

20° **ENECE**

Encontro Nacional
de Engenharia e
Consultoria Estrutural

A ARTE DA
ENGENHARIA
ESTRUTURAL

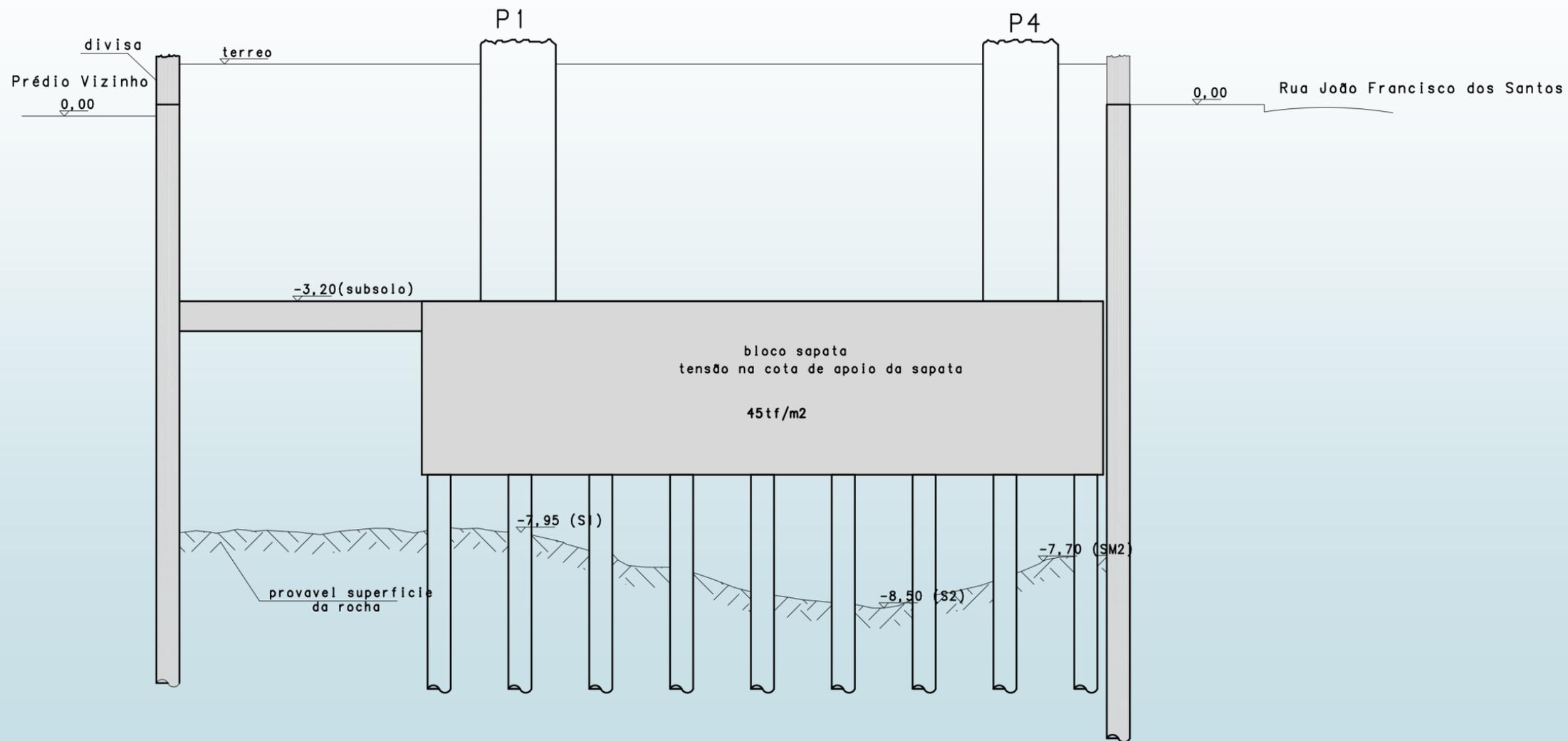


O Projeto Estrutural do Edifício Sky Tower Um Estudo de Caso



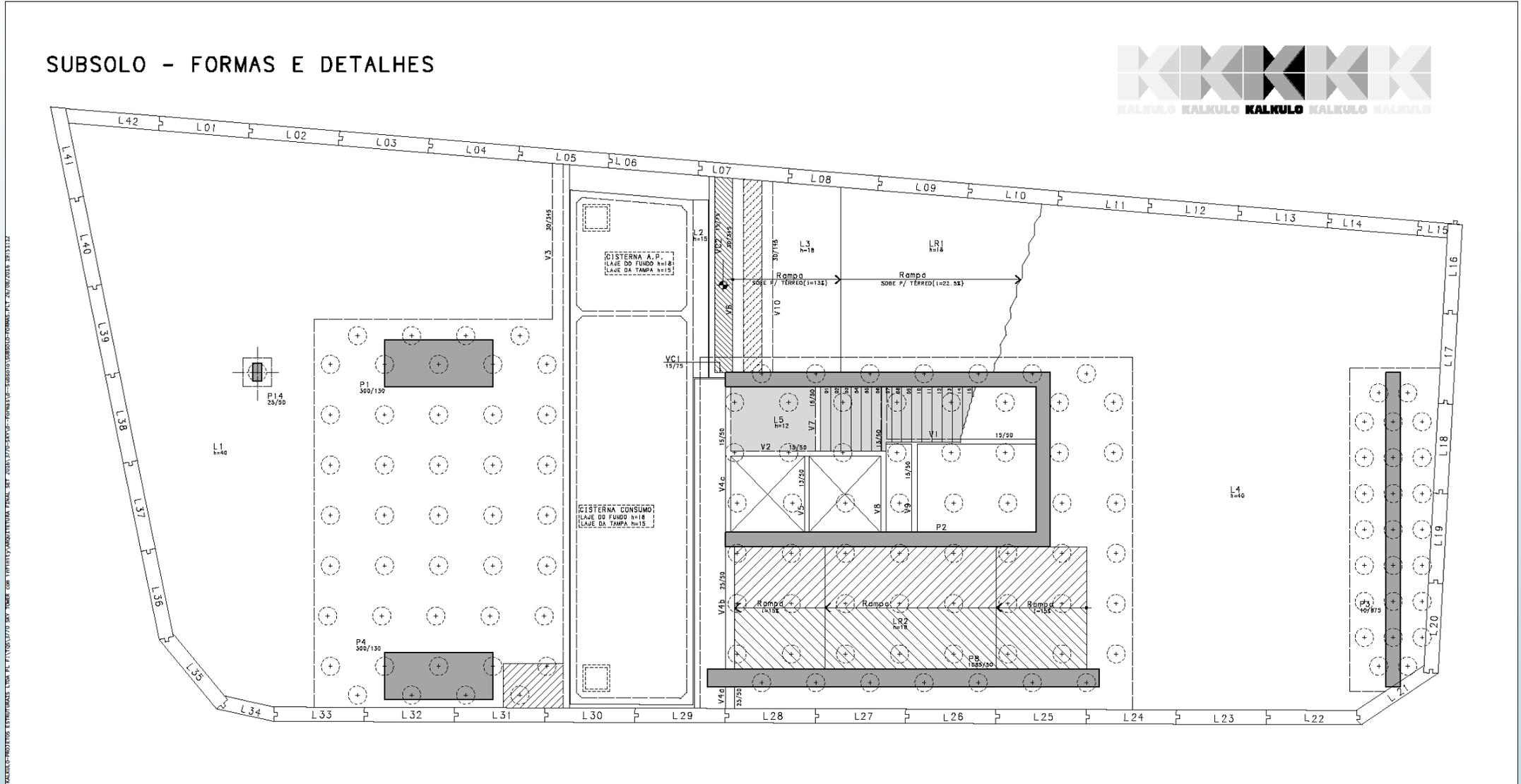
Sky Tower

CORTE





SUBSOLO - FORMAS E DETALHES

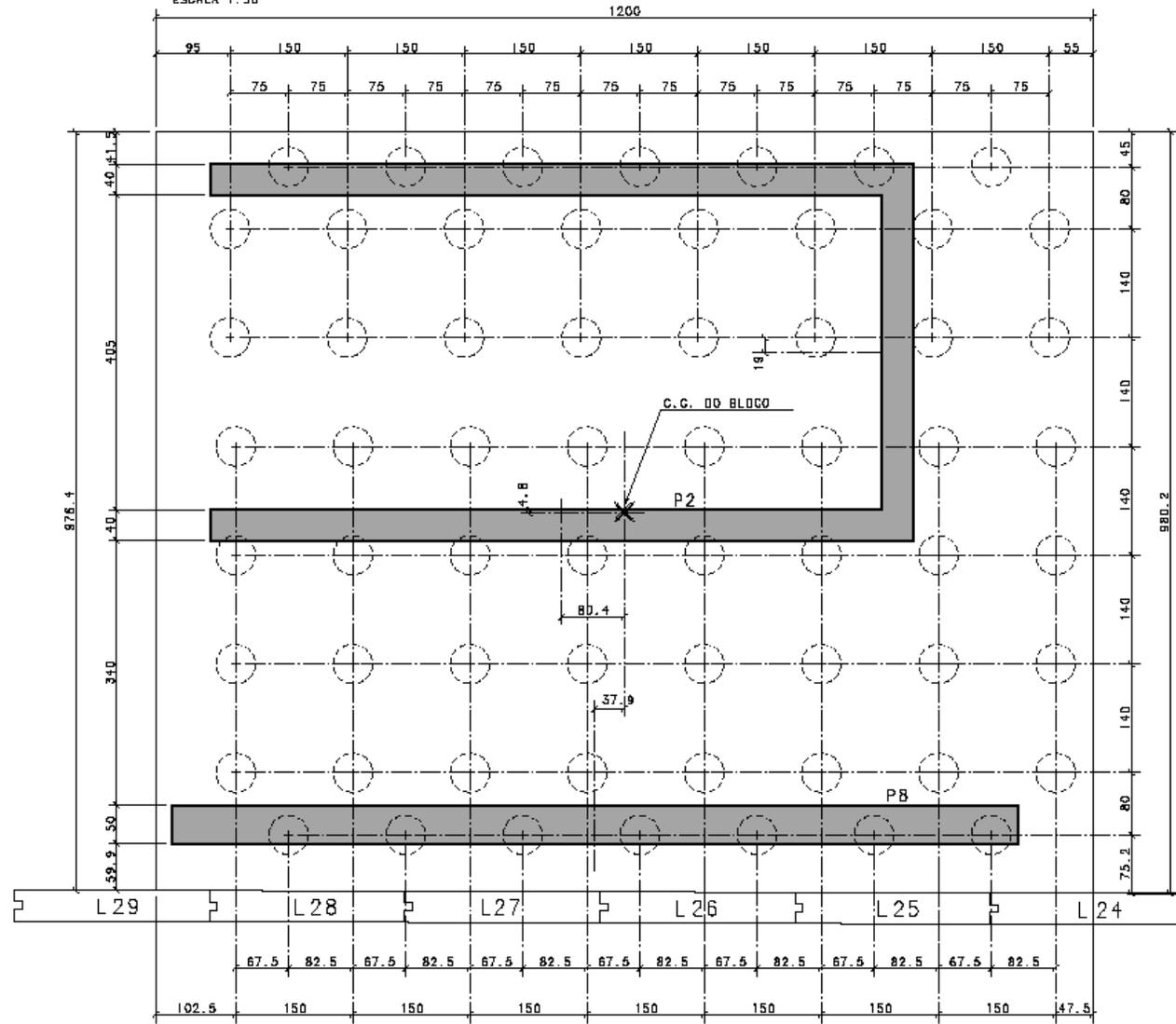


TUDO O PRODUTO ESTRUTURAL TEM QUE TER O SÍMBOLO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL (ABECE) EM TODAS AS PARTES DO PROJETO.



BLOCO P/ (P2+P8)

-FORMA-
ESCALA 1:50



KALKULO-PROJETOS ESTRUTURAIIS LTDA PL F:\LIVRO\BENMATO\3770-SKY\C--Armaduras\la-BLOCOS\BLOCO (P2+P8)-P14\3770 - FORMA BLOCO P2+P8.PLT 12/10/2016 14:58:55





Efeitos Dinâmicos Provocados pelo Vento



- Altura do Edifício Sky Tower: 120 m
- Menor Largura média: 10 m
- Relação altura/largura: 12
- Frequência natural da estrutura: 0,225 Hz



- **NBR-6123:**
 - 1.2 Esta Norma não se aplica a edificações de formas, dimensões ou localização fora do comum, casos estes em que estudos especiais devem ser feitos para determinar as forças atuantes do vento e seus efeitos. Resultados experimentais obtidos em túnel de vento, com simulação das principais características do vento natural, podem ser usados em substituição do recurso aos coeficientes constantes nesta Norma.





- 9.1 No vento natural, o módulo e a orientação da velocidade instantânea do ar apresentam flutuações em torno da velocidade média, designadas por rajadas.
- edificações com período fundamental superior a 1 s (ou frequência fundamental menor que 1 Hz), em particular aquelas fracamente amortecidas, podem apresentar importante resposta flutuante na direção do vento médio.....



- **Critérios do CTBUH - (Council on Tall Buildings and Urban Habitat-Illinois Institute of Technology)**

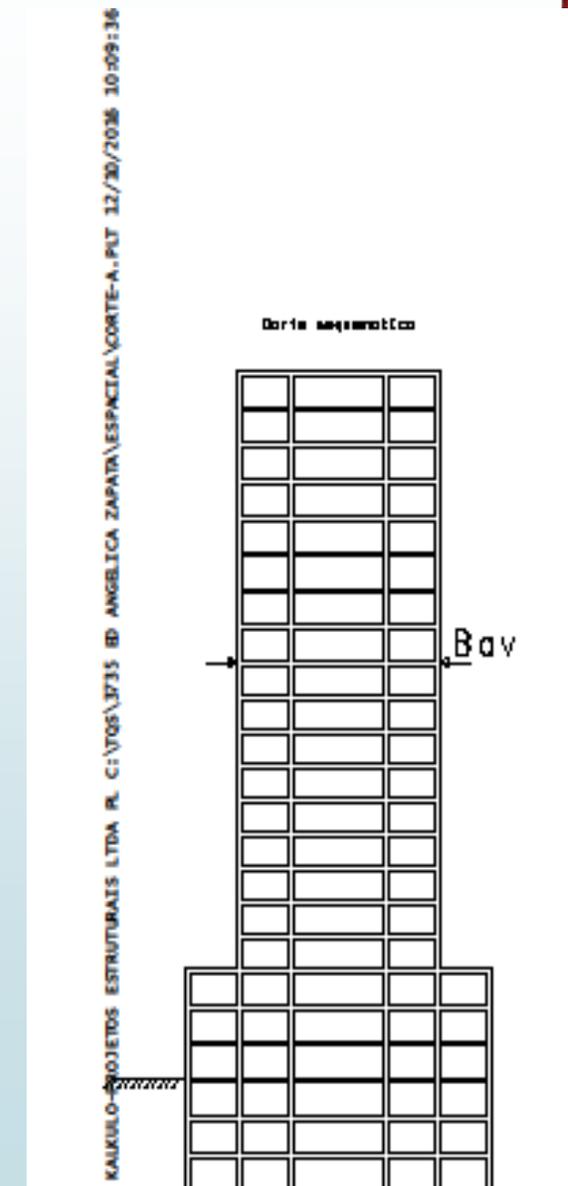
São critérios para se definir quando um edifício alto deve ser analisado mediante ensaios em túnel de vento:

- Todos os edifícios com altura superior a 120m;



-Todos os edifícios cuja altura total seja maior que 4 vezes a menor largura média B_{av} , correspondente aos pavimentos da metade superior da altura do edifício;

-Todos os edifícios nos quais a frequência fundamental seja menor que 0,25Hz (ou período fundamental maior que 4s).







- **Forças devidas ao vento segundo a NBR-6123**

- **Forças estáticas (item 4.2):**

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (\text{m/s}) \Rightarrow \text{itens 5.1 ao 5.4}$$

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (\text{N/m}^2)$$

$$F_a = C_a q A_e \quad (\text{N}) \Rightarrow \text{item 6.3.1 ou 6.5.3}$$

Velocidade básica do vento: é a velocidade de uma rajada de 3s, excedida em média uma vez em 50anos, a 10m acima do terreno, em campo aberto e plano.

excentricidades das forças de arrasto => item 6.6



- Resposta dinâmica do vento (Resposta Média + Resposta Flutuante):
 - Na direção do vento :
 - Modelo Contínuo Simplificado => itens 9.2.2.1 e 9.3.1
 - Modelo Discreto => itens 9.2.2.2 e 9.3.2
 - Na direção transversal ao vento => item 9.4



- **Modelo Contínuo Simplificado**

- **Velocidade de projeto:** corresponde à velocidade média sobre 10 min a 10 m de altura sobre o solo, em terreno de categoria II.

$$V_p = 0,69 V_0 S_1 S_3$$

- **Pressão Dinâmica do Vento**

$$q(z) = q_0 b^2 \left[\left(\frac{z}{z_r} \right)^{2p} + \left(\frac{h}{z_r} \right)^p \left(\frac{z}{h} \right)^\gamma \frac{1 + 2\gamma}{1 + \gamma + p} \xi \right]$$



- Estudos elaborados com o modelo contínuo simplificado, do item 9.2.2.1 da NBR-6123, resultaram:

- Coeficiente de “Amplificação Dinâmica”:

$$CAD = M_{VD} / M_{VE} = \mathbf{1,21} \text{ (ELU } \Rightarrow \text{ período de recorrência de 50 anos)}$$

- Aceleração no topo do edifício:

$$a = (2\pi f)^2 u = (2\pi 0,225)^2 \times 0,1016 = 0,203 \text{ m/s}^2 = 0,203/9,81 * 1000 =$$

20,7 mil-g

(ELS \Rightarrow período de recorrência de 10 anos)



- Deslocamento horizontal máximo no topo do Edifício:

$$u_{\text{máx}} = 0,208 \text{ m} = 20,8 \text{ cm}$$

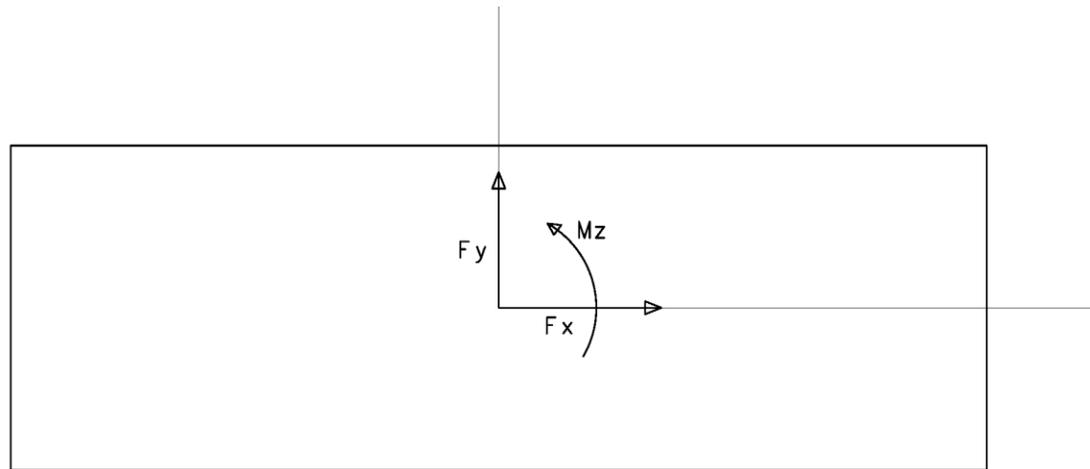
$$u_{\text{lim}} = H/500 = 120/500 = 0,24 \text{ m} = 24 \text{ cm}$$

$$u_{\text{máx}} < u_{\text{lim}}$$

(ELS => Período de recorrência de 10 anos)



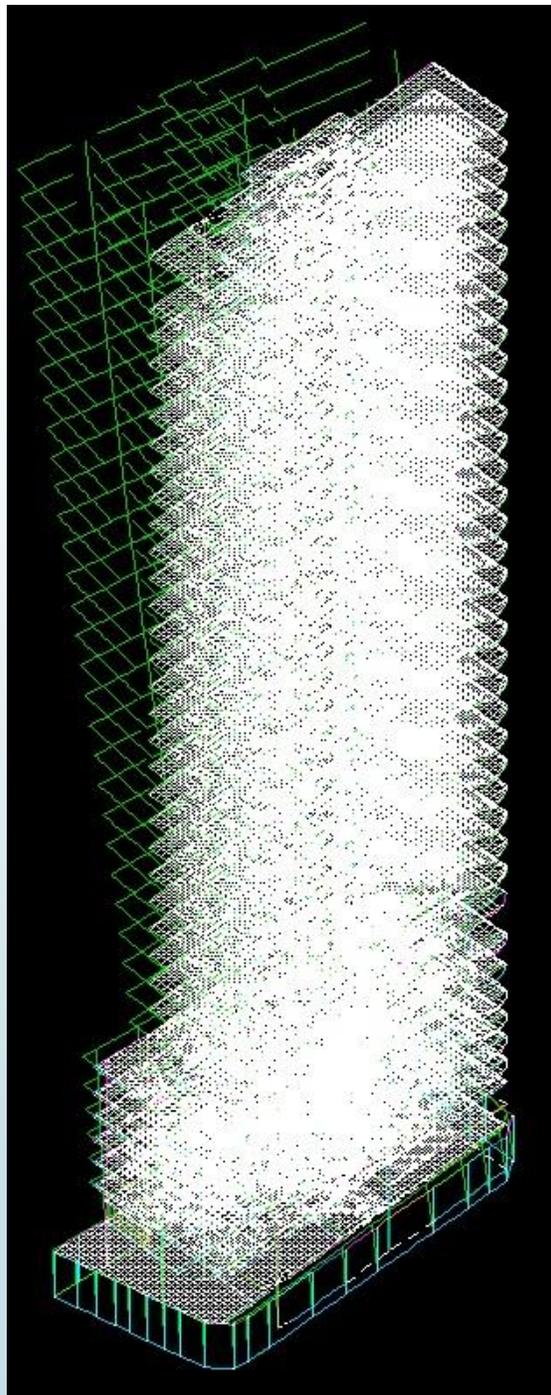
- **Resultados obtidos com a análise dinâmica efetuada pela STO em parceria com a BRE, que realizou os ensaios/estudos no túnel de vento:**
 - **Cargas do vento para o período de retorno de 50 anos (ELU):**
 F_x , F_y e M_z em cada piso do edifício, para 24 direções do vento (de 15 em 15 graus), para o dimensionamento da estrutura.

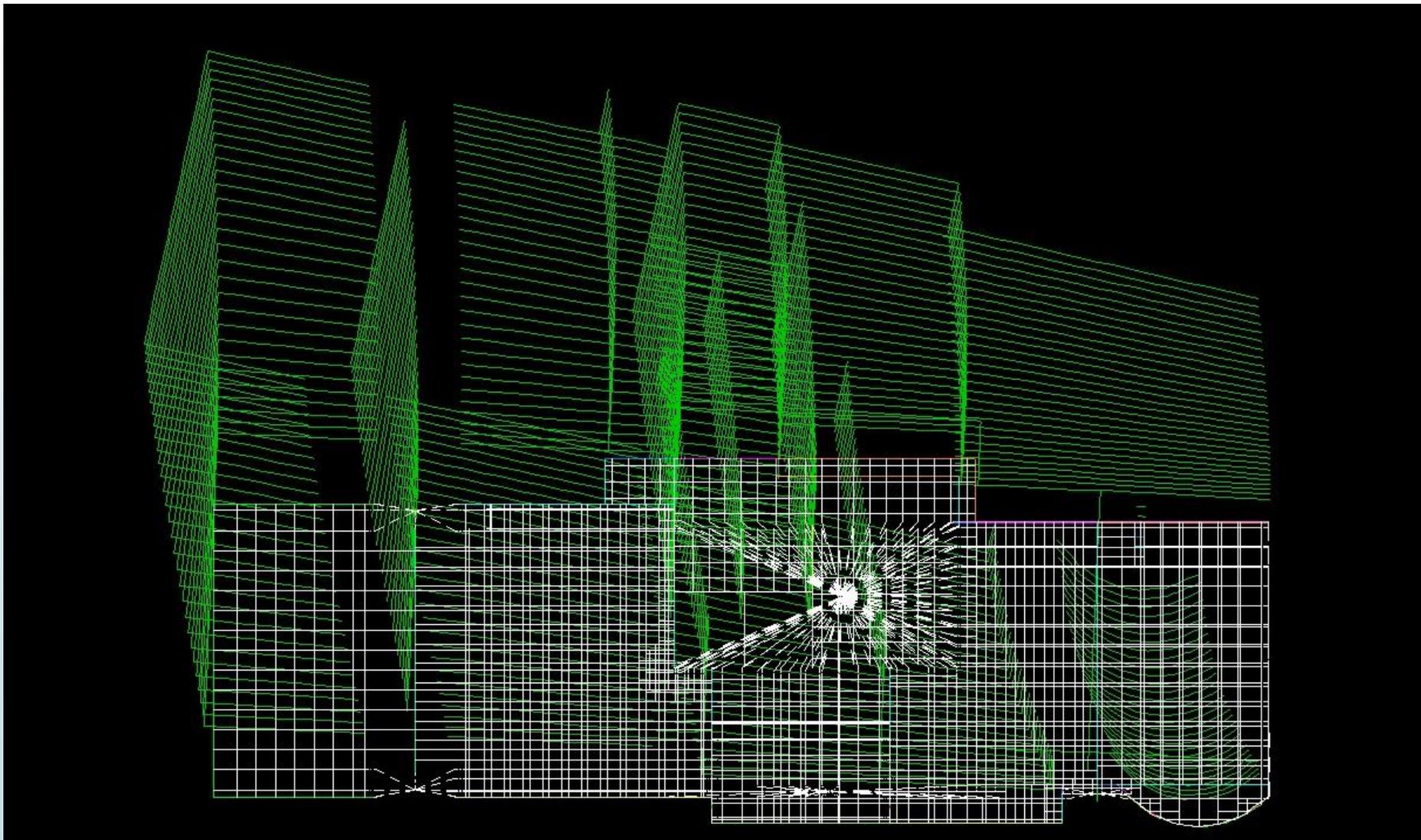


1. Estudo de Engenharia de Estruturas, Vol. 4, 11/2012 (2012) de autoria de ABCECE/ABCECE/ABCECE, ISBN: 978-85-921008-0-7 (2012)

-Condições de conforto dos ocupantes do edifício (ELS):

Amplitude máxima da aceleração no topo do edifício, para o período de retorno de 10 anos, igual a **16,4 mili-g (ELS)**.







Acceleration level	Human perception of movement
< 5 milli-g	Imperceptible
5 milli-g to 15 milli-g	Perceptible
15 milli-g to 50 milli-g	Annoying
50 milli-g to 150 milli-g	Very annoying
> 150 milli-g	Intolerable

Tabela 1 – Human Perception of Building Vibration Due do Wind – CEB 209

“Este nível de aceleração está previsto nos cantos mais externos do topo da torre. Nos locais mais próximos ao centro de torção e nos pavimentos mais abaixo os níveis de aceleração serão menores.

Para um período de retorno de 10 anos (que é uma referência muito usada neste tipo de estudo) em relação aos níveis de aceleração, o Edifício Sky Tower apresenta índices de conforto de ocupação adequados.”



- Deslocamento horizontal máximo no topo do edifício (período de retorno de 10 anos):

$$u_{\text{máx}} = 19,6 \text{ cm}$$

$$u_{\text{lim}} = 24 \text{ cm}$$

$$u_{\text{máx}} < u_{\text{lim}}$$



ANÁLISE DA ESTRUTURA DE EDIFÍCIOS ALTOS

Na análise da estrutura de edifícios altos é importante a consideração dos seguintes efeitos:

- Não-linearidade geométrica ou efeitos de 2ª ordem;
- Os efeitos dinâmicos do vento;
- Efeitos da ação sísmica, quando for o caso;
- A deformação longitudinal dos pilares;
- Carregamento incremental de acordo com as etapas de construção;
- Recalques diferenciais da fundação.



RESUMO QUANTITATIVO DOS MATERIAIS

- Área Construída Total: 14.123,94 m²
- Concreto
 - fck=45 Mpa
 - Volume: 6.834,90 m³
- Aço
 - CA50/CA60: 678.391 kg
 - CP190 RB: 17.429 kg
- Formas: 32.065 m²

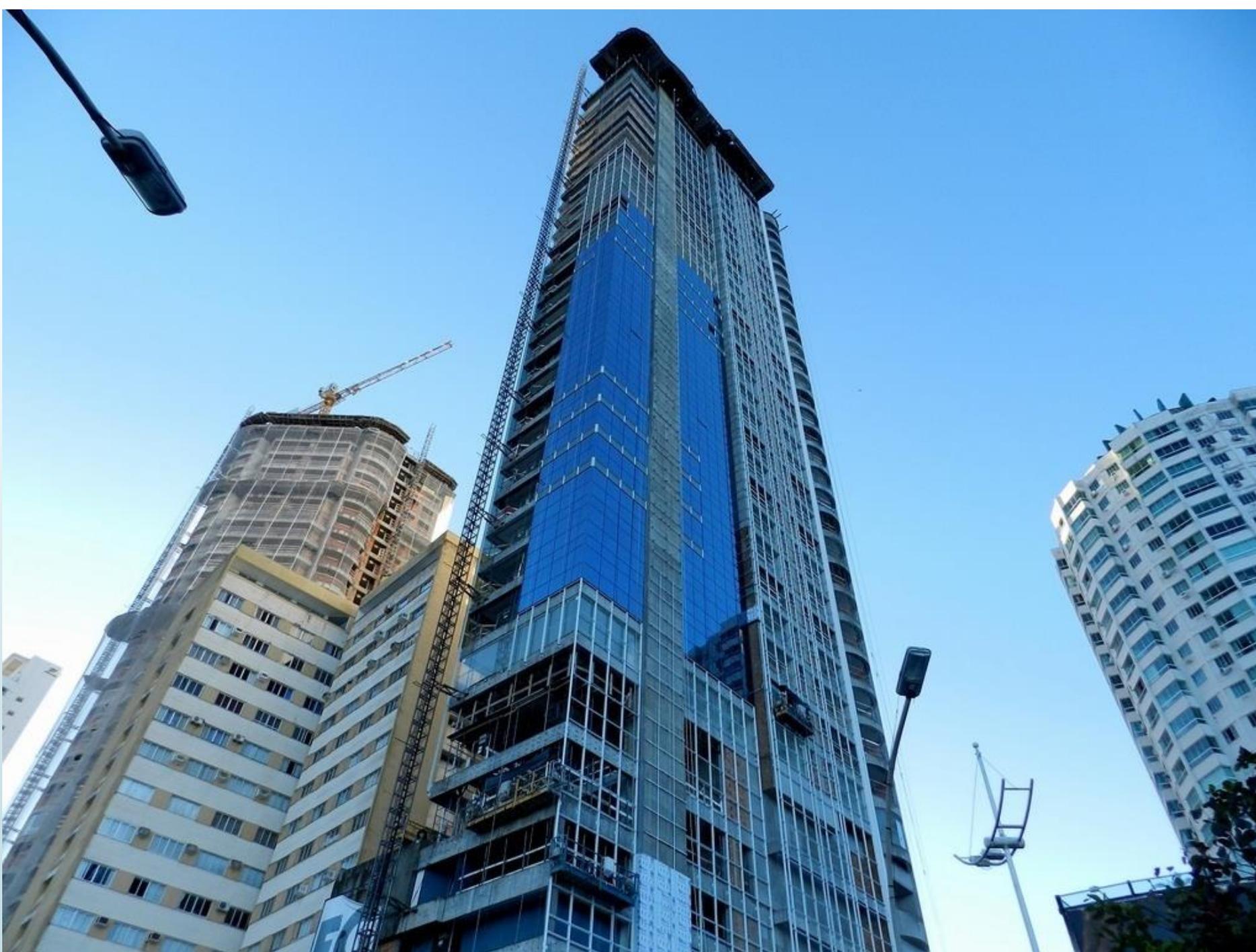


- Formas Plásticas
 - Forma inteira: 3.181 unidades
 - Meia forma: 470 unidades
- Blocos de EPS
 - 50x50x30: 13.505 unidades
 - 50x50x25: 1.355 unidades

Material	Consumo	Consumo/A. Construída
Concreto C45	6.834,90 m ³	0,484 m ³ /m ²
Aço CA50/CA60	678.391 kg	48 kg/m ²
Aço CP190 RB	17.429 kg	1,23 kg/m ²
Formas	32.065 m ²	2,27 m ² /m ²
Formas Plásticas	3.416 uns	0,24 un/m ²
EPS 50x50x30 e 50x50x25	1.097,6 m ³	0,078 m ³ /m ²



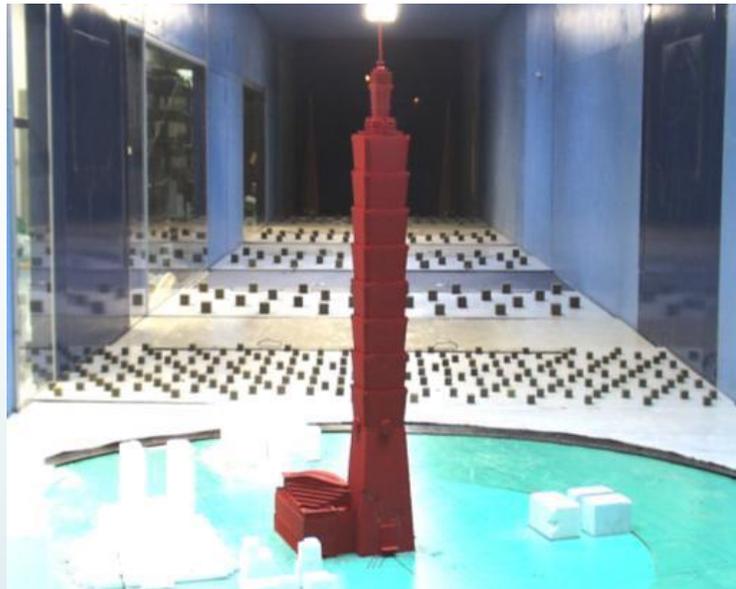
ASSOCIAÇÃO
BRASILEIRA DE
ENGENHARIA E
CONSULTORIA
ESTRUTURAL



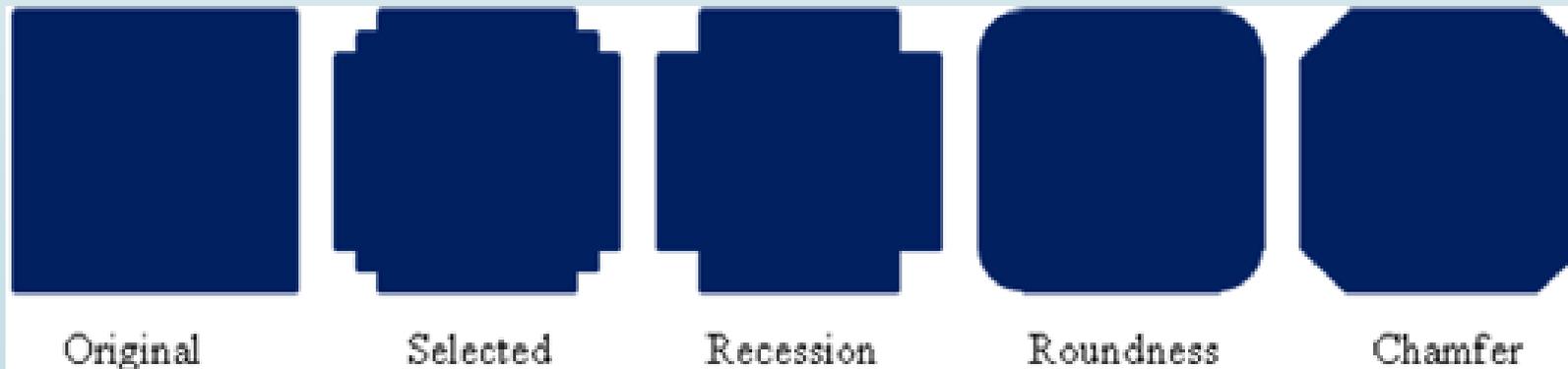


Considerações Finais

- É importante que o empreendedor contrate a equipe técnica desde o início dos trabalhos.
- O arquiteto, o engenheiro estrutural e o consultor de dinâmica devem trabalhar juntos desde o início do projeto arquitetônico.
- A depender da altura e esbeltez da torre, o sistema estrutural deve ser idealizado até mesmo antes da definição da arquitetura.



- A forma da torre pode contribuir muito para minimizar os efeitos do vento. Este assunto pode ser estudado com o auxílio do túnel de vento.

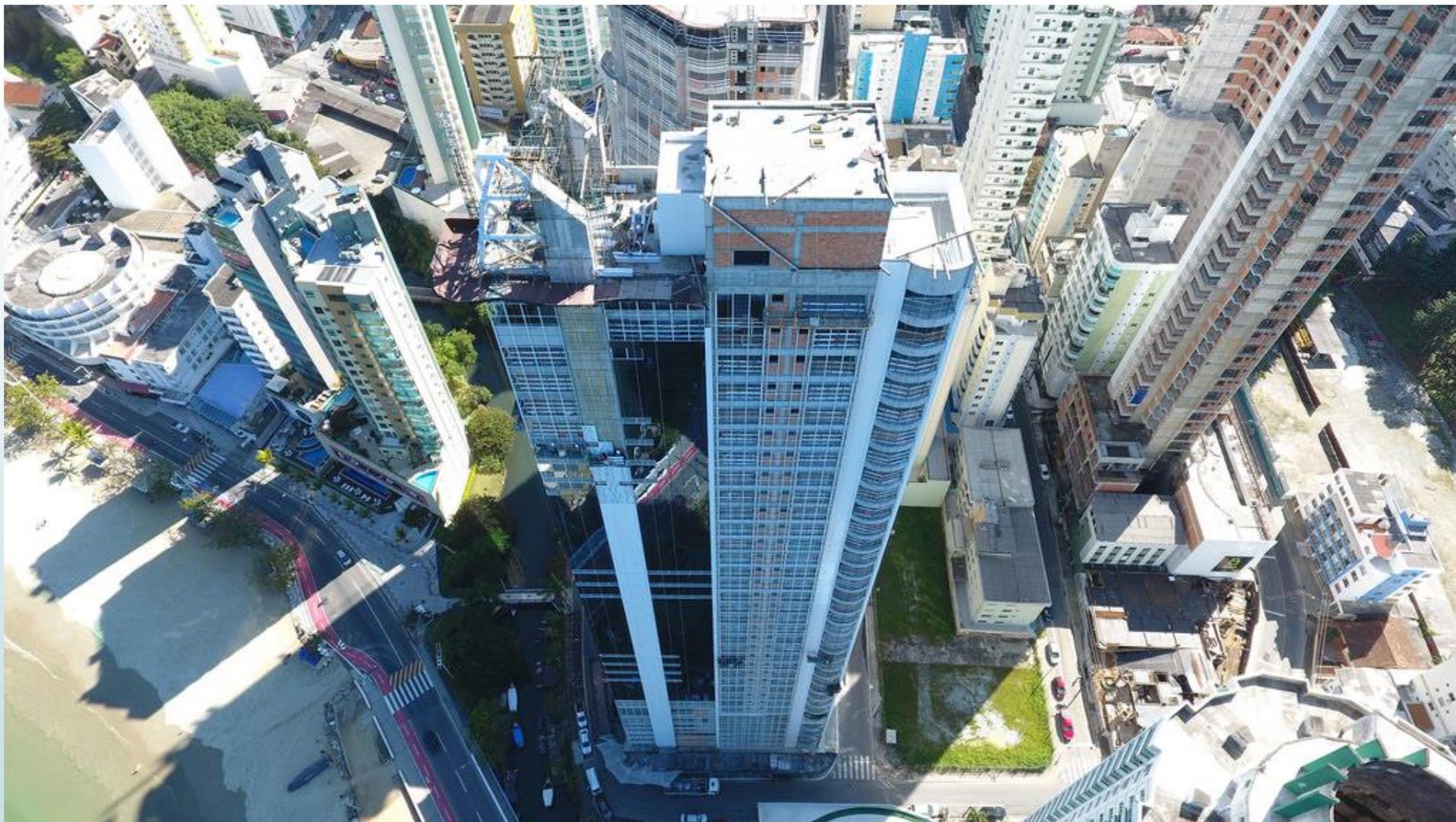




- Ao definir a estrutura é importante se lembrar que a sua frequência fundamental é diretamente proporcional à raiz quadrada de sua rigidez e inversamente proporcional à raiz quadrada de sua massa.
- Os pilares devem ser projetados de modo a minimizar a torção da torre sob a ação do vento.
 - Posicionamento dos pilares de forma a resultar que o centro de torção esteja próximo do centro geométrico.
 - Posicionamento dos pilares de modo a resultar uma maior rigidez à torção => pilares mais afastados do centro de torção.















Equipe Técnica

- **Projeto Arquitetônico:**

- LDD Arquitetura Contemporânea
 - Arq. Deise Soares da Silva
 - Eng. Danusa Soares da Silva

- **Projeto Geotécnico de Fundação:**

- EMEPÊ Fundações
 - Eng. Celso Prates
 - Eng. Amauri Malim



- **Projeto Estrutural:**

- KALKULO Projetos Estruturais Ltda.
 - Eng. Antonio Stramandinoli Junior
 - Eng. Luiz Carlos Giroldo
 - Eng. Mauro Tetsuo Kawai
 - Eng. Roberto Stramandinoli
 - Eng. Eliane Lima de Oliveira
 - Eng. João Paulo Gribogy
 - Eng. Luise Caroline Daniel Mielke

- **Consultoria em Dinâmica:**

- STO – Análise e Soluções Estruturais Ltda.
 - Eng. Sérgio Stolovas
- BRE – Building Research Establishment Ltd.
 - Eng. Gordon Breeze



- **Projeto Preventivo-Hidrosanitário-Elétrico-Telecomunicação-Pára Raio:**

- FRANZMANN Engenharia e Consultoria
 - Eng. Bruno Ricardo Franzmann
 - Eng. Fernando Garcia Ribeiro

- **Construção:**

- FG Empreendimentos
 - Eng. Gustavo Simas (execução de obras)
 - Eng. Victor Kussonoki (execução de obras)
 - Eng. Jhoni Mazotine (gestão de projetos)

- **Execução da Protensão:**

- IMPACTO SUL Protensão
 - Eng. Ricardo Loiacono



OBRIGADO!

