é necessário levar em consideração diversos fatores, como a forma da estrutura, a sua altura, a velocidade e direção do vento, entre outros. A norma técnica ABNT NBR 6123:1988, estabelece informações para o cálculo dessas cargas, levando em conta fatores como a forma e a rugosidade do terreno, a categoria de exposição da região, e a velocidade básica do vento.

A velocidade característica do vento é obtida através da seguinte fórmula:

$$V_k = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot V_0 \quad (Eq. 4.1)$$

Sendo:

V_0 = Velocidade básica do vento, definida de acordo com o local onde a estrutura será construída;

V_k = Velocidade característica do vento;

S_1 = Fator topográfico que leva em consideração as variações do relevo;

S_2 = Fator que considera a rugosidade, altura e dimensões da edificação sobre o terreno;

S_3 = Fator estatístico que considera o grau de segurança requerido pela estrutura, de acordo com o tipo de uso.

Uma maneira comum de aplicação prática do efeito do vento nas estruturas e consequentemente nos edifícios é através de cargas nodais nos nós. Essa carga é determinada pela pressão do vento em cada superfície da edificação, levando em conta o coeficiente de

arrasto adequado, neste trabalho tal carga será referida como caso de carregamento 2, CC2. conforme Cruz, Ferreira e Lucena (2019, p.168).

O vento pode exercer forças laterais significativas sobre a edificação, e estas podem levar a deslocamentos importantes exigindo a análise de segunda ordem ou análise não linear da estrutura. Além disso, ao efeito do vento pode ser adicionado as cargas devido ao desaprumo, o CC3.

4.2. Carga do desaprumo

O desaprumo de uma estrutura é uma das fontes de carregamento que devem ser consideradas no projeto estrutural. Este carregamento horizontal é decorrente da consideração da inclinação dos elementos do SEC, ele passou a ser de cálculo obrigatório no Brasil com a revisão da ABNT NBR 6118 que gerou a versão de 2003.

De acordo com a NBR 6118:2014, a consideração do efeito do desaprumo concomitante com o efeito do vento. Nesse caso, as ações CC2 e CC3 devem ser combinadas, considerando ambas atuando na mesma direção e sentido. As ações daí decorrentes são, para fins de dimensionamento, distribuídos entre os elementos do sistema de contraventamento proporcionalmente à sua rigidez.

No Subitem 13.3.3.4.1 a ABNT NBR 6118 assim se refere sobre as Imperfeições globais:

“A consideração das ações de vento e de desaprumo deve ser realizada de acordo com as seguintes possibilidades:

a) Quando 30% da ação do vento for maior que a ação do desaprumo, considera-se apenas a ação do vento.

b) Quando a ação do vento for inferior a 30% da ação do desaprumo, considera-se somente o desaprumo respeitando o Teta 1 Min, conforme definido acima.

c) Nos demais casos, combina-se a ação do vento e desaprumo, sem necessidade do Teta min. Nesta 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 consideração pode ser feita com os momentos totais na base da construção e em cada direção e sentido da aplicação do vento com o desaprumo calculado com o Teta, sem a consideração do Teta 1 min”

4.3. Carga de gravidade

O chamado Caso de Carregamento 1, CC1, é originário do peso próprio da estrutura, dos elementos de vedação, de revestimento e das sobrecargas utilizadas. Ele tem papel importante no dimensionamento dos elementos estruturais e, por isso mesmo, está presente em todas as combinações de ações ou de cargas.

4.4. Os problemas de estabilidade

As estruturas da engenharia civil, sistemas físicos que são, devem trabalhar sob a condição de equilíbrio estável na configuração deformada. Quando esta condição não é observada diz-se que ela (a estrutura) perdeu sua estabilidade.

De acordo com RACHID e MORI (1989), citado em Oliveira (2002, p.11), são três os problemas de estabilidade. Eles são classificados como problemas de estabilidade de 1ª, 2ª e 3ª espécies. Os de 1ª espécie são chamados de problemas de bifurcação do equilíbrio, os de 2ª, são referidos como problemas de carga última enquanto os de 3ª espécie são os ditos problemas de ponto limite.

Na Figura 4.2 mostra o gráfico Força x Deslocamento de uma barra articulada-livre (articulada a base e livre no topo) escorada na base por uma mola de rigidez k . Este é um clássico problema de bifurcação do equilíbrio. Vê-se que para valores da carga axial de compressão, P , menores que o valor crítico, P_{cr} , o pilar está em equilíbrio estável (neste caso na configuração indeformada). Quando $P = P_{cr}$ o pilar atinge o ponto de bifurcação do equilíbrio. Se ele continuar na vertical seu equilíbrio é instável, se inclinar seu equilíbrio é estável.

A possibilidade que indica aumento do ângulo de inclinação da barra sem aumento do valor de P (representado pela reta paralela ao eixo das rotações) caracteriza a situação de equilíbrio indiferente. Esta situação é decorrente da aplicação da teoria de segunda ordem com pequenos deslocamentos enquanto a possibilidade do ramo curvo, no qual para acréscimos de ϕ são necessários acréscimos de P , a situação é de equilíbrio estável na configuração deformada.

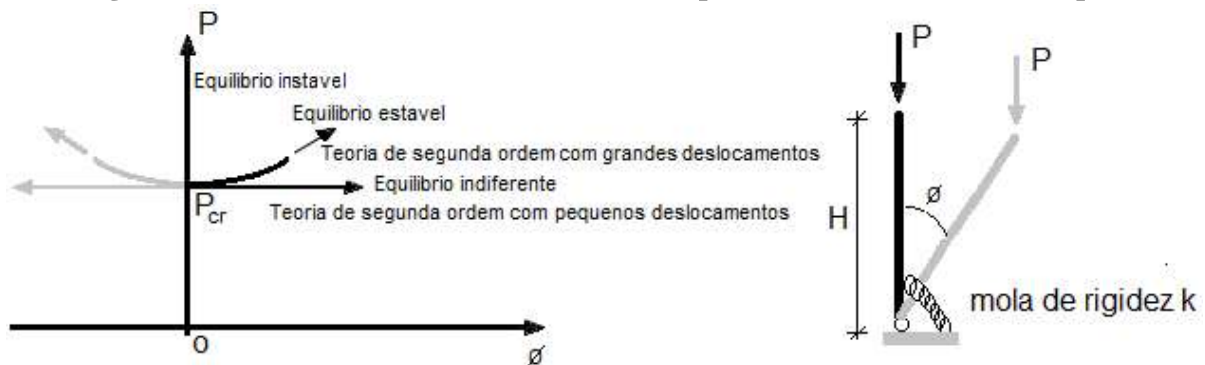
Assim, o ramo curvo do gráfico da Figura 4.2 é obtido através da aplicação da Eq.4.1, e o ramo representado pela reta horizontal, através da Eq. 4.2, Oliveira (2002, p.17).

$$\frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} = -\frac{M}{EI} \quad (4.1)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (4.2)$$

É imediata a obtenção da Eq. (4.2) a partir da Eq. (4.1) quando se considera pequenos deslocamentos, pois com $\frac{dy}{dx}$ pequeno, seu quadrado será menor ainda, tendendo para zero, isto é: $\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 \rightarrow 0$, fazendo com que o denominador da fração do primeiro membro da Eq. (4.1) resulte na unidade.

Figura 4.2 - Problema de estabilidade de 1ª espécie ou de bifurcação do equilíbrio



Fonte: Adaptada de Oliveira (2002, p.14)

Na Figura 4.3 mostra-se uma barra vertical com uma carga vertical, P , de compressão aplicada na extremidade de um braço rígido existente no topo que possibilita a aplicação de flexo-compressão à barra. Esta é articulada na base onde é escorada por uma mola de rigidez k e livre no topo.

De acordo com a teoria de segunda ordem com pequenos deslocamentos estando a barra inclinada com um ângulo ϕ obtém-se pela condição de equilíbrio de momentos:

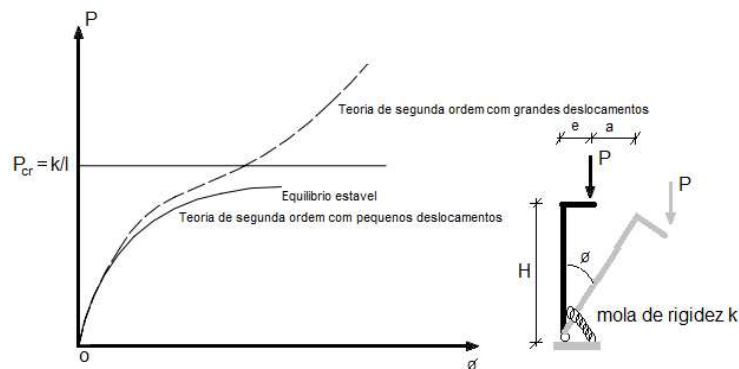
$P(e + l\phi) - k\phi = 0$, Oliveira (2002, p.17) donde:

$$P = \frac{k}{l} \frac{\phi}{\phi + \frac{e}{H}} \quad (4.3)$$

Concluindo-se que quando ϕ tende para infinito ($\phi \rightarrow \infty$), $P \rightarrow P_{cr}$. Sendo:

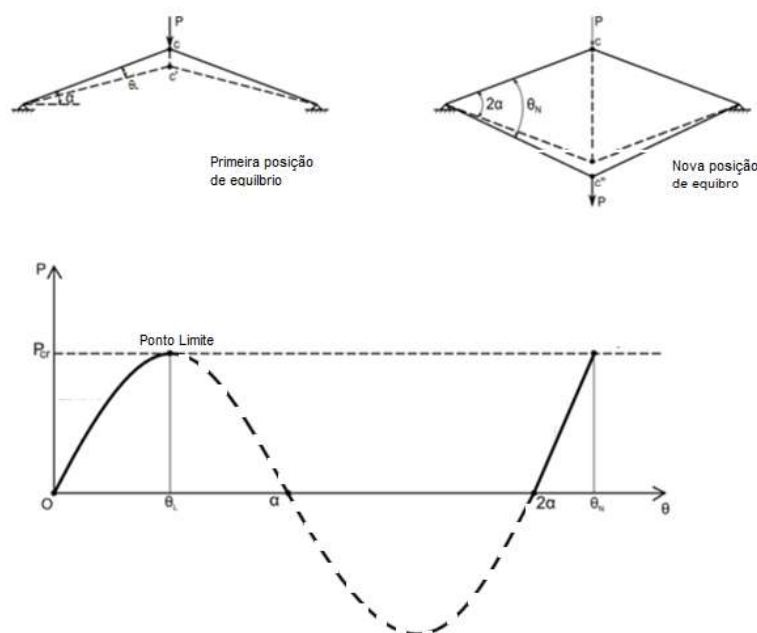
$$P_{cr} = \frac{k}{l} \quad (4.4)$$

Figura 4.3 - Problema de estabilidade de 2ª espécie ou de carga última



Fonte: Adaptada de Oliveira (2002, p.17)

Figura 4.4 - Problema de estabilidade de 3ª espécie ou de ponto limite



Fonte: Adaptada de Cruz, (1985, p.64)

Para a caracterização da necessidade da verificação da deslocabilidade lateral das edificações, é muito importante analisar os conceitos de linearidade e não-linearidade no comportamento estrutural. Franco e Vasconcelos (1991) citado por Leal (2016, p. 22) estudando o problema da estabilidade/instabilidade estrutural fizeram referência ao estado limite de flambagem como uma situação de perda de estabilidade. Ao tempo em que discordaram do termo flambagem sugerindo sua substituição por não-linearidade, consideradas a não-linearidade geométrica quanto a não-linearidade física.

4.5. Não Linearidade

Nos problemas da engenharia estrutural, ainda conforme Leal (2016, p.22) é possível dividir a não-linearidade nas estruturas de concreto armado em três tipos distintos: não-linearidade geométrica (NLG), a não-linearidade física (NLF) e a não-linearidade por contato (NLC).

Das três origens distintas do comportamento não-linear, uma delas (tipo (a)) surge na ocorrência de grandes deslocamentos, rotações e deformações que são oriundos da análise, sendo referido como Comportamento Não-linear Cinemático ou Geométrico (CNLG); outra, tipo (b) é decorrente das deformações inelásticas, o chamado Comportamento Não-linear Constitutivo ou Físico (CNLF), e a do tipo c) que surge em função do contato e do atrito que ocorre entre os materiais que atuam no processo através de uma superfície de contato, na qual

pode variar de acordo com o tempo e carregamento que o Comportamento Não-linear das Condições de Contorno ou de extremidade (CNLC).

São necessárias apenas, as análises da não linearidade física e geométrica nos projetos de edificações com estrutura de concreto armado (Moncayo, 2011, p. 23), uma vez que a não linearidade de contato (NLC) não se faz presente nesse tipo de estrutura. A não linearidade-física (NLF) e a não-linearidade geométrica (NLG) serão abordadas nos próximos subitens.

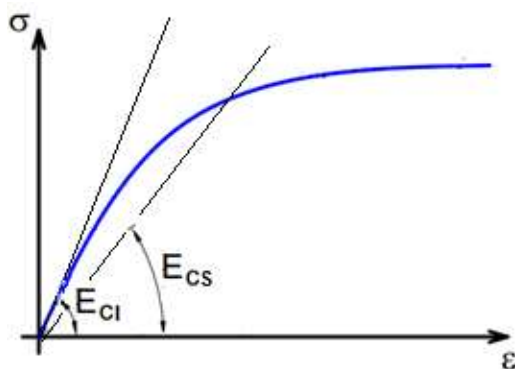
4.5.1. Não linearidade física

A não linearidade física está relacionada com os efeitos causados pelo comportamento do material, que nesse TCC é o concreto armado. Tais efeitos (fissuração, fluência, etc.) evidenciando as características próprias dos materiais que provoca diminuição de rigidez dos elementos estruturais correlacionada com o módulo de elasticidade e com a inércia da seção transversal, Leal (2016, p.22).

A Figura 4.5, explicita o comportamento do módulo de elasticidade de um material de comportamento tipicamente não-linear, no diagrama Tensão x Deformação.

Sendo o concreto um material fisicamente não-linear, verifica-se na Figura 4.5 que para o aumento da tensão atuante, a resposta do concreto não é igual para os casos distintos. Conclui-se, assim, que o módulo de elasticidade (E) varia, com a tensão atuante. E que o $\arctg(E)$ muda com o nível de deformação ocorrido.

Figura. 4.5 - DIAGRAMA TENSÃO X DEFORMAÇÃO (MATERIAL NÃO- LINEAR)



Fonte: Adaptado de CRUZ (2023, p.9)

Como a não linearidade do material está relacionada principalmente com a parte constitutiva do material, para o qual a relação entre as tensões e deformações é não-linear, vide Figura 4.5, então o comportamento físico do material é representado através de equações constitutivas (ou reológicas), não-lineares.

A ABNT NBR 6118: 2014 recomenda ao projetista de estruturas a utilização de valores de rigidez diferenciados para cada tipo de elemento (pilares, vigas e lajes) na avaliação da rigidez da edificação para análise global das estruturas. Estes valores diferenciados para a rigidez secante $(EI)_{sec}$ são obtidos pela redução da rigidez tangente $E_{ci}I_c$ de cada elemento a partir de um coeficiente específico, os quais devem ser utilizados apenas nas estimativas aproximadas dos efeitos da não-linearidade do material (ou seja da não-linearidade física). Os valores desses coeficientes aparecem no subitem 15.7.3 da mencionada norma, sendo eles:

$$(EI)_{sec} = 0,3E_{ci}I_c \text{ para lajes,}$$

$$(EI)_{sec} = 0,4E_{ci}I_c \text{ para vigas com armadura à tração diferente da de compressão,}$$

$$(EI)_{sec} = 0,5E_{ci}I_c \text{ para vigas com armadura à tração igual à de compressão,}$$

$$(EI)_{sec} = 0,8E_{ci}I_c \text{ para pilares}$$

I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto, incluindo as mesas colaborantes, enquanto o E_{ci} representa o módulo de deformação longitudinal tangente (ou inicial) do concreto.

Das duas observações que podem ser feitas, de acordo com Moncayo (2011, p. 27) destacamos a primeira delas que limita o uso desses coeficientes para estruturas reticuladas com mais de quatro pavimentos, já que não existem estudos satisfatórios que comprovem sua eficiência para edifícios de menos que quatro andares.

Observa-se que até a versão de 2007 da ABNT NBR 6118 era permitido obter a rigidez das vigas e pilares para os sistemas de contraventamento compostos exclusivamente por estes elementos estruturais através da equação $(EI)_{sec} = 0,7E_{ci}I_c$. Sendo importante notar que este coeficiente redutor igual à 0,7 é numericamente igual ao utilizado na formulação do parâmetro

de instabilidade global alfa para simular a não-linearidade física, como mostrado por Junior et al (2016, p. 17).

Existem diversas causas de não linearidade em estruturas, tais como grandes deslocamentos, grandes deformações, não homogeneidade do material, não isotropia do material, efeitos de segunda ordem, entre outras.

Quando a não linearidade é considerada no projeto estrutural, o comportamento da estrutura pode ser melhor previsto e a segurança pode ser melhorada. Alguns dos efeitos que podem ser considerados na análise não linear incluem o surgimento de momentos fletores adicionais devido a grandes deslocamentos ou deformações, o surgimento de tensões residuais no material, a redução da rigidez da estrutura devido a grandes deformações, entre outros.

A análise não linear também é importante em situações onde a carga pode ser variável ao longo do tempo, como terremotos, cargas dinâmicas, ou mesmo ações sísmicas. A análise não linear pode ser utilizada para prever o comportamento da estrutura em condições extremas, garantindo assim a segurança da estrutura e das pessoas que a utilizam.

A não linearidade física em estruturas ocorre quando a relação entre a tensão e a deformação do material estrutural não é mais linear. Isso significa que a resposta do material a uma carga aplicada não é mais proporcional ao valor da carga, e isso pode levar a grandes deformações e falha estrutural.

A não linearidade física em estruturas está associada a perda da relação linear entre a tensão atuante no material constituinte de uma estrutura ou corpo de prova, e a deformação causada. Isto significa que o material não é mais obediente à lei de Hooke Linear. É importante considerar a não linearidade física no projeto estrutural sempre que necessário, pois isso pode afetar significativamente o comportamento e a estabilidade da estrutura.

A norma brasileira ABNT NBR 6118:2014 estabelece os requisitos e procedimentos para o projeto estrutural de edifícios de concreto. Essa norma prevê a análise de não linearidade física em estruturas de concreto armado e protendido, e recomenda o uso de métodos de análise não linear para levar em consideração o comportamento não linear do material.

Conforme o subitem 15.5.2 da norma, para estruturas reticuladas de pelo menos 4 pavimentos, a não linearidade física pode ser considerada de forma simplificada nas análises de estabilidade global. Nesse caso, é permitido reduzir a rigidez flexional de cada elemento estrutural em uma porcentagem específica, a fim de levar em conta o efeito da não linearidade física.

4.5.2. Não linearidade geométrica

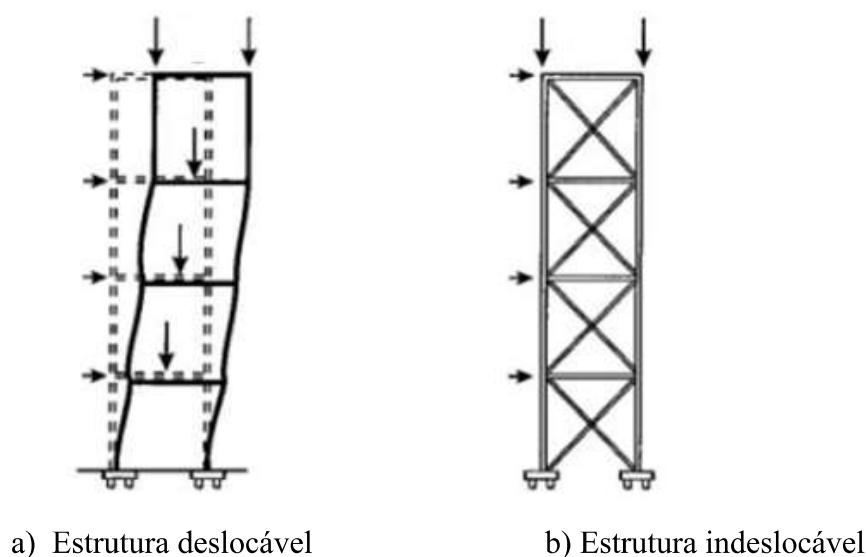
Toda e qualquer edificação, e consequentemente sua estrutura, quando em serviço será solicitada por ações verticais e horizontais. As ações verticais são as chamadas cargas de gravidade (o peso da edificação considerada sua sobrecarga) enquanto as outras, as horizontais, podem ser oriundas do efeito do vento, do efeito térmico, da movimentação dos apoios, de sismos, etc.

Quando as forças verticais e horizontais atuam na configuração inicial ou indeformada da estrutura, os esforços atuantes solicitando a estrutura geram esforços internos que provocam deformações e deslocamentos ditos de 1ª ordem. Estes deslocamentos conduzirão a estrutura para uma nova configuração, conhecida como configuração deformada. As ações atuantes solicitando a estrutura nessa nova posição, deformada e deslocada, produzirão os chamados efeitos de 2ª ordem, como pode ser visto na Figura.4.6.

A não linearidade geométrica é um tipo de não linearidade que leva em conta a alteração na geometria da estrutura, fazendo com que as deformações, os deslocamentos, as tensões e as reações de apoio não sejam proporcionais às cargas aplicadas. Esse tipo de não linearidade pode se tornar significativo em estruturas que apresentam grandes deslocamentos ou rotações.

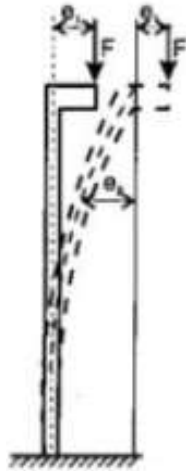
Os problemas que consideram a não-linearidade geométrica podem ser representados por uma barra submetida a ação de carregamento excêntrico. Como exemplo para essa problemática, pode-se citar os pilares que por serem peças estruturais esbeltas sob a ação de forças de compressão, terminam submetidos aos esforços de flexão de segunda ordem, como pode ser observado na Figura. 4.7.

Figura 4.6 - Efeitos globais de segunda ordem



Fonte: Adaptado de Fusco (1981)

Figura 4.7 - Efeito da não-linearidade geométrica



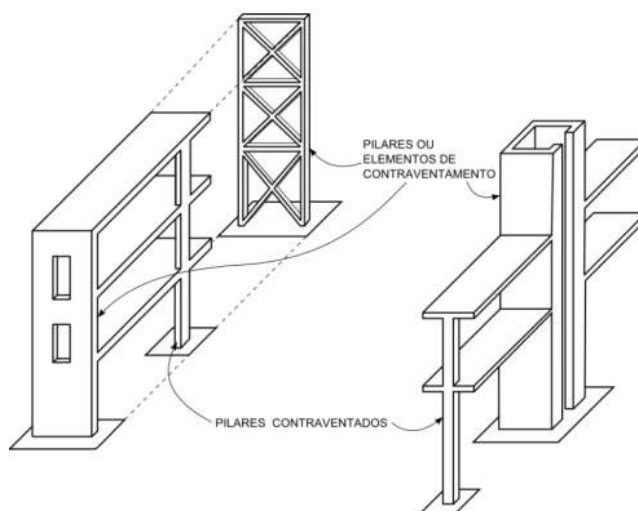
Fonte: Adaptado de Fusco (1981)

Ao longo da sua dissertação intitulada EFEITOS DE SEGUNDA ORDEM EM EDIFÍCIOS DE CONCRETO ARMADO, Carmo (1995) evidencia a importância da existência de elementos de contraventamento para os pilares e os pórticos (por isto mesmo, dito contraventados), para garantir a estabilidade global dos edifícios. Estruturas de contraventamento e contraventada podem ser vistos na Figura 4.8.

A análise de uma estrutura com a consideração da não-linearidade geométrica permite uma avaliação dos esforços internos que atuam na configuração deformada.

Do ponto de vista conceitual esta análise pode ser feita de duas maneiras diferentes: a primeira tem como objetivo fundamental a utilização de métodos de cálculo mais ou menos complexos (cuja complexidade é quase sempre proporcional ao nível de precisão desejada), nos quais se avaliam as estruturas; a outra tem como proposta estimar o comportamento real da estrutura por processos simplificados que levam à majoração ou amplificação dos esforços de primeira ordem, para a incorporação dos esforços na configuração deformada.

Figura. 4.8 - Elementos estruturais verticais de contraventamento e contraventado



Fonte: Fusco (1981, p.35)

4.6. Combinação de cargas

O dimensionamento de uma estrutura é feito a partir da análise dos esforços que atuam sobre ela, considerando as ações e combinações de carregamento mais desfavoráveis.

As ações permanentes são aquelas que atuam continuamente sobre a estrutura, como o peso próprio da construção, paredes, revestimentos, equipamentos fixos, entre outros. Já as ações variáveis são aquelas que podem mudar em função do uso da edificação, como as cargas móveis, o vento, a neve, as cargas térmicas, entre outras.

As ações verticais e horizontais são separadas por sua direção. As ações verticais correspondem às cargas que atuam no sentido vertical, enquanto as ações horizontais correspondem às cargas que atuam no sentido horizontal, como o vento ou o empuxo do solo.

O coeficiente γ_z é utilizado no projeto estrutural para verificar a capacidade resistente da estrutura contra as ações solicitantes. Este coeficiente é calculado para cada combinação de estados limites último (ELU) a ser verificada no projeto, levando em conta os coeficientes ponderadores de ações, tais como γ_f e ψ_0 .

O coeficiente γ_f é utilizado para ponderar as ações permanentes desfavoráveis e variáveis gerais que atuam sobre a estrutura. Esse coeficiente tem em geral um valor de 1,4 e leva em conta inclusive o fato de que as ações permanentes tendem a permanecer constantes ao longo do tempo e podem exercer um efeito significativo sobre a estrutura.

Já o coeficiente ψ_0 é utilizado para considerar a ação do vento como uma variável secundária. Esse coeficiente tem um valor de 0,6 e é utilizado para ponderar as ações de vento que atuam sobre a estrutura.

As combinações de carregamentos devem incluir as ações horizontais que podem causar deslocamentos nodais horizontais significativos na estrutura.

4.7. Parâmetro de verificação de estabilidade/ instabilidade global

A ABNT NBR 6118:2014, apresenta diretrizes para análises de estruturas em segunda ordem, que levam em conta a não linearidade geométrica.

O item 15.4.4 da norma prevê que, para análises em segunda ordem, deve-se considerar a não linearidade geométrica da estrutura. Com a utilização do Coeficiente γ_z para a avaliação da necessidade de se considerar ou não os efeitos da NLG na análise da estrutura e da amplificação das ações horizontais nas combinações analisadas, podemos obter também a estimativa do acréscimo de esforços decorrentes da NLG, como também realizar a estimativa dos esforços finais da estrutura, caso o valor do Coeficiente γ_z não ultrapasse 1,3, através da multiplicação de 0,95 do valor do referido coeficiente, da parcela do carregamento horizontal da combinação considerada.

A norma também estabelece critérios para a verificação da estabilidade global da estrutura, considerando a não linearidade geométrica. O subitem 15.5.2 estabelece que, para estruturas que apresentem grandes deslocamentos, é necessário levar em conta a contribuição dos deslocamentos laterais da estrutura na estabilidade global, o que pode ser realizado por meio de análises não lineares.

É importante observar que os efeitos da não linearidade geométrica (NLG) são mais intensos em estruturas altas e flexíveis, devido às maiores deformações horizontais que podem ocorrer. Isso pode levar a deslocamentos horizontais excessivos, com possibilidade de comprometer a estabilidade global da estrutura.

Por outro lado, em estruturas rígidas e de pouca altura, os efeitos da NLG podem ser desprezados, pois provocam pequenas deformações horizontais que não representam um risco significativo para a estabilidade da estrutura.

Quando a estrutura é classificada como de nós deslocáveis, isso significa que a estrutura não é completamente indeslocável e, portanto, é mais suscetível a efeitos de não linearidade. O parâmetro α é utilizado para classificar a estrutura quanto a esse comportamento, sendo que valores maiores indicam maior possibilidade de deslocamentos horizontais da estrutura.

Nesse caso, a análise da estrutura deve levar em consideração tanto a não linearidade física como a não linearidade geométrica, uma vez que não é possível desconsiderar a indeslocabilidade do sistema estrutural de contraventamento, de toda a estrutura da edificação e da própria edificação.

4.7.1 Parâmetro de instabilidade global alfa

O Parâmetro Alfa é utilizado para a avaliação da estabilidade global da estrutura ao indicar ao calculista de estruturas se é possível ou não desprezar os esforços globais de segunda ordem. Em outras palavras, o valor do parâmetro alfa pode ser utilizado para classificar a estrutura como de nós fixos ou de nós móveis.

Uma estrutura de nós fixos é aquela em que os deslocamentos horizontais dos seus nós são pequenos, pois a rigidez lateral é elevada. Nesse caso, os esforços globais de segunda ordem podem ser desprezados e a análise pode ser feita com a utilização da formulação linear. Já uma estrutura de nós móveis é aquela em que os deslocamentos nodais são significativos e a rigidez é menor. Portanto, os esforços globais de segunda ordem não podem ser desprezados e a análise deve ser feita com a utilização da formulação não-linear.

O valor do Parâmetro Alfa deve ser calculado para cada uma das duas direções ortogonais da projeção horizontal da edificação e comparado com um valor limite estabelecido nas normas técnicas pertinentes, como a ABNT NBR 6118:2014, subitem 15.5.2, no caso de estruturas de concreto armado simétricas. Se o valor do alfa for maior do que o(s) valor(es) limite(s) estabelecido(s), a estrutura é considerada como de nós móveis e a análise deve ser realizada através de formulação não linear.

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, subitem 15.4.2, o valor de $\alpha_1 = 0,6$ é comumente aplicado às estruturas de edifícios com mais de 4 pavimentos. Já para sistemas de contraventamento formados apenas por pilares-parede, utiliza-se $\alpha_1 = 0,7$; para sistemas estruturais de contraventamento formados apenas por pórticos, utiliza-se $\alpha_1 = 0,5$ e para sistemas estruturais de contraventamento mistos, utiliza-se $\alpha_1 = 0,6$. Quando o valor de α é menor ou igual a α_1 , os efeitos de 2ª ordem podem ser desprezados na análise estrutural.

O parâmetro Alfa é calculado através da expressão:

$$\alpha = H \sqrt{\frac{P_k}{E_{cs} I_c}} \quad (4.5)$$

Considerando:

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

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

Sendo:

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

P_k É o somatório de todas as cargas verticais atuantes na estrutura (a partir do nível considerado para o cálculo de H), com seu valor característico;

H É a altura total da estrutura, medida a partir do topo da fundação ou de um nível pouco deslocável do subsolo;

$E_{CS} I_C$ 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 $E_{CS} I_C$ de um pilar equivalente de seção constante.

O valor de I_C deve ser calculado considerando as seções brutas dos pilares.

4.7.2. Coeficiente Gama-Z

O coeficiente γ_z representa tecnicamente um avanço em relação ao parâmetro α por avaliar a magnitude dos efeitos de segunda ordem na estrutura. Pois, além de permitir que a estrutura seja classificada de nós fixos ou deslocáveis como o Parâmetro Alfa, ele se constitui em uma boa ferramenta para a obtenção da análise de segunda ordem a partir de uma análise de primeira ordem, para os casos nos quais seu valor seja menor ou igual à 1,30, $\gamma_z \leq 1,30$.

Assim, com o coeficiente γ_z é possível, não apenas, estimar a magnitude dos efeitos de 2ª ordem atuantes na estrutura, mas também realizar a análise de 2ª ordem da estrutura a partir da correção dos resultados obtidos em uma análise de 1ª ordem, acrescentando os efeitos decorrentes do comportamento não linear físico e geométrico da estrutura.

O procedimento de cálculo do coeficiente γ_z envolve a realização de uma análise de 1ª ordem da estrutura, levando em consideração os carregamentos vertical e horizontal, reduzindo a rigidez da estrutura para que, de forma aproximada, possa ser considerada a NLF. O coeficiente de majoração dos esforços γ_z , como é referido nas normas, é válido, para este fim, até o limite de $\gamma_z \leq 1,30$, sendo recomendado pela NBR 6118:2014 como uma solução aproximada para a determinação de esforços globais de 2ª ordem. É importante lembrar que,

para valores do γ_z maiores que 1,30, é necessária a avaliação de forma mais rigorosa dos efeitos de segunda ordem.

No subitem 15.5.3 da norma acima referida encontra-se a expressão para o cálculo Coeficiente Gama-Z

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (4.6)$$

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; $\Delta M_{tot,d}$ 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 em análise de primeira ordem.

Considera-se que a estrutura pode ser considerada indeslocável horizontalmente se Gama-Z for menor ou igual a 1.

4.8. RELAÇÕES ENTRE O PARÂMETRO α E O COEFICIENTE γ_z

Durante muito tempo, vários estudiosos e pesquisadores sugeriram que os Parâmetros Alfa e Gama-Z estavam relacionados matematicamente, podendo um deles figurar como dependente do outro. Porém, foi somente através dos estudos realizados por Carmo em 1995 que se determinou uma correlação entre esses dois parâmetros. Essa correlação foi obtida a partir da análise de uma amostra de sessenta pares ($\alpha - \gamma_z$), Carmo (1995, p.82), que resultou na expressão polinomial de terceiro grau, indicada na Eq. (4.7)

$$\gamma_z = 0,46\alpha^3 - 0,62\alpha^2 + 0,52\alpha + 0,90 \quad (4.7)$$

De acordo com Zumaeta Moncayo (2011, p. 72), conforme mencionado por Freitas, Luchi e Ferreira (2016, p. 205), Mário Corrêa e Márcio Ramalho propuseram em 1995 uma equação polinomial quadrática, identificada como Eq. (4.8), que relaciona o coeficiente Gama-Z ao Parâmetro Alfa.

$$\gamma_z = 0,50\alpha^2 - 0,33\alpha + 1,10 \quad (4.8)$$

A norma NB-1/1978. Assim como, a ABNT NBR 6118:1980, não estabelecia diretrizes claras para os parâmetros Alfa e Gama-Z. Como resultado, as pesquisas realizadas até 2003

foram baseadas nas definições propostas nos projetos de revisão dessas normas, que por sua vez se basearam nos referenciais teóricos do CEB 78. Portanto, as definições utilizadas para Alfa e Gama-Z eram muito próximas das contidas nesses boletins.

Naquela época, o módulo de deformação inicial ou tangente na origem do concreto era calculado como $E_{ci} = 6600\sqrt{f_{cj}}$ e era utilizado no cálculo do parâmetro Gama-Z. Já o módulo de deformação secante do concreto $E_{cs} = 0,90 \times 6600\sqrt{f_{cj}}$ era usado no cálculo do parâmetro Alfa, onde $f_{cj} = f_{ck} + 3,5$. Todas as grandezas mencionadas eram utilizadas em MPa.

Dessa forma, os valores do parâmetro Alfa e do coeficiente Gama-Z obtidos para as mesmas estruturas submetidas aos mesmos carregamentos mudavam apenas com base no valor de f_{ck} do concreto. O valor de Alfa = 0,6 e Gama-Z = 1,10 eram equivalentes, pois ambos representavam os limites para a consideração da indeslocabilidade lateral da estrutura. Por essa razão, quando adotamos o valor de Alfa = 0,6 na Equação de Carmo ou na Equação de Mário Corrêa e Márcio Ramalho espera-se obter um valor próximo a Gama-Z = 1,10 com cada uma dessas expressões. De fato, ao utilizar a Equação de Carmo, obtém-se Gama-Z = 1,088, enquanto que com a outra equação, Gama-Z = 1,082.

Nos últimos anos da década de 1990 até o final da primeira década de 2000, foram publicadas várias correlações entre o Alfa e γ_z . Algumas dessas correlações foram citadas por autores como Francisco Graziano, e elas são expressas matematicamente por meio de equações, por exemplo, uma das equações $\gamma_z(\alpha) = \frac{1}{1-\Omega^2\alpha^2}$, que foi obtida analiticamente em um estudo de pórticos planos e usa um valor constante $\hat{\Omega} = 0,50$. Outra equação, $\gamma_z(\alpha) = \frac{1}{1-\gamma_{fv}\alpha}$, usa um valor constante γ_{fv} igual a 0,15. A partir do ano de 2003, com a entrada em vigor da ABNT NBR 6118:03 passou-se a recomendar o Parâmetro Alfa e o Coeficiente Gama-Z para avaliar os efeitos de segunda ordem.

Em 2021, Cruz e seus colaboradores apresentaram a título de proposta, funções de correlação entre o Alfa e o Gama-Z. Estas funções permitem a estimativa do Coeficiente Gama-Z em função do Parâmetro Alfa, do f_{ck} do concreto e do fator de redução equivalente, f_{Req} , que leva em conta a redução do EI na consideração da não linearidade física. Nesta proposta, correções foram efetuadas para a obtenção das grandezas que foram sofrendo alterações no cálculo dos seus valores devido às atualizações da NBR 6118.

4.8.1. AS CORREÇÕES DOS VALORES DOS PARÂMETROS α E γ_z .

Carmo (1995) utilizou pares de valores Alfa-Gama-Z para um valor de $E_{ci} = 30.000 \text{ MPa}$ que correspondia a um valor de f_{ck} aproximadamente igual a $17,2 \text{ MPa}$, e um fator de redução único, f_R , igual a 0,70, de acordo com a NB-1/78. Embora a ABNT NBR 6118:2003 e 2007 e textos provisórios anteriores tolerasse o uso desse fator de redução único, sujeito a certas exigências, sua aplicação deixou de ser recomendada na versão atual da norma ABNT NBR 6118. É importante ressaltar que Carmo (1995) adotou um coeficiente de ponderação das ações verticais igual à unidade, em vez do valor recomendado de 1,4, para obter a equação correspondente.

Paiva (2020) calculou, no seu TCC, os pares Alfa – Gama-Z de acordo com as recomendações atuais da ABNT NBR 6118:2014, considerando valores pré-definidos para f_{ck} e f_{Req} . A partir desses novos valores, foram obtidas as funções de correlação entre esses parâmetros por meio de análise de regressão. Cruz et al (2021), reunindo os trabalhos de Maracajá (2020), Paiva (2020) e Silva (2020), apresentaram um conjunto de tabelas e ábacos, como uma proposta alternativa para a obtenção do Gama-Z sem a utilização da expressão indicada pela ABNT NBR 6118:2014.

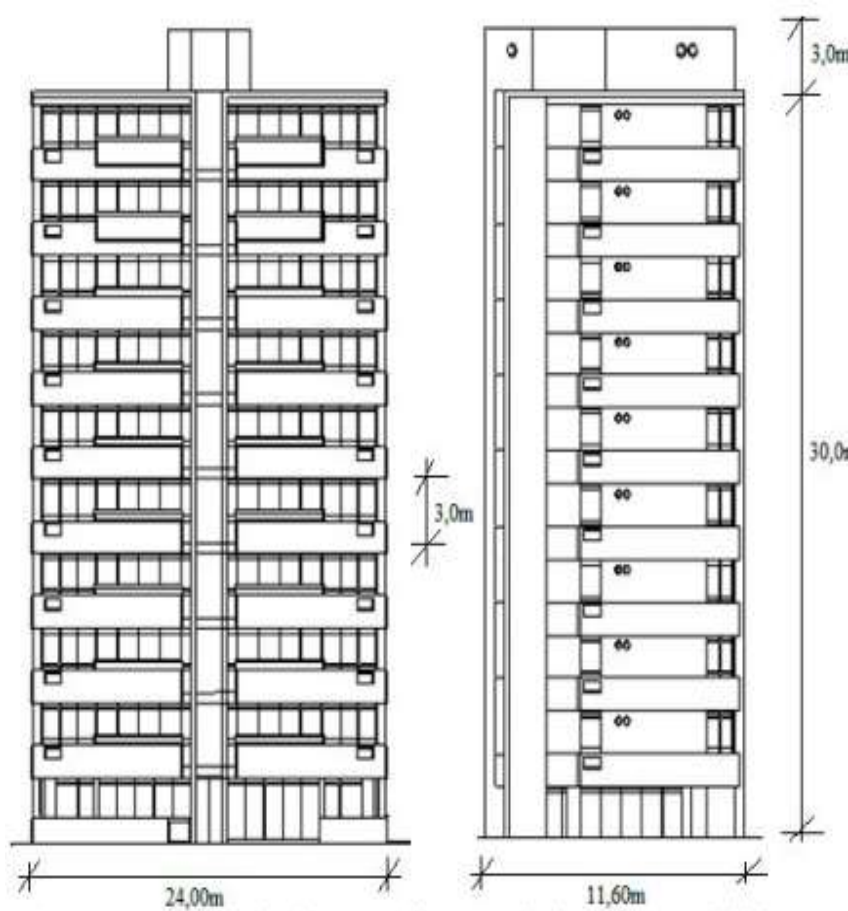
5. APLICAÇÕES

Neste item calculam-se os valores dos parâmetros Alfa e Gama-Z, através das expressões indicadas pela NBR 6118:2014, das equações aproximadoras quadrática e cúbica referidas como Eq.4.7 e Eq. 4.8. E, também, através da equações e/ou ábacos (Cruz et al, 2021) cuja divulgação é um dos objetivos deste TCC.

5.1. APLICAÇÃO 1

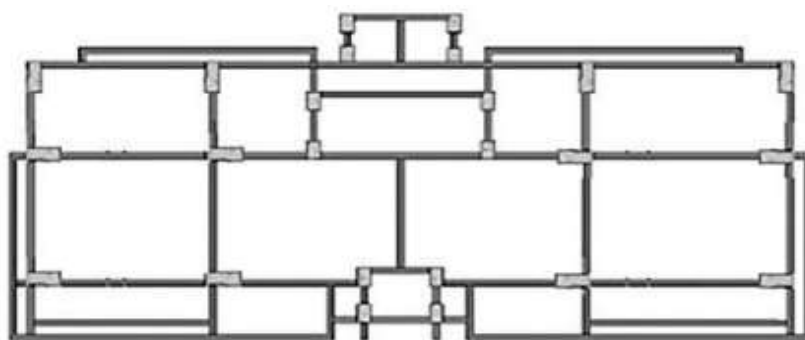
Considerando o projeto arquitetônico cujas fachadas estão mostradas na Figura 5.1 e a planta de fôrma do pavimento tipo da Figura 5.2, cujo SECy está indicado na Figura 5.3 e o SECx na Figura 5.4, calculam-se os valores de Alfa e Gama-Z.

Figura 5.1 - Fachadas frontal e lateral.



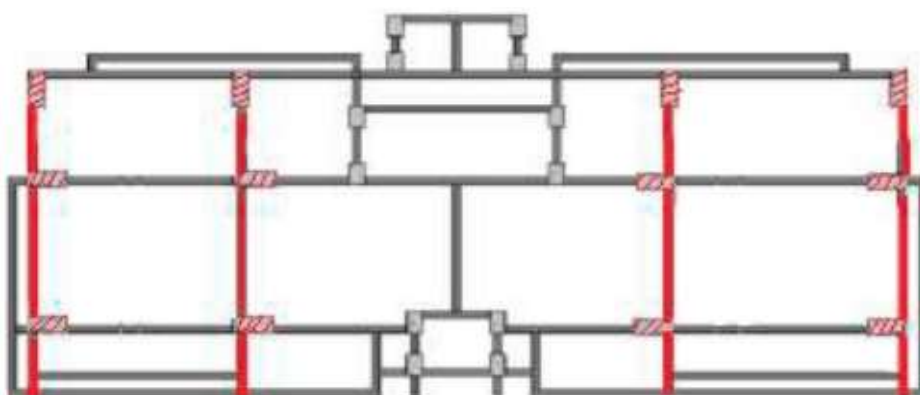
Fonte: Fonte: Da Silva (2020)

Figura 5.2 – Planta de fôrma do pavimento tipo



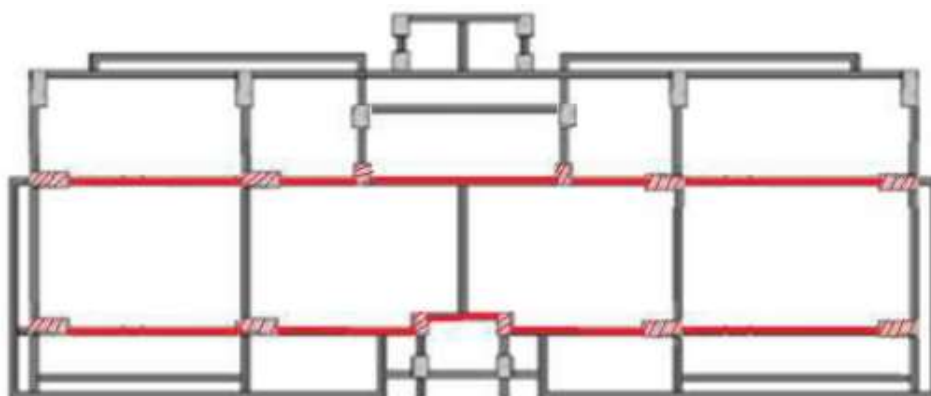
Fonte: Da Silva (2020)

Figura 5.3 - Definição do Sistema Estrutural de Contraventamento da direção Y



Fonte: Da Silva (2020)

Figura 5.4 - Definição do Sistema Estrutural de Contraventamento da direção X



Fonte: Da Silva (2020)

5.1.1. Avaliação do parâmetro α segundo as direções X e Y definidas na projeção horizontal da edificação, com a aplicação da expressão recomendada na ABNT NBR 6118:2014.

- Por poder ser considerado desnecessário, não são apresentados o dimensionamento dos pilares, das vigas e das lajes. E, bem assim, o cálculo dos deslocamentos no topo dos elementos dos SEC utilizados no cálculo da inércia destes pórticos.
- A estimativa do carregamento vertical - F_{vk} - a ser considerada é implementada através do procedimento conhecido como da área de influência de cargas ou método do P médio.

$$F_{vk} \simeq B_x B_y p_m (n + \chi) + \beta V_{res} \cdot \gamma_{\text{água}}$$

$$B_x \cdot B_y = 24,00 \times 11,60 = 278,40 m^2$$

$$p_m = [11; 13] + 0,5sc = 11,00 + 1,50 \times 0,50 = 11,75 kN/m^2$$

$$\beta V_{res} \cdot \gamma_{\text{água}} = 2,5 \times 48,5 \times 10 = 1212,50 kN$$

$$\chi = 0,80$$

Onde: B_x e B_y são as dimensões da projeção horizontal da edificação; p_m é o valor adotado para a carga média por metro quadrado da edificação; sc é a sobrecarga adotada; $\beta V_{res} \cdot \gamma_{\text{água}}$, onde β é uma constante cujo valor pode ser tomado entre 2 e 3, $\gamma_{\text{água}}$ representa o peso específico da água, V_{res} representa o volume correspondente à capacidade de armazenamento do reservatório elevado e χ é uma constante (de 0,6 a 0,9); n é a quantidade de pavimentos.

$$F_{vk} \simeq 278,40 \times 11,75 \times (10 + 0,8) + 1212,50$$

$$F_{vk} \simeq 36541,6 kN$$

5.1.1.1. Estimativa do Parâmetro de Instabilidade Global Alfa na direção Y:

$$\alpha_y = H \sqrt{\frac{F_{vk}}{E_{cs} I_{SEC_y}}}$$

$$F_{vk} = N_K = 36541,46 kN$$

$$H = 31,00 m$$

$$F_{ck} = 30MPa$$

$$\alpha_E = 1,0$$

$$\alpha_i = 0,88$$

$$a_{cd} = 4,111 + 10^{-3}m$$

$$E_{cs} = 0,88 \times 5600 \sqrt{30} = 26991,77MPa = 26991770kN/m^2$$

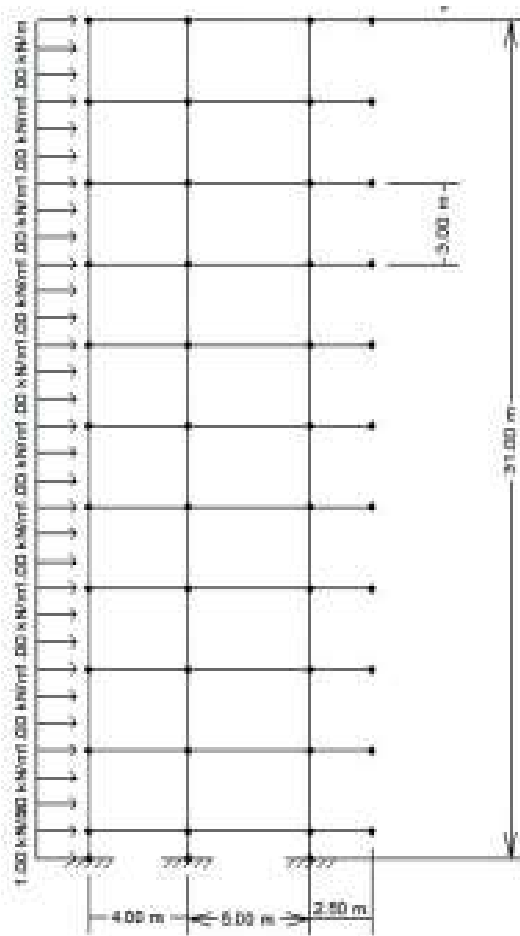
$$I_{p\acute{o}rtico} = \frac{pH^4}{8E_{cs}a_{cd}} = \frac{1,0 \times 31,00^4}{8 \times 26991,77 \times 1000 \times 0,004111} = 1,04m^4$$

$$I_{SEC_Y} = 4 \times I_{p\acute{o}rtico} = 4 \times 1,04 = 4,16m^4$$

Onde: $I_{p\acute{o}rtico}$ representa a inércia do pilar equivalente ao pórtico e I_{SEC_Y} representa a inércia do Sistema Estrutural de Contraventamento da direção Y, a_{cd} é o deslocamento horizontal no topo devido a carga distribuída. Assim, tem-se a estimativa do Parâmetro Alfa para a direção Y:

$$\alpha_y = 31,00 \sqrt{\frac{32541,46}{26991770 \times 4,16}} = 0,559 \approx 0,56$$

Figura 5.5 - Pórtico do SECy



Fonte: Cruz et al (2018)

5.1.1.2. Estimativa do Parâmetro Alfa na direção X

$$\alpha_x = H \sqrt{\frac{F_{vk}}{E_{cs} I_{SEC_x}}}$$

$$a_{cd} = 0,0017m$$

$$I_{p\acute{o}rtico} = \frac{pH^4}{8E_{cs} a_{cd}} = \frac{1,0 \times 31,00^4}{8 \times 26991,77 \times 1000 \times 0,0017} = 2,51m^4$$

$$H = 31,00m$$

$$f_{ck} = 30MPa$$

$$E_{cs} = 26991,77MPa = 26991770kN / m^2$$

$$a_{cd} = 0,0017m$$

$$I_{p\acute{o}rtico} = \frac{pH^4}{8E_{cs}a_{cd}} = \frac{1,0 \times 31,00^4}{8 \times 26991,77 \times 1000 \times 0,0017} = 2,51m^4$$

$$I_{SEC_x} = \sum_1^2 I_{porticoi} = 5,02m^4$$

$$\alpha_x = 31,00 \sqrt{\frac{36541,46}{26991770 \times 5,02}} = 0,509 \cong 0,51$$

5.1.2. Avaliação do γ_z a partir do carregamento devido ao vento e do carregamento vertical estimado utilizado na avaliação do α . Com a aplicação da expressão recomendada na ABNT NBR 6118:2014.

- Parâmetros para o cálculo do efeito do vento paralelo à direção Y e à direção X

$$B_x=24,00m, B_y=11,60m, H=30,00m$$

$$V_0=30m/s$$

$$S_1=1 \text{ e } S_3=1$$

Categoria: Quatro; Classe: B

$$b = 0,85, p=0,125, Fr = 0,9$$

$$S_2=b Fr (Z /10)^P$$

$$C_{ay}=1,31$$

$$f_{ay,i}=C_{ay}q_iB_{xi}$$

$$F_{ay,i}=0,5.(f_{ay,i}h_i+f_{ay,i-1}h_{i-1})$$

$$C_{ax}=1,43$$

$$f_{ax,i}=C_{ax}q_iB_{yi}$$

$$F_{ax,i}=0,5.(f_{ax,i}h_i+f_{ax,i-1}h_{i-1})$$

Tabela 5.1 - Efeito do vento na direção Y e na direção X

Pav.	Z (m)	Z ⁺ (m)	S ₂	V _k (m/s)	q (N/m ²)	f _{ay} (kN/m)	f _{ax} (kN)	F _{ay} (kN)	F _{ax} (kN)
Primeiro	0	1,5	0,66	19,71	238,24	7,49	3,95	11,23	5,92
Segundo	3	4,5	0,75	22,62	313,54	9,86	5,20	26,02	13,72
Terceiro	6	7,5	0,80	24,11	356,25	11,20	5,91	31,59	16,66
Quarto	9	10,5	0,84	25,14	387,52	12,18	6,43	35,07	18,51
Quinto	12	13,5	0,86	25,95	412,64	12,97	6,84	37,72	19,90
Sexto	15	16,5	0,89	26,60	433,87	13,64	7,20	41,79	21,06
Sétimo	18	19,5	0,91	27,17	452,38	14,22	7,50	43,44	22,05
Oitavo	21	22,5	0,92	27,66	468,86	14,74	7,78	44,92	22,95
Nono	24	25,5	0,94	28,09	483,76	15,21	8,02	47,17	23,70
Decimo	27	28,5	0,95	28,49	497,40	15,64	8,25	46,27	24,40
Cobertua	30							23,46	12,37

Fonte: O Autor

5.1.2.1.Cálculo do Gama-Z da direção Y

- Cálculo do $M_{l,tot,d,y}$

Tabela 5.2 - Elementos para o cálculo do $M_{l,tot,d,y}$

Pavimento	F _{ay,i} (kN)	H _i (m)	M _{l,tot,d,y} (kNm)
Cobertura	6,40	31	198,4
Decimo	11,57	28	323,96
Nono	11,79	25	294,75
Oitavo	11,23	22	247,06
Sétimo	10,86	19	206,34
Sexto	10,45	16	167,20
Quinto	9,43	13	122,59
Quarto	8,77	10	87,70
Terceiro	7,90	7	55,30
Segundo	6,50	4	26,00
Primeiro	2,81	1	2,81
Total	---	---	1732,11

Fonte: O Autor

- Cálculo do $\Delta M_{l,tot,d,y}$

Tabela 5.3 - Elementos para o cálculo do $\Delta M_{1,tot,d,y}$

Pavimento	$F_{y,i}$ (kN)	a(cm)	$\Delta M_{1,tot,d,y}$ (kNm)
Cobertura	957,35	3,17	30,35
Decimo	817,80	3,06	25,02
Nono	817,80	2,93	23,96
Oitavo	817,80	2,83	23,14
Sétimo	817,80	2,62	21,43
Sexto	817,80	2,33	19,05
Quinto	817,80	2,01	16,44
Quarto	817,80	1,45	11,86
Terceiro	817,80	0,72	5,89
Segundo	817,80	0,42	3,43
Primeiro	817,80	0,1	0,82
Total	9135,35	---	181,4

Fonte: O Autor

O carregamento vertical devido ao reservatório elevado e às casas de máquinas foi aplicado no nível da laje da coberta.

Para o cálculo dos deslocamentos horizontais devido ao vento utilizou-se a $CB1=1,4F_{vk} + 0,6 \times 1,4 F_{ay}$, de análise de ELU em que o vento é variável secundária.

- Obtenção do Gama-Z da direção Y

$$\gamma_{zy} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{1,tot,d,y}}{M_{1,tot,d,y}}} = \frac{1}{1 - \frac{181,4}{1732,11}} = 1,117 \equiv 1,12$$

5.1.2.2.Cálculo do Gama-Z da direção X

- Cálculo do $M_{1,tot,d,x}$

Tabela 5.4 - Elementos para o cálculo do $M_{1,tot,d,x}$

Pavimento	$F_{ax,i}$ (kN)	H_i (m)	$M_{1,tot,d,x}$ (kNm)
Cobertura	12,37	31	383,47

Décimo	24,40	28	683,20
Nono	23,70	25	592,50
Oitavo	22,95	22	504,90
Sétimo	22,05	19	418,95
Sexto	21,06	16	336,96
Quinto	19,90	13	258,70
Quarto	18,51	10	185,10
Terceiro	16,66	7	116,62
Segundo	13,72	4	54,88
Primeiro	5,92	1	5,52
Total	---	---	3541,2

Fonte: O Autor

- Cálculo do $\Delta M_{1,tot,d,x}$

Tabela 5.5 - Elementos para o cálculo do $\Delta M_{1,tot,d,x}$

Pavimento	$F_{x,i}$ (kN)	a(cm)	$\Delta M_{1,tot,d,x}$ (kNm)
Cobertura	1914,70	3,78	72,38
Décimo	1635,60	3,66	59,86
Nono	1635,60	3,45	56,43
Oitavo	1635,60	3,28	53,65
Sétimo	1635,60	2,97	48,58
Sexto	1635,60	2,38	38,93
Quinto	1635,60	1,92	31,40
Quarto	1635,60	1,61	26,33
Terceiro	1635,60	0,79	12,92
Segundo	1635,60	0,20	3,27
Primeiro	1635,60	0,05	0,82
Total	18270,70	---	404,58

Fonte: O Autor

Como no cálculo anterior o carregamento vertical devido ao reservatório elevado e às casas de máquinas aplicado no nível da laje da coberta. Assim, o valor do Coeficiente Gama-Z calculado para o SEC da direção X:

- Obtenção do Gama-Z da direção X

$$\gamma_{zx} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{1,tot,d,y}}{M_{1,tot,d,y}}} = \frac{1}{1 - \frac{404,58}{3541,20}} = 1,129 \equiv 1,13$$

5.1.3. Avaliação do γ_z a partir do parâmetro α .

Neste caso serão utilizadas as funções aproximadoras quadrática e a cúbica.

- As funções aproximadoras quadrática e cúbica

$$\gamma_z = 1,10 - 0,33\alpha + 0,50\alpha^2$$

$$\gamma_z = 0,90 + 0,50\alpha - 0,62\alpha^2 + 0,46\alpha^3$$

Estimativa do Gama-Zy

Sendo $\alpha_y = 0,56$, tem-se:

$$\gamma_{zy} = 1,10 - 0,33 \times 0,56 + 0,50 \times 0,56^2$$

$$\gamma_{zy} = 1,072$$

$$\gamma_{zy} = 0,90 + 0,50 \times 0,56 - 0,62 \times 0,56^2 + 0,46 \times 0,56^3$$

$$\gamma_{zy} = 1,066$$

Estimativa do Gama-Zx

Sendo $\alpha_y = 0,50$, tem-se:

$$\gamma_{zx} = 1,10 - 0,33 \times 0,51 + 0,50 \times 0,51^2$$

$$\gamma_{zx} = 1,062$$

$$\gamma_{zx} = 0,90 + 0,50 \times 0,51 - 0,62 \times 0,51^2 + 0,46 \times 0,51^3$$

$$\gamma_{zx} = 1,055$$

5.1.4. Avaliação do α a partir do parâmetro α , do f_{ck} , e do f_{Req} .

- Cálculo do fator de redução equivalente

Considerando que o SEC_y é composto por quatro pórticos iguais e que da análise de um deles se verifica que o deslocamento horizontal no topo produzido por um carregamento horizontal distribuído de valor unitário, calculado com 0,80 da rigidez flexional dos pilares e 0,40 da rigidez flexional das vigas é igual ao valor obtido para o pórtico com 0,55 da rigidez flexional dos pilares e das vigas, então conclui-se que o $F_{Req} = 0,55$.

- Utilização de ábacos – Correlação cúbica

$$\alpha_y = 0,56$$

$$\alpha_x = 0,50$$

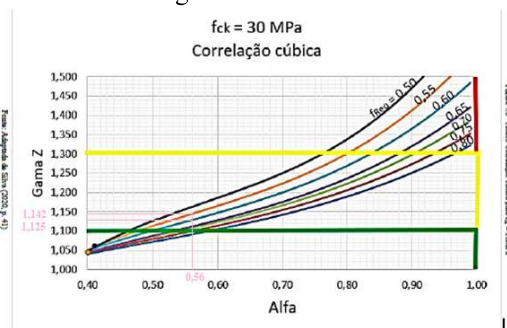
$$F_{Req} = 0,56$$

$$F_{Reqx} = 0,50$$

$$F_{CK} = 30MPa$$

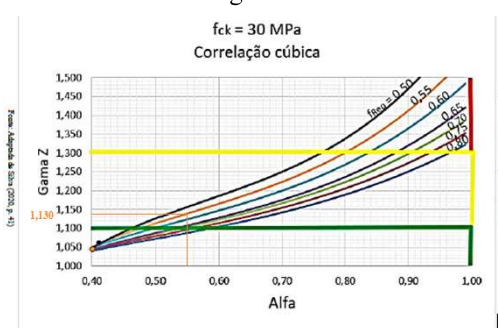
$$F_{CK} = 30MPa$$

Figura 5.6



Fonte Cruz et al (2021)

Figura 5.6a

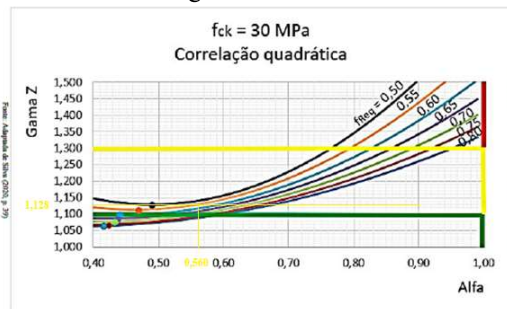


Fonte Cruz et al (2021)

$$\gamma_{zyCubica} = \frac{1,142 + 1,125}{2} = 1,133$$

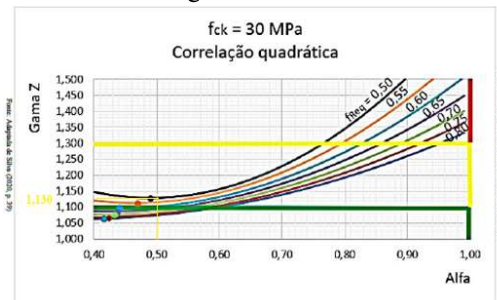
$$\gamma_{zxCubica} = 1,13$$

Figura 5.7



Fonte Cruz et al (2021)

Figura 5.7a



Fonte Cruz et al (2021)

- Utilização de tabelas

Figura 5.8 Tabela 3.10, página:62, de Cruz et al (2021)

Tabela 3.2 - O γ_z em função do α e do f_{Req} para $f_{ck} = 25\text{MPa}$ (Correlação Cúbica)

α	$f_{ck} = 25\text{MPa}$ (Cúbica)						
	f_{Req}						
	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
0,40	1,036	1,037	1,038	1,038	1,036	1,031	1,018
0,41	1,040	1,041	1,043	1,043	1,043	1,040	1,030
0,42	1,043	1,045	1,048	1,049	1,050	1,048	1,041
0,43	1,047	1,049	1,052	1,054	1,056	1,056	1,052
0,44	1,050	1,053	1,057	1,059	1,062	1,064	1,063
0,45	1,053	1,057	1,061	1,064	1,068	1,072	1,073
0,46	1,057	1,060	1,066	1,069	1,074	1,079	1,083
0,47	1,060	1,064	1,070	1,074	1,080	1,086	1,092
0,48	1,063	1,068	1,074	1,079	1,085	1,093	1,101
0,49	1,067	1,071	1,079	1,083	1,091	1,099	1,110
0,50	1,070	1,075	1,083	1,088	1,096	1,106	1,118
0,51	1,073	1,079	1,087	1,092	1,101	1,112	1,126
0,52	1,076	1,082	1,091	1,097	1,106	1,118	1,133
0,53	1,080	1,086	1,095	1,101	1,111	1,124	1,141
0,54	1,083	1,089	1,099	1,105	1,116	1,130	1,148
0,55	1,086	1,093	1,103	1,110	1,121	1,135	1,155

0,56	1,090	1,096	1,107	1,114	1,126	1,141	1,161
0,57	1,093	1,100	1,111	1,118	1,131	1,147	1,168
0,58	1,096	1,103	1,115	1,123	1,136	1,152	1,174
0,59	1,099	1,107	1,119	1,127	1,140	1,158	1,181
0,60	1,103	1,111	1,123	1,131	1,145	1,163	1,187
0,61	1,106	1,114	1,127	1,136	1,150	1,168	1,193
0,62	1,110	1,118	1,132	1,140	1,155	1,174	1,199
0,63	1,113	1,122	1,136	1,145	1,160	1,179	1,205
0,64	1,117	1,126	1,140	1,149	1,165	1,184	1,211
0,65	1,120	1,130	1,144	1,154	1,170	1,190	1,217
0,66	1,124	1,134	1,149	1,158	1,175	1,196	1,223
0,67	1,128	1,138	1,153	1,163	1,180	1,201	1,229
0,68	1,131	1,142	1,158	1,168	1,185	1,207	1,235
0,69	1,135	1,146	1,162	1,173	1,190	1,213	1,241
0,70	1,139	1,150	1,167	1,178	1,196	1,219	1,248
0,71	1,143	1,154	1,172	1,183	1,202	1,225	1,255
0,72	1,147	1,159	1,177	1,188	1,207	1,231	1,261
0,73	1,152	1,163	1,182	1,193	1,213	1,237	1,268
0,74	1,156	1,168	1,187	1,199	1,219	1,244	1,276
0,75	1,160	1,173	1,192	1,205	1,225	1,251	1,283
0,76	1,165	1,178	1,198	1,210	1,232	1,258	1,291
0,77	1,169	1,183	1,203	1,216	1,238	1,265	1,299
0,78	1,174	1,188	1,209	1,223	1,245	1,273	1,307
0,79	1,179	1,193	1,215	1,229	1,252	1,281	1,316
0,80	1,184	1,198	1,221	1,235	1,259	1,289	1,325
0,81	1,189	1,204	1,227	1,242	1,267	1,297	1,335
0,82	1,194	1,209	1,234	1,249	1,275	1,306	1,345
0,83	1,199	1,215	1,240	1,256	1,283	1,315	1,355
0,84	1,205	1,221	1,247	1,263	1,291	1,325	1,366
0,85	1,210	1,227	1,254	1,271	1,300	1,334	1,378
0,86	1,216	1,234	1,261	1,279	1,308	1,345	1,389
0,87	1,222	1,240	1,269	1,287	1,318	1,355	1,402
0,88	1,228	1,247	1,277	1,295	1,327	1,366	1,415
0,89	1,235	1,254	1,284	1,304	1,337	1,378	1,429
0,90	1,241	1,261	1,293	1,313	1,347	1,390	1,443
0,91	1,248	1,268	1,301	1,322	1,358	1,402	1,458
0,92	1,254	1,276	1,310	1,332	1,369	1,415	1,473
0,93	1,261	1,283	1,319	1,341	1,380	1,428	1,489
0,94	1,268	1,291	1,328	1,351	1,392	1,442	1,506
0,95	1,276	1,299	1,337	1,362	1,404	1,456	1,524
0,96	1,283	1,308	1,347	1,373	1,416	1,471	1,542
0,97	1,291	1,316	1,357	1,384	1,429	1,487	1,562
0,98	1,299	1,325	1,368	1,395	1,442	1,503	1,582
0,99	1,307	1,334	1,378	1,407	1,456	1,519	1,603

Fonte: Adaptada de Paiva (2020, p. 60)

Figura 5.8a Tabela 3.10, página:62, de Cruz et al (2021)

Tabela 3.10 - O γ_z em função do α e do f_{req} para $f_{ck} = 30\text{MPa}$ (Correlação Quadrática)

α	$f_{ck} = 30\text{MPa}$ (Quadrática)						
	0,80	0,75	0,70	f_{req} 0,65	0,60	0,55	0,50
0,40	1,062	1,069	1,077	1,087	1,101	1,120	1,149
0,41	1,063	1,069	1,077	1,087	1,100	1,118	1,145
0,42	1,064	1,070	1,077	1,086	1,099	1,116	1,141
0,43	1,064	1,070	1,078	1,087	1,098	1,115	1,138
0,44	1,065	1,071	1,078	1,087	1,098	1,114	1,136
0,45	1,066	1,072	1,079	1,087	1,098	1,113	1,134
0,46	1,068	1,073	1,080	1,088	1,099	1,113	1,132
0,47	1,069	1,074	1,081	1,089	1,099	1,113	1,131
0,48	1,070	1,076	1,082	1,090	1,100	1,113	1,130
0,49	1,072	1,078	1,084	1,092	1,102	1,114	1,130
0,50	1,074	1,079	1,086	1,094	1,103	1,115	1,130
0,51	1,076	1,081	1,088	1,095	1,105	1,116	1,131

0,52	1,078	1,083	1,090	1,098	1,107	1,118	1,132
0,53	1,080	1,086	1,092	1,100	1,109	1,120	1,134
0,54	1,082	1,088	1,095	1,102	1,112	1,122	1,136
0,55	1,085	1,091	1,097	1,105	1,114	1,125	1,138
0,56	1,087	1,093	1,100	1,108	1,118	1,128	1,141
0,57	1,090	1,096	1,103	1,111	1,121	1,132	1,144
0,58	1,093	1,099	1,107	1,115	1,125	1,136	1,148
0,59	1,096	1,102	1,110	1,119	1,128	1,140	1,152
0,60	1,099	1,106	1,114	1,122	1,133	1,144	1,157
0,61	1,102	1,109	1,117	1,127	1,137	1,149	1,162
0,62	1,106	1,113	1,121	1,131	1,142	1,154	1,168
0,63	1,109	1,117	1,126	1,135	1,147	1,160	1,174
0,64	1,113	1,121	1,130	1,140	1,152	1,166	1,181
0,65	1,117	1,125	1,135	1,145	1,158	1,172	1,188
0,66	1,121	1,130	1,139	1,151	1,163	1,178	1,195
0,67	1,125	1,134	1,144	1,156	1,170	1,185	1,203
0,68	1,129	1,139	1,149	1,162	1,176	1,192	1,211
0,69	1,134	1,144	1,155	1,168	1,183	1,200	1,220
0,70	1,138	1,149	1,160	1,174	1,189	1,208	1,229
0,71	1,143	1,154	1,166	1,180	1,197	1,216	1,239
0,72	1,148	1,159	1,172	1,187	1,204	1,225	1,249
0,73	1,153	1,165	1,178	1,193	1,212	1,234	1,260
0,74	1,158	1,170	1,184	1,200	1,220	1,243	1,271
0,75	1,163	1,176	1,191	1,208	1,228	1,252	1,282
0,76	1,169	1,182	1,197	1,215	1,237	1,262	1,294
0,77	1,174	1,188	1,204	1,223	1,245	1,273	1,307
0,78	1,180	1,194	1,211	1,231	1,254	1,283	1,319
0,79	1,186	1,201	1,218	1,239	1,264	1,294	1,333
0,80	1,192	1,207	1,226	1,247	1,273	1,306	1,346
0,81	1,198	1,214	1,233	1,256	1,283	1,317	1,361
0,82	1,204	1,221	1,241	1,265	1,293	1,329	1,375
0,83	1,211	1,228	1,249	1,274	1,304	1,342	1,390
0,84	1,217	1,236	1,257	1,283	1,315	1,354	1,406
0,85	1,224	1,243	1,265	1,292	1,326	1,367	1,422
0,86	1,231	1,251	1,274	1,302	1,337	1,381	1,438
0,87	1,238	1,258	1,283	1,312	1,348	1,395	1,455
0,88	1,245	1,266	1,291	1,322	1,360	1,409	1,473
0,89	1,252	1,274	1,301	1,332	1,372	1,423	1,491
0,90	1,260	1,283	1,310	1,343	1,384	1,438	1,509
0,91	1,267	1,291	1,319	1,354	1,397	1,453	1,528
0,92	1,275	1,299	1,329	1,365	1,410	1,468	1,547
0,93	1,283	1,308	1,339	1,376	1,423	1,484	1,566
0,94	1,291	1,317	1,349	1,388	1,437	1,500	1,586
0,95	1,299	1,326	1,359	1,399	1,450	1,517	1,607
0,96	1,307	1,335	1,369	1,411	1,464	1,533	1,628
0,97	1,315	1,345	1,380	1,423	1,478	1,551	1,649
0,98	1,324	1,354	1,391	1,436	1,493	1,568	1,671
0,99	1,332	1,364	1,402	1,448	1,508	1,586	1,694

Fonte: Adaptada de Paiva (2020, p. 60)

Correlação quadrática

$$\alpha_y = 0,56$$

$$F_{Req} = 0,56$$

$$F_{CK} = 30MPa$$

$$\gamma_{zyQuadrática} = 1,128$$

Correlação quadrática

$$\alpha_x = 0,50$$

$$F_{Reqx} = 0,50$$

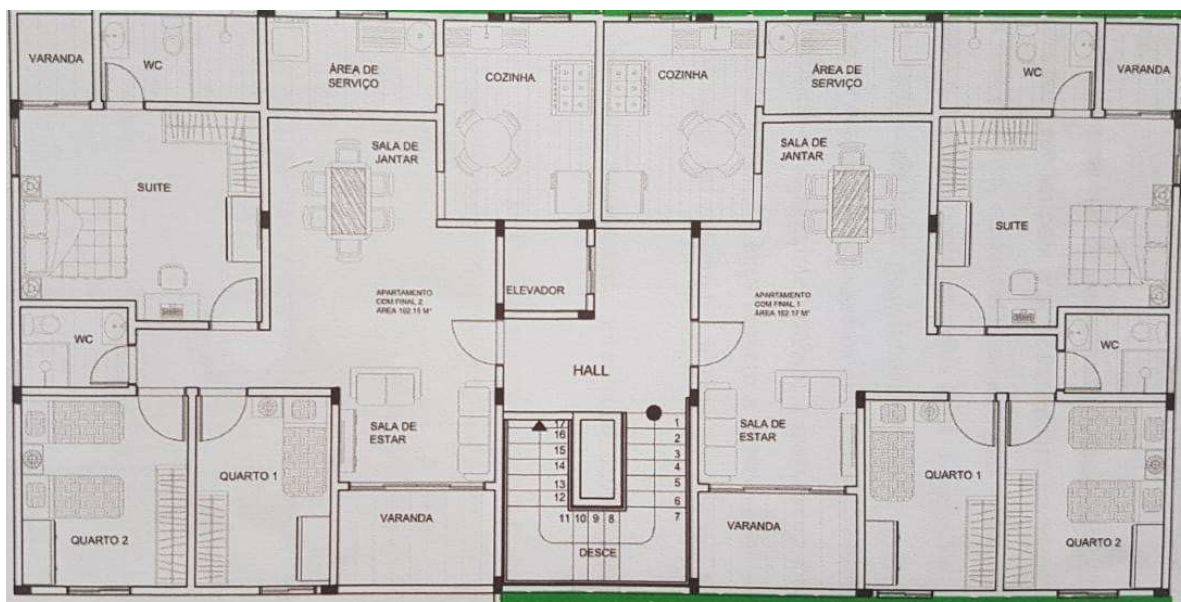
$$F_{CK} = 30MPa$$

$$\gamma_{zxQuadrática} = 1,13$$

5.2. APLICAÇÃO 2

Considerando a edificação cuja planta do pavimento tipo está indicada na Figura 5.9, cuja planta de fôrma é mostrada na Figura 5.10, estando o SECy indicado na Figura 5.11, calculam-se os valores do Gama-Z.

Figura 5.9 - Planta do pavimento tipo



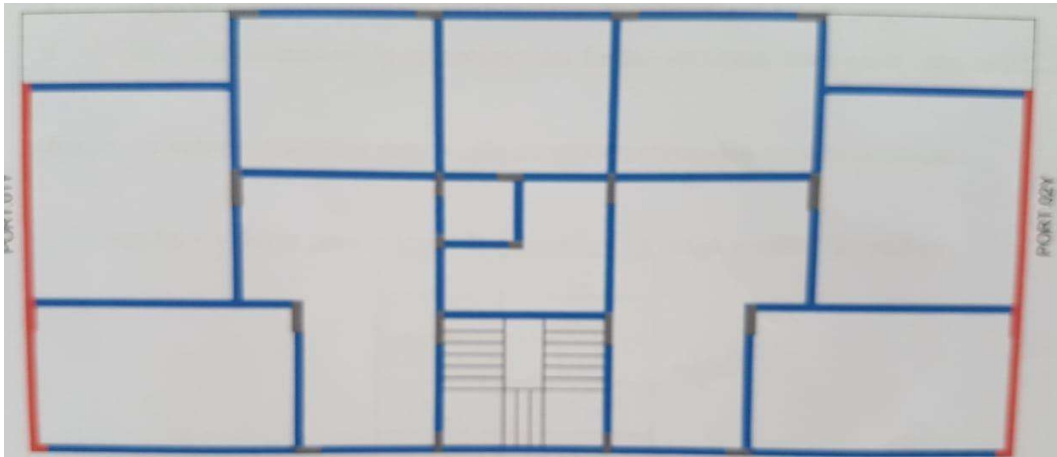
Fonte: Pereira, Rodrigues e Peixoto (2022)

Figura 5.10 Planta de fôrma



Fonte: Pereira, Rodrigues e Peixoto (2022)

Figura 5.11 - SECy



Fonte: Pereira, Rodrigues e Peixoto (2022)

5.2.1. Avaliação do parâmetro α segundo a direção Y definida na projeção horizontal da edificação, com a aplicação da expressão recomendada na ABNT NBR 6118:2014.

• A estimativa do carregamento vertical - F_{vk} - a ser considerada é implementada através do procedimento conhecido como da área de influência de cargas ou método do P médio.

$$F_{vk} \simeq B_x B_y p_m (n + \chi) + \beta V_{res} \cdot \gamma_{\text{água}}$$

$$B_x \cdot B_y = 242m^2$$

$$p_m = [11; 15] + 0,5sc = 13,00 + 2.22 \times 0,50 = 14,11kN/m^2$$

$$\beta V_{res} \cdot \gamma_{\text{água}} = 3 \times 23,694 \times 10 = 710,83kN$$

$$\chi = 0,85$$

Onde: B_x e B_y são as dimensões da projeção horizontal da edificação; p_m é o valor adotado para a carga média por metro quadrado da edificação; sc é a sobrecarga adotada; $\beta V_{res} \cdot \gamma_{\text{água}}$, onde β é uma constante cujo valor pode ser tomado entre 2 e 3, $\gamma_{\text{água}}$ representa o peso específico da água, V_{res} representa o volume correspondente à capacidade de armazenamento do reservatório elevado e χ é uma constante (de 0,80 a 0,95); n é a quantidade de pavimentos

$$F_{vk} \simeq 242 \times 14,11 \times (12 + 0,85) + 710,83$$

$$F_{vk} \simeq 44588,70 kN$$

5.2.1.1 Estimativa do Parâmetro de Instabilidade Global Alfa na direção Y:

$$\alpha_y = H \sqrt{\frac{F_{vk}}{E_{cs} I_{SEC_Y}}}$$

$$F_{vk} = N_K = 44588,70 kN$$

$$H = 42,45 m$$

$$F_{ck} = 30 MPa$$

$$\alpha_E = 1,0$$

$$\alpha_i = 0,88$$

$$a_{cc} = 0,0005696 m$$

$$E_{cs} = 0,88 \times 5600 \sqrt{30} = 26991,77 MPa = 26991770 kN/m^2 \simeq 27000000 kN/m^2$$

$$I_{p\acute{o}rtico} = \frac{PH^3}{3E_{cs} a_{cc}} = \frac{1,0 \times 42,45^3}{3 \times 27000000 \times 0,0005696} = 1,658 m^4$$

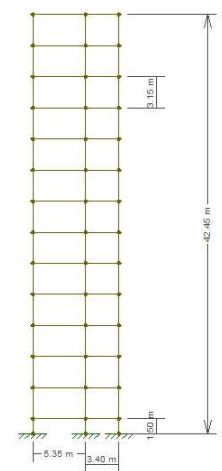
$$I_{SEC_Y} = 2 \times I_{p\acute{o}rtico} = 2 \times 1,658 = 3,316 m^4$$

Onde: $I_{p\acute{o}rtico}$ representa a inércia do pilar equivalente ao pórtico e I_{SEC_Y} representa a inércia do Sistema Estrutural de Contraventamento da direção Y, a_{cc} é o deslocamento horizontal no topo devido à carga concentrada. Assim, tem-se a estimativa do Parâmetro Alfa para a direção Y:.

Assim, tem-se a estimativa do Parâmetro Alfa para a direção Y:

$$\alpha_y = 42,45 \sqrt{\frac{44588,70}{27000000 \times 3,316}} = 0,947 \simeq 0,95$$

Figura 5.12 - Pórtico do SECy



Fonte: Pereira, Rodrigues e Peixoto (2022)

5.2.2. Avaliação do γ_z a partir do carregamento devido ao vento e do carregamento vertical estimado utilizado na avaliação do α . Com a aplicação da expressão recomendada na ABNT NBR 6118:2014.

- Parâmetros para o cálculo do efeito do vento paralelo à direção Y e à direção X

$$B_x=24,00\text{m}, B_y=11,60\text{m}, H=30,00\text{m}$$

$$V_0=30\text{m/s}$$

$$S_1=1$$

$$S_3=1$$

Categoria: Quatro

Classe: B

$$b = 0,85, p=0,125, Fr = 0,9$$

$$S_2=b Fr (Z /10)^P$$

$$C_{ay}=1,05$$

$$f_{ay,i}=C_{ay}q_iB_{xi}$$

$$F_{ay,i}=0,5.(f_{ay,i}h_i+f_{ay,i-1}h_{i-1})$$

Tabela 5.6 -Efeito do vento na direção Y

Niv.	Z (m)	F _{ay} kN)
1	0,00	1,147
2	3,15	11,494
3	6,30	23,194

4	9,45	27,009
5	12,60	29,426
6	15,75	31,126
7	18,90	32,558
8	22,05	33,891
9	25,20	35,287
10	28,35	36,461
11	31,50	37,307
12	34,65	38,007
13	37,80	38,753
14	40,95	19,539

Fonte: Adaptada de Pereira, Rodrigues e Peixoto (2022)

5.2.3. Cálculo do Gama-Z da direção Y

- Cálculo do $M_{l,tot,d,y}$

Tabela 5.7 - Elementos para o cálculo do $M_{l,tot,d,y}$

Pavimento	$F_{ay,i}$ (kN)	Cota (m)	$M_{l,tot,d,y}$ (kNm)
Coberta	9,797	42,45	349,39
Décimo segundo	19,376	39,30	639,80
Décimo primeiro	19,003	36,15	576,95
Décimo	18,654	33,00	517,11
Nono	18,230	29,85	457,00
Oitavo	17,643	26,70	395,18
Sétimo	16,990	23,55	336,06
Sexto	16,279	20,40	278,87
Quinto	15,563	17,25	225,51
Quarto	14,713	14,10	174,26
Terceiro	13,505	10,95	124,22
Segundo	11,597	7,80	75,98
Primeiro	5,747	4,65	22,45
Pilotis	0,573	1,5	0,72
Total	---	---	4173,48

Fonte: Adaptada de Pereira, Rodrigues e Peixoto (2022)

- Cálculo do $\Delta M_{1,tot,d,y}$

Tabela 5.8 - Elementos para o cálculo do $\Delta M_{1,tot,d,y}$ (kNm)

Pavimento	$F_{vk,i}$ (kN)	a_i (mm)	$\Delta M_{1,tot,d,y}$ (kNm)
Coberta	1691,05	89,55	167,62
Decimo segundo	1573,00	87,43	192,54
Decimo primeiro	1573,00	84,47	186,02
Decimo	1573,00	80,56	177,41
Nono	1573,00	75,69	166,68
Oitavo	1573,00	69,90	153,93
Sétimo	1573,00	63,22	139,22
Sexto	1573,00	55,72	122,71
Quinto	1573,00	47,44	104,47
Quarto	1573,00	38,42	84,70
Terceiro	1573,00	28,88	63,60
Segundo	1573,00	18,90	41,63
Primeiro	1573,00	9,024	19,87
Pilotis	1730,30	1,206	2,92
Total	---	---	1622,31

O carregamento vertical devido ao reservatório elevado e às casas de máquinas foi aplicado no nível da laje da cobertura.

Para o cálculo dos deslocamentos horizontais devido ao vento utilizou-se a $CB1=1,4F_{vk} + 0,6 \times 1,4 F_{ay}$, de análise de ELU em que o vento é variável secundária.

- Obtenção do Gama-Z da direção Y

$$\gamma_{zy} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{1,tot,d,y}}{M_{1,tot,d,y}}} = \frac{1}{1 - \frac{1622,31}{4173,48}} = 1,636 \approx 1,64$$

5.2.4. Avaliação do γ_z a partir do parâmetro α .

Neste caso serão utilizadas as funções aproximadoras quadrática e a cúbica.

- As funções aproximadoras quadrática e cúbica

$$\gamma_z = 1,10 - 0,33\alpha + 0,50\alpha^2$$

$$\gamma_z = 0,90 + 0,50\alpha - 0,62\alpha^2 + 0,46\alpha^3$$

Estimativa do Gama-Zy

Sendo $\alpha_y = 0,947$, tem-se, para a aproximação quadrática:

$$\gamma_{zy} = 1,10 - 0,33 \times 0,947 + 0,50 \times 0,947^2$$

$$\gamma_{zy} = 1,146$$

E, para a aproximação cúbica:

$$\gamma_{zy} = 0,90 + 0,50 \times 0,947 - 0,62 \times 0,947^2 + 0,46 \times 0,947^3$$

$$\gamma_{zy} = 1,208$$

5.2.5. Avaliação do γ_z a partir do parâmetro α , do f_{ck} , e do f_{Req} .

- Cálculo do Coeficiente de redução equivalente

Considerando que o SEC_y é composto por dois pórticos iguais e que da análise de um deles se verifica que o deslocamento horizontal no topo produzido por um carregamento horizontal concentrado de valor unitário ali aplicado e calculado com 0,80 da rigidez flexional dos pilares e 0,40 da rigidez flexional das vigas é igual ao valor obtido para o pórtico com 0,48 da rigidez flexional dos pilares e das vigas, então conclui-se que o $F_{Req} = 0,48$.

- Utilização de ábacos

A utilização dos ábacos não é possível pelo fato de que os valores a serem obtidos estão fora do alcance.

- Utilização das tabelas.

As tabelas 3.3 e 3.10 de Cruz et al (2021) já representadas, poderão ser utilizadas desde que se considere $\alpha_y = 0,947 \cong 0,95$ e $F_{Req} = 0,48 \cong 0,50$.

Assim, da p.52 da Tab.3.3 (aproximação cúbica) e da p.62 da Tab.3.10 (aproximação quadrática), da referência supracitada tem-se respectivamente:

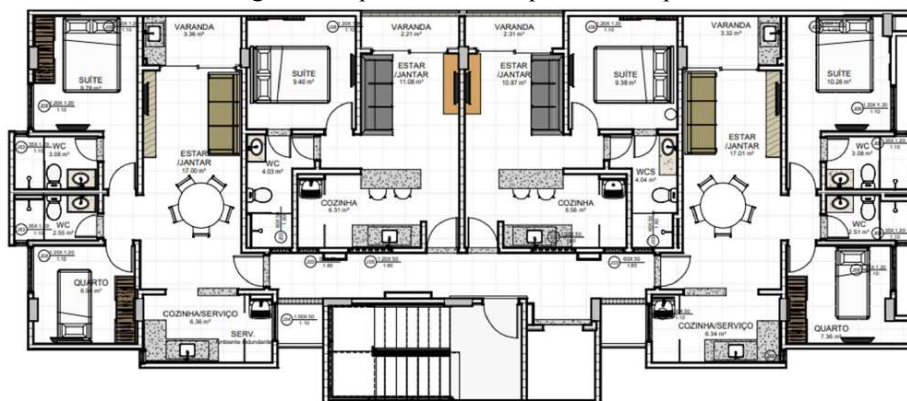
$$\gamma_{zy} = 1,562 \quad (\text{para aproximação cúbica})$$

$$\gamma_{zy} = 1,607 \quad (\text{para aproximação quadrática})$$

5.3. APLICAÇÃO 3

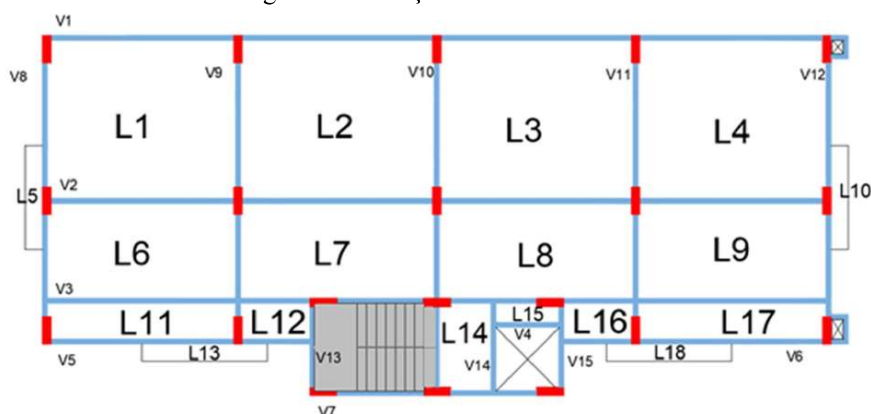
Considerando o projeto arquitetônico cuja planta baixa do pavimento tipo está indicada na Figura 5.13, o lançamento da estrutura na Figura 5.14 e o SECy na Figura 5.15 calculam-se os valores de Alfa e Gama-Z.

Figura 5.13 planta baixa do pavimento tipo



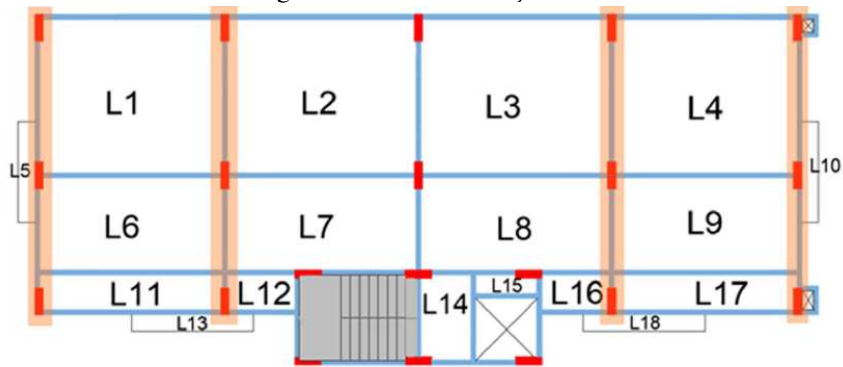
Fonte: Simas e Amaral Leite (2021)

Figura 5.14 Lançamento da estrutura



Fonte: Simas e Amaral Leite (2021)

Figura 5.15 SEC da direção Y



Fonte: Simas e Amaral Leite (2021)

5.3.1. Avaliação do parâmetro α segundo a direção Y definida na projeção horizontal da edificação, com a aplicação da expressão recomendada na ABNT NBR 6118:2014.

● A estimativa do carregamento vertical - F_{vk} - a ser considerada é implementada através do procedimento conhecido como da área de influência de cargas ou método do P médio.

$$F_{vk} \simeq B_x B_y p_m (n + \chi) + \beta V_{res} \cdot \gamma_{\text{água}}$$

$$B_x \cdot B_y = 223m^2$$

$$p_m = [11; 15] = 13,6kN/m^2$$

$$\beta V_{res} \cdot \gamma_{\text{água}} = 3 \times 10 \times 10 = 300kN$$

$$\chi = 0,80$$

Onde: $B_x = 23,26m$ e $B_y = 9,63m$ são as dimensões da projeção horizontal da edificação; p_m é o valor para a carga média por metro quadrado da edificação; $\beta V_{res} \cdot \gamma_{\text{água}}$, onde β foi tomado igual a 3, $\gamma_{\text{água}}$ representa o peso específico da água, V_{res} representa o volume correspondente à capacidade de armazenamento do reservatório elevado e χ é uma constante (de 0,80 a 0,95), n é o número de pavimentos.

$$F_{vk} \simeq 223,97 \times 13,6 \times (9 + 0,80) + 300$$

$$F_{vk} \simeq 30110,41kN$$

5.3.1.1 Estimativa do Parâmetro de Instabilidade Global Alfa na direção Y

$$\alpha_y = H \sqrt{\frac{F_{vk}}{E_{cs} I_{SEC_Y}}}$$

$$F_{vk} = N_K = 30110,41 kN$$

$$H = 30m$$

$$F_{ck} = 25 MPa$$

$$\alpha_E = 1,0$$

$$\alpha_i = 0,86$$

$$a_{cc} = 0,0005696m$$

$$E_{cs} = 0,86 \times 5600 \sqrt{25} \approx 24000000 kN/m^2$$

$$I_{p\acute{o}rtico} = \frac{PH^3}{3E_{cs} a_{cc}} = \frac{1,0 \times 42,45^3}{3 \times 27000000 \times 0,0006287} = 0,4348 m^4$$

$$I_{SEC_Y} = 4 \times I_{p\acute{o}rtico} = 4 \times 0,4348 = 1,7392 m^4$$

Tabela 5.9 - Deslocamento horizontal no topo e inércia do pilar equivalente

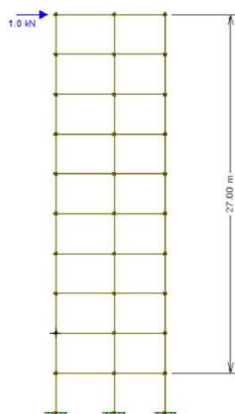
Eixo	acc (dx - m)	Ipórtico (kN/m4)
y	0,0006287	0,434825831

Fonte: Simas e Amaral Leite (2021)

Onde: $I_{p\acute{o}rtico}$ representa a inércia do pilar equivalente ao pórtico e I_{SEC_Y} representa a inércia do Sistema Estrutural de Contraventamento da direção Y, a_{cc} é o deslocamento

horizontal no topo devido a carga concentrada. Assim, tem-se a estimativa do Parâmetro Alfa para a direção Y:.

Figura 5.16 Pórtico do SECy



Fonte: Simas e Amaral Leite (2021)

Assim, tem-se a estimativa do Parâmetro Alfa para a direção Y:

$$\alpha_y = 30 \sqrt{\frac{30110,41}{24000 \times 4 \times 0,4348}} = 0,805 \approx 0,81$$

5.3.2. Avaliação do γ_z a partir do carregamento devido ao vento e do carregamento vertical estimado utilizado na avaliação do α . Com a aplicação da expressão recomendada na ABNT NBR 6118:2014.

- Parâmetros para o cálculo do efeito do vento paralelo à direção Y

$$B_x=23,26\text{m}, B_y=9,63\text{m}, H=30,00\text{m}$$

$$V_0=30\text{m/s}$$

$$S_1=1$$

$$S_3=1$$

Categoria: Cinco

Classe: B

$$b = 0,85, p=0,125, Fr = 0,9$$

$$S_2=b Fr (Z /10)^P$$

$$C_{ay}=1,05$$

$$f_{ay,i} = C_{ay} q_i B_{xi}$$

$$F_{ay,i} = 0,5 \cdot (f_{ay,i} h_i + f_{ay,i-1} h_{i-1})$$

5.3.2.1. Cálculo do Gama-Z da direção Y.

Os valores das grandezas necessárias ao cálculo do Gama-Z foram transcritos diretamente de Fonte: Simas e Amaral Leite (2021)

- Cálculo do $M_{1,tot,d,y}$

$$M_{1,tot,d,y} = 6269,79 \text{ kNm}$$

- Cálculo do $\Delta M_{1,tot,d,y}$

$$\Delta M_{1,tot,d,y} = 965,5 \text{ kNm}$$

Para o cálculo dos deslocamentos horizontais devido ao vento utilizou-se a $CB1 = 1,4F_{vk} + 0,6 \times 1,4 F_{ay}$, de análise de ELU em que o vento é variável secundária.

- Obtenção do Gama-Z da direção Y

$$\gamma_{zy} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{1,tot,d,y}}{M_{1,tot,d,y}}} = \frac{1}{1 - \frac{965,50}{6269,79}} = 1,182 \approx 1,18$$

5.3.3. Avaliação do γ_z a partir do parâmetro α

Neste caso serão utilizadas as funções aproximadoras quadrática e a cúbica.

- As funções aproximadoras quadrática e cúbica

$$\gamma_z = 1,10 - 0,33\alpha + 0,50\alpha^2$$

$$\gamma_z = 0,90 + 0,50\alpha - 0,62\alpha^2 + 0,46\alpha^3$$

Estimativa do Gama-Zy

Sendo $\alpha_y = 0,805 \approx 0,81$, tem-se, para a aproximação quadrática:

$$\gamma_{zy} = 1,10 - 0,33 \times 0,81 + 0,50 \times 0,81^2$$

$$\gamma_{zy} = 1,161 \cong 1,16$$

E, para a aproximação cúbica:

$$\gamma_{zy} = 0,90 + 0,50 \times 0,81 - 0,62 \times 0,81^2 + 0,46 \times 0,81^3$$

$$\gamma_{zy} = 1,143 \cong 1,14$$

5.3.4. Avaliação do γ_z a partir do parâmetro α , do f_{ck} , e do f_{Req} .

- Cálculo do Coeficiente de redução equivalente

Considerando que o SEC_y é composto por quatro pórticos iguais e que da análise de um deles se verifica que o deslocamento horizontal no topo produzido por um carregamento horizontal concentrado de valor unitário ali aplicado e calculado com 0,80 da rigidez flexional dos pilares e 0,40 da rigidez flexional das vigas é igual ao valor obtido para o pórtico com 0,83 da rigidez flexional dos pilares e das vigas, então conclui-se que o $F_{Req} = 0,83$.

- Utilização de ábacos

A utilização dos ábacos não é possível pelo fato de que os valores a serem obtidos estão fora do alcance.

- Utilização das tabelas.

As tabelas 3.2 e 3.9 de Cruz et al (2021) poderão ser utilizadas desde que se considere $\alpha_y = 0,81$ e $F_{Req} = 0,83 \cong 0,80$.

Assim, da p.50-51 na Tab.3.2 (aproximação cúbica) e da p.61-62 na Tab.3.9 (aproximação quadrática), da referência supracitada tem-se respectivamente:

$$\gamma_{zy} = 1,189 \quad (\text{para aproximação cúbica})$$

$$\gamma_{zy} = 1,188 \text{ (para aproximação quadrática)}$$

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados para o Coeficiente Gama-Z são aqui apresentados em forma de tabela. Eles foram obtidos no item anterior, não só, com a aplicação das expressões recomendadas pela ABNT NBR 6118:2014, mas também através das funções polinomiais aproximadoras do terceiro e do segundo graus apresentadas, na ordem, por Carmo (1995) e por Marcio e (1995) e, ainda, através de funções aproximadoras, também, do terceiro e do segundo graus e/ou dos ábacos apresentadas em Cruz et al, 2021.

Tabela 6.1 Valores do Gama-Z obtidos através de diferentes expressões

Gama-Z	NBR 6118:2014		Carmo 3º Grau		Marcio 2º Grau		Cruz et al. 2021			
	γ_{zx}	γ_{zy}	γ_{zx}	γ_{zy}	γ_{zx}	γ_{zy}	3º Grau		2º Grau	
Aplicação 1	1,129	1,117	1,055	1,068	1,062	1,072	1,130	1,113	1,130	1,128
Aplicação 2	-	1,636	-	1,208	-	1,146	-	1,562	-	1,602
Aplicação 3	-	1,182	-	1,143	-	1,161	-	1,189	-	1,188

Fonte: O Autor

Comparando os resultados obtidos para as aplicações implementadas neste TCC observa-se que:

- Os valores do Gama-Z obtidos em função do Parâmetro Alfa através dos polinômios aproximadores do terceiro grau (Carmo) apresentam aproximação ligeiramente mais fraca que os valores do Gama-Z obtidos com os polinômios aproximadores do segundo grau (Marcio);
- Considerando os valores calculados segundo a expressão da ABNT NBR 6118:2014 como os valores de referência, obtém-se os erros entre estes valores e os calculados através do polinômio do segundo grau:
- Considerando os valores calculados segundo a expressão da ABNT NBR 6118:2014 como os valores de referência, obtém-se os erros entre estes valores e os calculados através das tabelas e/ou ábacos constantes de Cruz et al, (2021):
- Os valores do Gama-Z obtidos através das tabelas e/ou ábacos propostos por Cruz et al. (2021) se configuram como uma boa alternativa para a estimativa deste parâmetro global. Esta observação é embasada nos resultados apresentados na Tabela 6.3,

mostrando que para os casos estudados o maior erro verificado é de 4,52 % contra a segurança, na aplicação 2.

Tabela 6.2 Erros em percentual - (Carmo/Márcio)

Aplicações		Gama-Z (NBR)	Gama-Z Carmo/Márcio	Erro %
1	γ_{zx}	1,129	1,055	-6,55
	γ_{zy}	1,117	1,068	-4,39
2	γ_{zy}	1,636	1,146	-29,95
3	γ_{zy}	1,182	1,143	-3,30

Fonte: O Autor

Tabela 6.3 Erros em percentual - (Cruz et al.)

Aplicações		Gama-Z (NBR)	Gama-z (Cruz et al.)		Erro %	
			3 ^o	2 ^o	3 ^o	2 ^o
1	γ_{zx}	1,129	1,13	1,13	+0,09	+0,09
	γ_{zy}	1,117	1,11 3	1,12 8	-0,36	+0,98
2	γ_{zy}	1,636	1,56 2	1,60 2	-4,52	-2,08
3	γ_{zy}	1,182	1,18 9	1,18 8	+0,59	+0,51

Fonte: O Autor

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Trabalho de Conclusão de Curso o autor faz uma revisão do estado da arte relacionado ao tema da estabilidade das estruturas, com ênfase no estudo da Estabilidade Global. Alguns autores são referenciados com suas contribuições. Trabalhos recentes, Maracajá (2020), Paiva (2020) e Araújo (2020) são especialmente citados juntamente com trabalhos mais antigos, como Carmo (1995), dentre outros. De Maracajá (2020) foram utilizadas as equações necessárias para a obtenção de valores corrigidos (atualizados) dos pares Alfa-Gama-Z; de Paiva (2020), as tabelas por ele apresentadas e, de Araújo (2020) foram utilizados os ábacos.

Em “ESTRUTURAS – O γ_z como função do F_{ck} e do F_{Req} (Uma proposta), Cruz et al. (2021), obtiveram mais algumas tabelas e ábacos de modo a poder oferecer ao público alvo uma referência mais completa. Nela foram reunidos e expandidos os resultados dos três trabalhos de 2020 acima citados. Tendo como objetivo principal a apresentação de tabelas e de gráficos (ábacos) para a obtenção do Coeficiente Gama-Z em função do F_{ck} do concreto e do F_{Req} que simula a redução da rigidez flexional da estrutura, quatorze tabelas e quatorze gráficos foram apresentados, duas tabelas e dois ábacos para cada valor do f_{ck} (para $f_{ck} = 20, 25, 30, 35, 40, 45$ e 50MPa). Cada uma destas tabelas apresenta oito colunas (uma para o Parâmetro Alfa e sete para os valores do F_{Req}) e em cada um destes gráficos foram representadas sete curvas, uma coluna e uma curva para cada valor do F_{Req} (para $F_{Req} = 0,80, 0,75, 0,70, 0,65, 0,60, 0,55$ e $0,50$). Nestas tabelas e ábacos o valor do Parâmetro Alfa varia de 0,40 até 0,99 com acréscimos de 0,01.

Três aplicações foram realizadas envolvendo o cálculo de quatro coeficientes Gama-Z. O edifício antes analisado por Da Silva (2020) esquematicamente representado nas Figuras 5.1, 5.2, foi utilizado na primeira aplicação. Para a qual foi estabelecido o SEC da direção Y indicado na Figura 5.3, composto por quatro pórticos iguais entre si (estrutura e carregamento) e o SEC da direção X indicado na Figura 5.4, composto por dois pórticos também iguais entre si (estrutura e carregamento). Já para a segunda aplicação, utilizou-se o edifício analisado em Ferreira, Rodrigues e Peixoto (2022), para o qual foi estabelecido um SECy composto por dois pórticos iguais entre si (estrutura e carregamento), enquanto para terceira aplicação considerou-se o SECy do edifício estudado por Simas e Amaral Leite (2021), também composto por dois pórticos iguais entre si (estrutura e carregamento).

Para a avaliação 1 o SECy foi estimado para o Parâmetro Alfa o valor 0,56 e para o F_{Req} o valor 0,55. Com estes valores e observando o valor do $f_{ck} = 30\text{ MPa}$ obteve-se os valores do

Coeficiente Gama-Z através dos ábacos da Figura 5.6 e da 5.7, respectivamente para aproximação cúbica e quadrática. Sendo, estes valores iguais a: $\gamma_{zy} \equiv 1,13$ e $\gamma_{zy} \equiv 1,128$.

Comparando os valores do γ_{zy} obtidos via gráfico, $\gamma_{zy} \equiv 1,13$ e $\gamma_{zy} \equiv 1,128$, e via expressão da NBR 6118:2014, $\gamma_{zy} \equiv 1,117$, observa-se que o erro cometido ao adotar o primeiro deles é de 1,16 % e 0,98% ambos a favor da segurança.

Para o SECx foi estimado o Parâmetro Alfa = 0,50 e o $F_{Req} = 0,50$. Com estes valores e observando o valor do $f_{ck} = 30$ MPa, obteve-se o valor do Coeficiente Gama-Z através da Figura 5.6a e da Figura 5.7a. Sendo, ambos os valores iguais a: $\gamma_{zy} \equiv 1,13$.

Comparando os valores do γ_{zy} obtidos via gráfico, $\gamma_{zy} \equiv 1,13$, e via expressão da NBR 6118:2014, $\gamma_{zy} \equiv 1,13$, observa-se que o erro cometido ao adotar o primeiro deles é de 0,00 %. Para as aplicações 2 e 3 os maiores erros seriam relativos aos valores obtidos através da aproximação cúbica com os valores, respectivamente iguais a: 4,62% contra a segurança e 0,59% a favor da segurança.

Embora as aplicações apresentadas envolvam sistemas de contraventamento compostos apenas por pórticos planos, espera-se que as tabelas e as curvas apresentadas em Cruz et al. (2021) sejam aplicáveis também quando da análise de SEC compostos por pilares-parede, por sistemas mistos e principalmente por sistemas de contraventamento obtidos por pórticos espaciais sem a consideração das lajes. Portanto os resultados aqui obtidos carecem de maiores comprovações neste sentido.

O fator tempo foi também o responsável pela limitação do estudo para outros Sistemas Estruturais de Contraventamento e para valores diferentes do f_{ck} . Posto que apenas duas estruturas com $f_{ck} = 30$ MPa e uma com $f_{ck} = 25$ MPa foram considerados, sendo todos do grupo dos concretos classe I.

Considera-se importante ressaltar, ainda, que a análise do SECy foi levada adiante mesmo sendo cada um dos seus quatro pórticos integrantes, assimétricos. Fato que por si só impossibilita a avaliação do Parâmetro de instabilidade Global Alfa, de acordo com a ABNT NBR 6118: 2014, subitem 15.5.2.

Por fim, sobre as curvas (e as Tabelas) representativas das correlações cúbicas, com relação às edificações analisadas neste TCC, é possível afirmar que os resultados foram muito

próximos aos valores obtidos para o Coeficiente Gama-Z calculados conforme NBR 6118:2014.

Assim, a utilização dos gráficos formulados para a obtenção do Gama-Z a partir do Alfa, do fator de redução equivalente da rigidez EI e do F_{ck} do concreto utilizado, parece fornecer resultados com boa precisão e praticidade, pois os resultados aqui obtidos, quando não idênticos aos obtidos por norma, apresentaram erros muito pequenos, contra ou a favor da segurança.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.

_____. **NBR 6118: Projeto de Estrutura de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6118: Projeto de Estrutura de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

CARMO, R. M. S, **EFEITOS DE SEGUNDA ORDEM EM EDIFÍCIOS DE CONCRETO ARMADO**. Dissertação Mestrado. EESC, USP, 1995, 112p.

Comitê Euro-Internacional du Béton. **Code Modele CEB-FIP** pour les structures em betón. CEB Bulletin d'Information n° 124/125. Paris, 1978;

CRUZ, JMF; Ferreira, E.T; LUCENA, C.A.T. **Estruturas: a estabilidade global dos edifícios altos**. João Pessoa: Leia Livros, 2019. Livro digital, 261 p.

FUSCO, P. B. **Estruturas de Concreto. Solicitações Normais**. 1.ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1981.

FRANCO, M; VASCONCELOS, A. C. I. - **Practical assessment of second order effects in tall buildings**. In: COLLOQUIUM ON THE CEB-FIP MC90, Rio de Janeiro. Proceedings. p.307-324; 1981.

FREITAS, F. C.; LUCHI, L. A. R.; FERREIRA, W. G. **Análise da estabilidade global das estruturas e ações de controle dos seus efeitos**. In: Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, Recife, Vol. 9. N° 2, 2016.

JÚNIOR, A. da S. S. et al, Artigo **O Parâmetro de Instabilidade Global α : Origem, Evolução e Tendências**. Revista, INTERSCIENTIA, Vol.4, número 1º, ano 2016.

LEAL, M. A. S.. **Verificação da utilização do Coeficiente B₂ para a avaliação dos efeitos da não linearidade geométrica de estruturas em concreto armado**. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2016.

MARACAJÁ, A. L. C. **SOBRE OS PARÂMETROS DE INSTABILIDADE GLOBAL E AS RELAÇÕES ENTRE O ALFA E O GAMA-Z**. 79 pág. TCC; UFPB. João Pessoa, 2020.

OLIVEIRA, D. M. de; SILVA, N. A. **PARÂMETROS DE INSTABILIDADE GLOBAL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO SEGUNDO A NOVA NB-1**.

In: Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural. UNB. Brasília, 27 a 31 de maio de 2002.

PAIVA, W da S. de; **TABELAS PARA O CALCULO DO COEFICIENTE GAMA-Z A PARTIR DO FCK DO F_{Req} E DO PARAMETRO ALFA.** 88 pag. TCC ENGENHARIA CIVIL – UFPB, João Pessoa, 2020;

PEREIRA, C. A. da C; RODRIGUES, H. F de L; PEIXOTO, M. T; Projeto II – Cálculo do Parâmetro Alfa e do Coeficiente Gama-Z da estrutura de uma edificio; Curso de Engenharia Civil da UFPB; João Pessoa-PB, 2022;

SILVA, A. F. da; **ÁBACOS PARA O CÁLCULO DO COEFICIENTE γ_z A PARTIR DO fck, Do F_{Req} . E DO PARÂMETRO α .** 57 pág. TCC Engenharia Civil – UFPB, João Pessoa. 2020;

SIMAS, M. O; AMARAL LEITE,N. M., Projeto II – Cálculo do Parâmetro Alfa e do Coeficiente Gama-Z da estrutura de uma edificio; Curso de Engenharia Civil da UFPB; 50p; João Pessoa-PB, 2021;

ZUMAETA MONCAYO; W. J., **Análise de segunda ordem global em edifícios com estrutura de concreto armado.** (Dissertação Metrado), Escola de Engenharia de São Carlos da USP. 2011. 212p.