

FLÁVIO ROBERTO XAVIER DE OLIVEIRA

SISTEMAS ESTRUTURAIS

HANDBOOK

UMA ABORDAGEM CONTEXTUALIZADA COM OS PADRÕES INTERNACIONAIS

estruturasonline.com

Sistemas Estruturais

Sistemas Estruturais

Portal Estruturas Online
http://estruturasonline.com

Flávio Roberto Xavier de Oliveira

Portal Estruturas Online
http://estruturasonline.com
João Pessoa - PB, Brasil

Sistemas Estruturais

Flávio Roberto Xavier de Oliveira

Copyright ©2021 Estruturas Online

Projeto: Educação Continuada em Engenharia Civil
Comitê: Flávio Roberto Xavier de Oliveira Autor
Fábio Giovanni Xavier de Oliveira Revisor
Brayan Victor Lourenço Costa Diagramação

Todos os direitos reservados ao Portal Estruturas Online

Av. Júlia Freire, 1224, Expedicionários, João Pessoa-PB
www.estruturasonline.comemail:
contanto@estruturasonline.com

estruturasonline.

Sumário

1 Generalidades **1**
1.1 Histórico do Concreto Armado 1
1.2 Histórico dos Edifícios Modernos 1
1.3 Contextualização 5

2 Sistemas Estruturais no Contexto Internacional **7**
2.1 Formas Arquitetônicas 7
2.2 Sistemas de Amortecimento 8
2.3 Formas Estruturais 9
2.4 Casos Internacionais 10
2.4.1 Burj Khalifa 10
2.4.2 Tower 432 Parke Avenue 12
2.4.3 Jaddah Tower 13

3 Sistemas Estruturais no Contexto Internacional: Estudo de Caso **15**
3.1 Estudo Complementares que Auxiliaram no Desenvolvimento do Estudo de Caso 15
3.2 Modelo Utilizado como Protótipo 19
3.2.1 Descrição do Modelo 19
3.2.2 Resultados das Análises 19
3.3 Modelo Protótipo com Outriggers e Amortecedores FVD 500 23
3.3.1 Resultados das Análises com Outriggers e Amortecedores 24
3.4 Comparação dos Resultados dos Protótipos Apresentados 27

Lista de Figuras

1.1 Chigado em Chamas: The Rush for Lives Over Randolph Street Brigde (1871), Chigago, IL. Créditos, Sarkisian (2016)[11] . . . 2
1.2 Home Insurance Building. Créditos, Sarkisian (2016)[11] . . . 2
1.3 The Monadnock Building, Chicago, 1981 . . . 3
1.4 The Reliance Building, Chicago, 1895 . . . 3
1.5 7° pavimento tipo do Empire State Building, Nova York, NY . . . 4
1.6 Alcoa Building, São Francisco, CA . . . 4
1.7 Sears Tower, Chicago, 1974 . . . 4

2.1 Formas de edifícios altos, Poulos (2017)[8] . . . 7
2.2 Fluxo do vento sob as diversas formas arquitetônicas, Ching (2020)[5] . . . 8
2.3 Detalhe típico de planta de forma do pavimento tipo, *Group of The Concrete Cente*[3] . . 8
2.4 Formas estruturais, Poulos (2017)[8] . . . 9
2.5 Formas estruturais para sistema em concreto armado, Sarkisian (2016)[11] . . . 10
2.6 Burj Khalifa em construção . . . 10
2.7 Planta de forma do pavimento tipo do Burj Khalifa . . . 11
2.8 Tower 432 Park Avenue . . . 12
2.9 Perspectiva estrutural e planta baixa do pavimento tipo do 432 Park Avenue, respectivamente (Etabs Computer and Structures[6]) . . . 13
2.10 Plantas baixas dos pavimentos tipos (Etabs Computer and Estructures[6] . . . 13
2.11 Construção do Jeddah Tower . . . 14
2.12 Perspectiva do modelo estrutural do pavimento tipo (Etabs Computer and Estructures[6] 14

3.1 Demonstração do Sistema Belt Truss, Baker (2012)[2] . . . 16
3.2 Sistemas estruturais, Ching (2020)[5] . . . 16
3.3 Núcleo Central, Ching (2020)[5] . . . 17
3.4 Planta baixa do pavimento tipo, Sao (2017)[10] . . . 17
3.5 (I) Pavimento com laje de concreto, (II) braços metálicos e (III) outriggers da periferia da estrutura, Sao (2017)[10] . . . 18
3.6 Planta baixa do pavimento tipo e perspectiva da estrutura . . . 19
3.7 Gráfico do deslocamento máximo da estrutura (perspectiva) . . . 20
3.8 Gráfico do deslocamento máximo da estrutura na direção Y, e momento máximo de tombamento, respectivamente . . . 20
3.9 Distribuição da força axial nos pilares e núcleo de rigidez . . . 21
3.10 Deslocamento máximo produzido pela ação dinâmica do vento . . . 22
3.11 Planta Baixa dos pavimentos outriggers . . . 23
3.12 Elevação e perspectiva estrutural, respectivamente . . . 23
3.13 Gráfico do deslocamento máximo da estrutura, perspectiva (modelo com outriggers e amortecedores . . . 24
3.14 Gráfico do deslocamento máximo da estrutura na direção Y, e momento máximo de tombamento, respectivamente (com outriggers) . . . 25
3.15 Distribuição da força axial nos pilares e núcleo de rigidez (com outriggers) . . . 26
3.16 Deslocamento máximo produzido pela ação dinâmica do vento (com outriggers e amortecedores) . . . 26

Capítulo 1

Generalidades

A quantidade de dados, informações, materiais didáticos, vídeos, etc... disponíveis na internet é demasiadamente volumoso em praticamente todas as áreas de atuação. Hoje em dia, qualquer pessoa pode publicar diversos conteúdos em plataformas de acesso livre ao público, em qualquer área de conhecimento. A qualidade desses materiais, que deveriam ser melhor discutidas intelectualmente, estão sendo avaliadas e qualificadas pelo número de *likes*, quantidade de visualizações, número de seguidores ou de inscritos que o autor possui em suas redes sociais ou plataformas digitais. Então, como poderemos escolher o melhor conteúdo ou o que atenderia às necessidades de cada profissional?

Para começarmos a responder o questionamento supracitado, precisamos conhecer e entender a filosofia proposta pelo Portal Estruturas Online, cujo objetivo principal é o de encurtar a distância entre o que é produzido na academia, e a real necessidade do mercado por uma pequena via, segura e contínua.

1.1 Histórico do Concreto Armado

O desenvolvimento do concreto armado e protendido, deu-se a partir da criação do cimento Portland, na Inglaterra, em 1824. Nos anos sequentes, os franceses e alemães também começaram a produzir cimento e a conceber formas para aumentar a capacidade portante do concreto.

Em meados do século XIX, já se conhecia mundialmente a possibilidade de reforçar elementos de concreto através de armaduras de aço. Em 1855, foi fundada a primeira fábrica de cimento Portland na Alemanha. No mesmo ano, o francês Lambot[1] patenteou uma técnica para a fabricação de embarcações de concreto armado. A partir de 1867, outro francês, Monier[2], começou a fabricar vasos, tubos, lajes e pontes, utilizando concreto com armadura de aço. Nessa época, as construções em concreto armado eram desenvolvidas em bases puramente empíricas, pois ainda não se conhecia com clareza a função estrutural da armadura de aço no concreto. Foi em 1877, que o americano Hyatt[3] reconheceu de fato, o efeito da aderência entre o concreto e a armadura, após executar vários ensaios com construções de concreto. A partir de então, passou-se a colocar a armadura apenas do lado tracionado das peças.

1.2 Histórico dos Edifícios Modernos

Os edifícios altos “modernos"evoluíram nos Estados Unidos por volta de 1880 em Chicago, onde em sua maioria se concentraram ao longo das décadas. Em 1871, em meio a uma tragédia provocada por um incêndio que devastou a cidade, surgiu para Chicago uma oportunidade de repensar no projeto e construção em ambientes urbanos, iniciando pelos limites das resistências dos materiais empregados, na concepção e desenvolvimento de transportes verticais na própria estrutura dos edifícios.

Nos anos finais do século XIX, os avanços tecnológicos levaram ao desenvolvimento de ferro fundido durante a revolução industrial dos Estados Unidos. Embora frágil, esse material tinha alta resistência

[1] Joseph-Louis Lambot inventor do concreto armado, nascido em 22 de maio de 1814 em Montfort Sur Argens; morreu em 2 de agosto de 1887 em Brignoles.

[2] Joseph Monier, nascido em 8 de novembro de 1823, Saint-Quentin; morreu em La-Poterie, França em 13 de março de 1906, Paris, foi um jardineiro francês e um dos principais inventores do concreto armado.

[3] Thaddeus Hyatt, foi efetivamente o grande precursor do concreto armado e possivelmente o primeiro a compreender profundamente a necessidade de uma boa aderência entre os dois materiais e do posicionamento correto, nas áreas tracionadas, das barras de ferro para que este material pudesse colaborar eficientemente na resistência do conjunto concreto-aço, 1870.

e podia ser pré-fabricado, possibilitando uma construção rápida no local. O primeiro edifício de vários andares utilizando essa nova tecnologia foi o *Home Insurance Building*, em Chicago, construído em 1885, com dois andares adicionados em 1890, com 12 pisos e com altura de 55 metros. Embora já tenha sido demolido, esse é considerado o pai dos arranha-céus.



Figura 1.1: Chigado em Chamas: The Rush for Lives Over Randolph Street Brigde (1871), Chigago, IL. Créditos, Sarkisian (2016)[11]



Figura 1.2: Home Insurance Building. Créditos, Sarkisian (2016)[11]

O Edifício Monadnock, em Chicago, construído em 1981, utilizava suas paredes não armadas com 1,8 metros de espessura para atingir uma altura de 60 metros (atualmente é o edifício mais alto em Alvenaria não armada). Segundo Trein (2005),[13] vários edifícios foram construídos com paredes espessas, porém, enquanto subiam, iria impondo a necessidade de paredes cada vez mais robustas, de maneira que os andares inferiores acabavam por ter suas áreas úteis prejudicadas. Tal estrangulamento atrelado a uma perda de área bastante significativa dos pavimentos inferiores, serviu como um ótimo combustível para o desenvolvimento de novas concepções de sistemas estruturais.

O Reliance Building de 15 andares e 61,6 metros de altura, construído em 1895, foi o primeiro edifício que utilizou um sistema reticulado em aço, onde sua estrutura não dependia mais das Alvenarias. Elevadores a vapor e hidráulicos foram testados para uso em 1850, e em 1873, Elisha Graves Otis desenvolveu e instalou elevadores de vapor em 2000 edifícios em todo o Estados Unidos, em alguns anos depois, em 1889 foi utilizada a primeira instalação de um elevador elétrico com engrenagem de conexão direta.

Outras cidades como Nova York, Filadélfia e Londres beneficiaram-se com essa nova tecnologia dos materiais empregados, e com o "novo sistema estrutural reticulado". Do final do século XIX até a última parte do século XX, Nova York assumiu a liderança na construção de prédios altos, e deteve o recorde mundial em altura.

Como altura sempre esteve relacionada ao poder e à ambição dos homens, (fato ilustrado pelas pirâmides do Egito e as torres na Idade Média), a identidade e o ego, segundo Sarkisian (2016),[11] alimentaram uma explosão na construção dos edifícios altos, que acabaram tornando-se ferramentas de ostentação para grandes empresas e motivo de orgulho para os profissionais envolvidos em sua construção.

Em 1930, o *Chrysler Building* em Nova York se tornou o edifício mais alto do mundo, com 319 metros



Figura 1.3: The Monadnock Building, Chicago, 1981

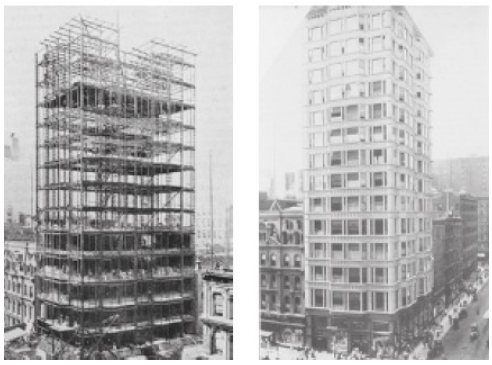


Figura 1.4: The Reliance Building, Chicago, 1895

de altura, porém no ano seguinte o *Empire State* o ultrapassou, chegando a 382 metros de altura. O feito mais significativo foi a extraordinária velocidade com que o *Empire State* foi planejado e construído, principalmente, devido à integração entre arquitetos, engenheiros, proprietário e empreiteiro.

O desenvolvimento de técnicas de cálculo manuais mais sofisticadas para estruturas, incluindo métodos desenvolvidos por grandes engenheiros como Hardy Cross, tornou possível analisar, projetar e desenhar estruturas que poderia ser facilmente construídas.

Posteriormente, o *World Trade Center* assumiu o lugar de edifício mais alto do mundo, até que em 1974, o *Sears Tower*, com 108 pavimentos e com uma altura de 442 m, construído em Chicago, assumiu o controle até 1996, quando foi superado pelas torres gêmeas do Petronas Towers, em Kuala Lumpur na Malásia, com uma altura de 451,9 m. Em um período anterior à construção do World Trade Center, a engenharia de vento recebeu grandes contribuições para o seu desenvolvimento através de estudos realizados por Alan Davemport e Nicholas Isyumov da Universidade de Ontário. Na área de geotecnia, as contribuições advindas de Clyde Baker, também tiveram substancial importância. Do ponto de vista de sistemas estruturais, Dr. Fazlur Khan fundamentou conceitos e princípios que foram intimamente integrados com arquitetura, em muitos casos, tornando-se a própria arquitetura. O conceito de *in tube* trazido por Khan transformou drasticamente o sistema tradicional utilizado no Empire State.

Após o milênio, um rápido desenvolvimento da técnica de modelagem por computador e de tecnologias empregadas nas construções, edifícios cada vez mais altos foram construídos ao redor do mundo. Em 2004, o Taipei 101 com 509,2 metros de altura, tornou-se o edifício mais alto do mundo. No entanto, essa posição foi assumida por Dubai, em 2010 com o Burj Khalifa com uma incrível altura de 829,8 metros. O Burj trouxe consigo algumas inovações, principalmente no sistema estrutural com a utilização do *Core Plus Outrigger System*, sendo uma excelente ferramenta para se projetar edifícios maiores e eficientes (vide capítulos posteriores). Prédios altos se tornaram um fenômeno mundial nas últimas três décadas, no entanto, as maiores concentrações estão na Ásia e no Oriente Médio.

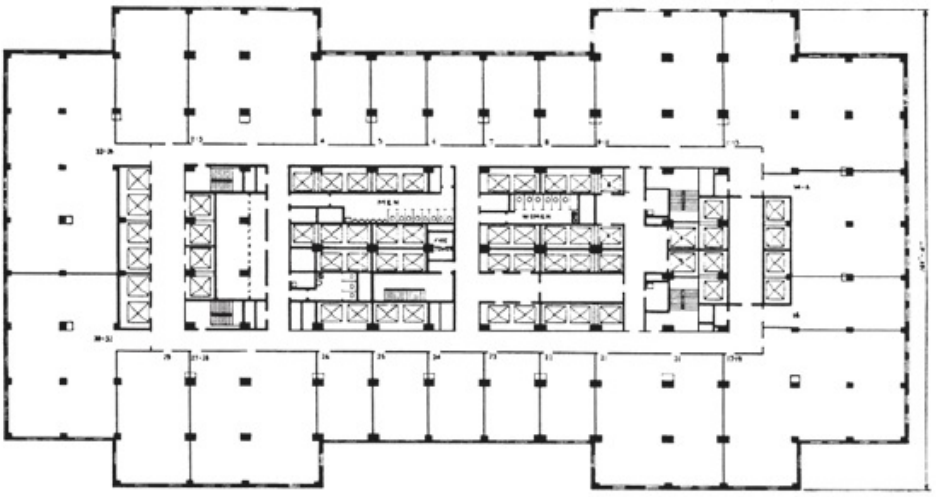


Figura 1.5: 7° pavimento tipo do Empire State Building, Nova York, NY



Figura 1.6: Alcoa Building, São Francisco, CA



Figura 1.7: Sears Tower, Chicago, 1974

1.3 Contextualização

A qualidade do projeto, é diretamente proporcional à escolha do sistema estrutural utilizado. Porém, o sucesso do projeto não depende somente do calculista, mas principalmente da arquitetura da edificação. A forma do projeto arquitetônico, tanto em planta como em perspectiva, pode gerar grande "desconforto"estrutural, além de ser o maior indutor de custo na execução da estrutura da edificação. No Brasil, é natural conceber um projeto arquitetônico sem integra-lo à estrutura, podendo inviabilizar sua construção do ponto de vista de estabilidade lateral ou ainda sobre os aspectos de economicidade. Mas, antes de abrirmos esse tema, será necessário conhecermos alguns *cases* internacionais, para nos ajudar a formar um senso crítico responsável, para assim compararmos com os projetos desenvolvidos no Brasil.

Com o avanço da tecnologia e a busca incessante por sistemas estruturais cada vez mais eficientes e econômicos, tais como o sistema de outriggers conectados aos núcleos do edifício, uma maior flexibilidade foi concedida aos arquitetos para se projetar edifícios cada vez maiores e com formas irregulares.

Capítulo 2

Sistemas Estruturais no Contexto Internacional

2.1 Formas Arquitetônicas

A capacidade de resistir aos carregamentos laterais, é um dos principais parâmetros do projeto estrutural dos edifícios. A medida que suas alturas aumentam, mais susceptíveis ficam ao vento e ao terremoto. Por isso, que estratégias arquitetônicas são necessárias para reduzir o efeito provenientes dos carregamentos laterais. Alaghmandan et al(2013),[1] indica a porcentagem das formas mais adotadas nos prédios mais altos do mundo em plantas, nos anos entre 2000 e 2012:

- Rectangular: 58%
- Elíptica ou circular: 16%
- Triangular: 9%
- Curvilinea: 7%
- Poligonal: 7%
- Paralelograma: 3%

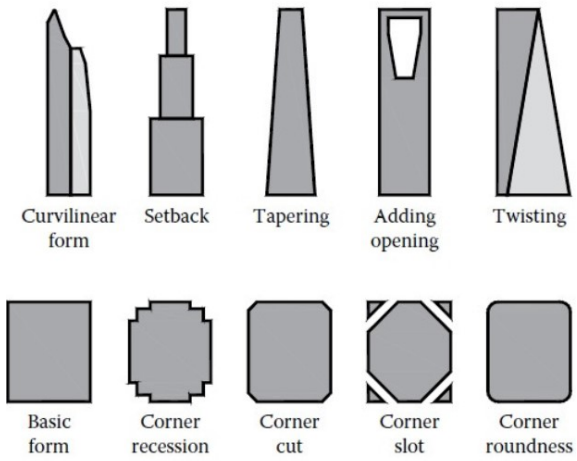


Figura 2.1: Formas de edifícios altos, Poulos (2017)[8]

A busca dos arquitetos pela individualidade de um edifício, pode exigir muito dos engenheiros estruturais. Portanto, os engenheiros precisam preservar a visão do arquiteto, que no que lhe concerne, e devem apreciar os desafios que podem ser impostos. Claramente, é altamente desejável uma abordagem colaborativa entre o arquiteto e o engenheiro estrutural, e entre o engenheiro estrutural e o de fundações, Poulos (2017)([8]).

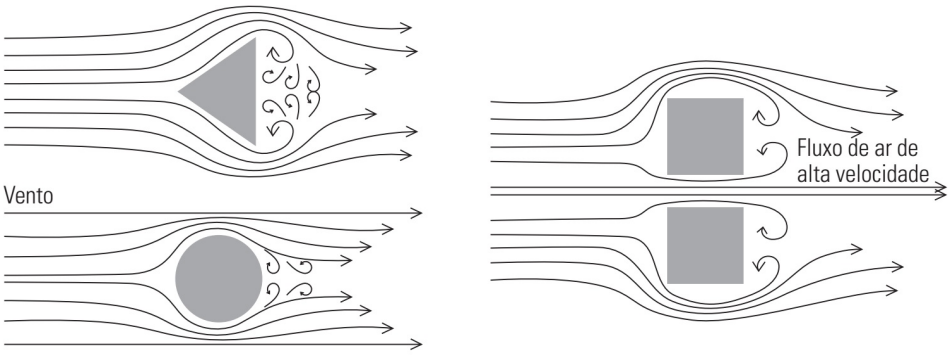


Figura 2.2: Fluxo do vento sob as diversas formas arquitetônicas, Ching (2020)[5]

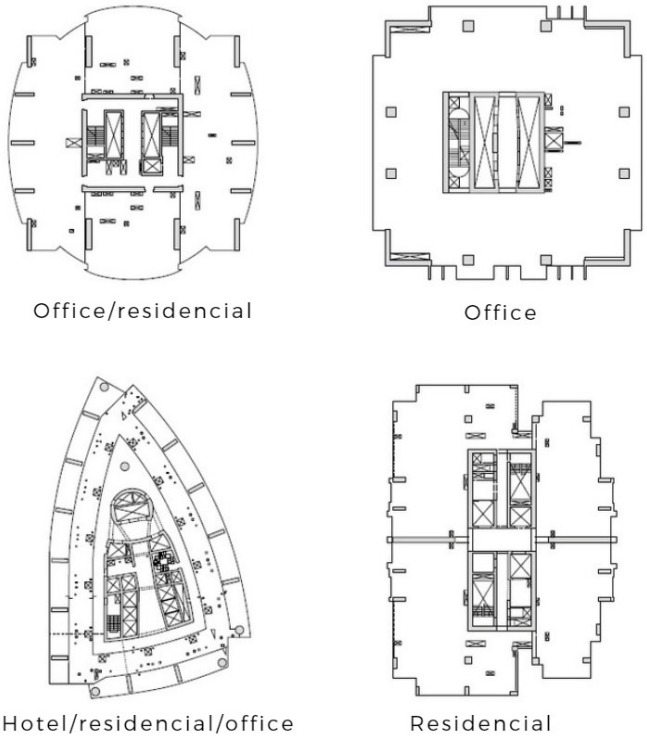


Figura 2.3: Detalhe típico de planta de forma do pavimento tipo, *Group of The Concrete Cente*[3]

2.2 Sistemas de Amortecimento

O amortecimento está presente em todos sistemas oscilatórios. O seu efeito é tirar energia do sistema. Essa energia é dissipada sob forma de calor ou irradiada. Um sistema de vibração pode encontrar muitos categorias de forças amortecedoras, como o atrito molecular interno. O amortecimento considerado intrínseco às estruturas é o do tipo viscoso, em que seu valor é traduzido sob a forma de coeficiente ou taxa. Segundo Soriano (2014),[12]devido à complexidade do fenômeno de dissipação de energia, o coeficiente de amortecimento tem grande variabilidade. Contudo, é necessário buscar uma estimativa adequada para sua utilização que depende do tipo e do material da estrutura.

Para Fu (2018),[6] o amortecimento viscoso por si só não é suficiente para limitar as respostas dinâmicas e atender aos requisitos de desempenho dos edifícios altos. Portanto, são necessários sistemas de amortecimento complexos adicionais para controlar a oscilação devido ao carregamento do vento.

No Brasil, esses sistemas de amortecimento não são normalizados e são poucos utilizados. Por isso, às estruturas precisam ter rigidezes suficientes para atender os requisitos de desempenho e de conforto humano. Como esses requisitos precisam ser respeitados, às nossas edificações precisam ter um volume expressivo de elementos estruturais, para se contrapor à vibração causada pelas ações dinâmicas, os que a tornam bastante robustas.

Os sistemas de amortecimentos adicionais são comumente chamados sistema de controle (*control system*). Segundo Carneiro (2009),[4],esses dispositivos absorvem ou consumem parte da energia transmitida pelo carregamento dinâmico, reduzindo sua dissipação nos membros da estrutura principal. Pode ser dos tipos:

- Controle passivo;
- Controle ativo;
- Controle semi-ativo;
- Controle híbrido.

Os sistemas ativos conseguem decidir e executar um conjunto de ações que melhorarão o estado atual de uma estrutura de maneira controlada, e dentro de um curto período, podendo funcionar em uma ampla gama de frequências.

Os sistemas passivos alteram continuamente a rigidez do edifício, para manter suas frequências longe das frequências das forças externas, evitando assim, uma condição de ressonância.

2.3 Formas Estruturais

Existem vários fatores a serem considerados ao selecionar um sistema estrutural para edifícios altos. Segundo Sarkisian (2016),[11] a segurança, conforto dos ocupantes, economia e o uso são os mais importantes. Para Fu (2018),[6] as principais considerações são as que envolvem a maior eficiência do sistema estrutural em relação à estabilidade lateral da edificação para resistir ao vento e sismos, e que estes não afetem o conforto dos ocupantes. Já para *Group of The Concrete Center*,[3] a seleção mais adequada depende de fatores, tais como, localização geográfica, habilidades de construção, altura, dimensões em planta, uso pretendido e aparência visual requerida pelos arquitetos.

A seguir, serão mostrados os sistemas estruturais comumente usados nos edifícios altos em relação ao número de andares segundo Sarkisian (2012) e *Group of The Concrete Center*.

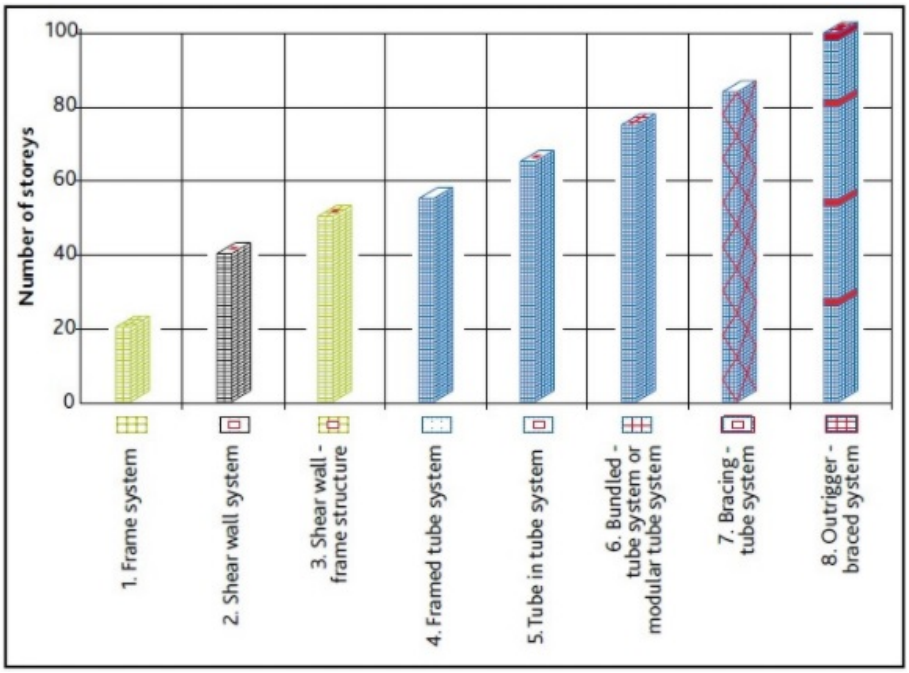


Figura 2.4: Formas estruturais, Poulos (2017)[8]

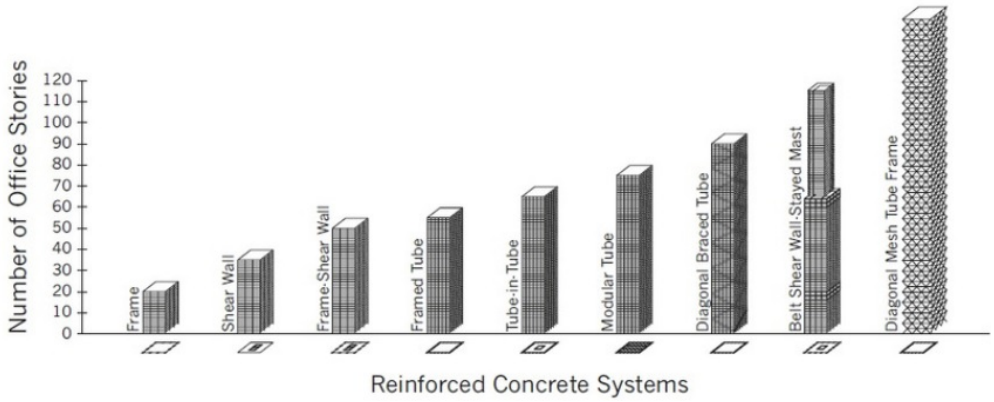


Figura 2.5: Formas estruturais para sistema em concreto armado, Sarkisian (2016)[11]

2.4 Casos Internacionais

2.4.1 Burj Khalifa

Um dos ícones da engenharia estrutural mundial é o Burj Khalifa, construído entre os anos de 2004 a 2010, chegando a uma altura de 829,8 metros. O Burj (vide Figura 2.6) trouxe consigo algumas inovações principalmente no sistema estrutural, com a utilização do *Core Plus Outrigger System* desenvolvido por Lame (2008)[7].



Figura 2.6: Burj Khalifa em construção

As Figuras 2.6 e 2.7 mostram a forma regular Burj. Essa forma foi concebida estrategicamente, visando otimizar o escoamento do vento pela estrutura, de modo a minimizar os seus efeitos. Concentrando-se na forma do pavimento tipo, tiramos a conclusão de um sistema estrutural em laje lisa protendida com

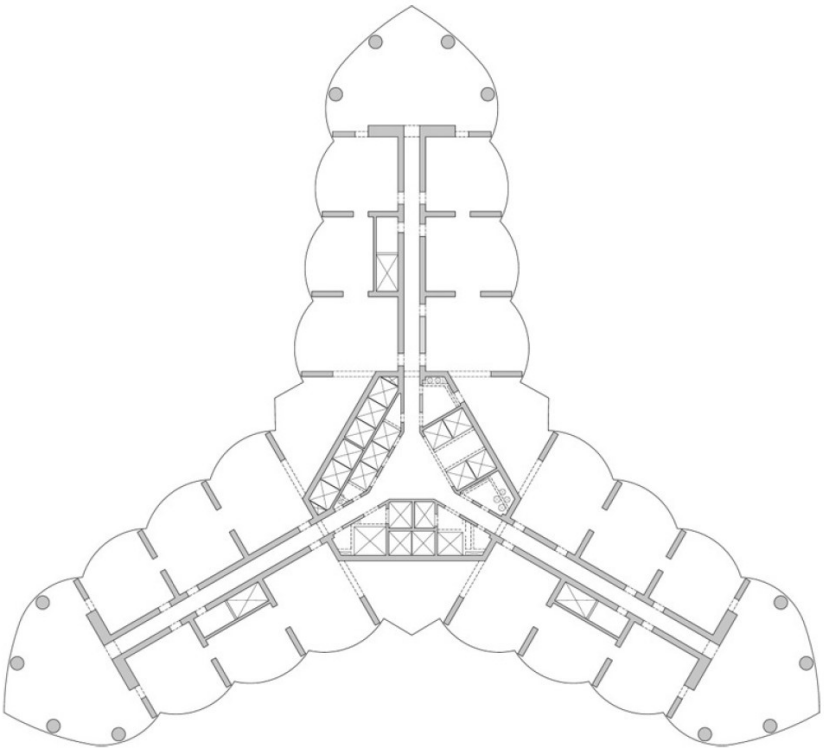


Figura 2.7: Planta de forma do pavimento tipo do Burj Khalifa

núcleos de rigidezes conectados a um núcleo central (posteriormente, teceremos comentários sobre o quanto a forma regular dos pavimentos tipos diminui a distância entre seus centros de massa e rigidez).

2.4.2 Tower 432 Parke Avenue

O 432 Park Avenue é o edifício residencial mais "fino"do mundo, localizado em Manhattan, Nova York, com vista para o Central Park. Sua estrutura é em concreto com a resistência característica a compressão de $100MPa$. A laje possui uma espessura de 25 centímetros e os pilares de 116x116 centímetros. O sistema estrutural utilizado foi o *tube in tube system* (vide Figura 2.4). Existe um núcleo interno de concreto de 9x9 metros com paredes com espessura de 76 centímetros, ligado a estrutura de periferia via *outriggers*[7] em cinco níveis (vide Figura 2.9). Devido à sua esbeltez, o edifício ficou mais susceptível à vibração causadas pela ação do vento, que poderiam gerar desconforto humano. Para resolver esse problema, as salas dos apartamentos não possuem esquadrias, o que permite que o vento passe através dos edifícios (solução verificada através do ensaio de túnel de vento). Além disso, dois amortecedores de massa sintonizada de 1.300 toneladas foram instalados na parte superior do edifício para limitar sua aceleração.



Figura 2.8: Tower 432 Park Avenue

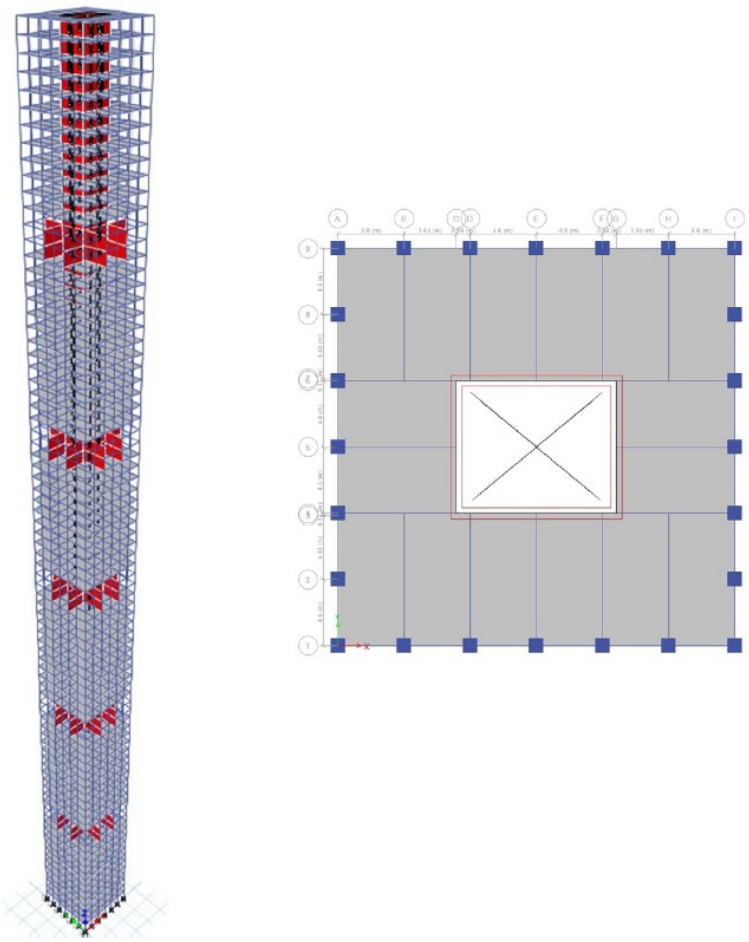


Figura 2.9: Perspectiva estrutural e planta baixa do pavimento tipo do 432 Park Avenue, respectivamente (Etabs Computer and Structures[6])

2.4.3 Jaddah Tower

Lançado em 2013, e com a pretensão de ser o edifício mais alto do mundo, o Jeddah Tower prevê alcançar uma altura de 1008 metros. Uma das características do edifício é sua forma cônica, aerodinâmica, com o objetivo reduzir o efeito do vento e melhorar sua estabilidade lateral. Basicamente, o material fundamental utilizado no sistema principal da estrutura foi o concreto, com resistência característica à compressão de $85MPa$ até o $95^{\underline{o}}$ andar e a partir daí $75MPa$, até o topo.

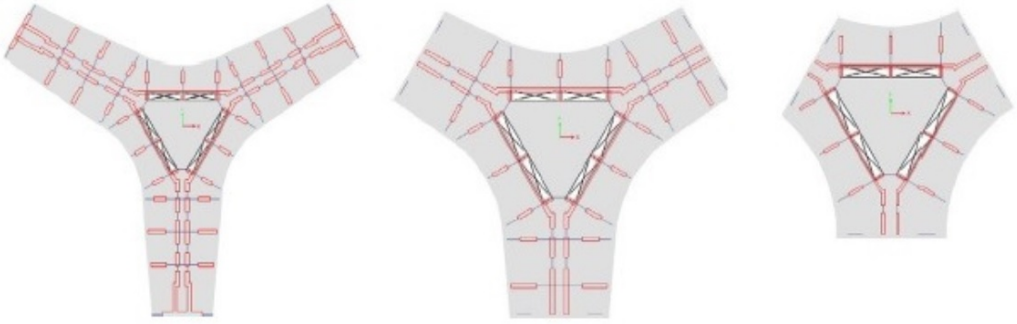


Figura 2.10: Plantas baixas dos pavimentos tipos (Etabs Computer and Estructures[6]



Figura 2.11: Construção do Jeddah Tower



Figura 2.12: Perspectiva do modelo estrutural do pavimento tipo (Etabs Computer and Estructures[6]

Capítulo 3

Sistemas Estruturais no Contexto Internacional: Estudo de Caso

3.1 Estudo Complementares que Auxiliaram no Desenvolvimento do Estudo de Caso

O lançamento da estrutura dos edifícios é um grande desafio para os projetistas brasileiros, haja vista que, geralmente, a definição da forma e do sistema estrutural fica por conta do projeto arquitetônico. No contexto internacional, o sistema estrutural e a forma dos edifícios já fazem parte da concepção do projeto arquitetônico. No Brasil, é natural conceber um projeto arquitetônico sem integra-lo à estrutura, chegando até inviabilizar sua construção do ponto de vista de estabilidade lateral ou ainda sobre os aspectos de economicidade.

Para haver um bom lançamento estrutural, a concepção arquitetônica precisa assumir premissas pouco difundidas na academia brasileira, tais como:

- Formas aerodinâmicas;
- localização adequada do núcleo de rigidez e a otimização da distância entre o centro de massa e do centro de rigidez;

Para exemplificarmos a abordagem internacional dos sistemas estruturais supracitados, foi desenvolvido um modelo protótipo baseado em Sarkisian (2016),[11] Fu (2018),[6] Ching (2020),[5] e Poulos (2017),[8]. Esses autores focaram na forma estrutural, assim como, no material empregado em seus elementos, em função de desempenho e altura.

Ching (2020),[5] propôs um sistema com um núcleo central rígido, porém com os pavimentos atirantados em balanço (vide Figura 3.2). Tanto Poulos (2017),[8] como Sarkisian (2016),[11] propuseram um sistema *tube in tube*, porém, para alturas até 80 metros. Contudo, Poulos (2017),[8] acrescentou *Outriggers* no sistema estrutural de edifícios acima de 100 metros de altura. Todavia, Baker (2012),[2] desenvolveu para o Burj Khalifa, o *Beltruss Core System* mostrado na Figura 3.1.

O sistema proposto por Baker (2012),[2] decorreu da evolução dos sistemas utilizados em pontes e igrejas, como, por exemplo, a Catedral de Notre-Dame, em Paris. Este sistema possui um núcleo central conectado à estrutura de periferia, trazendo assim, um aumento significativo na resistência à torção da estrutura.

Antes de citarmos o próximo estudo complementar, precisamos considerar a recomendação da ASCE/SEI 7-16 [1], apêndice D — *Buildings Exempted From Torsional Wind Load Cases*, que diz que, a excentricidade entre o centro de massa e o centro de rigidez dos edifícios não deve exceder 15% em cada direção principal, ao longo de cada pavimento, para estruturas que possuam as lajes como diafragma Rígido.

Outro estudo de bastante relevância foi o de Sao (2017)[10], que combinou diferentes tipos de sistemas estruturais para otimizar os espaços ocupados pelos *Outriggers*, sem comprometer a estabilidade lateral do edifício (edifício modelado no Etabs V15).

[1] American Society of Civil Engineers, Structural Engineer Institute. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, 2017, Reston, Virginia, United States.

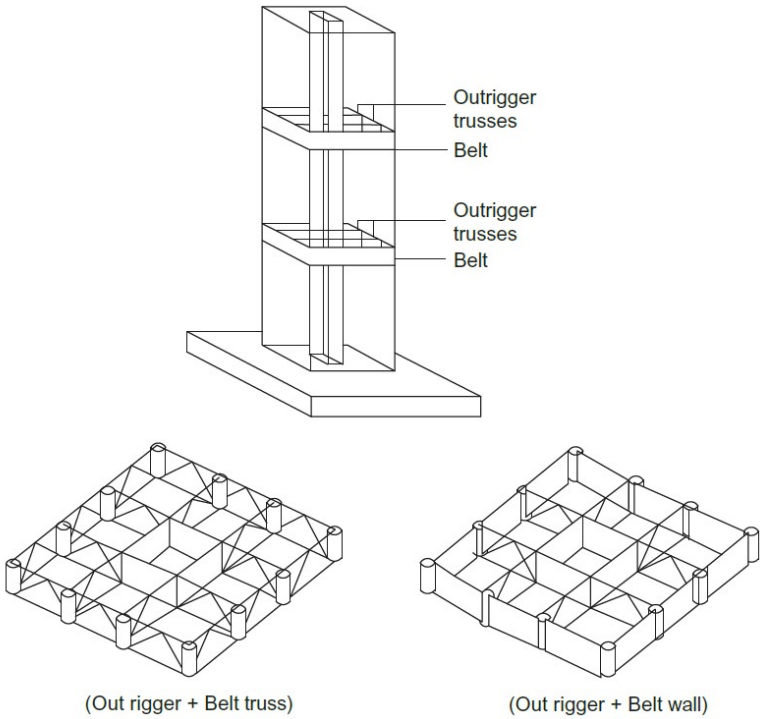


Figura 3.1: Demonstração do Sistema Belt Truss, Baker (2012)[2]

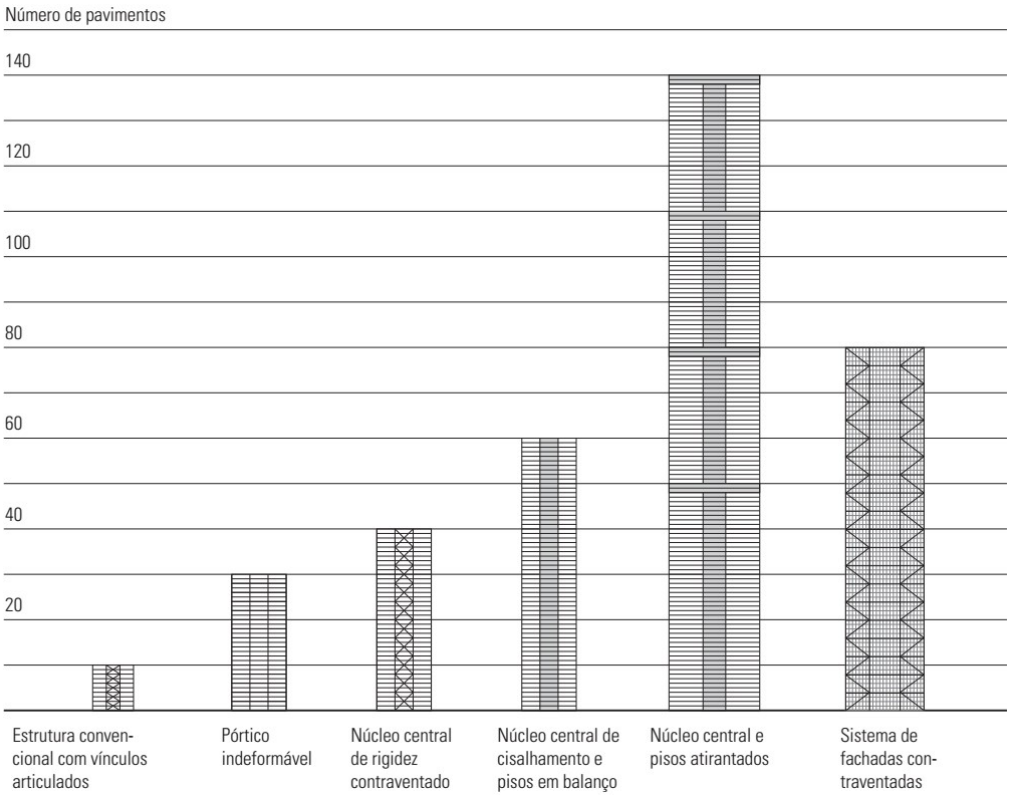


Figura 3.2: Sistemas estruturais, Ching (2020)[5]

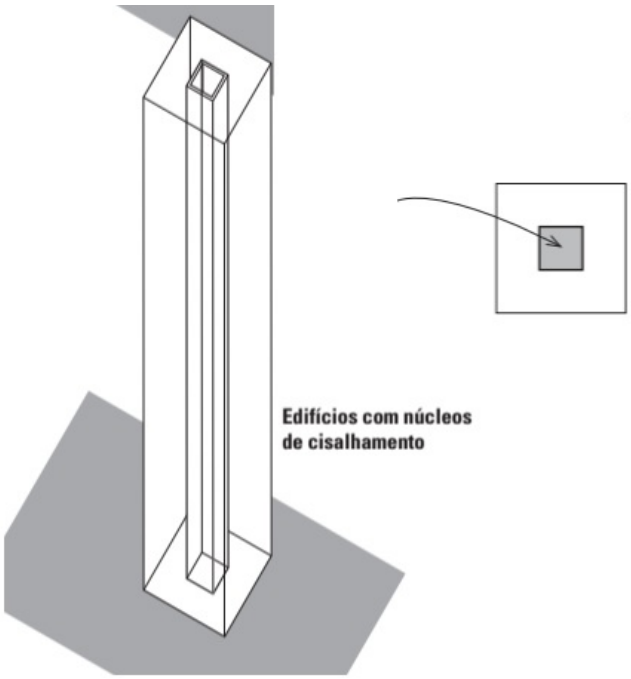


Figura 3.3: Núcleo Central, Ching (2020)[5]

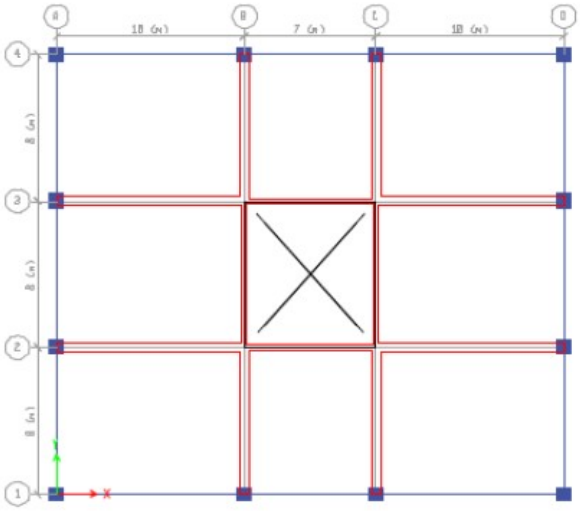


Figura 3.4: Planta baixa do pavimento tipo, Sao (2017)[10]

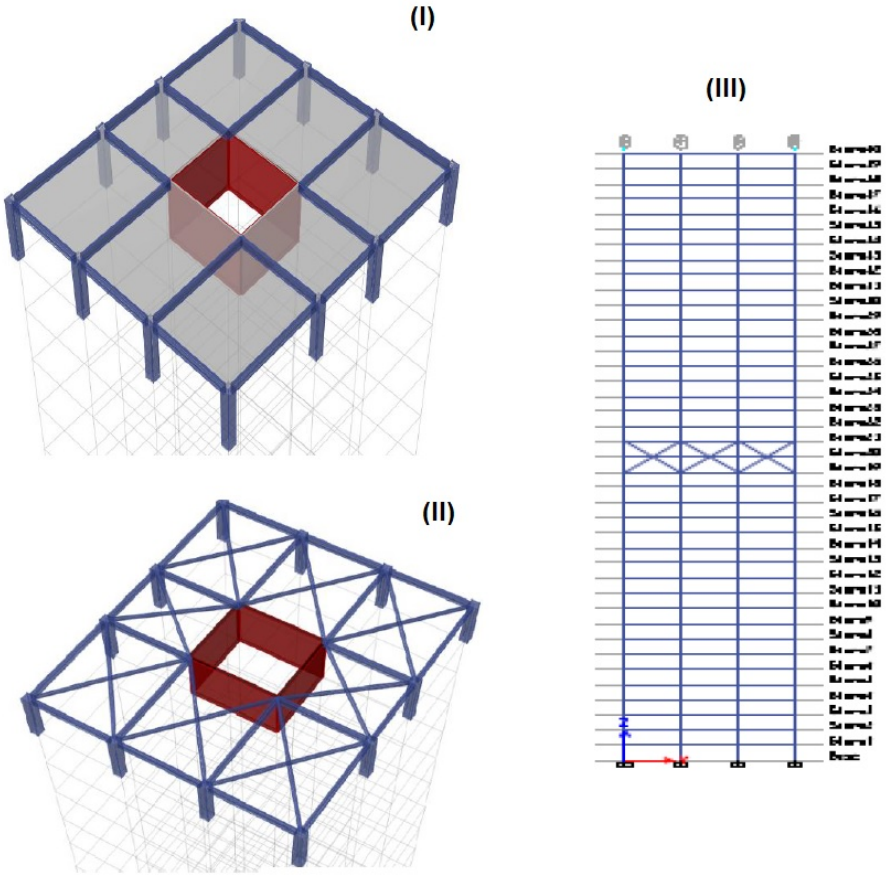


Figura 3.5: (I) Pavimento com laje de concreto, (II) braços metálicos e (III) outriggers da periferia da estrutura, Sao (2017)[10]

3.2 Modelo Utilizado como Protótipo

Depois de uma boa pesquisa bibliográfica, iniciamos o protótipo com auxílio do software Etabs Ultimate V19 *Computer and Structures*[2] conforme Figura 3.6.

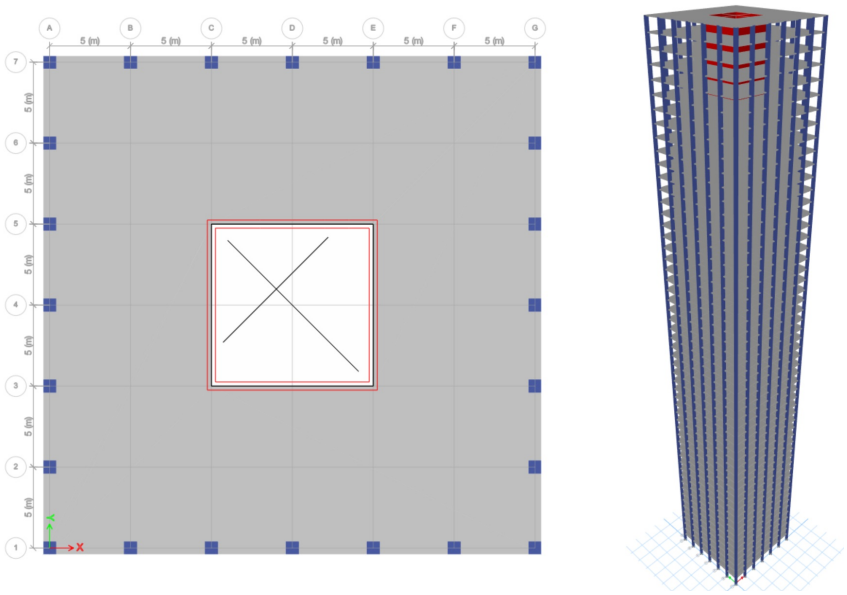


Figura 3.6: Planta baixa do pavimento tipo e perspectiva da estrutura

3.2.1 Descrição do Modelo

Abaixo estão descritas todas as informações utilizadas no modelo protótipo:
Dimensões da planta: 30x30 metros;
Número de pavimento: 55;
Pé esquerdo: 3,5 metros;
Resistência característica à compressão do concreto: $f_{ck} = 50MPa$;
Dimensão dos pilares: 80x80 centímetros;
Laje lisa protendida com espessura de 23 centímetros;
Núcleo de Rigidez com espessura de 45 centímetros;
Vento conforme a ABNT NBR6123:1988[3];
Carregamento e ações conforme a ABNT NBR6120:2019[4].

3.2.2 Resultados das Análises

Foram utilizadas as combinações prescritas na ABNT NBR6118:2014[5], conforme o "item" 18.8.3. e a análise estrutural foi realizada pelo método dos Elementos Finitos, conforme o "item" 14, da mesma norma.

A análise modal da estrutura apresentou os seguintes valores:

Na última linha da Tabela 3.1, foi atribuída a carga dinâmica de uma pessoa caminhando sobre o último pavimento do edifício, conforme as recomendações da ASCE 7-16. Na Tabela 3.2, são apresentados os valores das acelerações da estrutura mediante o carregamento do vento dinâmico, e na Tabela 3.3, o resultado da aceleração da análise de pessoas caminhando sobre a laje.

Conforme a recomendação da ASCE 7-16, foi calculado a excentricidade entre o centro de rigidez e o centro de massa da estrutura.

[2]https://www.csiamerica.com/products/etabs
[3]ABNT NBR6123:1988 - Forças devidas ao vento em edificações (*Building construction - Base for design of structures - Wind loads - Procedure*)
[4]ABNT NBR 6120:2019 - Ações para cálculo de estruturas de edificações (*Design loads for structures*)
[5]ABNT NBR6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento (Design of concrete structures - Procedure

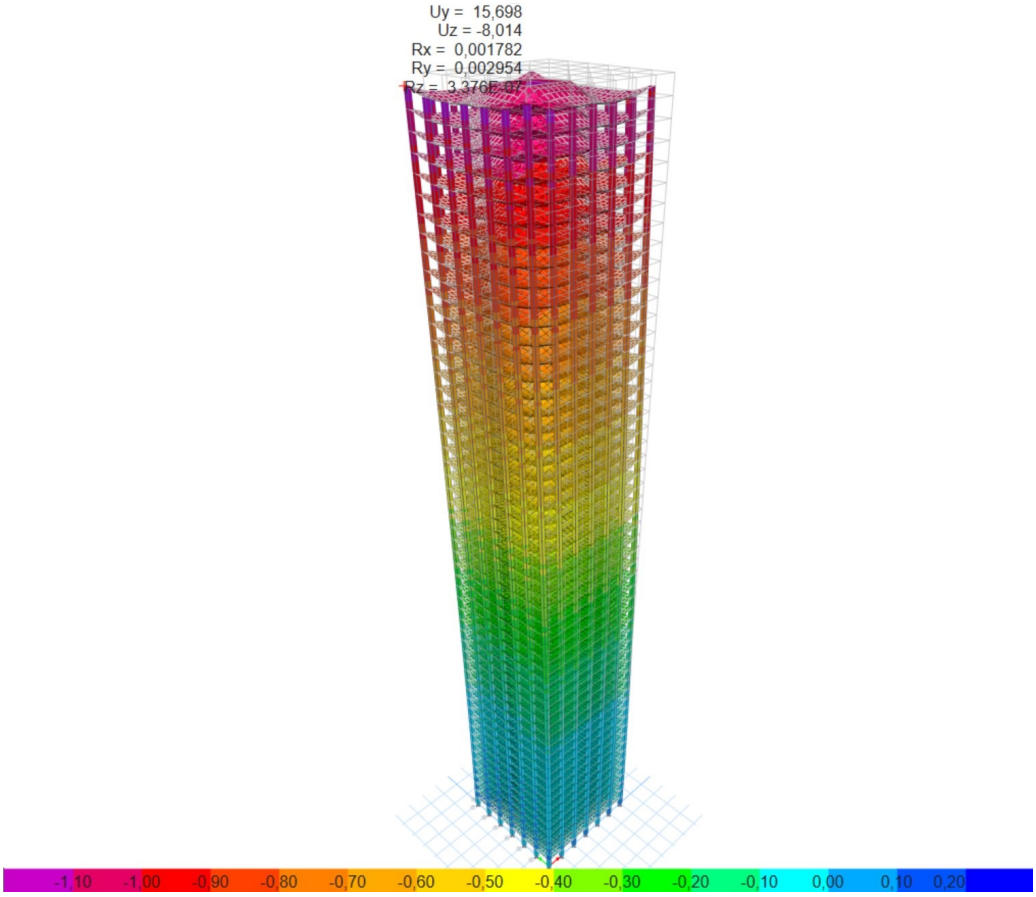


Figura 3.7: Gráfico do deslocamento máximo da estrutura (perspectiva)

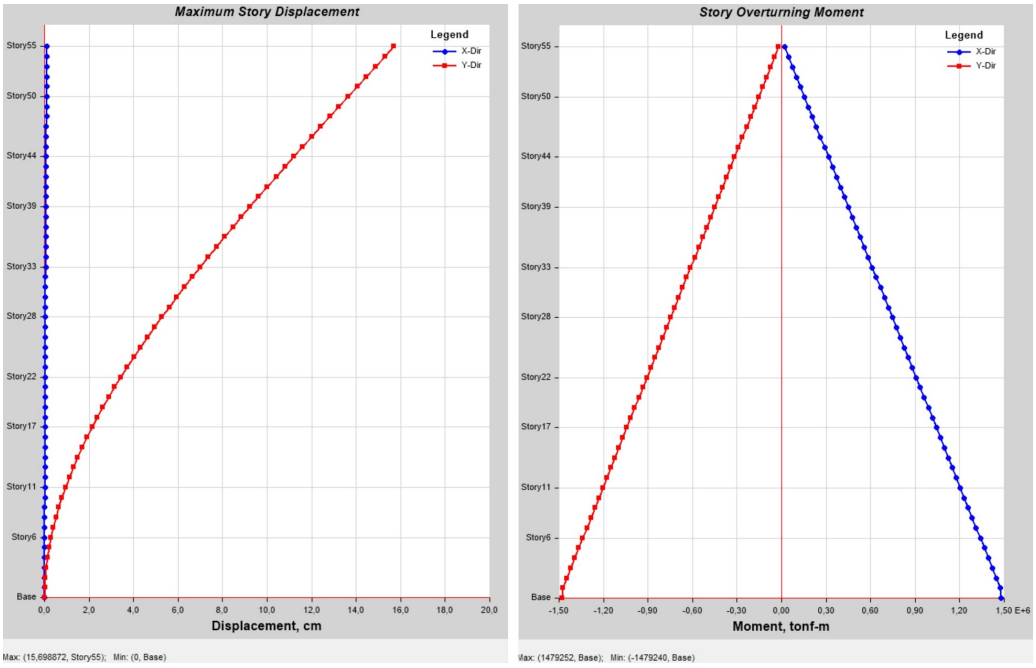


Figura 3.8: Gráfico do deslocamento máximo da estrutura na direção Y, e momento máximo de tombamento, respectivamente

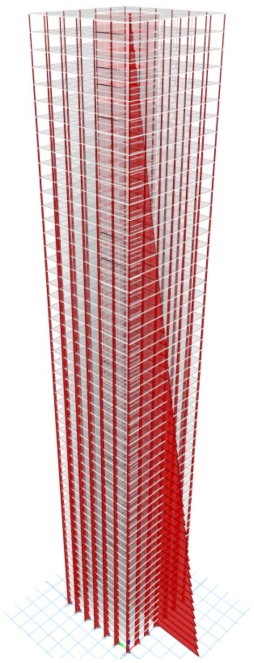


Figura 3.9: Distribuição da força axial nos pilares e núcleo de rigidez

Tabela 3.1: Análise Modal

Casos	Modos	Períodos (s)	Frequência (ciclo/s)	Autovalor (rad/s)	Autovetor (rad/s²)
Modal	1	14,473	0,069	0,4341	0,1885
Modal	2	13,609	0,073	0,4617	0,2132
Modal	3	3,167	0,316	1,9841	3,9367
Modal	4	2.472	0,405	2,5416	6,4597
Modal	5	2,35	0,426	2,6736	7,148
Modal	6	1.042	0,959	6.0277	36,3334
Modal	7	0,934	1.071	6,7289	45,2778
Modal	8	0,905	1,106	6,9463	48,2508
Modal	9	0,693	1.443	9.0694	82,2533
Ritz-Walk1	1	14.473	0,069	0,4341	0,1885

Fonte: O Próprio Autor.

Tabela 3.2: Análise espectral do vento

Pavimento	Case	Tipo	direção X (10%g)	Direção Y (10%g)	Direção Z (10%g)
55	Vento Expectro	LinResSpec	1,86	1,78	1,26
40	Vento Expectro	LinResSpec	1,03	1,04	1,14
30	Vento Expectro	LinResSpec	0,86	0,87	0,95

Fonte: O Próprio Autor.

Tabela 3.3: Resultado da análise de pessoas caminhando sobre a laje

Walking Vibration Case	Aceleração Z (10%g)	Pico de Aceleração (10%g)
Walk1	0,2	0,5

Fonte: O Próprio Autor.

Tabela 3.4: Centro de massa e de rigidez

Pavimento	Mass X (kg)	Mass Y (kg)	XCM (m)	YCM (m)	Cumul. X (kg)	Cumul. Y (kg)	XCCM (m)	YCCM (m)	XCR (m)	YCR (m)
55	171027,85	171027,85	15	14,979	171027,85	171027,85	15	14,979	14,9533	13,0134

Fonte: O Próprio Autor.

Tabela 3.5: Excentricidade entre o centro de massa e de rigidez

ex (m)	ey (m)	Dx (m)	Dy (m)	ex/dx (%)	ey/dy (%)
0,047	1,966	30,00	30,00	0	7

Fonte: O Próprio Autor.

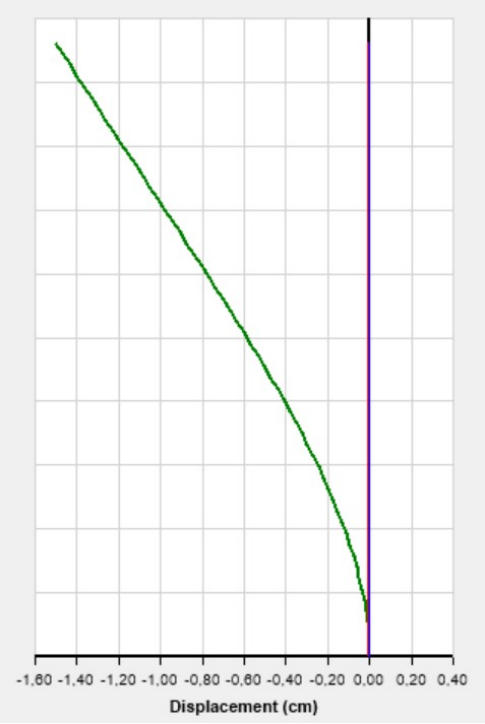


Figura 3.10: Deslocamento máximo produzido pela ação dinâmica do vento

3.3 Modelo Protótipo com Outriggers e Amortecedores FVD 500

Visando melhorar o desempenho da estrutura frente a estabilidade lateral, foi adicionado ao modelo dois níveis (pavimentos 17 e 37) de Outriggers e um conjunto de amortecedores passivos na periferia da estrutura, conforme as Figuras 3.11 e 3.12. Os amortecedores utilizados no modelo estrutural do edifício foram os da fabricante Taylor Devices Inc.[6] (fabricados nos Estados Unidos) do tipo FVD 500[7], segundo o trabalho de Qamaruddin (2016)[9]. Todas as premissas do modelo anterior foram mantidas. A resistência característica do concreto foi a mesma, isto é, $f_{ck} = 50MPa$.

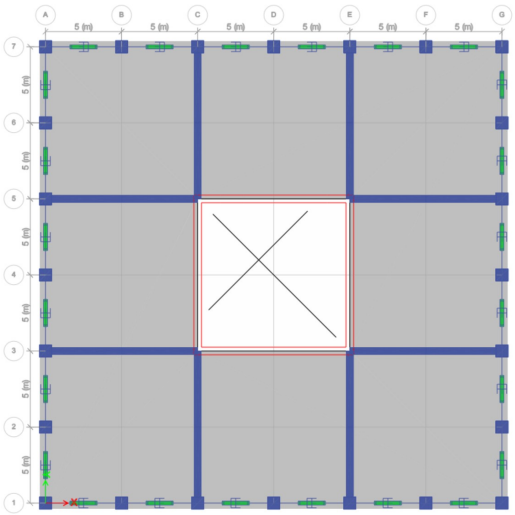


Figura 3.11: Planta Baixa dos pavimentos outriggers

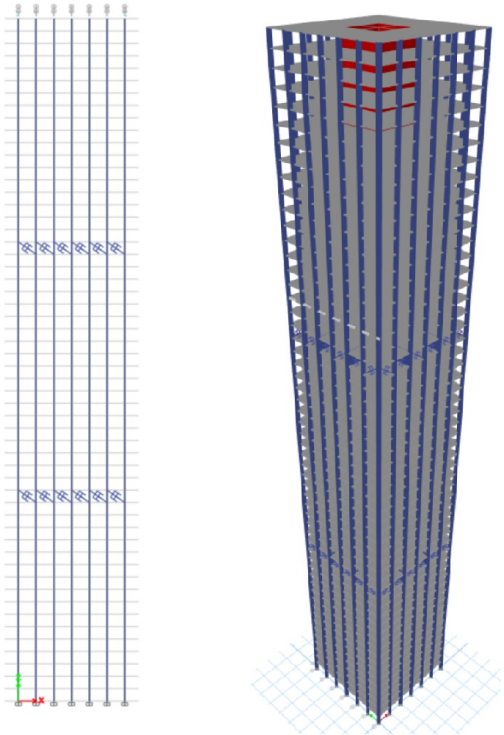


Figura 3.12: Elevação e perspectiva estrutural, respectivamente

[6]https://www.taylordevices.com/about-us/
[7]Fluid viscous dampers - General Guidelines for Engineers

3.3.1 Resultados das Análises com Outriggers e Amortecedores

As mesmas análises foram efetuadas para o segundo modelo proposto, seguindo a mesma sequência de apresentação dos resultados (vide Figuras 3.13, 3.14, 3.15 e 3.16).

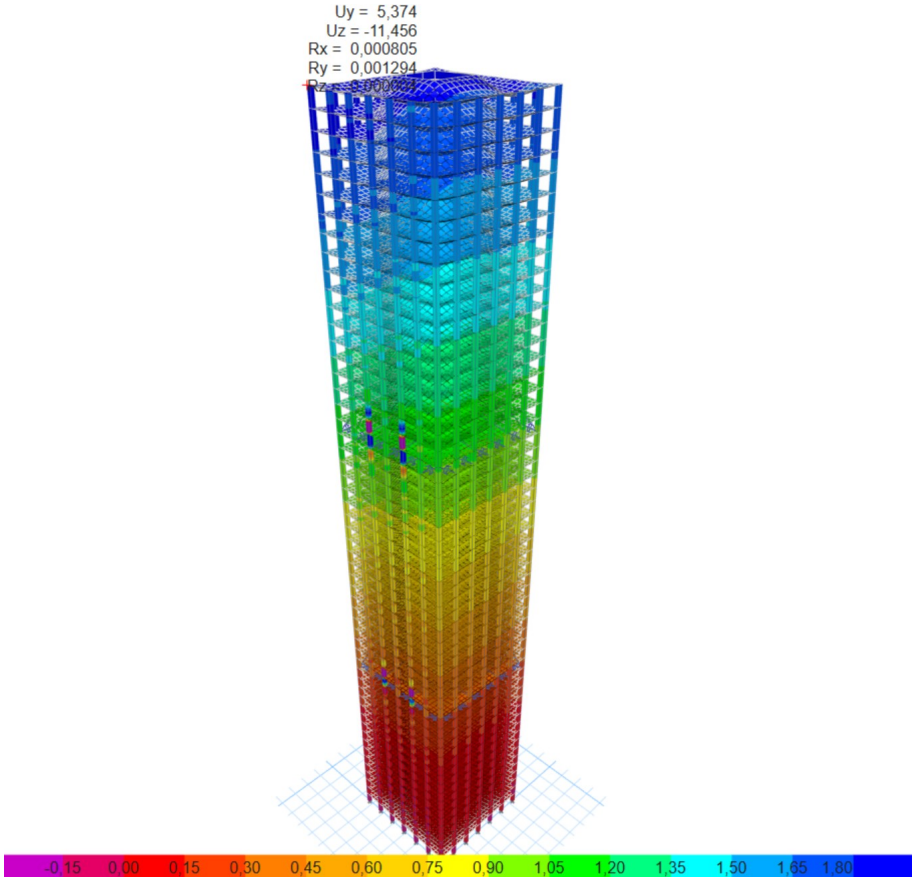


Figura 3.13: Gráfico do deslocamento máximo da estrutura, perspectiva (modelo com outriggers e amortecedores

A análise modal da estrutura com outriggers e amortecedores apresentou os seguintes valores (vide Tabela 3.6):

Tabela 3.6: Análise Modal com outriggers e amortecedores

Casos	Modos	Períodos (s)	Frequência (ciclo/s)	Autovalor (rad/s)	Autovetor (rad/s²)
Modal	1	5,097	0,196	1,2327	1,5194
Modal	2	4,932	0,203	1,2740	1,6229
Modal	3	1.973	0,507	3,1847	10,1424
Modal	4	1.279	0,782	4,9142	24,1489
Modal	5	1.259	0,794	4,9897	24,8968
Modal	6	0,667	1.499	9,4210	88,7549
Modal	7	0,587	1,703	10.6989	114,4659
Modal	8	0,414	2.418	15.1899	230,7341
Modal	9	0,311	3.215	20,2025	408,1422
Ritz-Walk1	1	5,097	0,196	1,2327	1,5194

Fonte: O Próprio Autor.

Na última linha da Tabela 3.6, foi atribuída a carga dinâmica de uma pessoa caminhando sobre o último pavimento do edifício, segundo as recomendações do ASCE 7-16, seguindo as mesmas premissas que no caso anterior. Na Tabela 3.7 são apresentados os valores das acelerações da estrutura mediante o carregamento do vento dinâmico e na Tabela 3.8 o resultado da aceleração da análise de pessoas caminhando sobre a laje.

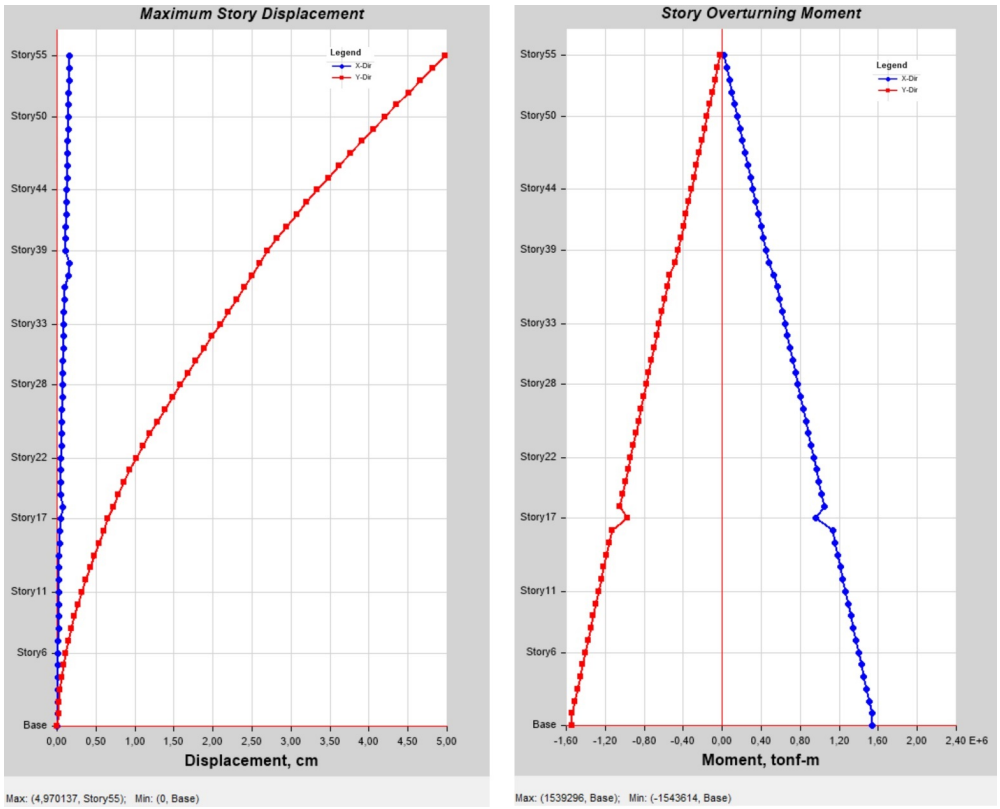


Figura 3.14: Gráfico do deslocamento máximo da estrutura na direção Y, e momento máximo de tombamento, respectivamente (com outriggers)

Tabela 3.7: Análise Espectral do vento com amortecedor e outriggers

Pavimento	Case	Tipo	direção X (10%g)	Direção Y (10%g)	Direção Z (10%g)
55	Vento Expectro	LinResSpec	1,044	0,923	0,144
40	Vento Expectro	LinResSpec	0,574	0,532	0,130
30	Vento Expectro	LinResSpec	0,532	0,442	0,115

Fonte: O Próprio Autor.

Tabela 3.8: Resultado da análise de pessoas caminhando sobre a laje (com outriggers e amortecedores)

Walking Vibration Case	Aceleração Z (10%g)	Pico de Aceleração (10%g)
Walk1	0,2	0,5

Fonte: O Próprio Autor.

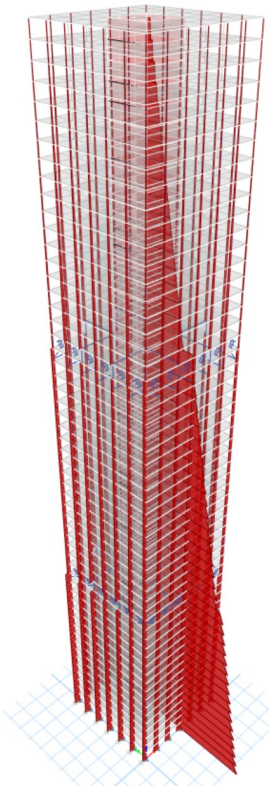


Figura 3.15: Distribuição da força axial nos pilares e núcleo de rigidez (com outriggers)

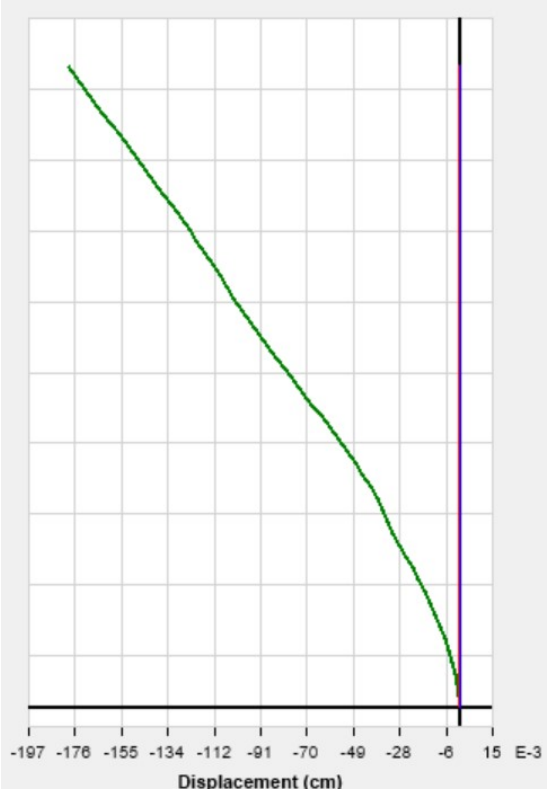


Figura 3.16: Deslocamento máximo produzido pela ação dinâmica do vento (com outriggers e amortecedores)

3.4 Comparação dos Resultados dos Protótipos Apresentados

Os resultados das análises mostraram que houve uma redução significativa em praticamente todos itens verificados. O deslocamento máximo da estrutura apresentou uma redução de 66%, a frequência natural da estrutura passou de 1Hz a partir do modo “6"de vibração, a aceleração máxima da estrutura reduziu 56% e por fim o deslocamento máximo produzido pela ação dinâmica do vento chegou a uma redução de 86%. Portanto, a utilização desses sistemas combinados produzem ótimos resultados para a estabilidade lateral da estrutura.

Referências Bibliográficas

[1] MATIN ALAGHMANDAN, FARID ABDOLHOSSEIN-POUR, and JAMSHID MOHAMMADI. Innovative design method of tall build-ings. *Cutting Edge: 47th InternationalConference of the Architectural Science Association (ANZAScA), Hong Kong. http://anzasca. net/wp-content/uploads/2014/08/27. pdf*, 2013.

[2] William F Baker and James J Pawlikowski. Higher and higher: The evolution of the buttressed core. *Civil Engineering Magazine Archive*, 82(9):58–65, 2012.

[3] Colin Banks, Jenny Burridge, Stefano Cammelli, and Mario A.. Chiorino. *Tall Buildings-Structural Design of Concrete Buildings Up to 300 M Tall: A Working Group of The Concrete Center and Fib Task Group 1.6*. MPA The Concrete Centre and Fédération internationale du béton (fib), 2014.

[4] RB Carneiro. *Controle semi-ativo de vibrações em estruturas utilizando amortecedor magnetorreológico [Semi-active control structures of vibrations involving magneto-rheological dampers]*. PhD thesis, Ph. D. Dissertation. Universidade de Brasilia, Brasília, Brazil, 2009.

[5] Francis DK Ching. *Building construction illustrated*. John Wiley & Sons, 2020.

[6] Feng Fu. *Design and analysis of tall and complex structures*. Butterworth-Heinemann, 2018.

[7] Ali Lame. *Optimization of outrigger structures*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2008.

[8] Harry G Poulos. *Tall building foundation design*. CRC Press, 2017.

[9] Shaik Qamaruddin. Seismic response study of multi-storied reinforced concrete building with fluid viscous dampers. *Chaitanya Bharathi Institute of Technology, India*, 2016.

[10] Pallavi Sao and BHV Pai. Static analysis and optimization of outriggers in a tall building. 2017.

[11] Mark Sarkisian. *Designing tall buildings: Structure as architecture*. Routledge, 2016.

[12] Humberto Lima Soriano. *Introdução à dinâmica das estruturas*. Elsevier Rio de Janeiro, 2014.

[13] Cristiano Augusto Trein. Modelagem dinâmica equivalente de edificios altos submetidos à ação do vento. 2005.