

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TIPO DE AGREGADO GRAÚDO NA ESTABILIDADE GLOBAL DE EDIFÍCIOS DE CONCRETO ARMADO

Analysis of the influence of the type of coarse aggregate on the global stability of reinforced concrete buildings

NATÁLIA BACON MENEGUIN (natbmeneguim@gmail.com)

DIONÍSIO PALHARINI JUNIOR (dionisio.junior@faculdedefacec.edu.br)

1. Acadêmica do curso de graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Administração e Ciências Econômicas – FACEC -Rod PR-082, KM 468 - Lote 45/46 - Gleba, R. Ribeira, Cianorte - PR, 87200-000.

2. Professor Orientador.

Recebido em 12/12/2022. Publicado em 02/02/2023.

RESUMO

Na análise estrutural de edifícios de concreto armado de múltiplos pavimentos, a ação do vento e a estabilidade global são verificações para a segurança das estruturas. Em edifícios médios a altos ocorrem maiores deslocabilidades provenientes das cargas horizontais, por vezes tornando necessária análises de segunda ordem. Existem parâmetros para estas análises, como a rigidez dos elementos estruturais, que é composta parcialmente pelo módulo de elasticidade do concreto. A ABNT NBR 6118:2014, implementou um coeficiente α_e para o cálculo do módulo de elasticidade que é diretamente relacionado ao tipo de agregado graúdo utilizado na mistura. A pesquisa visa analisar a influência do agregado graúdo na estabilidade global dos edifícios, para avaliação da consideração ou não dos efeitos de segunda ordem. Foram comparadas onze edificações de concreto armado com mesma planta e ação do vento, variando-se os agregados graúdos e número de pavimentos. Com 10 pavimentos houve necessidade dos efeitos de 2º ordem nos cálculos para o arenito. Para edifícios de 11 a 14 pavimentos, a consideração dos efeitos de 2º ordem foi crescente para a maioria dos agregados, devido à altura dos edifícios. Notou-se que a escolha do agregado graúdo para o concreto armado permite que as estruturas sejam mais rígidas.

PALAVRAS-CHAVE: estabilidade global; agregado graúdo; módulo de elasticidade; efeitos de 2ª ordem.

ABSTRACT

In the structural analysis of multi-story reinforced concrete buildings, wind action and global stability are checks for the safety of the structures. In medium to high-rise buildings, greater displacements occur from horizontal loads, sometimes making second-order analysis necessary. There are parameters for these analyses, such as the stiffness of the structural elements,

which is partially composed by the modulus of elasticity of the concrete. ABNT NBR 6118:2014, implemented a coefficient α_e to calculate the modulus of elasticity that is directly related to the type of coarse aggregate used in the mixture. The research aims to analyze the influence of the coarse aggregate on the global stability of buildings, to assess whether or not to consider second-order effects. Eleven reinforced concrete buildings with the same plan and wind action were compared, varying the coarse aggregates and number of floors. With 10 floors, there was a need for 2nd order effects in the calculations for sandstone. For buildings with 11 to 14 floors, the consideration of 2nd order effects was increasing for most aggregates, due to the height of the buildings. It was noted that the choice of coarse aggregate for reinforced concrete allows the structures to be more rigid.

KEYWORD: global stability; coarse aggregate; modulus of elasticity; 2nd order effects

1 INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica no campo da engenharia civil possibilita que construções de edifícios cada vez mais esbeltos e de alta complexidade sejam construídos com maior frequência. Devido a este crescimento, a análise estrutural desempenha papel fundamental para o bom funcionamento da edificação, tanto em termos de segurança quanto de economia. Sobre análise estrutural, dois pontos são de suma importância, principalmente em edifícios altos submetidos a ação do vento, que são a verificação da estabilidade global e a necessidade de consideração dos efeitos de 2ª ordem.

Observando essa necessidade de análises mais precisas da engenharia estrutural em relação à estabilidade global de edificações, os projetistas devem se atentar aos efeitos de 2ª ordem, que podem ser menores ou maiores a depender da rigidez dos elementos da estrutura, rigidez esta que é diretamente

relacionada ao módulo de elasticidade do material adotado.

A antiga versão da norma brasileira de estruturas de concreto, ABNT NBR 6118:2007, prescrevia a mesma expressão de cálculo para o módulo de elasticidade do concreto independente do agregado graúdo adotado. Entretanto, a revisão promovida pela ABNT NBR 6118:2014 alterou a forma de cálculo do módulo de elasticidade, com a adição de um coeficiente α_e , este que varia de acordo com o agregado graúdo adotado para a composição do concreto. Devido a esta mudança na forma de cálculo, subentende-se que a variação no módulo de elasticidade tem a capacidade de interferir também na estabilidade global dos edifícios.

Para iniciar o projeto estrutural, é feita a análise de 1ª ordem, onde a estrutura é considerada em seu estado inicial (indeformado) e neste momento são obtidos os deslocamentos verticais e horizontais, devidos a ação do vento, por exemplo. Todavia, a depender da deformada obtida na análise de 1ª ordem, surgem esforços adicionais, que devido a magnitude que se apresentam são significativos no comportamento da estrutura, sendo por vezes considerados na análise estrutural, sendo esta verificação conhecida como análise de 2ª ordem.

Por meio da ABNT NBR 6118:2014, é possível classificar a estrutura de acordo com seus deslocamentos, sendo essa classificação dividida em dois tipos: estruturas de nós fixos, onde os efeitos de 2ª ordem podem ser desprezados por possuírem valores pequenos de deslocamentos, e estruturas de nós móveis, quando a estrutura apresenta valores significativos de deslocamentos horizontais, sendo necessária a análise de 2ª ordem. A ABNT NBR 6118:2014, fornece dois parâmetros que verificam a dispensa ou não dos efeitos de 2ª ordem, que são o parâmetro α e o coeficiente γ_z , sendo o último o foco deste projeto de pesquisa, visto que comparado ao primeiro, ele fornece estimativas dos efeitos globais de 2º ordem e majora os efeitos globais de 1º ordem para a obtenção dos esforços finais da estrutura, e em contrapartida, o parâmetro α apenas relata sobre a sensibilidade da estrutura sob ação dos efeitos de 2º ordem, o que não contribui de forma efetiva no dimensionamento do projeto estrutural.

Através destes fatores, a pesquisa visa analisar se a estabilidade global de edifícios é influenciada conforme o tipo de agregado graúdo utilizado no concreto armado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A revisão de literatura da presente pesquisa está dividida em 4 seções. A primeira seção explica sobre os tipos de agregado graúdo, sua composição e classificação de acordo com sua natureza. Na segunda seção, fica explícito sobre a comparação de cálculo do módulo de elasticidade, em relação a ABNT NBR 6118:2007 e a ABNT NBR 6118:2014, evidenciando a diferença na nova forma de cálculo. Em seguida, na terceira seção fala-se sobre os efeitos globais de 2º ordem, seguidos por sua classificação e importância para a análise estrutural dos edifícios. Para concluir, a

quarta seção demonstra como a ação do vento pode influenciar na estabilidade global dos edifícios, e como esse fator é calculado.

Os agregados do concreto armado para Amorim (2010), são materiais granulares, que não apresentam forma e nem volume estabelecido. Entretanto, apresentam propriedades e dimensões favoráveis para a construção civil, sendo utilizados na produção de concretos e argamassas de cimento Portland.

No início dos estudos sobre concreto, acreditava-se que os agregados apenas eram considerados materiais para enchimento na composição do concreto, onde sua função era otimizar a fabricação, visto que eram tidos como inertes. Com o passar do tempo, percebeu-se a importância de aprofundar os estudos sobre esse material, já que as propriedades existentes no concreto provêm dos agregados, como a porosidade, granulometria, absorção d'água, estabilidade, forma e textura dos grãos, resistência mecânica e módulo de deformação (AMORIM,2010).

Os agregados podem ser de origem natural, britados, artificiais, industrializados e reciclados (AMORIM, 2010).

- Natural: são aqueles já existentes na natureza em forma pronta para utilização, como os agregados miúdos (areia).
- Britados/Artificiais: são aqueles encontrados por meio de britamento de rochas, como os agregados graúdos (pedrisco, pedra britada usada na composição do concreto armado).
- Industrializados: aqueles que provêm de processos industriais. Recebe este nome devido ao modo que são obtidos e não ao material em si. São agregados deste tipo: argila expandida e escória britada.
- Reciclados: agregados formados através de produção industrial e tecnológica, em laboratórios de pesquisas de universidades, utilizando materiais já existentes com a adição de outros materiais de forma a melhorar a qualidade e propriedades do agregado escolhido, como por exemplo: os agregados criados a partir de resíduos da construção civil como vidro e fibra de vidro.

A figura 1 exemplifica o tipo de cada rocha e seus modelos:



Figura 1 – Agregado graúdo
Fonte: MATTIA,2017.

2.1 Comparação de cálculo do módulo de elasticidade segundo a ABNT NBR 6118:2007 e ABNT NBR 6118:2014

De acordo com a ABNT NBR 6118:2007 o módulo de elasticidade (E_{ci}) pode ser encontrado por meio do método de ensaio especificado pela ABNT NBR 8522, onde nesta norma o módulo de deformação tangente inicial, é obtido aos 28 dias de idade. Quando não forem feitos ensaios e não existirem dados mais precisos sobre o concreto usado na idade de 28 dias, pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade usando a equação 1:

$$E_{ci} = 5600 \times f_{ck}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

onde:

E_{ci} = módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto, referindo-se sempre ao módulo cordal (MPa);

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto (MPa).

O módulo de elasticidade numa idade $j \geq 7$ dias pode também ser avaliado através dessa equação substituindo-se f_{ck} por f_{ckj} .

A ABNT NBR 6118:2014, estabelece que o módulo de elasticidade (E_{ci}) deve ser obtido por meio do método de ensaio determinado na ABNT NBR 8522:2021, onde é considerado nesta norma o módulo de deformação tangente inicial, extraído aos 28 dias de idade. A ABNT NBR 6118:2014 permite que quando não são feitos ensaios, é possível estimar o valor do módulo de elasticidade inicial (E_{ci}) através das equações 2 e 3;

$$E_{ci} = \alpha_e \times 5600 \times \sqrt{f_{ck}} \quad (2)$$

para f_{ck} de 20 MPA a 50 MPA

$$E_{ci} = 21,5 \times 10^3 \times \alpha_e \times \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25\right)^{1,25} \quad (3)$$

para f_{ck} acima de 55 MPA

sendo:

$\alpha_e = 1,2$ para basalto e diabásio

$\alpha_e = 1,0$ para granito e gnaisse

$\alpha_e = 0,9$ para calcário

$\alpha_e = 0,7$ para arenito

onde:

E_{ci} = módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto, referindo-se sempre ao módulo cordal (MPa)

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto (MPa).

A ABNT NBR 6118:2014, trata que para a verificação do estado comportamental de um elemento estrutural ou seção transversal, pode ser adotado o módulo de elasticidade único, à tração e a compressão, sendo igual ao módulo de deformação secante E_{cs} . Portanto, para projetos estruturais a princípio deve ser considerado o módulo de elasticidade secante.

O módulo de deformação secante pode ser obtido segundo método de ensaio estabelecido na ABNT NBR 8522, ou estipulado pela equação 4;

$$E_{cs} = \alpha_i \times E_{ci} \quad (4)$$

sendo:

$$\alpha_i = 0,80 + 0,20 \times \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,10$$

onde:

E_{ci} = módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto, referindo-se sempre ao módulo cordal (MPa);

E_{cs} = módulo de elasticidade secante (MPa);

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto (MPa).

De acordo com os métodos de cálculo apresentados, percebe-se a diferença nos cálculos da ABNT NBR 6118:2007 e da ABNT NBR 6118:2014. Na versão anterior o módulo de elasticidade era calculado de apenas uma forma, independentemente do tipo de concreto e composição do mesmo. Já pela norma vigente existe um coeficiente α_e que varia de acordo com o tipo de agregado graúdo empregado. Tal modificação pode acarretar em resultados diferentes para as estruturas que são dimensionadas após 2014.

Surge, portanto, o questionamento de como essa alteração no cálculo pode influenciar nas relações entre os deslocamentos da estrutura, visto que, para o cálculo atual, é usado um coeficiente para cada tipo de agregado graúdo utilizado. A alteração no método de cálculo pode tornar o módulo de elasticidade maior ou menor a depender do agregado utilizado, resultando em estruturas mais ou menos rígidas como um todo.

2.2 Efeitos Globais de 2º Ordem

Para iniciar o dimensionamento do projeto estrutural é feita a análise de 1ª ordem, onde através dela são obtidos os deslocamentos horizontais dos nós. Entretanto, em alguns casos, quando os deslocamentos horizontais apresentam valores consideráveis, esta análise de 1ª ordem não captura de forma adequada o comportamento da estrutura. Devido a este fator, torna-se necessário verificar os efeitos de 2ª Ordem fazendo, portanto, uma análise de 2ª Ordem.

Para Chinem (2010) vale ressaltar que nesta análise de 2ª ordem, os deslocamentos gerados influenciam diretamente nos esforços solicitantes, isso quer dizer que se o valor dos deslocamentos for significativo, ainda maiores serão os efeitos de 2ª ordem. Diante a isso, é de extrema importância que a rigidez admitida em todos os elementos seja adequada, visto que implica na consideração ou não de esforços adicionais na estrutura.

A análise estrutural utilizando os efeitos de 2ª ordem deve garantir que em condições mais desfavoráveis de cálculo, não aconteça perda de estabilidade da estrutura, e que seja mantida as resistências de cálculo. (ABNT NBR 6118:2014).

Nesta análise, os valores que são encontrados nos

cálculos são somados aos valores da análise de 1ª ordem, (onde a estrutura é dita como equilibrada na sua condição geométrica inicial), e então são encontrados os esforços finais de cálculo da estrutura.

2.2.1 Classificação das estruturas

As estruturas são classificadas de duas formas, de nós fixos (quando os efeitos de 2º ordem são desconsiderados) e de nós móveis (quando os efeitos de 2º ordem apresentam valores significativos) de acordo com a ABNT NBR 6118:2014, sendo:

As estruturas são consideradas, para efeito de cálculo, de nós fixos, quando os deslocamentos horizontais dos nós são pequenos e, por decorrência, os efeitos globais de 2ª ordem são desprezíveis (inferiores a 10 % dos respectivos esforços de 1ª ordem). Nessas estruturas, basta considerar os efeitos locais e localizados de 2ª ordem.

As estruturas de nós móveis são aquelas onde os deslocamentos horizontais não são pequenos em decorrência, os efeitos globais de 2ª ordem são importantes (superiores a 10 % dos respectivos esforços de 1ª ordem). Nessas estruturas devem ser considerados tanto os esforços de 2ª ordem globais como os locais e localizados.

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, é possível desconsiderar os efeitos de 2ª ordem através de processos aproximados, que são pelo parâmetro de instabilidade α , que examina a sensibilidade da estrutura aos efeitos de 2º ordem e pelo coeficiente γz , que majora os esforços globais de 1º ordem provenientes dos carregamentos horizontais para que sejam obtidos os esforços finais de 2º ordem. Neste trabalho, será verificado apenas o coeficiente γz .

Wordell (2003) relata que a principal vantagem do coeficiente γz comparado ao parâmetro α é que o γz fornece uma estimativa dos valores que foram acrescidos dos esforços de 2ª ordem, enquanto o parâmetro α apenas indica se há ou não necessidade da verificação dos efeitos de 2º ordem.

A ABNT NBR 6118:2014 retrata que o coeficiente γz pode ser utilizado como verificação da ação dos efeitos de 2ª ordem globais de estruturas que tenham a partir de 4 pavimentos. Para cada caso de carregamento, o γz é calculado conforme prescrição do item 15.5.3, pela equação 5;

$$\gamma z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (5)$$

onde:

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

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

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, há uma forma aproximada para a definição dos esforços globais de 2ª

ordem, onde é avaliado os esforços finais (1º ordem + 2ª ordem) por meio da majoração adicional dos esforços horizontais da combinação de carregamento, sendo feita pelo fator majorador $0,95 \times \gamma z$.

Sendo esta equação válida para $\gamma z \leq 1,30$. Caso $\gamma z \leq 1,10$ a estrutura pode ser considerada de nós fixos e torna-se dispensável a avaliação dos efeitos de 2ª ordem.

2.3 Influência do vento na estabilidade global.

Silva (2015) afirma que o vento pode ser desconsiderado no cálculo de edificações de pequeno porte, porém em edifícios altos ele é fundamental na análise da estabilidade global as estruturas, visto que devido à altura, podem ocorrer maiores instabilidades por conta das forças horizontais oriundas das rajadas de vento.

A incidência do vento nas estruturas depende também de fatores climáticos e características topográficas da região, podendo atingir as estruturas com forças diferentes. Faz-se necessário, portanto, aprofundar os estudos sobre como as intensidades das rajadas de vento influenciam na estabilidade global de edifícios feitos de concreto armado (SILVA,2015).

A ABNT NBR 6123:1988, apresenta o cálculo da pressão dinâmica do vento a partir da equação 6;

$$V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3 \quad (6)$$

onde:

V_0 = velocidade básica

S_1 = fator topográfico, que considera as variações do relevo do terreno;

S_2 = fator de rugosidade e dimensões da edificação, que leva em conta o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno, e também as dimensões da edificação ou a parte que está sendo considerada, sendo classificada em 5 categorias de acordo com o relevo;

S_3 = fator estatístico, que considera o grau de segurança exigido e a vida útil da edificação.

a) V_0 , velocidade básica do vento:

Medida por uma rajada de $3s$, que ocorre em média uma vez a cada 50 anos e a 10m acima do terreno, em campo aberto e plano. É determinado pelo mapa das isopletas que está localizado no item 5 da ABNT NBR 6123:1988.

b) S_1 , fator topográfico:

Segundo a ABNT NBR 6123:1988 este fator leva em consideração as variações do relevo do terreno, sendo determinado da seguinte forma:

- Para terrenos planos ou pouco acidentados ($S_1 = 1,00$);
- Morros e taludes – Figura 2 (ABNT NBR 6123:1988);
- Para vales profundos, protegidos de vento de qualquer direção ($S_1 = 0,90$);

Os valores podem ser obtidos no item 5 da ABNT NBR 6123:1988, na figura 2 (Fator Topográfico S_1);

c) S_2 , fator de rugosidade do terreno e dimensões da edificação:

Conforme a ABNT NBR 6123:1988, S_2 é um fator que leva em consideração a combinação entre a rugosidade do terreno, variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e as dimensões da edificação.

• Rugosidade do Terreno: a ABNT NBR 6123 (1988) classifica a rugosidade do terreno em cinco categorias:

Categoria I: Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente.

Categoria II: Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas.

Categoria III: Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas.

Categoria IV: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizados.

Categoria V: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados.

• Dimensões da edificação: a ABNT NBR 6123:1988 separa a edificação e suas partes em classes:

Classe A: Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m.

Classe B: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m.

Classe C: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m. Após determinar a categoria do terreno e a classe da edificação, os valores de podem ser obtidos através da Tabela 1 no item 5 da ABNT NBR 6123:1988 de acordo com a altura da edificação.

Há outra forma de calcular o fator S_2 , em uma altura z acima do nível geral do terreno, conforme a ABNT NBR 6123:1988, através da equação 7;

$$S_2 = b \times F_r \times \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (7)$$

onde:

F_r = fator de rajada, sendo correspondente à categoria II.

Os parâmetros que determinam o fator S_2 , segundo a ABNT NBR 6123:1988 para as categorias citadas acima, são mostrados na Tabela 2 do item 5 da mesma normativa.

d) S_3 , fator estatístico:

Conforme a ABNT NBR 6123:1988 o fator é

baseado em conceitos estatísticos e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. Esse valor de é determinado pela Tabela 3 pertencente ao item 5 da ABNT NBR 6123:1988.

e) Pressão dinâmica do vento:

A pressão dinâmica do vento $q_{\text{vento}} \left(\frac{N}{m^2}\right)$ diz sobre a velocidade característica $V_k \left(\frac{m}{s}\right)$, esta que é a velocidade utilizada em projeto, para condições normais de temperatura (15°C) e pressão (1 atm = 1013,2 mbar = 10132 Pa), sendo determinada por meio do teorema de Bernoulli, na equação 8;

$$q_{\text{vento}} = 0,613 \times V_k^2 \left(\frac{N}{m^2}\right) \quad (8)$$

onde:

q_{vento} = pressão dinâmica do vento (KN/m²);

V_k = velocidade característica (m/s²);

f) Força de arrasto:

Para a ABNT NBR 6123:1988, a força global do vento sobre uma edificação ou parte dela é a soma vetorial das forças do vento que estejam atuando sobre ela. A componente da força global é (F_g), e sua componente na direção do vento é chamada de força de arrasto (F_a), calculada pela equação 9:

$$F_a = C_a \times q_{\text{vento}} \times A_e \quad (9)$$

onde:

F_a = força de arrasto (KN);

C_a = coeficiente de arrasto;

q_{vento} = pressão dinâmica do vento (KN/m²);

A_e = área efetiva (m²)

g) Coeficiente de arrasto

Conforme a ABNT NBR 6123:1988, o coeficiente de arrasto é usado na verificação da força global da estrutura, sendo determinado com base no item 6.3 da norma, onde seu valor depende da forma da edificação. Ele é definido por meio das relações h/l_1 e l_1/l_2 (válido para edificações retangulares), onde h é a altura da edificação acima do terreno, medida até o topo da platibanda ou nível do beiral, l_1 é a largura da edificação (dimensão perpendicular à direção do vento) e l_2 é a profundidade da edificação (dimensão na direção do vento). De acordo com o item 6.3.1 da ABNT NBR 6123:1988, quando o vento incide de forma perpendicular a cada uma das fachadas de uma edificação retangular em planta e assente no terreno, deve ser usado o gráfico apresentado na norma, para a determinação do coeficiente de arrasto. No caso de vento de alta turbulência, usar o gráfico da Figura 4 do item 6.3 da ABNT NBR 6123:1988.

Chinem (2010) afirma que a intensidade das cargas horizontais que são aplicadas na estrutura, não possuem

influência em sua estabilidade global. Onde exemplifica que se a velocidade do vento aumentar de 38 m/s para 40 m/s na mesma estrutura, o valor do coeficiente y_z se manterá.

O vento atuante nos edifícios deste estudo estava a 90°, sendo aplicado nos 4 lados do edifício, ou seja, nos 4 casos, +x,-x, +y e -y.

2.4 Software Eberick

No Eberick, a estabilidade global da estrutura pode ser determinada de diversas formas, a depender da informação que o projetista deseja obter. Sendo a avaliação da estabilidade global da estrutura pode ser avaliada de maneiras diversas, a depender do tipo de informação que o usuário deseja obter. (LONGO, 2022). Poder avaliar a estrutura de forma diferentes é vantagem para o projetista pois ele consegue filtrar os resultados que lhe são convenientes, tendo uma análise mais específica.

A escolha do modelo de análise da estrutura é um fator importante que influencia na análise da estabilidade global da edificação. Um dos principais impactos da escolha do modelo. O Eberick dispõe de dois modelos, o modelo de grelha mais pórtico e o modelo integrado. No modelo de grelha separado do pórtico espacial, a estabilidade global da estrutura é analisada somente com o pórtico formado pelas vigas e pilares da estrutura, ao mesmo tempo que no modelo integrado a estabilidade global é verificada considerando as lajes no modelo. Este último modelo de consideração proporciona mais rigidez a estrutura em análise, e com isso, altera os resultados dos parâmetros de estabilidade global. (FRANCESCHI, 2022).

Nesta pesquisa foi utilizado o modelo de grelhas mais pórticos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa de cunho teórico e de natureza descritiva, trata-se de uma pesquisa que foi dividida em duas etapas: a pesquisa bibliográfica e a análise da pesquisa exploratória.

A pesquisa bibliográfica para Gil (2010) é desenvolvida a partir de material já elaborado, formado em sua maioria por livros e artigos científicos. Mesmo que em quase todos os estudos seja exigido algum tipo de trabalho desta natureza, há pesquisas desenvolvidas puramente com base em fontes bibliográficas.

Neste trabalho foi necessário fazer uma revisão bibliográfica de artigos e monografias sobre os tipos de agregados graúdos, módulo de elasticidade, efeitos de 2ª ordem, e ação do vento nas edificações para embasamento do referencial teórico.

As pesquisas exploratórias têm o intuito de explicar ideias e conceitos acerca de problemas ou futuras hipóteses para temas que podem ser estudados adiante. Portanto, a pesquisa exploratória neste trabalho tem o intuito de comparar a forma de cálculo do módulo de elasticidade da ABNT NBR 6118:2007 e ABNT NBR 6118:2014, visto que na última versão foi acrescentado

uma variável no cálculo, que recebe o nome de coeficiente α_e .

A pesquisa exploratória também foi feita com o auxílio do software de cálculo e dimensionamento estrutural Eberick da empresa AltoQi. Este software permite fazer o lançamento de projetos estruturais em 2D, onde é possível visualizar os elementos em formas de barras, gerar relatórios com os resultados obtidos pela análise estrutural, bem como os diagramas de esforços solicitantes.

Desse modo, foi analisado com o auxílio do software, a estabilidade global de edifícios de concreto armado de 4 a 14 pavimentos tipo submetidos a ação do vento, sendo alternado o tipo de agregado graúdo do concreto, a fim de verificar a influência dos agregados graúdos nos efeitos de 2ª ordem e consequentemente na estabilidade global dos edifícios.

Para verificar como a estrutura lançada no software se comporta perante aos efeitos de 2º ordem, ela será classificada de nós fixos se o coeficiente $y_z \leq 1,10$, onde para ABNT NBR 6118:2014 os efeitos de 2º ordem podem se desprezados, e caso o $y_z \geq 1,10$, ela será considerada como de nós móveis, sendo necessária a análise dos efeitos de 2º ordem, devido aos deslocamentos significativos que a estrutura tende a apresentar.

Neste estudo foi analisado a estabilidade global da estrutura de 11 edifícios residenciais de plantas com pavimentos tipo, que possuíam elementos com seções e carregamentos iguais. A altura de piso a piso é de 3,00m.

Na figura 02 abaixo, é apresentada a planta baixa dos pavimentos tipo, que tem forma quadrada de 9x9m. Onde os edifícios possuem ambientes iguais, com dimensões entre eixos de vigas de 3 metros, conforme figura 2:

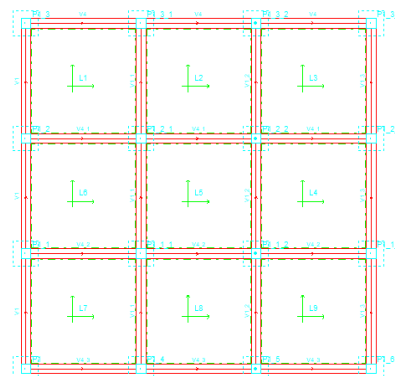


Figura 2 – Planta baixa dos pavimentos tipo dos edifícios
Fonte: elaborado pelo autor

Os edifícios foram projetados adotando-se uma resistência à compressão característica do concreto (F_{ck}) fixada em 25Mpa. Para a avaliação da ação horizontal do vento, foi empregado os seguintes valores estabelecidos pela ABNT NBT 6123:1988:

- Velocidade básica do vento: 42 m/s;
- Categoria: IV;
- Classe: B;
- Fator topográfico: $S1 = 1,0$;
- Fator estatístico: $S3 = 1,0$.

Para lançamento das estruturas, foram adotadas as seguintes dimensões dos elementos:

- Vigas de seção 25x40cm;
- Pilares de seção 25x25cm;
- Lajes maciças com espessura de 15cm e carregamento de 150kgf/m², para dormitórios;
- Cargas permanentes de 154,50 kgf/m²;
- Blocos de fundação rígidos com nível de arrasamento zero.

Para que a estrutura seja processada, ainda foi configurado na aba materiais e durabilidade do software Eberick, os agregados graúdos, que possuem quatro naturezas: basalto/diabásio, granito/gnaiss, calcário e arenito. O Quadro 01 apresenta os valores de módulos de elasticidade inicial (Eci) e o Quadro 02 mostra o módulo de elasticidade secante (Ecs):

Quadro 01: Valores de módulo de elasticidade inicial dos os 4 agregados graúdos, para fck 25Mpa

AGREGADOS GRÁUDOS	FCK (MPA)	ECI (MPA)
Basalto/diabásio	25	33600
Granito/gnaiss	25	28000
Calcário	25	25200
Arenito	25	19600

Fonte: elaborado pelo autor

Quadro 02: Valores de módulo de elasticidade secante dos os 4 agregados graúdos, para fck 25Mpa

AGREGADOS GRÁUDOS	FCK (MPA)	ECS (MPA)
Basalto/diabásio	25	28980
Granito/gnaiss	25	24150
Calcário	25	21735
Arenito	25	16905

Fonte: elaborado pelo autor

Como o módulo de elasticidade do concreto representa a relação entre suas tensões e deformações, isso quer dizer que quanto maior o seu valor, mais rigidez a estrutura apresentará, visto que terá menos deformações ao longo de seu uso.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A estabilidade global do edifício foi verificada por meio da comparação de dois parâmetros: o coeficiente y_z , e os deslocamentos do topo nos eixos x e y (cm), sendo que, pelo edifício possuir planta tipo simétrica, os deslocamentos eram os mesmos. Segundo a ABNT NBR 6118:2014, para que seja válida a avaliação da influência do coeficiente y_z quanto aos esforços de 2º ordem, a estrutura em questão deveria apresentar no mínimo 4 andares. Diante desse quesito, este trabalho iniciou a análise de edifícios a partir de 4 pavimentos e se estendeu até 14 pavimentos, totalizando 11 edifícios analisados.

No Quadro 03 a seguir, serão apresentados os deslocamentos de topo nos eixos x e y em centímetros (os valores de deslocamentos encontrados para os dois eixos foram iguais devido a simetria, com isso há apenas

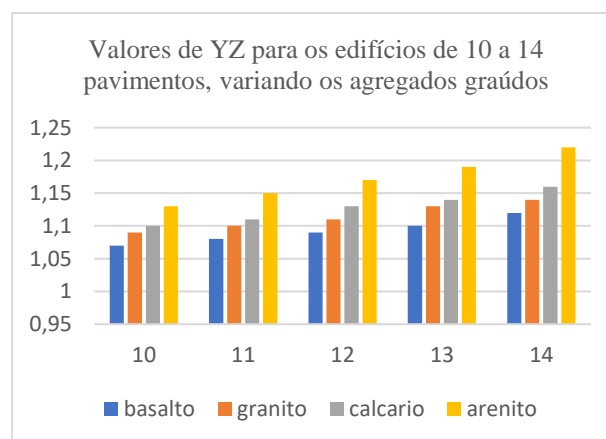
um valor de deslocamento no quadro), e o coeficiente y_z dos 11 edifícios, estes que variam de 4 a 14 pavimentos. Os resultados abaixo foram extraídos do software Eberick:

Quadro 03: Valores de deslocamento de topo e y_z obtidos pelo Eberick, ao variar os agregados graúdos

Nº	BASALTO		GRANITO		CALCÁRIO		ARENITO	
	DESL. (cm)	YZ	DESL. (cm)	YZ	DESL. (cm)	YZ	DESL. (cm)	YZ
4	0,15	1,02	0,18	1,03	0,2	1,03	0,26	1,03
5	0,26	1,03	0,32	1,04	0,35	1,04	0,45	1,05
6	0,41	1,04	0,49	1,05	0,55	1,05	0,7	1,07
7	0,6	1,05	0,72	1,06	0,8	1,06	1,02	1,08
8	0,83	1,05	1,00	1,07	1,11	1,07	1,43	1,10
9	1,11	1,06	1,33	1,08	1,48	1,09	1,9	1,10
10	1,44	1,07	1,73	1,09	1,92	1,10	2,47	1,13
11	1,84	1,08	2,21	1,10	2,45	1,11	3,15	1,15
12	2,31	1,09	2,77	1,11	3,08	1,13	3,95	1,17
13	2,85	1,10	3,42	1,13	3,8	1,14	4,87	1,19
14	3,48	1,12	4,16	1,14	4,62	1,16	5,93	1,22

Fonte: elaborado pelos autores

Gráfico 01: Comparação dos valores de y_z para os edifícios de 10 a 14 pavimentos, com variação dos agregados graúdos: basalto, granito, calcário e arenito.



Fonte: elaborado pelo autor

Como já exposto neste trabalho, a ABNT NBR 6118:2014 preconiza que quando o $y_z \leq 1,10$, os efeitos de 2º ordem da estrutura podem ser desconsiderados nos cálculos e que para $y_z \geq 1,10$ os efeitos de 2º ordem são expressivos e então devem ser considerados nos cálculos da estrutura, sendo necessária uma análise de 2º ordem.

Por meio do Quadro 03 de resultados, consegue-se perceber que até o 7º pavimento, os valores de y_z não atingiram o limite de 1,10, que é estabelecido pela ABNT 6118:2014 para não consideração dos efeitos de 2ª ordem. Já a partir do 8º pavimento, o coeficiente y_z começa apresentar valores de 1,10. Contudo, ainda para o 8º e 9º pavimento, para todos os agregados estudados, a análise dos efeitos de 2º ordem pode ser desprezada, devido a não ultrapassarem do limite estabelecido. Mas uma análise importante dos resultados para esses dois

pavimentos, 8º e 9º, é que para o basalto, granito e calcário, os valores de y_z ficaram distantes de 1,10, e para o arenito o $y_z = 1,10$. Essa diferença ocorre devido aos seus módulos de elasticidade possuírem valores maiores quando comparado ao do arenito, que tem o menor módulo de elasticidade dos agregados aqui apresentados.

O Gráfico 01 resume e compara os resultados do y_z obtidos para o edifício com 10 pavimentos em diante, visto que a análise começou a ficar mais criteriosa, pois para este edifício, os modelos em que foram utilizados basalto, granito e calcário o $y_z \leq 1,10$, contudo para o arenito o $y_z = 1,13$, sendo necessária a análise dos efeitos de 2º ordem neste caso.

Para o edifício com 11 pavimentos, o $y_z = 1,08$ para basalto, $y_z = 1,10$ para granito, $y_z = 1,11$ para calcário e $y_z = 1,15$ para arenito. Com estes valores, verificou-se para o basalto e o granito a análise de 2º ordem poderia ser desprezada. Já para utilização do calcário e arenito deveriam ser considerados os efeitos de 2ª ordem.

Para 12 pavimentos, $y_z = 1,09$ para basalto, $y_z = 1,11$ para granito, $y_z = 1,13$ para calcário e $y_z = 1,17$ para arenito. Verificou-se com os valores obtidos que somente o caso em que foi utilizado o basalto não necessitaria da consideração dos efeitos de 2ª ordem.

Para 13 pavimentos, $y_z = 1,10$ para basalto, $y_z = 1,13$ para granito, $y_z = 1,14$ para calcário e $y_z = 1,19$ para arenito. Neste edifício, pode-se observar que para o basalto o limite já foi atingido, porém não ultrapassado, como aconteceu para os demais agregados.

Por fim para o edifício com 14 pavimentos, o último estudado neste trabalho, o $y_z = 1,12$ para o basalto, $y_z = 1,14$ para granito, $y_z = 1,16$ para calcário e $y_z = 1,22$ para arenito. Mostrando que para qualquer um dos agregados que fosse empregado, necessitariam de análises dos efeitos de 2ª ordem nos cálculos.

Quadro 04: Comparativo em porcentagem dos deslocamentos de topo e y_z , em relação ao basalto

Nº	GRANITO		CALCÁRIO		ARENITO	
	DESL. (cm)	YZ	DESL. (cm)	YZ	DESL. (cm)	YZ
4	20,00%	0,98%	33,33%	0,98%	73,33%	0,98%
5	23,08%	0,97%	34,62%	0,97%	73,08%	1,94%
6	19,51%	0,96%	34,15%	0,96%	70,73%	2,88%
7	20,00%	0,95%	33,33%	0,95%	70,00%	2,86%
8	20,48%	1,90%	33,73%	1,90%	72,29%	4,76%
9	19,82%	1,89%	33,33%	2,83%	71,17%	3,77%
10	20,14%	1,87%	33,33%	2,80%	71,53%	5,61%
11	20,11%	1,85%	33,15%	2,78%	71,20%	6,48%
12	19,91%	1,83%	33,33%	3,67%	71,00%	7,34%
13	20,00%	2,73%	33,33%	3,64%	70,88%	8,18%
14	19,54%	1,79%	32,76%	3,57%	70,40%	8,93%

Fonte: elaborado pelo autor

Os resultados apresentados no Quadro 4 comparam por meio de porcentagem, os deslocamentos de topo nos eixos x e y, e o coeficiente y_z do granito, calcário e arenito, todos em relação aos mesmos parâmetros do basalto. Como a comparação dos resultados é em relação

ao basalto, o mesmo não aparece na tabela, pois seus valores são zerados.

Com essa análise, ficou evidente um padrão de acréscimo dos deslocamentos conforme foram alterados os agregados, visto que para todos os pavimentos, o deslocamento do granito em relação ao basalto aumentava na ordem de 20%, já do calcário em relação ao basalto aumentava na ordem de 32 a 34% e por fim, os deslocamentos do arenito em relação ao basalto aumentavam na faixa de 70 a 73%. Nota-se que essas porcentagens de deslocamentos são repetidas em todos os pavimentos, avaliando o parâmetro do deslocamento de topo, que no eixo x e y possuíam valores iguais devido a simetria do edifício.

5 CONCLUSÃO

Por meio dos resultados obtidos com auxílio do software de dimensionamento e detalhamento de projeto estrutural o Eberick, em que foi verificada a estabilidade global de 11 edifícios com a mesma planta, verificou-se que os deslocamentos de topo e o coeficiente y_z que a estrutura apresentou variaram a depender do tipo de agregado graúdo utilizado indicando que a correta definição deste material é fundamental para a análise da estabilidade global de edifícios.

Com os resultados apresentados, foi possível constatar que para os edifícios em análise, os resultados mais significativos se deram somente a partir do 8º pavimento, onde os resultados para y_z se aproximaram de 1,10 conforme o limite estabelecido pela ABNT NBR 6118:2014, e portanto, até este pavimento, os efeitos de 2º ordem poderiam ser desconsiderados. A partir do edifício de 10 pavimentos em diante, os valores de deslocamentos nos eixos x e y, e o coeficiente y_z sofreram alterações mais decorrentes e conforme os edifícios foram ficando mais altos, mais tornou-se necessária a análise de 2ª Ordem, para a maioria dos agregados graúdos.

Desse modo, foi notório que a estabilidade global de edifícios de concreto armado é influenciada pela escolha do agregado graúdo utilizado no concreto da edificação. E com isso, concluiu-se que, com a mudança do método de cálculo da ABNT NBR 6118:2014 foi assertiva para este estudo, visto que trouxe vantagens para as estruturas de concreto, devido que apenas com o tipo de agregado graúdo escolhido, a estabilidade global teve variações, que por vezes foram vantajosas, pois apresentou valores mais excessivos de módulo de elasticidade, e consequentemente mais rigidez aos edifícios.

Por meio desta alteração de cálculo, o módulo de elasticidade possui valores variáveis, corrigindo situações que poderiam ficar contra a segurança.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por ser minha fonte de força durante toda minha caminhada na graduação e ter me sustentado até aqui.

A minha mãe Vanessa, por sempre estar ao meu lado

em todas as fases da vida, por não medir esforços em custear meus estudos e por reforçar todos os dias que seria uma fase difícil, mas que com determinação eu alcançaria meu sonho de ser Engenheira Civil. Também as minhas irmãs Lívia e Suzana, por terem me apoiado e dado todo incentivo para fazer este curso e por terem me ajudado em todos os momentos.

Ao meu noivo, Guilherme, por sempre estar ao meu lado e nunca ter me deixado desistir, além de me dar todo o apoio, me mostrando o caminho a seguir e por toda compressão em dias difíceis.

Ao meu orientador, Dionísio, por ter abraçado meu tema, e por ter fornecido meios e explicações para que nossa ideia saísse do papel. Com certeza todas as orientações foram de suma importância. Agradecer também a ele por toda paciência em esclarecer minhas dúvidas ao longo do trabalho, o que me permitiu concluir como gostaria.

Aos meus amigos que a faculdade me trouxe, Eduarda, Thales, Vitor, Willian, Anna e Kenzo, que conseguiram transformar dias difíceis e trabalhos intermináveis em fardos mais leves, pela parceria, amizade, companheirismo e grandes risadas.

E a mim, Natália, por ter perseverado em todos as fases do curso, o que tornou possível chegar ao final do meu sonho com muito sucesso. Foram com certeza os 5 anos mais puxados da minha vida, porém hoje o sentimento é de dever cumprido e gratidão pela determinação que tive até aqui.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6123:1988. **Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimentos**, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1988.

ABNT NBR 6118:2007. **Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimentos**, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2007.

ABNT NBR 6118:2014. **Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimentos**, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2014.

ABNT NBR 8522:2021. **Concreto Endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação**, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2021.

AMORIM, Anderson Anacleto de. **Durabilidade das estruturas de concreto armado aparentes**.2010. Monografia de Especialização (Especialização em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

CHINEM, Rodolpho Mendonça. **Avaliação da estabilidade global de edifícios**.2010.Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

FRANCESCHI, Lucas. Efeito da escolha do modelo de análise na estabilidade global da estrutura. **Qi Suporte**, 2022. Disponível em: <<https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/360002182574-Efeito-da-escolha-do-modelo-de->

[an%C3%A9lise-na-estabilidade-global-da-estrutura->](https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/115001006413-Como-avaliar-a-estabilidade-global-da-estrutura->). Acesso em: 29/11/22.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Editora Atlas SA, 2008.

LONGO, Luis Felipe. Como avaliar a estabilidade global da estrutura? **Qi Suporte**, 2022. Disponível em <<https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/115001006413-Como-avaliar-a-estabilidade-global-da-estrutura->>>. Acesso em: 29/11/22.

MATTIA, Vitor Hugo Anselmo de. **Estudo experimental da influência do agregado graúdo de diferentes origens mineralógicas nas propriedades mecânicas do concreto**. UNESC, 2017.

RIEMKE, Rodrigo Mattar. **Estabilidade global em edifícios de concreto armado: análise comparativa entre coeficiente Yz e processo P-Delta**. 2015. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SILVA, Flávio Roberto. **Estudo da influência do vento em edifícios de concreto armado**.2015. Trabalho de Conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2015.

WORDELL, Fernando. **Avaliação da instabilidade global de edifícios altos**. 2003. Tese de Pós-Graduação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.