

Estabilidade global em edifício alto de concreto considerando a modelagem e o posicionamento do núcleo rígido

TATYANNE PACÍFICO DOS SANTOS – PROFESSORA

CENTRO UNIVERSITÁRIO CESMAC

ALINE DA SILVA RAMOS BARBOZA – PROFESSORA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL, UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

RESUMO

É FEITA A ANÁLISE DA ESTABILIDADE GLOBAL E DO DESLOCAMENTO DOS PAVIMENTOS DE EDIFÍCIOS ALTOS DE CONCRETO COM NÚCLEOS RÍGIDOS RETANGULARES, DISCRETIZADOS POR UMA ÚNICA BARRA OU POR MALHA DE ELEMENTOS DE BARRA, POSICIONADOS NA REGIÃO CENTRAL OU NO CENTRO DE MASSA DO PAVIMENTO, OU EM UMA DAS EXTREMIDADES DO EDIFÍCIO. OS RESULTADOS

INDICARAM, POR UM LADO, QUE A DESCENTRALIZAÇÃO DO NÚCLEO RÍGIDO AUMENTA A FLEXIBILIDADE DA ESTRUTURA, OCASIONANDO DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS CONSIDERÁVEIS DOS PAVIMENTOS. POR OUTRO, A ALTERAÇÃO DA MODELAGEM DO NÚCLEO RÍGIDO NÃO TEVE EFEITO SIGNIFICATIVO PARA A ESTRUTURA.

Palavras-chave: análise estrutural, estabilidade global, deslocamento de pavimentos, edifícios altos e núcleo rígido.

I. INTRODUÇÃO

Enquanto o mundo está cheio de estruturas interessantes, grandes e pequenas, antigas e modernas, as que mais atraem o espectador são os modernos edifícios altos. A viabilidade da construção dessas estruturas sempre dependeu dos materiais disponíveis e do desenvolvimento do transporte vertical necessário para mover as pessoas para cima e para baixo nos edifícios. A introdução de elevadores tornou os pavimentos superiores tão atraentes comercialmente quanto os pavimentos inferiores e, como resultado, tornou os edifícios mais altos financeiramente bem-sucedidos (TARANATH, [1]).

É difícil distinguir as características de

um edifício é categorizado como alto. Afinal, a aparência externa de altura é uma questão relativa, depende das características da cidade na qual a edificação está localizada e do ponto de vista do transeunte que a visualiza. Não há consenso sobre o que constitui um edifício alto ou em uma altura específica, número de pavimentos, ou proporção que um edifício tenha para que possa ter essa denominação. Do ponto de vista do projeto estrutural, considera-se um edifício alto quando suas análises e projetos estruturais são, de alguma forma, afetadas pelas cargas laterais, como as forças devidas ao vento, particularmente pelo movimento causado por essas cargas (TARANATH, [1]).

Existem diferentes maneiras de se estruturar os edifícios altos. Dentre

os sistemas mais usuais, citam-se: os pórticos (formados por pilares e vigas), sistemas de núcleos rígidos, pilares-parede, pilares perimetrais (formando um tubo), estruturas mistas (aço e concreto) e os sistemas associados. Cada categoria possui vantagens e desvantagens, devendo ser escolhida aquela que oferecer maior eficiência em termos de segurança e economia para cada caso específico (SANTOS [2]).

Os núcleos rígidos são compostos pela associação de pilares-parede, formando uma seção transversal aberta que pode ser parcialmente fechada por vigas ou lajes. Sua função arquitetônica é, normalmente, a de abrigar caixas de elevadores e escadas. A associação de



pórticos a núcleos torna esse sistema estrutural para edifícios altos bastante eficaz, pois, devido à forma geométrica do núcleo, obtém-se elevada rigidez às ações horizontais (SMITH, COULL [3]).

O sistema estrutural tem a função de transmitir os esforços que atuam na estrutura ao solo, de modo a não comprometer nenhum elemento que o componha. Além das cargas verticais, a estrutura deve suportar as ações horizontais e os deslocamentos impostos. As ações horizontais podem aumentar o efeito das cargas verticais, gerando um acréscimo de tensões devido à imposição do equilíbrio ser realizada na situação deformada. Tal situação é denominada não-linearidade geométrica, da qual ocorrem os efeitos de segunda ordem globais. Conseqüentemente, é importante que o edifício possua um sistema estrutural capaz de limitar os deslocamentos horizontais conferindo rigidez suficiente para reduzir os efeitos globais de segunda ordem (SANTOS [2]).

De acordo com a NBR 6118 [4], os efeitos de segunda ordem são os efeitos somados aos obtidos na análise de primeira ordem (em que a análise do equilíbrio da estrutura é realizada considerando a posição indeformada da estrutura), quando a análise do equilíbrio passa a ser efetuada considerando a configuração deformada.

Para verificar a necessidade ou não de considerar os efeitos de segunda ordem, a NBR 6118 [4] disponibiliza o parâmetro de instabilidade α e o coeficiente γ_z . O parâmetro de instabilidade α classifica a estrutura quanto à deslocabilidade dos seus nós e o coeficiente γ_z estabelece a mobilidade da estrutura e estima os esforços de segunda ordem. Smith e Coull [3] apresentam uma forma mais precisa para analisar a esta-

bilidade do edifício, o processo P-Delta, que realiza uma análise por meio de sucessivas iterações, nas quais buscam-se novas configurações de equilíbrio para a estrutura.

As estruturas mais complexas e esbeltas têm sido concebidas, necessitando de métodos computacionais mais elaborados para a análise e projeto de edifícios. Surge, assim, a necessidade de analisar edifícios altos de concreto com a presença de núcleo rígido, modelando esse elemento por uma única barra (modelo amplamente utilizado em escritórios de cálculo estrutural) e por malha de elementos de barra, verificando a influência do posicionamento e a modelagem do núcleo rígido na análise dos parâmetros de estabilidade global e do deslocamento lateral do edifício.

2. ESTABILIDADE GLOBAL

A estrutura é considerada estável quando a configuração do equilíbrio do arranjo estrutural não é alterada drasticamente na presença das imperfeições geométricas e das ações perturbadoras, isto é, quando a estrutura é capaz de absorver os efeitos de segunda ordem. Esse efeito pode ser desprezado, sempre que não representar o acréscimo superior a 10% nas reações e nas solicitações relevantes na estrutura. Nesses casos, pode-se considerar a análise do equilíbrio na configuração indeformada da estrutura.

Nos edifícios altos, os efeitos de segunda ordem são relevantes, uma vez que, à medida que as estruturas se tornam mais esbeltas e elevadas, maiores serão os efeitos causados pela força do vento e existirão acréscimos de esforços e deslocamentos horizontais. Desta forma, são concei-

tuados os parâmetros de estabilidade global disponibilizados na NBR 6118 [4] e na literatura.

2.1 Coeficiente γ_z

O coeficiente γ_z é utilizado para avaliar a sensibilidade da estrutura de um edifício aos efeitos da não-linearidade geométrica, sendo válido para estruturas reticuladas de no mínimo quatro andares. Pode-se determinar o coeficiente γ_z a partir dos resultados de uma análise linear de primeira ordem, para cada caso de carregamento, adotando-se os valores de rigidez aproximada estabelecidos pela ABNT NBR 6118 [4].

Uma solução para a determinação dos esforços globais de segunda ordem por meio da avaliação dos esforços finais (primeira ordem somados aos de segunda ordem) é a partir da majoração adicional dos esforços horizontais da combinação de carregamento considerada por $0,95 \gamma_z$ porém esse processo só é válido para o γ_z com valores iguais ou inferiores a 1,3 (ABNT NBR 6118 [4]).

2.2 Coeficiente FAV_t

O coeficiente FAV_t (fator de amplificação de esforços horizontais ou de vento) também pode ser considerado um parâmetro para avaliação da estabilidade global. Esse fator de amplificação de esforços é exclusivo do sistema CAD/TQS e é calculado para cada combinação do estado limite último (ELU) definida no edifício com o mesmo equacionamento do γ_z original, porém os deslocamentos horizontais provocados por cargas verticais são considerados (SANTOS [2]). Uma vez que o γ_z considera apenas os deslocamentos causados por casos simples de vento,

o FAVt utiliza a combinação de ações utilizando os carregamentos verticais e horizontais.

2.3 Processo P-Delta

O processo P-Delta determina os esforços resultantes considerando a existência de efeitos de segunda ordem. Processando-se uma combinação com cargas verticais e horizontais, o efeito das forças horizontais provocará um deslocamento no edifício e as cargas verticais provocarão esforços adicionais de segunda ordem. Ao processar a estrutura com esses esforços adicionais, têm-se deslocamentos adicionais, que, por sua vez, causarão novos esforços, e assim sucessivamente, até que o equilíbrio seja obtido. Logo, no processo P-Delta, por ser uma análise não-linear, obtêm-se esforços finais que já consideram os efeitos da não linearidade geométrica, e a avaliação da estabilidade global é realizada pós-análise. Para esta avaliação, existe no sistema CAD/TQS um coeficiente (RM2M1) que representa a intensidade dos esforços de segunda

ordem em relação aos de primeira. Este processo pode ser considerado mais refinado se comparado aos métodos aproximados, γ_2 e FAVt.

3. DESENVOLVIMENTO NUMÉRICO

3.1 Definição do problema

Objetiva-se analisar edifícios altos de concreto com a presença de núcleo rígido, discretizando este elemento por uma única barra e por malha de elementos de barra, verificando a influência do posicionamento e da modelagem do núcleo rígido na análise dos parâmetros de estabilidade global e do deslocamento lateral do edifício. Vale ressaltar que a concepção estrutural é de um modelo hipotético, isto é, não caracteriza uma estrutura concebida, mas uma análise com dimensões usuais em estruturas de concreto armado.

O edifício estudado possui, em planta, dimensões 19,90 m x 9,60 m, composto por 30 pavimentos, com altura de 3 m cada, resultando numa altura total de 90 m, em que o núcleo rígido é posicionado em três locais diferentes do pavimento. Primeiramente, o núcleo é localizado na região central. Em seguida, o centro de cisalhamento do núcleo é localizado no centro de massa do pavimento. Por fim, considera-se o núcleo em uma das extremidades do edifício. Este edifício, que foi concebido para a resistência característica do concreto de 30 MPa, possui as seguintes características:

- ▶ Os pavimentos são compostos por lajes maciças de 12 cm;
- ▶ As vigas têm dimensões de 20 cm x 50 cm;
- ▶ O sistema estrutural é composto por pórticos, compostos por 22 pi-

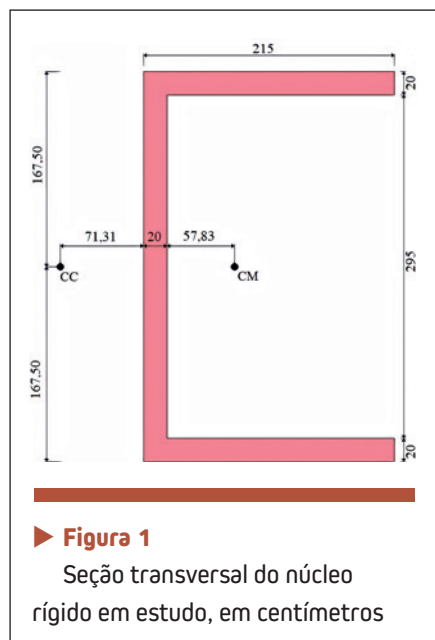
lares retangulares de seção 20 cm x 50 cm e um núcleo rígido de seção mostrada na Figura 1.

O centro de massa (CM) e o centro de cisalhamento (CC) são pontos significativos na análise de edifícios com a presença de núcleo rígido. A posição do CM é importante em relação às forças axiais verticais. Quando uma força é aplicada nesse ponto, ocorrerão apenas translações. No entanto, caso a força seja aplicada fora do CM, pode ocorrer a flexão em torno dos eixos transversais e, possivelmente, o empenamento. O CC é importante em relação às forças transversais, quando a força atua no CC, o núcleo desenvolve apenas empenamento. Entretanto, caso a força atue fora desse ponto, registram-se efeitos importantes de torção e empenamento.

Para o cálculo do CM foram utilizadas as expressões das propriedades geométricas de seções transversais compostas e, para o CC, utilizou-se uma expressão para o cálculo da excentricidade, deduzida em Santos [2].

Na Figura 2 são mostrados os edifícios estudados. Para a nomenclatura dos modelos utilizou-se a letra “R” para designar a forma retangular do edifício em planta, as letras “DB” e “DM” referem-se à discretização utilizada, ou seja, discretizado por uma única barra (DB) e discretizado por malha de elementos de barra (DM). E as letras “C”, “CC” e “E”, referem-se ao posicionamento do núcleo no pavimento, ou seja, núcleo localizado na região central (C), centro de cisalhamento do núcleo localizado no centro de massa do pavimento (CC) e núcleo excêntrico (E) no pavimento.

Em edifícios com plantas duplamente simétricas, ou próximo disso, e com ações horizontais aplicadas



em seus eixos de simetria, o CM da estrutura é coincidente, ou praticamente coincidente, com o seu CC. Devido às restrições funcionais, por exemplo, o arranjo ótimo (duplamente simétrico) não pode ser alcançado em muitos casos práticos. O CM através do qual a carga externa passa e o CC do subsistema de contra-ventamento normalmente não coincidem e, conseqüentemente, o edifício desenvolve a rotação (SANTOS [2]). Dessa forma, modificar a posição do núcleo rígido no pavimento, alterando a sua discretização, torna-se importante para analisar o comportamento estrutural do edifício.

3.2 Premissas da análise estrutural

A análise do edifício foi realizada

utilizando o sistema CAD/TQS em sua versão 20.10. O modelo de cálculo utilizando para a análise é o modelo VI, que considera o edifício como um único pórtico espacial, incluindo as vigas, pilares e lajes (grelhas).

Os pilares são considerados totalmente engastados na fundação e as ligações viga-pilar flexibilizadas, considerando os coeficientes de mola (REDMOL e LEPMOL) definidos como padrão no CAD/TQS. Para a análise dos esforços globais de segunda ordem, a NBR 6118 [4] permite considerar a não-linearidade física de maneira aproximada. Neste trabalho, foi adotada a consideração da redução das rigidezes dos elementos estruturais de acordo com a norma.

As cargas adotadas para a verificação foram: peso próprio (PP), carregamento permanente (PERM) e

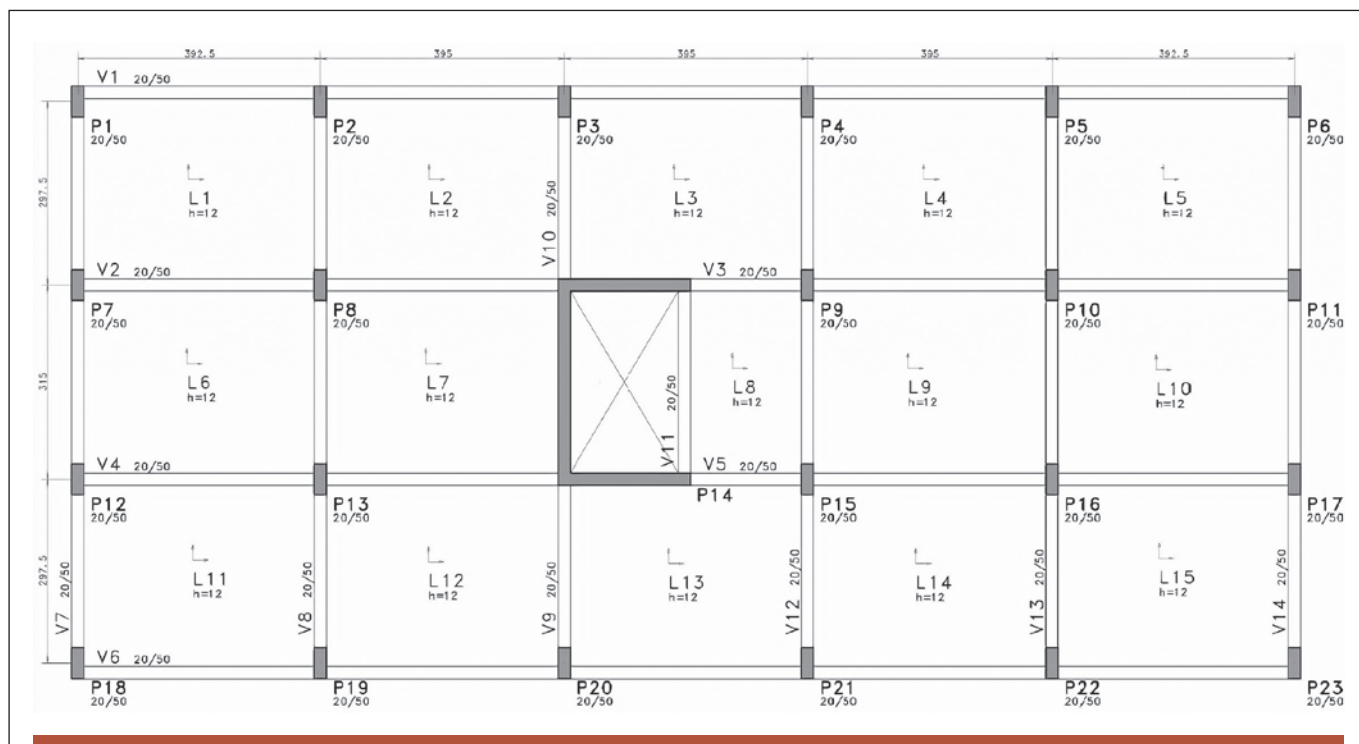
carregamento acidental (ACID), cujas magnitudes são as seguintes:

- ▶ Peso próprio: calculado pelo CAD/TQS;
- ▶ Carregamento permanente (enchimento, revestimento e piso): 1 kN/m²;
- ▶ Carregamento acidental usual para edifícios residenciais: 1,5 kN/m².

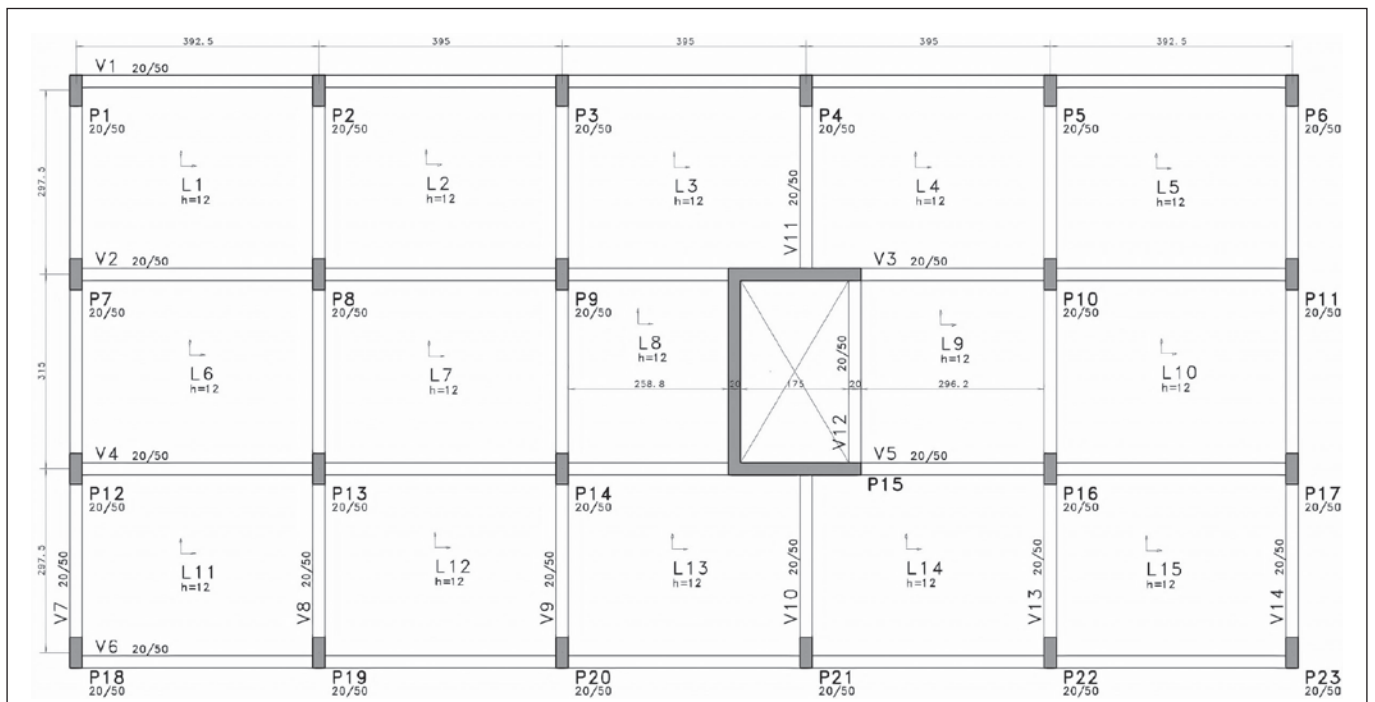
As cargas estáticas referentes aos efeitos de vento foram consideradas seguindo as seguintes direções X, Y, -X e -Y, e seguindo os parâmetros da NBR 6123 [5], a citar:

- ▶ V_0 – Velocidade básica do vento: 30 m/s;
- ▶ S_1 – Fator topográfico: 1,0;
- ▶ S_2 – Categoria de rugosidade: IV;
- ▶ S_2 – Classe da edificação: C;
- ▶ S_3 – Fator estatístico: 1,0;
- ▶ Coeficientes de arrasto: $C_a(x; -x) = 1,15$ e $C_a(y; -y) = 1,52$.

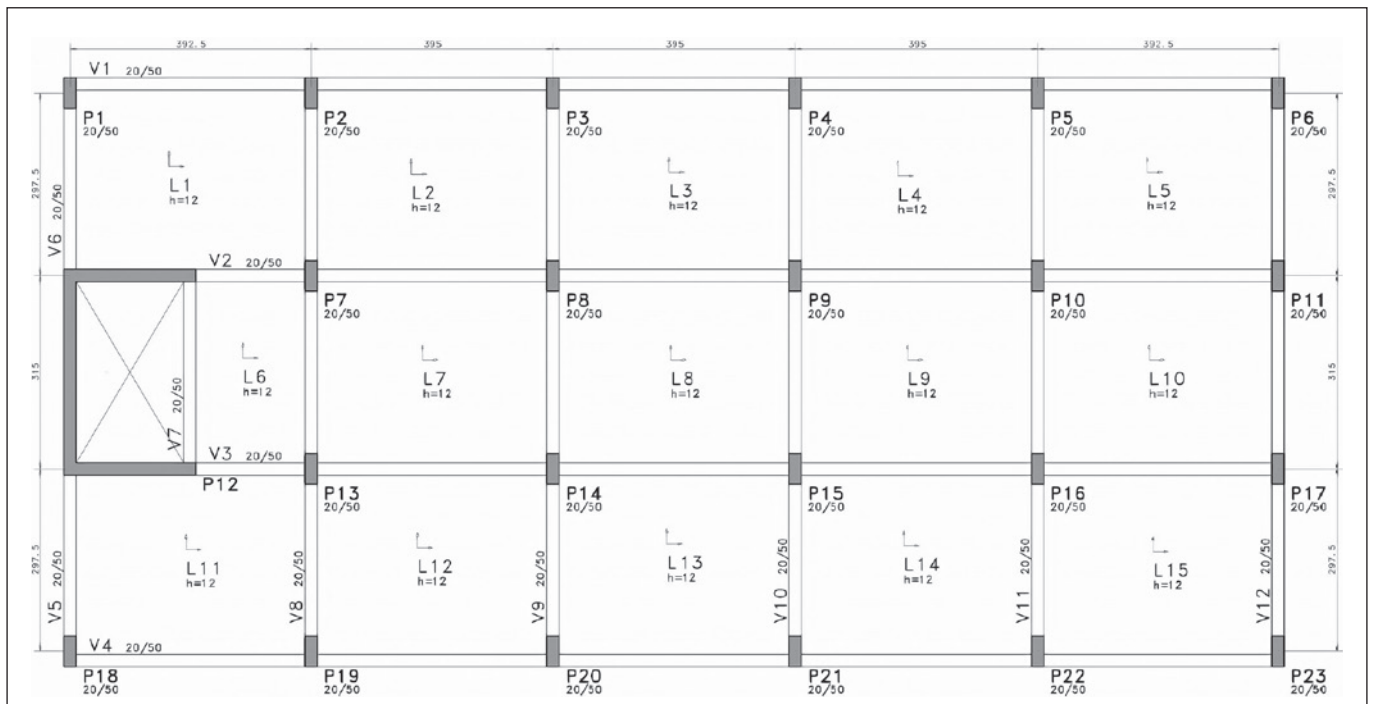
A partir dos carregamentos,



▶ **Figura 2a**
Modelos de edifícios estudados: R1DBC e R2DMC



► **Figura 2b**
Modelos de edifícios estudados: R3DBCC e R4DMCC



► **Figura 2c**
Modelos de edifícios estudados: R5DBE e R6DME



foram criadas combinações de cálculo, em que, além do carregamento de vento nas direções X, Y (V_x , V_y , V_{-x} e V_{-y}), foram considerados também o peso próprio (PP), cargas permanentes de revestimentos (PERM) e cargas acidentais (ACID). Para a análise de resistência, seguindo os Estados Limites Últimos (ELU), foram utilizadas combinações normais, as quais são:

- ▶ ELU1: $1,4*1,0*PP + 1,4*1,0*PERM + 1,4*1,0*ACID + 1,4*0,6*V_y$;
- ▶ ELU2: $1,4*1,0*PP + 1,4*1,0*PERM + 1,4*1,0*ACID + 1,4*0,6*V_{-y}$;
- ▶ ELU3: $1,4*1,0*PP + 1,4*1,0*PERM + 1,4*1,0*ACID + 1,4*0,6*V_x$;
- ▶ ELU4: $1,4*1,0*PP + 1,4*1,0*PERM + 1,4*1,0*ACID + 1,4*0,6*V_{-x}$.

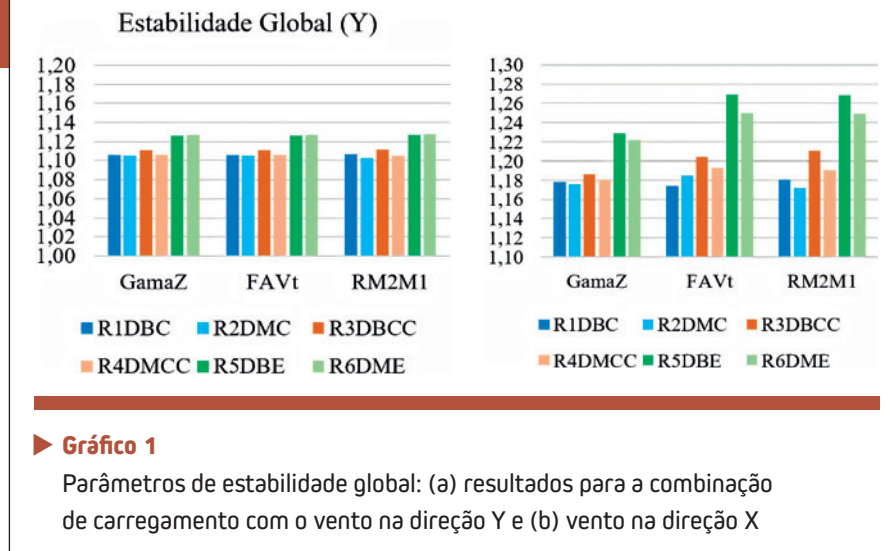
Para efeito de restrição de análise, os ventos foram considerados nas direções X e Y, não sendo analisadas incidências em outras direções.

Para análise do Estado Limite de Serviço (ELS), foi utilizada a combinação frequente de serviço, onde as ações permanentes foram consideradas com seus valores integrais, ao passo que as ações variáveis são consideradas com seus valores minorados. Desta forma, as combinações adotadas para o ELS foram:

- ▶ ELS1: $1,0*PP + 1,0*PERM + 0,6*ACID + 0,3*V_y$;
- ▶ ELS2: $1,0*PP + 1,0*PERM + 0,6*ACID + 0,3*V_{-y}$;
- ▶ ELS3: $1,0*PP + 1,0*PERM + 0,6*ACID + 0,3*V_x$;
- ▶ ELS4: $1,0*PP + 1,0*PERM + 0,6*ACID + 0,3*V_{-x}$.

As abreviaturas utilizadas na descrição das combinações citadas anteriormente foram:

- ▶ PP: Peso próprio da estrutura;



- ▶ PERM: Cargas permanentes de revestimento;
- ▶ ACID: Cargas acidentais de utilização do edifício;
- ▶ V_x : Vento na direção X;
- ▶ V_{-x} : Vento na direção -X;
- ▶ V_y : Vento na direção Y;
- ▶ V_{-y} : Vento na direção -Y.

3.3 Análise da estabilidade global

Foram realizadas as análises dos parâmetros de estabilidade global γ_z , FAV_t e RM2M1, conforme ilustrado no Gráfico 1.

Ressalta-se que para os valores do parâmetro γ_z são consideradas combinações para casos simples de vento, sendo desprezados os deslocamentos horizontais provocados por cargas verticais, o que ocorre nos demais parâmetros.

Observando o Gráfico 1a, percebe-se que os valores dos parâmetros de estabilidade estão próximos entre os mesmos modelos, quando alterada a modelagem do núcleo rígido. Ao modificar a posição do núcleo rígido no pavimento, nota-se que as intensidades dos parâmetros de estabilidade global são próximas, pois variam de 1,106 a 1,128.

Ao visualizar o Gráfico 1b, nota-se que os valores dos modelos onde o núcleo rígido é considerado excêntrico

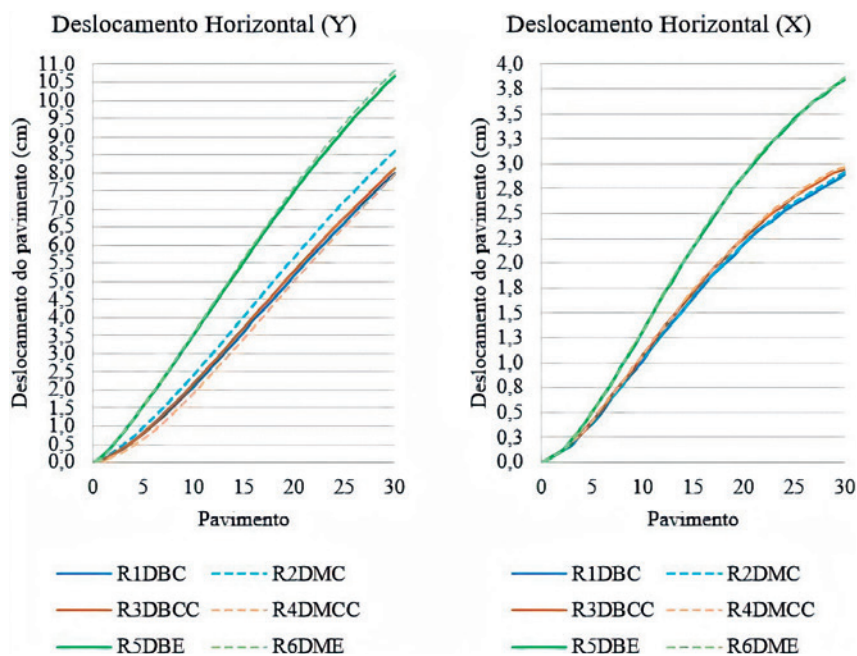
co são discrepantes em relação aos demais. Enquanto os parâmetros de estabilidade global dos modelos R1DBC, R2DMC, R3DBCC e R4DMCC estão entre 1,172 a 1,210, os parâmetros dos modelos R5DBE e R6DME estão entre 1,222 e 1,269. Devido aos valores dos parâmetros de estabilidade global, para os modelos onde o núcleo é excêntrico, estarem próximos ao limite (1,30), torna-se recomendável realizar a análise da estrutura utilizando o processo P-Delta, por ser mais refinado que os demais.

3.4 Análise do deslocamento lateral

No Gráfico 2, são mostrados os resultados do deslocamento lateral dos modelos analisados.

É possível ressaltar que de acordo com a NBR 6118 [4], o limite para o movimento lateral de edifícios deve ser inferior a $H/1700$. Como a altura total dos modelos em estudo é de 90 m, dessa forma, os resultados dos modelos não devem ser superiores a 5,29 cm.

Observando o Gráfico 2a, nota-se que todos os modelos ultrapassaram o limite de deslocamento lateral estabelecido pela Norma, aumentando à medida que o núcleo se distancia



► Gráfico 2

Deslocamento horizontal dos pavimentos: (a) resultados para a combinação de carregamento com o vento na direção Y e (b) vento na direção X

do CM do pavimento. Pode-se observar, também, que na maioria dos modelos, a mudança de modelagem do núcleo não influenciou na intensidade do deslocamento lateral, exceto nos modelos R1DBC e R2DMC, em que a diferença foi de 0,66 cm. Este fato pode ser evidenciado em razão da diferença da posição do CC e CM do núcleo, como ilustrado na Figura 1, devido ao núcleo estar na região central do edifício, esta diferença teve maior influência que nos demais modelos.

Ao analisar o Gráfico 2b, nota-se que os modelos são mais rígidos, deslocando-se dentro do limite estabelecido por norma. O menor deslocamento se deve ao fato da maior

rigidez devido à concepção estrutural adotada para os modelos, como pode-se verificar na Figura 2.

4. CONCLUSÕES


Este estudo visou analisar edifícios altos de concreto, verificando a influência do posicionamento e da modelagem do núcleo rígido, por meio da análise dos parâmetros de estabilidade global e do deslocamento lateral dos pavimentos.

Na análise da estabilidade global, verificou-se que a descentralização do núcleo no pavimento faz com que a flexibilidade da estrutura aumente, tornando os efeitos das cargas horizontais e verticais preponderantes. À medida que o núcleo se tornou ex-

cêntrico, os valores dos coeficientes aproximaram-se do limite estabelecido para o γ_z , fazendo-se necessária uma verificação mais refinada, utilizando o processo P-Delta para análise da estrutura.

Sabe-se que, na maioria dos edifícios concebidos, devido ao arranjo arquitetônico, as caixas de elevador ou escada (onde comumente são utilizados os núcleos) normalmente não estão posicionadas no centro de massa do pavimento. Desta forma, torna-se necessária uma análise mais refinada dos parâmetros de estabilidade global em edifícios com a presença desse elemento estrutural.

Em relação ao deslocamento lateral dos pavimentos do edifício, verificou-se que, ao tornar o núcleo excêntrico, foi ocasionado um aumento considerável nos deslocamentos horizontais, fazendo necessário um acréscimo de rigidez, seja por mudança no arranjo estrutural, seja por disposição de outro núcleo rígido no pavimento, estabelecendo, assim, o equilíbrio da estrutura. Nota-se que alterar a modelagem do núcleo não impactou negativamente nos resultados.

Por fim, ressalta-se que os resultados obtidos neste trabalho têm o intuito de contribuir com a engenharia estrutural na análise do comportamento edifícios com a presença de núcleo rígido. Recomenda-se que, para estudos futuros, a análise dinâmica do caso analisado. 

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TARANATH, B. S. Reinforced concrete design of tall buildings. Taylor and Francis Group, 2010.
- [2] SANTOS, T. P. Comportamento do sistema estrutural em edifícios altos de concreto armado considerando a influência das modelagens do núcleo rígido. 2018. 177 p. Mestrado (dissertação) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018.
- [3] SMITH, B. S; COULL, A. Tall building structures: analysis and design. John Wiley and Sons, 1991.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

