

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

HENRIQUE CHIARADIA FALCÃO CURCI

JESSICA MAYUMI SAKAI

LAÍS INOUE KURUSU

RAFAEL DE ALMEIDA CARDOSO SANDOVAL

ESTUDO DA AÇÃO DO VENTO EM UM EDIFÍCIO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS.
AVALIAÇÃO DA RESPOSTA ESTRUTURAL A PARTIR DE ENSAIOS DE TÚNEL DE
VENTO E PROGRAMA COMERCIAL.

SÃO PAULO

2017

HENRIQUE CHIARADIA FALCÃO CURCI

JESSICA MAYUMI SAKAI

LAÍS INOUE KURUSU

RAFAEL DE ALMEIDA CARDOSO SANDOVAL

ESTUDO DA AÇÃO DO VENTO EM UM EDIFÍCIO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS.

AVALIAÇÃO DA RESPOSTA ESTRUTURAL A PARTIR DE ENSAIOS DE TÚNEL DE
VENTO E PROGRAMA COMERCIAL.

Trabalho de Formatura apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
de São Paulo como requisito à obtenção do
título do grau de Engenheiro(a) Civil

Área de Concentração: Engenharia Civil

Orientador: Prof. Doutor Henrique Campelo Gomes

SÃO PAULO

2017

Catálogo-na-publicação

CURCI, HENRIQUE C. F.

Estudo da ação do vento em um edifício de múltiplos pavimentos.
Avaliação da resposta estrutural a partir de ensaios de túnel de vento e
programa comercial. / H. C. F. CURCI, J. M. SAKAI, L. I. KURUSU, R. A. C.
SANDOVAL -- São Paulo, 2017.
125 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

1.Estruturas de concreto 2.Ação do vento nas estruturas 3.Túnel de vento
4.Normas técnicas 5.Dimensionamento de estruturas I.Universidade de São
Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e
Geotécnica II.t. III.SAKAI, JESSICA M. IV.KURUSU, LAÍS I. V.SANDOVAL,
RAFAEL A. C.

*“Outras vezes ouço passar o vento,
E acho que só para ouvir passar o vento vale a pena ter nascido.”*

Alberto Caeiro

AGRADECIMENTOS

Agradecemos,

ao Prof. Doutor Henrique Campelo Gomes, pela orientação e suporte ao longo do trabalho, além do estímulo ao estudo da engenharia do vento com a sugestão do tema;

ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, representadas pelos pesquisadores Dr. Gilder Nader e Gabriel Borelli Martins, cujo suporte, atenção e apoio ao desenvolvimento desse trabalho foram de valor inestimável e fundamental para o sucesso do mesmo;

à TQS, representada pelos Engenheiros Rodrigo Nurnberg e Dr. Sérgio Ricardo Pinheiro Medeiros, por gentilmente nos terem recebido na visita à empresa e contribuído com ideias que nos ajudaram no desenvolvimento do trabalho, além do fornecimento da licença de uso do software;

à França e Associados, representada pelo Engenheiro Dr. Ricardo França, que gentilmente autorizou e forneceu materiais que permitiram que o estudo de caso fosse baseado no Eldorado Business Tower, projeto estrutural de sua autoria;

aos Professores Guilherme Rosa Franzini, Claudius de Sousa Barbosa e Leila C. Meneghetti Valverde, pela ajuda em muitos momentos importantes do desenvolvimento desse projeto;

aos laboratórios Inovalab@Poli e LEM – Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais, pelo espaço e equipamentos disponibilizados para o desenvolvimento e armazenamento do modelo físico do edifício;

e aos nossos colegas da Poli e a todos amigos que tornaram melhor cada momento vivido nessa instituição.

RESUMO

O estudo da ação do vento em construções é de grande importância para a engenharia civil. Com a tendência à verticalização das cidades e à construção de edifícios cada vez mais altos, esbeltos e de seções complexas, o carregamento de vento se torna muito mais significativo e de difícil análise frente à norma. Visando melhor compreensão de um tema pouco explorado na graduação, o trabalho propõe estudar a resposta estrutural ao vento de um edifício de múltiplos pavimentos, o Eldorado Business Tower, em São Paulo, utilizando resultados obtidos em ensaios em túnel de vento e software comercial. Com apoio da mecânica dos fluidos, são apresentados conceitos atrelados à engenharia do vento e à normalização vigente no Brasil, a NBR6123:1988, que recomenda o uso de ensaios para melhor compreensão do comportamento dessas estruturas particulares. O projeto também compreende o desenvolvimento e construção do modelo físico para ser ensaiado no Túnel de Vento do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, mostrando as particularidades que envolvem os processos técnicos de produção desse modelo de estudo. A modelagem computacional do edifício foi implantada no software comercial TQS e os resultados comparados com os da norma brasileira.

Palavras-Chave: Vento, Edifício, Projeto Estrutural, Túnel de Vento, TQS, ABNT NBR 6123:1988

ABSTRACT

The study of wind action on buildings is of great importance for civil engineering. With the trend towards the verticalization of cities and the construction of higher, slenderer and with complex sections buildings, the wind load becomes much more significant and difficult to analyze based only on design Codes. Aiming at a better understanding of an unexplored undergraduate subject, the project proposes to study the structural response to the wind of a multi-storey building, the Eldorado Business Tower, in São Paulo, using results obtained from wind tunnel trials and commercial software. With the support of fluid mechanics, this project presents concepts related to wind engineering and Brazilian Design Code, NBR6123 / 1988, which recommends the use of tests to better understand the behavior of these particular structures. The project also includes the development and construction of the physical model for tests in the IPT's Wind Tunnel (Institute of Technological Research of São Paulo), showing the particularities that involve the technical processes of production of this study model. The computational model was made with the brazilian commercial software TQS and its results compared with the actual Design Codes.

Keywords: Wind, Tower, Wind Tunnel, Structural Design, TQS, ABNT NBR6123:1988

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Orla de Balneário Camboriú.....	19
Figura 2 – São Paulo Corporate Tower, exemplo de desafio arquitetônico.	19
Figura 3 - Vista aérea da Avenida Paulista, São Paulo.	19
Figura 4 - Modelo físico de edifício, com representação do entorno.	19
Figura 5 - Estragos causados por Tornado em SC.	20
Figura 6 - Estágios de desenvolvimento de Tormenta TS.	21
Figura 7 - Edifício Eldorado Business Tower, corte em elevação e planta.	22
Figura 8 - Escoamento em torno de cilindros retangulares	27
Figura 9 - Forças de pressão e cisalhamento em um elemento.	28
Figura 10 - Exemplo de coeficientes de arrasto em diferentes corpos.	29
Figura 11 - Isopletas de velocidade básica do vento com V_0 em m/s.	35
Figura 12 - Alteração das linhas de fluxo em função da topografia do terreno	36
Figura 13 - Foto ilustrativa de terreno plano.....	37
Figura 14 - Fator topográfico $S_1(z)$	37
Figura 15 - Foto ilustrativa de talude.....	38
Figura 16 - Foto ilustrativa de vale profundo	39
Figura 17 - Perfis de velocidade do vento em km/h.	40
Figura 18 - Foto ilustrativa de mar	41
Figura 19 - Foto ilustrativa de lago.....	41
Figura 20 - Foto ilustrativa de rio	41
Figura 21 - Foto ilustrativa de pradaria	41
Figura 22 - Foto ilustrativa de fazendas sem muro	41
Figura 23 - Foto ilustrativa de terrenos ondulados com edificações esparsas.....	42
Figura 24 - Foto ilustrativa de quebra vento de árvores.	42
Figura 25 - Foto ilustrativa de subúrbio.	42
Figura 26 - Foto ilustrativa de zona de parques	42
Figura 27 - Foto ilustrativa de áreas industriais.....	42
Figura 28 - Foto ilustrativa de complexo industrial.	43
Figura 29 - Foto ilustrativa de centros de grandes cidades.	43
Figura 30 - Foto ilustrativa de floresta com árvores altas.	43
Figura 31 – Execução da fundação em sapata de um pilar do núcleo.	50
Figura 32 - Vista do Edifício Eldorado Business Tower, com destaque para o Jockey Club e entorno.	51

Figura 33 - Edifício Unibanco, Condomínio Nações Unidas e Eldorado Business Tower, respectivamente.	51
Figura 34 – Últimas fases da construção dos pavimentos superiores do Eldorado Business Tower.	51
Figura 35 - Vista da Região de interesse, com edifícios indicados.....	52
Figura 36 - Folhas da Cortadora a Laser.	53
Figura 37 - Cortadora a laser disponível no Inovalab@Poli	54
Figura 38 - Montagem do modelo físico a partir das chapas cortadas	56
Figura 39 – Faces montadas e colagem final.....	56
Figura 40 - Esquema simplificado do Túnel de Vento do IPT.....	57
Figura 41 - Indicação dos elementos de prevenção de turbulência no túnel de vento.	58
Figura 42 - Aparatos de simulação do ambiente e do vento na câmara de ensaio.....	59
Figura 43 – Referência de ângulo inicial de incidência de vento para o ensaio.....	61
Figura 44 – Electronic Pressure Scanner.....	62
Figura 45 - Detalhe do vão no centro da bandeja giratória.....	63
Figura 46 – Fixação do modelo no centro da bandeja giratória.	63
Figura 47 – Uso de cantoneiras na base do modelo.	63
Figura 48 - Modelo montado e posicionado para início do ensaio.....	63
Figura 49 – Exemplo de modelo carregado mobilizando deslocamentos na chapa base.	63
Figura 50 - Processo de modelagem 3D do Eldorado Business Tower no SolidWorks.....	66
Figura 51 - Vista 1	68
Figura 52 - Vista 2	68
Figura 53 - Vento incidente a 0 grau - Vista 1	69
Figura 54 - Vento incidente a 0 grau - Vista 2	69
Figura 55 - Vento incidente a 45 graus - Vista 1	69
Figura 56 - Vento incidente a 45 graus - Vista 2	69
Figura 57 - Vento incidente a 90 graus - Vista 1	70
Figura 58 - Vento incidente a 90 graus - Vista 2	70
Figura 59 - Vento incidente a 135 graus - Vista 1	70
Figura 60 - Vento incidente a 135 graus - Vista 2	70
Figura 61 - Vento incidente a 180 graus - Vista 1	71
Figura 62 - Vento incidente a 180 graus - Vista 2	71
Figura 63 - Vento incidente a 225 graus - Vista 1	71
Figura 64 - Vento incidente a 225 graus - Vista 2	71
Figura 65 - Vento incidente a 270 graus - Vista 1	72
Figura 66 - Vento incidente a 270 graus - Vista 2	72

Figura 67 - Vento incidente a 315 graus - Vista 1	72
Figura 68 - Vento incidente a 315 graus - Vista 2	72
Figura 69 - Padrão de distribuição de pressões para edifício de planta retangular	73
Figura 70 (Figura 11 adaptada) - Isopletas de velocidade básica do vento com V_0 em m/s.....	74
Figura 71 - Posição do Edifício Eldorado Business Tower	74
Figura 72 - Imagem do relevo do entorno do Eldorado Business Tower	75
Figura 73 - Eixos de referência para esforços calculados	78
Figura 74 - Indicação dos elementos e da obtenção das pressões médias atuantes ..	81
Figura 75 - Barra engastada com esforço aplicado.....	82
Figura 76 – Interfaces básicas do software com sistemas do TQS.	87
Figura 77 – Critério geral de pórticos quanto à incidência de carga de vento.	89
Figura 78 – Adoção dos dados nos elementos estruturais.....	90
Figura 79 – Elevação do edifício com indicação do pé-direito e número de repetição dos andares (em parênteses).....	92
Figura 80 – Exemplo de planta utilizada como referência.	93
Figura 81 – Exemplo de planta de formas lançada a partir da referência.....	94
Figura 82 – Entrada de dados de vento – manual (a) e por tabelas de túnel de vento (b)	95
Figura 83 – Caracterização dos coeficientes de arrasto a partir da norma.....	96
Figura 84 - Edifício modelado em visualização 3D do TQS®	96
Figura 86 - Diagrama de esforços perpendiculares à direção do vento (tf)	102
Figura 87 - Diagrama de momentos torsões (tf.m).....	103
Figura 88 - Diagrama de forças totais na direção x (tf).....	103
Figura 89 - Diagrama de forças totais na direção y (tf).....	104
Figura 90 - Diagrama de momentos fletores M_x (tf.m)	104
Figura 91 - Diagrama de Momentos fletores M_y (tf.m)	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - fator topográfico S1 em relação às características do terreno.....	39
Tabela 2 - Resumo com descrição do terreno, cota média e categoria de acordo com NBR6123:1988	43
Tabela 3 - Relação entre categorias, classes e parâmetros.....	45
Tabela 4 – Resumo dos valores mínimos do fator estatístico S3 com informações da NBR6123/1988	46
Tabela 5 – Trecho exemplificativo da tabela utilizada para associação do número do ponto de tomada de pressão adotado no modelo, às suas coordenadas espaciais no modelo 3D, ao seu número do bloco do equipamento e posição no sensor do ensaio67	
Tabela 7 - Modos de vibração da estrutura.....	98
Tabela 9 - Parâmetros de estabilidade	100

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparação do perfil de velocidades da lei logarítmica e <i>power law</i>	26
Gráfico 2 - Relação entre Coeficiente de Arrasto e Número de Reynolds	32
Gráfico 3 - Desenvolvimento do Coeficiente de Arrasto para corpo esférico	33
Gráfico 4 - Forças no sentido da atuação do vento	85
Gráfico 5 - Forças no sentido transversal ao da atuação do vento	86
Gráfico 6 - Momentos relativos ao sentido de atuação do vento	86
Gráfico 7 - Percepção humana à vibração devido ao vento	107

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área superficial plana projetada (m ²)
C_a	Coeficiente de arrasto (adm.)
C_f	Coeficiente de força (adm.)
$C_{f'}$	Coeficiente de atrito (adm.)
S_1	Fator topográfico (adm.)
S_2	Fator de rugosidade do terreno e dimensões da estrutura (adm.)
S_3	Fator probabilístico (adm.)
f	Frequência natural de vibração (Hz)
D	Comprimento característico (largura ou altura) (m)
V_0	Velocidade básica do vento (m/s)
V_k	Velocidade característica do vento (m/s)
$\bar{V}_p$	Velocidade do vento de projeto (m/s)
a	Lado maior de uma seção horizontal (m)
b	Lado menor de uma seção horizontal (m)
h	Altura de edificação do nível do terreno até nível do beiral (m)
q	Pressão dinâmica do vento relativo a V_k (N/m ²)
t	Intervalo de tempo para determinar velocidade média do vento (s)
μ	Viscosidade dinâmica (N.s/m ²)
Re	Número de Reynolds (adm.)
St	Número de Strouhal (adm.)
Fr	Número de Froude (adm.)
ρ_a	Densidade do ar (kg/m ³)

z	Cota acima do terreno (m)
α	Ângulo de incidência do vento relativo ao lado maior do corpo (°)
θ	Ângulo entre escoamento e cisalhamento à superfície (°)
Δp	Pressão efetiva em um ponto superficial da edificação (N/m ²)
Δp_e	Pressão efetiva externa (N/m ²)
Δp_i	Pressão efetiva interna (N/m ²)
$p_{seção}$	Pressão na seção de ensaio (N/m ²)
p_{eref}	Pressão estática do <i>Pitot</i> de referência (N/m ²)
p_{tref}	Pressão total do <i>Pitot</i> de referência (N/m ²)
f	Coeficiente de correção da pressão dinâmica (adm.)
c_p	Coeficiente de pressão (adm.)
c_{pe}	Coeficiente de pressão externa (adm.)
c_{pi}	Coeficiente de pressão interna (adm.)
F	Força atuante em superfície de área A (N)
F_e	Força efetiva externa (N)
F_i	Força efetiva interna (N)
$H_{túnel}$	Altura interna útil do Túnel de Vento (m)
$D_{túnel}$	Diâmetro útil da base móvel do Túnel de Vento (m)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
2. OBJETIVO.....	22
3. JUSTIFICATIVA.....	23
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
4.1 Descrição do Escoamento	24
4.1.1 Introdução	24
4.1.2 Número de Reynolds	24
4.1.3 Escoamento Turbulento.....	25
4.1.4 Corpos Rombudos.....	26
4.1.5 Arrasto e Sustentação	27
4.1.6 Parâmetros adimensionais	30
4.2 Normativa brasileira.....	34
4.2.1 Determinação de forças estáticas.....	34
5. EDIFÍCIO MODELO.....	50
5.1 Caracterização Geral.....	50
6. MODELO FÍSICO	52
6.1 Material e técnicas.....	52
6.2 Tomadas de pressão	54
7. TÚNEL DE VENTO.....	57
7.1 Caracterização Geral.....	57
7.2 Registro descritivo do ensaio	61
8. TRATAMENTO DOS DADOS DE ENSAIO.....	65
8.1 Comportamento do vento no modelo físico.....	65
8.1.1 Construção tridimensional do modelo físico.....	65
8.1.2 Coordenadas das tomadas de pressão	66
8.1.3 Verificação do comportamento dos coeficientes de pressão.....	67
8.2 Cálculo da pressão dinâmica segundo a NBR6123:1988	74

8.2.1	Velocidade básica V_0 do modelo.....	74
8.2.2	Fator topográfico S_1 do modelo	74
8.2.3	Fator S_2 do modelo.....	75
8.3	Tratamento dos dados no MatLab®.....	77
9.	MODELAGEM ESTRUTURAL EM PROGRAMA COMERCIAL	87
9.1	Introdução ao software utilizado	87
9.2	Considerações adotadas e critérios de projeto	88
9.3	Concepção da solução estrutural.....	91
9.4	Adoção do carregamento de vento no modelo estrutural.....	94
10.	RESULTADOS DO MODELO	97
10.1	Análise de Vibrações	97
10.2	Estado Limite Último.....	99
10.2.1	Estabilidade Global (parâmetros γ_z , α e F_{av_t})	100
10.2.2	Diagramas de esforços.....	101
10.3	Estado Limite de Serviço	106
	Deslocamentos Horizontais	106
10.3.1		106
10.3.2	Conforto perante a ação do vento.....	107
11.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
11.1	Processos técnicos.....	109
11.2	Resultados observados	110
11.3	Recomendações para trabalhos futuros	111
12.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
	APÊNDICE A.....	114
	APÊNDICE B.....	124

1. INTRODUÇÃO

Nas fases de desenvolvimento de edifícios complexos, altos¹ e esbeltos, é comum surgirem para o engenheiro projetista desafios em geral relacionados à concepção da solução estrutural, ao modelo a ser adotado e aos tipos de carregamentos aos quais esse estará submetido. A tecnologia computacional atual permite ao usuário o uso de *softwares* avançados de análise estrutural, utilizando método de elementos finitos, modelos de barras - com pórticos espaciais e grelhas, por exemplo -, modelos de casca e placa, entre outros, que em muito facilitam o processo produtivo desses projetos. Apesar disso, a modelagem de um edifício não será bem sucedida sem as corretas considerações dos esforços aos quais a estrutura estará solicitada em sua vida.

Os carregamentos permanentes, além dos carregamentos acidentais oriundos de ação humana, são, em geral, bem conhecidos e previsíveis pelos projetistas, de acordo com as características de ocupação e de projeto (materiais componentes e distribuição de cargas), explicitados pela Norma Brasileira NBR6120:1980 e outras normas correlatas. Já para o carregamento de vento, há uma série de considerações que devem ser feitas e analisadas, caso a caso.

Os ventos se apresentam, na engenharia estrutural, como importante parcela a ser considerada, tanto no dimensionamento da estrutura à ruptura (Estado Limite Último), quanto na capacidade desta em satisfazer ao conforto do usuário, quando em serviço. A ação do vento é, em muitos casos, o carregamento mais significativo do dimensionamento à ruptura de peças verticais de concreto à flexão, como pilares. Em serviço, a resposta dinâmica da estrutura submetida ao vento oferece os campos de aceleração, velocidade e deslocamentos nodais do projeto, permitindo inferir o nível de conforto e satisfação do usuário em exposição a esse fenômeno.

A maior complexidade em relação ao conhecimento sobre carregamentos de vento se deve, inicialmente, a dois fatos. O primeiro (HOLMES, 2001) está na

¹ Um edifício pode ser definido como alto a partir de diversos critérios (CTBUH, 2017), sendo alguns destes subjetivos e dependentes da percepção dos usuários ao prédio e seu ambiente. Um edifício com mais de 120m ou cuja altura exceda quatro vezes a menor largura (critério de esbeltez) é considerado alto. Outra abordagem comum é considerar o meio ao qual um edifício está inserido; um prédio de 30m será alto em uma pequena cidade interiorana, mas não se situado na Avenida Paulista.

“multidisciplinaridade desse campo, que envolve conhecimentos de probabilidade e estatística, meteorologia, mecânica dos fluidos e dinâmica estrutural”, muitas vezes exigindo do engenheiro projetista ciências pouco comuns de serem aprofundadas em sua graduação e complementadas entre si ao longo do ciclo acadêmico. Um segundo aspecto a se considerar seria a difícil aplicação e comparação do escopo da norma de vento nacional, a NBR6123:1988, para os casos de edifícios altos, esbeltos e/ou com seção transversal variável e complexa. Para esses casos, inclusive, a norma recomenda as avaliações de carregamento de vento a partir de ensaios em Túnel de Vento, que permitem a obtenção de coeficientes de pressão discretos e interpolados, com melhor precisão e representatividade se comparados com o uso das aproximações da norma vigente para casos mais simples. Juntamente a essa consideração, também deve ser mencionada a dificuldade de se prever o escoamento do vento em regiões de centros urbanos.

A verticalização das cidades é um processo existente dentro dos centros urbanos e outras regiões já esgotadas de áreas apropriadas para a construção civil. Assim, há a tendência da construção de edifícios altos e delgados, devido, entre outros fatores, às limitações de área disponível adequada nessas regiões e a imposições das leis e diretrizes de zoneamento das cidades. Dois exemplos representativos no Brasil são a orla de Balneário Camboriú (SC) e a região da Avenida Paulista, em São Paulo. O primeiro, representado na Figura 1, uma cidade litorânea com áreas de expansão esgotadas, devido às restrições ambientais, espaciais e de zoneamento, apresenta os maiores arranha-céus do Brasil, dentre os já construídos e em projeto ou construção. Além do processo de verticalização supracitado, é fato que a busca por destaque e superação de desafios arquitetônicos também é um incentivo ao desenvolvimento de empreendimentos maiores e mais complexos, conforme exemplificam os edifícios da Figura 2. O segundo exemplo, representado pela Figura 3, ilustra a dificuldade de se utilizar apenas a norma de vento ao se descrever o escoamento do vento sobre uma superfície quando a região é muito verticalizada. A consideração dos edifícios do entorno (Figura 4) é fundamental e dificilmente viabilizada em todas as suas características sem a utilização de modelos físicos, considerando o aparato normativo e computacional atual, sobretudo disponível à boa parte dos escritórios de projeto nacionais.

Figura 1 - Orla de Balneário Camboriú.



Figura 2 – São Paulo Corporate Tower, exemplo de desafio arquitetônico.



Figura 3 - Vista aérea da Avenida Paulista, São Paulo.



Figura 4 - Modelo físico de edifício, com representação do entorno.



Fonte: Google Earth

Fonte: França & Associados - divulgação

Para a avaliação do vento e situação crítica a serem considerados, o conhecimento de meteorologia é fundamental: os ventos, sobretudo quando inseridos em um contexto de condição climática atípica, como em tempestades, ciclones e tornados, apresentam forma de atuação distinta, com padrões de deslocamento e perfis de velocidade no tempo (em relação à altura) que também se diferenciam entre si. Assim, é essencial compreender, na localização à qual se interessa estabelecer um projeto estrutural, as variáveis climáticas que são de importância no estudo. Em “O Vento na Engenharia Estrutural” (1995), Blessmann enumera os tipos de vento interessantes à engenharia civil. Alguns desses, como ciclones tropicais e tornados,

por exemplo, não são comumente observados em boa parte do Brasil (exceção feita a estados do Sul e parte do Sudeste).

Uma observação deve ser feita aos ciclones tropicais: o aumento da temperatura das águas do atlântico sul, visto como consequência do aquecimento global, permitirá a formação de mais ciclones tropicais nessa região, afetando sobretudo o litoral dos estados do Sul e Sudeste (onde os ciclones têm maior atuação, perdendo força ao entrar no território). Assim, deverão ser reconsiderados, em alguns casos, o perfil crítico de velocidades da tempestade de vento a ser adotado.

Os estragos mais comumente perceptíveis pelos usuários de edifícios são relacionados ao destelhamento e o impacto de objetos lançados pelo vento, afetando principalmente elementos de vedação vertical e horizontal desses edifícios. Um exemplo pode ser observado na Figura 5, de um tornado em 2015.

Figura 5 - Estragos causados por Tornado em SC.

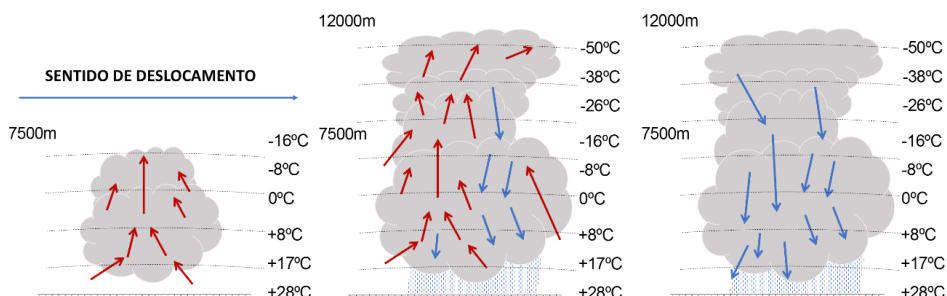


Fonte: EL PAÍS (22/04/2015)

Em relação às tormentas, a maior representatividade no estudo meteorológico para se definir o vento crítico a ser analisado vem das tormentas elétricas, também conhecidas por tormentas TS (BLESSMANN, 1995). São geradas a partir de cones de movimento vertical de ar, oriundo de formações *cumulonimbus*, com sopro de ventos fortes em todas as direções, radialmente a esse cone. Há também a ascensão

de ar quente e úmido, gerando fricção e formação de descargas elétricas, conforme demonstra Figura 6.

Figura 6 - Estágios de desenvolvimento de Tormenta TS.



Fonte: Adaptado de BLESSMANN (1995)

Como essa tempestade gera vento em todas as direções (diferente daqueles devidos à influência do relevo, como em vales e depressões ou vento litorâneo, por exemplo), se interessa analisar a estrutura sob a ação do vento que gera os esforços críticos, independentemente de sua direção. Assim, a definição do perfil de velocidades do vento de projeto e suas características serão descritas no capítulo 4.2.1.

A consolidação entre as interfaces prática, teórica e técnica deste trabalho será executada através da adoção de um estudo de caso. Serão desenvolvidos modelos físico e computacional do edifício Eldorado Tower de São Paulo (Figura 7) para a determinação dos coeficientes de interesse, natureza e valor de esforços e reações da estrutura, considerando diferentes possibilidades de concepção de projeto. Uma descrição mais detalhada do edifício será exposta no capítulo 5 deste texto.

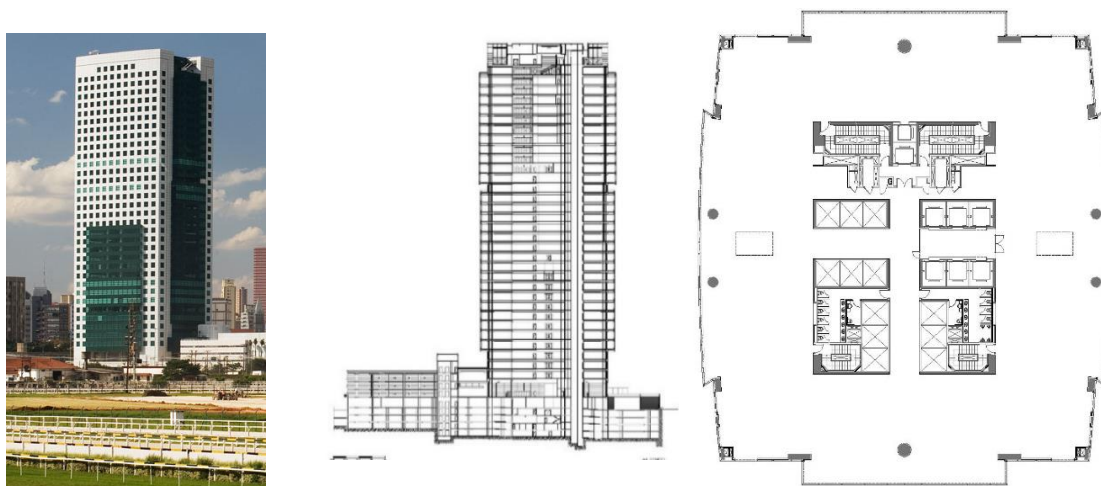
Para satisfazer as condições supracitadas, o ensaio de Túnel será indispensável ao desenvolvimento desse trabalho. O Túnel de Vento do Instituto Tecnológico de São Paulo (IPT) será local de ensaio do modelo físico da estrutura. A montagem do modelo físico será detalhada no capítulo 6 e a descrição do Túnel de Vento e o ensaio, no capítulo 7.

O tratamento dos dados recebidos será importante para que o *software* de dimensionamento possa receber corretamente as informações coletadas. Para isso,

será implementada uma rotina de cálculo através do software MatLab®, tema tratado no capítulo 8.

A modelagem computacional da estrutura para recebimento dos dados obtidos nos ensaios e tratados no MatLab® serão discutidos no capítulo 9, enquanto os resultados dessa modelagem serão indicados no capítulo 10 deste texto.

Figura 7 - Edifício Eldorado Business Tower, corte em elevação e planta.



Fonte: aflalo/gasperini arquitetos – divulgação

2. OBJETIVO

Diante do exposto, esse trabalho pretende obter e comparar coeficientes de pressão através de ensaios de túnel de vento em modelo físico construído, aplicando-os ao software comercial CAD/TQS® e posterior análise estática e dinâmica da estrutura com os carregamentos gerados através dos dados do ensaio, para avaliações dos Estados Limites Último e de Serviço dos modelos computacionais desenvolvidos.

3. JUSTIFICATIVA

Projetos estruturais de edifícios altos dependem, de forma geral, de considerações mais criteriosas em relação à estabilidade global e à ação de vento e sismos. A ação do vento sobre a estrutura varia conforme sua altura, suas características – dimensão horizontal e funcionalidade da edificação, por exemplo - e sua localização no espaço urbano, conforme já prevê as normas de caracterização do vento para prédios em geral, caso da norma brasileira NBR6123:1988. A norma nacional prevê ainda em seu objetivo (item 1.2) que essa não “se aplica a edificações de formas, dimensões ou localização fora do comum, casos esses em que estudos especiais devem ser feitos para determinar as forças atuantes do vento e seus efeitos”. Assim, pode-se considerar o estudo em Túnel de Vento para quaisquer estruturas que não se comportem, em relação às suas características, como o preconizado pela norma.

No caso de um edifício na Grande São Paulo, já tomada por uma considerável densidade de estruturas de média a grande altura, a ação do vento torna-se fortemente dependente da sua interação com obstáculos. Sem a realização de ensaios físicos de modelos, esses escoamentos apresentam comportamentos de difícil modelagem através apenas das normas ou até mesmo com a utilização de *softwares* CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Considerando que as estruturas tendem a ser cada vez mais leves e dimensionadas para consumir o mínimo de material, com tendência à redução da espessura média dos pavimentos, é fato que a interpretação refinada dos esforços externos se torna mais necessária.

A análise de esforços gerados por vento, da mesma forma que é essencial e fundamental para edifícios altos (sobretudo no Brasil, que não apresenta histórico com problemas sismológicos), também é pouco praticada e abordada nos cursos de graduação. A adoção da metodologia prevista, através do estudo direcionado de um caso com constituição de um modelo físico e outro computacional, busca, por sua vez, elucidar quanto às dificuldades técnicas e desafios inerentes à análise da ação do vento sobre a estrutura, bem como sua importância e influência no dimensionamento final desta.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Descrição do Escoamento

4.1.1 Introdução

Uma das considerações a serem feitas quanto à análise estrutural de um edifício é a incidência de vento em sua fachada. Os efeitos causados por esse acontecimento dependem das características do escoamento do vento - como seu perfil de velocidades, Número de Reynolds (Re) e seu ângulo de incidência - e de características do edifício e de seu entorno.

O escoamento a ser analisado ocorre na chamada camada limite atmosférica (CLA), região da troposfera em que o vento sofre interferência da superfície terrestre. Segundo Cook (1990), as características principais da camada limite atmosférica, quando totalmente desenvolvida, são:

- Aumento da velocidade média do vento conforme aumento da altura;
- Natureza turbulenta do escoamento do vento em todas as alturas;
- Ampla gama de frequências das rajadas no fluxo de ar;

Semelhança dos padrões das rajadas em todas as alturas, principalmente as rajadas de menor frequência.

4.1.2 Número de Reynolds

O Número de Reynolds (Re) é o adimensional mais conhecido da mecânica dos fluidos e representa a razão entre as forças de inércia de um elemento fluido e os efeitos viscosos no elemento. O Número de Reynolds depende basicamente de quatro variáveis: Velocidade (U); Tamanho (D); Viscosidade Dinâmica (μ); Densidade (ρ).

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\mu} \quad (1)$$

4.1.3 Escoamento Turbulento

O movimento turbulento de um fluido pode ser definido como uma “condição irregular do escoamento, na qual as várias quantidades envolvidas apresentam uma variação randômica no tempo e no espaço, tal que podem ser diferenciados estatisticamente de seus valores médios” (HINZE, 1975).

Com Número de Reynolds da ordem de 10^7 , a camada limite atmosférica apresenta regime de escoamento predominantemente turbulento e pode ser considerada similar, em vários aspectos, à camada limite turbulenta que ocorre em uma placa plana, quando submetida a ventos de alta velocidade (HOLMES, 2001). Essa correlação é possível pois, entre outros fatores, a superfície terrestre pode ser considerada plana, com influência da rugosidade própria sobre o escoamento.

Apesar de haver certa similaridade no padrão das rajadas de vento em todo o comprimento da camada, conforme dito no item 4.1.1, o escoamento é de difícil simulação computacional, o que justifica a utilização do túnel de vento como simulação do fenômeno.

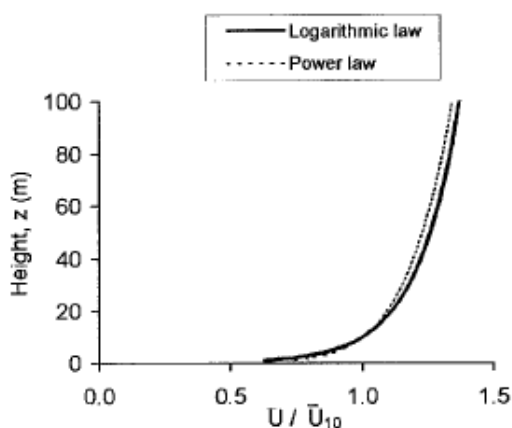
Existem basicamente dois modelos para representar o perfil de velocidades médias na Engenharia do Vento, segundo Holmes (2001, p. 47): a lei potencial (ou *power law*) e a lei logarítmica. A primeira, apesar de descrever bem o perfil de velocidades na camada limite atmosférica - à exceção de regiões muito próximas à superfície -, não possui embasamento teórico. A segunda, ao contrário, representa bem o perfil em alturas mais baixas, mas não se ajusta bem em regiões muito altas, próximas ao limite superior da camada.

Assim, o modelo matemático adotado foi o perfil em lei logarítmica, que se adequa bem ao estudo de um edifício (região mais próxima à superfície) e possui fundamentação teórica, baseada na integração da equação abaixo:

$$\frac{dU}{dz} z \sqrt{\frac{\rho_a}{\tau_0}} = \frac{1}{k} \quad (2)$$

Onde U é a velocidade do vento, z é a altura, ρ_a é a densidade do ar, τ_0 é a tensão de cisalhamento na superfície e k é uma constante arbitrária. Abaixo, é possível verificar ambos perfis, sendo $\bar{U}_{10}$ o valor médio da velocidade do vento a 10m.

Gráfico 1 - Comparação do perfil de velocidades da lei logarítmica e *power law*.



Fonte: Holmes, p.50

Outro aspecto importante a ser levado em conta no regime turbulento é a possível formação de vórtices, que variam em tamanho e orientação, e podem causar aleatoriedade ao movimento.

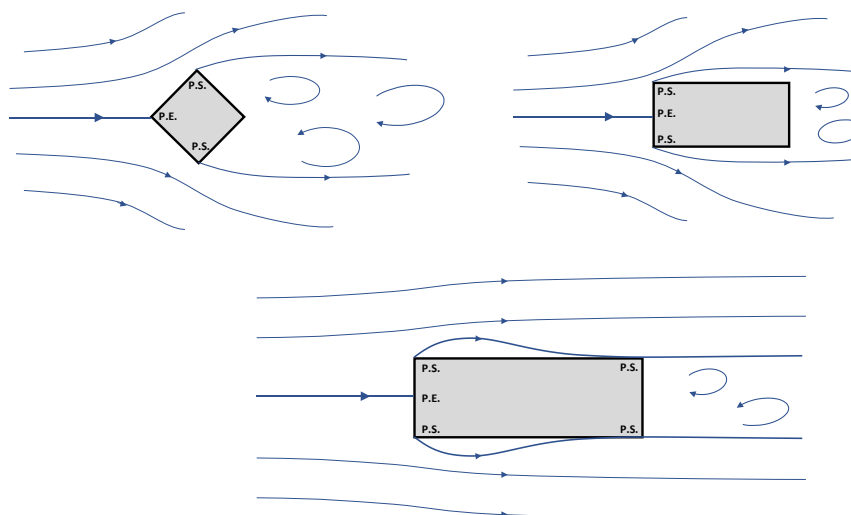
4.1.4 Corpos Rombudos

Os corpos chamados rombudos são, segundo Bearman (2003), aqueles cujo escoamento apresenta descolamento em uma porção significativa de sua superfície, ou seja, depende de sua forma e de como esse fluxo incide sobre o corpo. Na maioria dos casos, os edifícios podem ser considerados corpos rombudos, sofrendo grande força de arrasto e causando turbulência no escoamento.

As estruturas civis, em geral, possuem bordas pontiagudas, o que simplifica o estudo e compreensão do escoamento (Figura 8). Isso se verifica devido à facilidade de se localizar os pontos onde ocorre descolamento da camada limite, uma vez que o

escoamento não consegue acompanhar as mudanças de ângulos entre as faces e, portanto, se descola nas próprias bordas pontiagudas.

Figura 8 - Escoamento em torno de cilindros retangulares

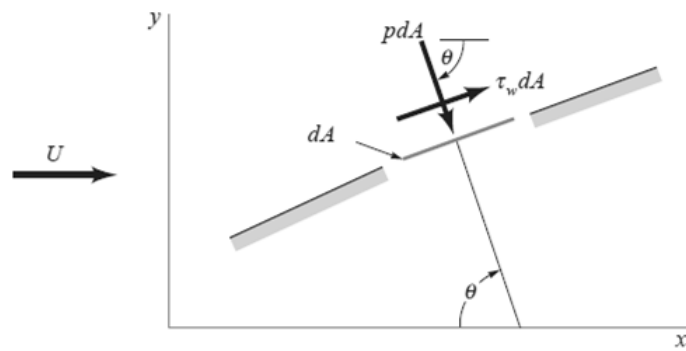


Fonte: Adaptado de COOK (1990)

4.1.5 Arrasto e Sustentação

A movimentação relativa entre um corpo imerso em um fluido acarreta em tensões cisalhantes na superfície do corpo devido à viscosidade do fluido e em tensões normais devido à pressão que ele exerce sobre o corpo (MUNSON, YOUNG, & OKIISHI, 2004), ilustradas na Figura 9. Chama-se de arrasto a resultante da força na direção do escoamento, e de sustentação a resultante da força normal ao escoamento.

Figura 9 - Forças de pressão e cisalhamento em um elemento.



Fonte: MUNSON (2004), p.464

A força de arrasto é a resultante das componentes normal e tangencial na direção do escoamento. Apesar do conhecimento dessas componentes, a resultante é de difícil determinação analítica, sendo possível apenas para corpos simples, conforme ilustra a Figura 10. A força de arrasto pode ser dividida em:

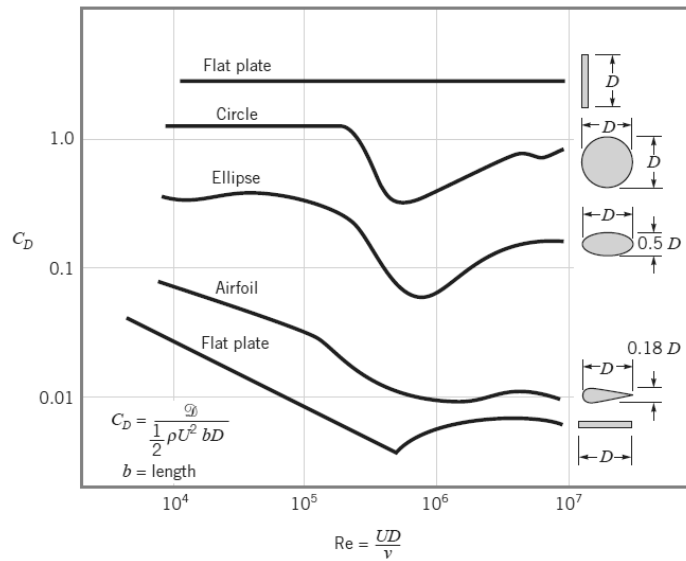
- Arrasto friccional ou de superfície: parcela devida apenas aos esforços de cisalhamento;
- Arrasto de pressão ou de forma: parcela devida aos esforços de pressão, chamada arrasto;

A forma adimensional da força de arrasto é o coeficiente de arrasto (C_d), que é função da forma do corpo, do Número de Reynolds e do Número de Froude.

$$C_D = \phi\left(forma, Re, Fr, Ma, \frac{\varepsilon}{l}\right) \quad (3)$$

$$D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \quad (4)$$

Figura 10 - Exemplo de coeficientes de arrasto em diferentes corpos.



Fonte: MUNSON (2004), p.502

Por definição, a força de arrasto friccional é a somatória da projeção das tensões de cisalhamento na direção do escoamento, em toda a superfície. Sendo θ o ângulo entre o escoamento e o cisalhamento.

$$D_f = \oint_{\Gamma} \tau \cdot \sin\theta \cdot dA \quad (5)$$

A baixa viscosidade do ar, somada a sua alta velocidade no escoamento estudado, resulta em um Número de Reynolds muito alto, portanto a parcela de arrasto friccional será baixa no arrasto.

A força de arrasto de pressão é a somatória das componentes normais ao corpo das tensões de cisalhamento, em toda a superfície.

$$D_p = \int p \cdot \cos\theta \cdot dA \quad (6)$$

A primeira interação de escoamento com um edifício se dá em uma grande área perpendicular ao escoamento, acarretando grandes pressões normais nessa região.

Como dito anteriormente, a sustentação é a resultante na direção normal ao escoamento, e pode ser representada pela equação abaixo:

$$L = - \int p \cdot \sin\theta \cdot dA + \int \tau \cdot \cos\theta \cdot dA \quad (7)$$

Da mesma forma como o arrasto, a sustentação é comumente utilizada na forma de adimensional, com as mesmas variáveis:

$$C_L = \phi \left(forma, Re, Fr, Ma, \frac{\varepsilon}{l} \right) \quad (8)$$

Em relação aos efeitos do vento, interessam a esse presente estudo as forças de arrasto observadas no edifício.

4.1.6 Parâmetros adimensionais

O uso de parâmetros adimensionais é uma ferramenta primordial na construção das hipóteses de compatibilização de modelos, além da obtenção de suas características funcionais. Essa análise pode ser satisfeita através do Teorema dos π de Buckingham, que relaciona N variáveis de um fenômeno a suas m dimensões componentes, sendo possível dessa forma a sua descrição através de $(N - m)$ parâmetros adimensionais independentes.

Segundo Cook (1990), supondo o escoamento de fluido sobre corpo rígido dependente dos parâmetros pressão (p), velocidade de escoamento (U), frequência (n), viscosidade dinâmica (μ), densidade do ar (ρ_a) e dimensão característica (D), com

3 dimensões componentes - massa, comprimento e tempo - tem-se $(6 - 3) = 3$ parâmetros adimensionais: o coeficiente de pressão (C_p), o Número de Reynolds (Re) e o Número de Strouhal (St), todos com importante interpretação física para o desenvolvimento dessa análise.

O Número de Reynolds descreve fisicamente uma relação entre a inércia do escoamento e suas forças viscosas. A inércia do fluido domina o fenômeno para valores elevados de Re , acima de 2×10^5 , e a sua frequência n é baixa, quando há a formação de grandes vórtices turbulentos no escoamento do vento (COOK, 1990, p.17).

O Número de Strouhal ($nD/\bar{U}$) descreve a intensidade de geração dos vórtices, sendo o parâmetro n qualquer frequência de interesse, em geral a frequência de formação de vórtices no escoamento do vento ou de oscilação da estrutura, por exemplo. Esse número é indispensável ao se analisar a resposta dinâmica do edifício ao vento e à geração e desprendimento de vórtices.

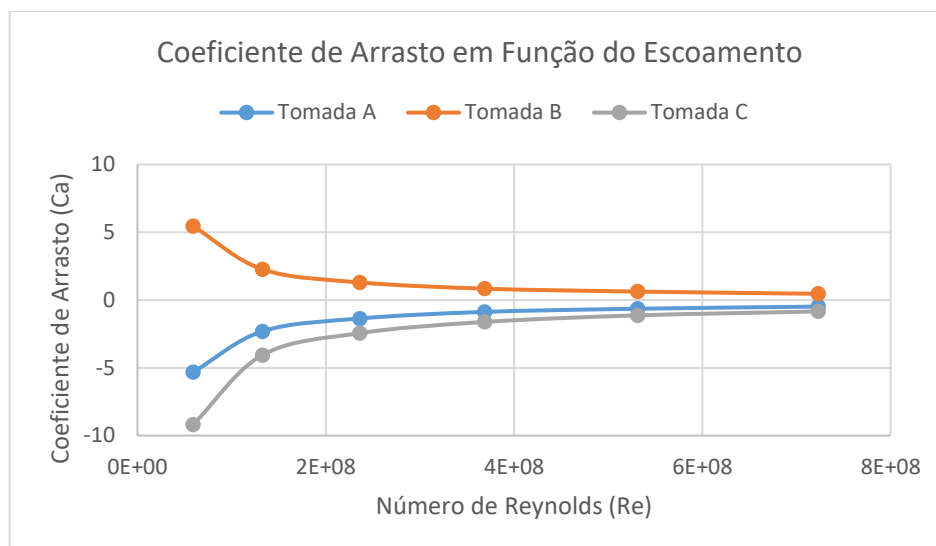
Para a compatibilização entre modelo e protótipo as variáveis de interesse são a dimensão característica D e a velocidade de escoamento $\bar{V}$, sendo suficiente considerar os Números de Reynolds ($D \propto 1/\bar{U}$), Strouhal ($D \propto \bar{U}$), bem como o coeficiente de pressão ($D \propto 1/\bar{U}^2$). Vê-se que as relações de proporção entre as variáveis em cada adimensional não são equivalentes, e dessa forma é necessário fazer uma avaliação da relevância de cada uma frente ao estudo proposto.

O Número de Reynolds apresenta sensibilidade à variação de velocidade, para escoamentos em corpos rombudos curvos, apenas no limiar entre os escoamentos subcrítico e supercrítico (COOK, 1990): bastaria, então, garantir que os regimes de escoamento entre o modelo e o protótipo sejam iguais, para se obter a semelhança necessária. Para corpos angulosos, inclusive, a estrutura é insensível ao Número de Reynolds, caso observado em parte considerável da estrutura adotada.

A consideração acima feita pode ser confirmada através de uma simples verificação feita em laboratório. Variando a velocidade de escoamento do vento dentro do túnel (através do aumento de rotações do ventilador) e observando a variação de coeficiente de pressão em um ponto, deve-se observar que, para certa velocidade e a partir desta, os coeficientes locais deixarão de apresentar alterações expressivas a cada aumento de velocidade. Tal informação foi confirmada através da análise da

variação de pressão de pontos do edifício modelo, sob variação da velocidade do ventilador. O resultado do experimento pode ser observado no Gráfico 2.

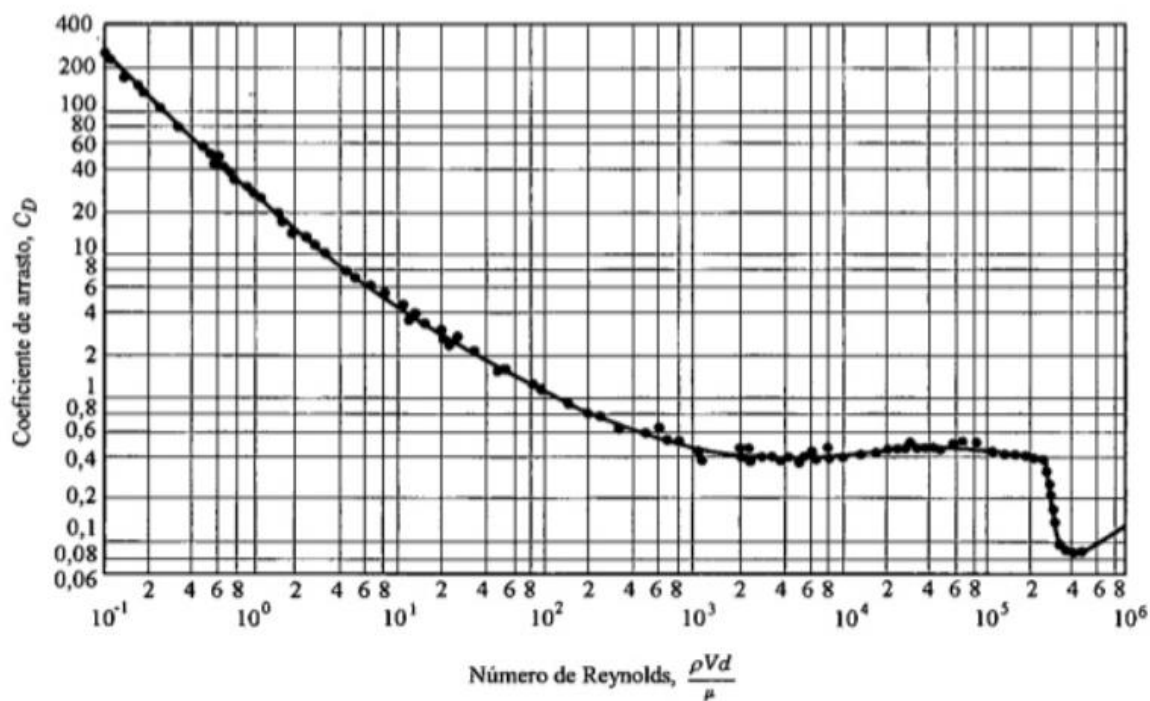
Gráfico 2 - Relação entre Coeficiente de Arrasto e Número de Reynolds



Fonte: Autoria Própria

O resultado observado é esperado, visto que o Número de Reynolds varia linearmente com a velocidade do escoamento ($Re \propto U$) e o Coeficiente de Arrasto varia com o inverso quadrático da mesma ($Cd \propto 1/U^2$). As referências bibliográficas corroboram com o resultado observado, como por exemplo em Munson et. al (2004), para escoamento sobre corpos esféricos, conforme Gráfico a seguir.

Gráfico 3 - Desenvolvimento do Coeficiente de Arrasto para corpo esférico



Fonte: MUNSON (2004), p.378

No caso do Número de Strouhal, coeficiente de interesse no estudo dinâmico vento-estrutura, bastaria então a comparação direta, relacionando por semelhança:

$$[\bar{U}] = n_m L_m / S_t = n_p L_p / S_t \quad (9)$$

com m e p índices relativos aos valores de modelo e protótipo, respectivamente.

Para uma análise estática do edifício, é suficiente garantir a condição imposta pelo Número de Reynolds, supracitada.

4.2 Normativa brasileira

A NBR 6123, “Forças devidas ao vento em edificações”, foi publicada em 1988, e desde então, serve como referência para os mais diversos projetos de construção no Brasil. Após mais de 25 anos de seu lançamento, a NBR6123 sofreu apenas duas revisões, em 1990 e 2013 e, recentemente, encontra-se em atualização para inserir ao texto uma abordagem da análise dinâmica do vento de forma mais precisa do que a versão anterior da norma.

A norma de vento visa dar diretrizes na consideração de ações estáticas e dinâmicas devidas ao vento para efeito de cálculo de edificações. Conforme apontado na introdução deste texto (item 1), a NBR 6123:1988 não é aplicável a edificações com “formas e dimensões fora do comum”, recomendando a estes casos estudos especiais utilizando túnel de vento para a obtenção dos coeficientes.

A ação do vento em edificações depende de duas condições (GONÇALVES, 2007): as meteorológicas e as aerodinâmicas, associadas, entre outros aspectos, à localização do edifício em estudo, ao tipo de terreno no qual se encontra, à rugosidade do terreno, altura, formato e dimensões da edificação, tipo de ocupação e, por fim, à aleatoriedade dos eventos de vento. Tais conceitos e parâmetros foram apresentados pela norma, e, serão objeto de estudo a seguir.

4.2.1 *Determinação de forças estáticas*

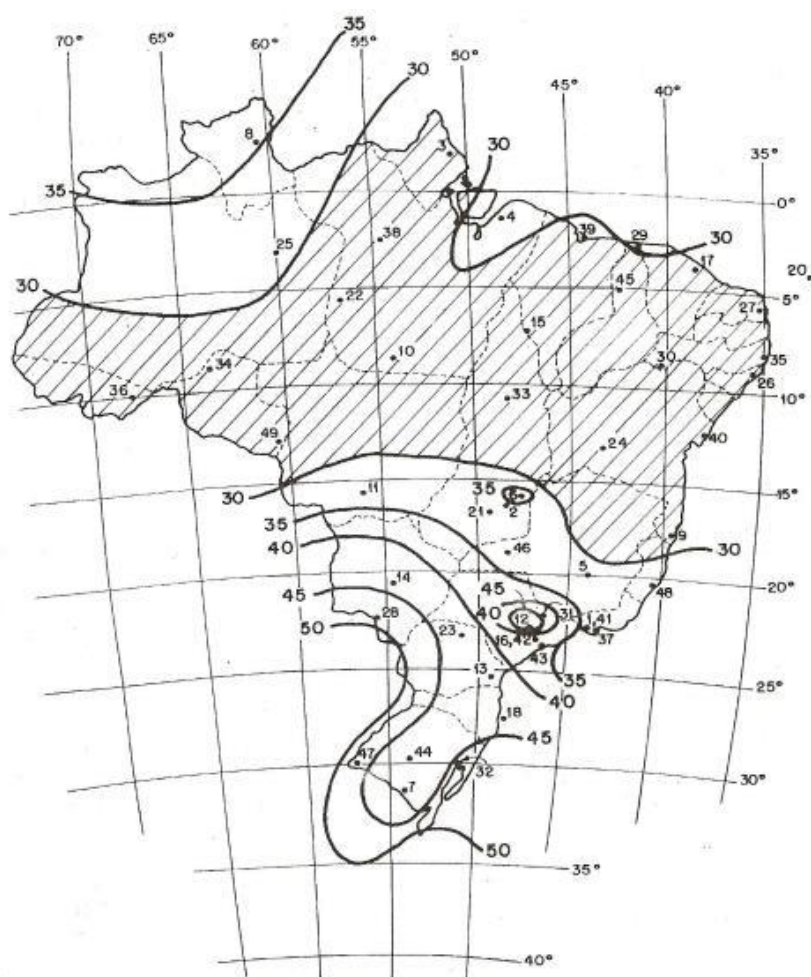
As forças estáticas são determinadas a partir da velocidade característica do vento V_k , que é obtida pela multiplicação dos fatores S_1 (item 4.2.1.2.1), S_2 (item 4.2.1.2.2) e S_3 (item 4.2.1.2.3) pela velocidade básica do vento V_0 (item 4.2.1.1). A pressão dinâmica q é obtida pela expressão $q = 0,613 \cdot V_k^2$. A determinação de cada coeficiente será detalhada a seguir.

4.2.1.1 Velocidade básica do vento V_0

Segundo a NBR 6123:1988, a velocidade básica de vento V_0 é definida pela velocidade de uma rajada de 3 segundos, com período de retorno² de 50 anos, a uma altura de 10m acima do terreno, em campo aberto, plano e sem obstruções. É admitido que o vento básico pode soprar de qualquer direção horizontal.

A Figura 11 a seguir representa as isopletras de velocidade básica no Brasil, retiradas da NBR 6123:1988 que foram obtidas através de registros de estações meteorológicas do Serviço de Proteção ao Vôo, do Ministério da Aeronáutica.

Figura 11 - Isopletras de velocidade básica do vento com V_0 em m/s.



Fonte: NBR6123:1988

² Período de retorno ou tempo de recorrência, segundo VILLELA e MATOS (1975) é o período de tempo médio (medido em anos) em que um determinado evento deve ser igualado ou superado pelo menos uma vez.

4.2.1.2 Velocidade característica do vento V_k

A velocidade básica V_0 , de acordo com GONÇALVES (2007), pode ser considerada como uma velocidade de referência em uma certa localização, uma vez que não contabiliza as interferências como as diferentes topografias locais, presença ou ausência de obstáculos, altura e dimensões da edificação em análise. Para tanto, é necessário obter a velocidade característica V_k atuante em uma certa edificação. Para o cálculo de V_k , tais efeitos serão ponderados na NBR 6123:1988 como coeficientes multiplicativos de V_0 .

4.2.1.2.1 Fator topográfico S_1

O fator topográfico S_1 considera as variações de relevo do terreno onde a edificação será construída: aumentando ou diminuindo a velocidade básica V_0 em função da alteração das linhas de fluxo de vento ao interagir com a topografia do terreno.

A NBR6123:1988 considera três situações para cálculo, conforme ilustra a Figura a seguir:

Figura 12 - Alteração das linhas de fluxo em função da topografia do terreno

Ponto I – terreno plano; Ponto II – talude, com aumento de velocidade; Ponto III – vales profundos e protegidos.



Fonte: adaptada da Figura 2.2 de GONÇALVES (2007)

I) terreno plano ou fracamente acidentado: $S_1 = 1$.

Ou seja, um terreno plano com poucas ondulações não provoca alterações significativas (nem aumentos nem diminuições) na velocidade básica V_0 . A Figura 13 contém um exemplo real ilustrativo do terreno.

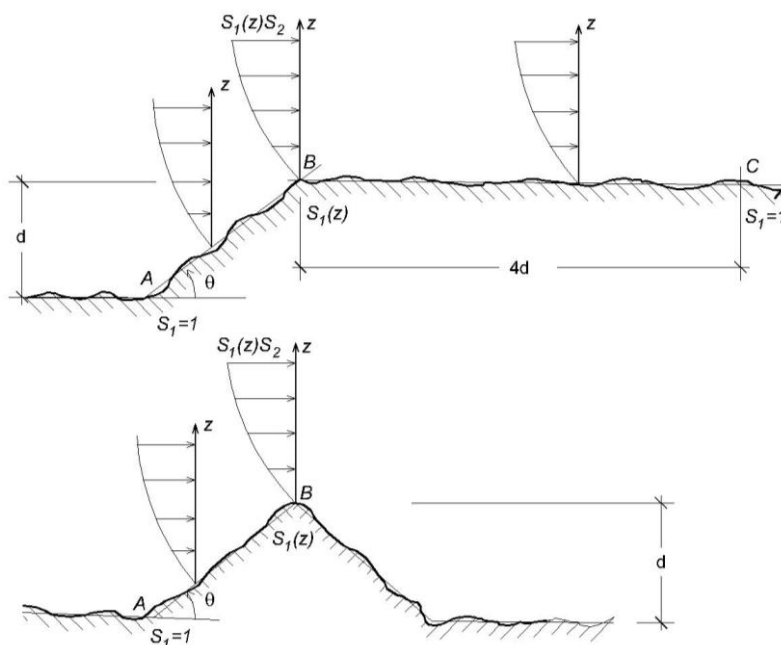
Figura 13 - Foto ilustrativa de terreno plano.



Fonte: <http://www.imoveisbrasilbahia.com.br>

II) taludes e morros: admitindo-se um fluxo de ar bidimensional de direção da esquerda para a direita conforme Figura 14 a seguir, tem-se:

Figura 14 - Fator topográfico $S_1(z)$.



Fonte: NBR6123:1988 - Figura 2

No ponto A e C, no caso do talude, e no ponto A, no caso de morro, a influência do terreno não é significativa e, portanto, adota-se $S_1 = 1$.

No ponto B, nos taludes e morros, S_1 é uma função de $S_1(z)$:

$$\theta \leq 3^\circ : S_1(z) = 1,0$$

$$6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ : S_1(z) = 1,0 + (2,5 - z/d) \operatorname{tg}(\theta - 3^\circ) \geq 1$$

$$\theta \geq 45^\circ : S_1(z) = 1,0 + (2,5 - z/d) 0,31 \geq 1$$

Deve-se interpolar linearmente para $3^\circ < \theta < 6^\circ$ e $17^\circ < \theta < 45^\circ$.

Onde:

z - altura medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado;

d - diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro;

θ - inclinação média do talude ou encosta do morro.

Entre A e B e entre B e C o fator S_1 é obtido por interpolação linear.

A Figura 15 contém um exemplo real ilustrativo do terreno.

Figura 15 - Foto ilustrativa de talude



Fonte: <http://www.terraplenagem.net/>

III) vales profundos: $S_1 = 0,9$.

Ou seja, nesta situação, há um efeito de diminuição da velocidade básica V_0 devido à proteção da região do vento em todas as direções. A Figura 16 contém um exemplo real ilustrativo do terreno.

Figura 16 - Foto ilustrativa de vale profundo



Fonte: [http:// 5l-henrique.blogspot.com.br/2016/01/aldeias-desertas-de-tras-os-montes.html](http://5l-henrique.blogspot.com.br/2016/01/aldeias-desertas-de-tras-os-montes.html)

A Tabela 1 sintetiza as informações apresentadas anteriormente para determinação do fator S_1 :

Tabela 1 - fator topográfico S_1 em relação às características do terreno

Característica do terreno		Fator Topográfico S_1
Terreno plano ou fracamente acidentado		1,0
Taludes e morros	Pontos A e C e $\theta \leq 3^\circ$	1,0
	Ponto B e $6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ$	$1 + (2,5 - z/d) \cdot \text{tg}(\theta - 3^\circ) \geq 1$
	Ponto B e $\theta \geq 45^\circ$	$1 + (2,5 - z/d) \cdot 0,31 \geq 1$
Vales profundos protegidos de vento		0,9

Fonte: Autoria própria

A NBR 6132:1988 também indica ensaios de modelos topográficos em túneis de vento ou medidas anemométricas no próprio terreno em caso de dificuldades de determinação do fator S_1 devido à uma possível complexidade do relevo em análise.

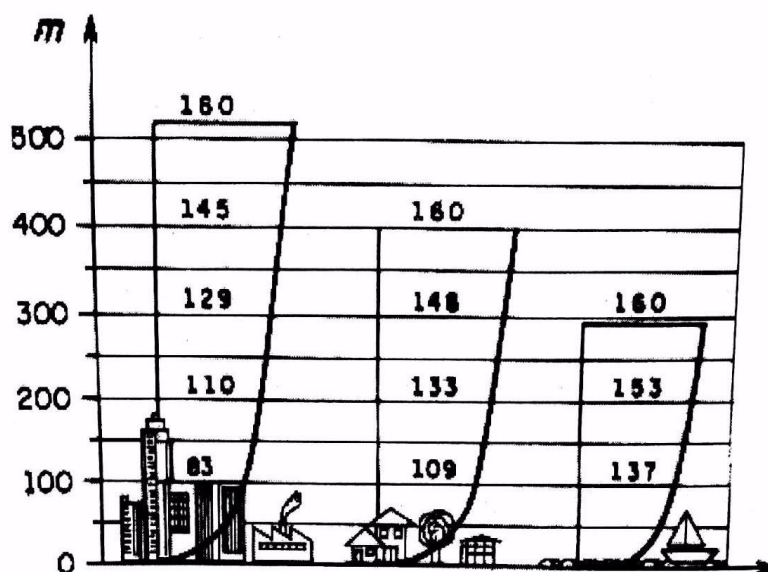
4.2.1.2.2 Fator S_2 de rugosidade do terreno e dimensões da edificação

O fator S_2 considera o efeito da rugosidade do terreno, a variação da velocidade com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação, características que serão discutidas a seguir:

I) Rugosidade do terreno:

A rugosidade do terreno influencia diretamente a velocidade de escoamento do vento. Quanto maior a rugosidade, maior o abrandamento do perfil de velocidade que o vento apresenta quanto interposto por obstáculos, portanto, em terrenos planos o vento apresentará velocidade média superior se comparada à velocidade do vento em um centro urbano densamente ocupado, conforme ilustra a Figura 17 dos perfis de velocidade de GONÇALVES (2007).

Figura 17 - Perfis de velocidade do vento em km/h.



Fonte: (GONÇALVES, 2007)

A NBR6123/1988 classifica a rugosidade em cinco categorias:

- **CATEGORIA I:** Compreende superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5km de extensão que é medida na direção e sentido do vento incidente.

Como exemplos podem ser citados o mar calmo, lagos e rios, pântanos sem vegetação (Figura 18, Figura 19 e Figura 20).

Figura 18 - Foto ilustrativa de mar



Fonte: <http://www.veratour.it/>

Figura 19 - Foto ilustrativa de lago



Fonte: <http://www.motoraid.com.br/>

Figura 20 - Foto ilustrativa de rio



Fonte: <https://www.caf.com>

- **CATEGORIA II:** Nesta categoria estão os terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados como árvores e edificações baixas com cota média inferior ou igual a 1m. Conforme Figura 21 e Figura 22, os terrenos que exemplificam a categoria são zonas costeiras planas, pântanos com vegetação rala, campos de aviação, pradarias e charnecas, fazendas sem muros.

Figura 21 - Foto ilustrativa de pradaria



Fonte: <https://static.todamateria.com.br/>

Figura 22 - Foto ilustrativa de fazendas sem muro



Fonte: <http://www.andrefazendas.com.br>

- **CATEGORIA III:** Inclui terrenos planos ou ondulados com obstáculos, como sebes ou muros, quebra ventos de árvores, edificações esparsas e baixa, em

que a cota média dos obstáculos seja de 3m. A Figura 23 e Figura 24 exemplificam os terrenos da categoria.

Figura 23 - Foto ilustrativa de terrenos ondulados com edificações esparsas.



Fonte: <http://g1.globo.com>

Figura 24 - Foto ilustrativa de quebra vento de árvores.



Fonte:
<http://jardinagempaisagismo.com>

- CATEGORIA IV: Abrange terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados cuja cota média é considerada igual a 10m, tais como cidades pequenas e seus arredores, zonas de parques e bosques com muitas árvores, subúrbios densamente construídos de grandes cidades e áreas industriais (Figura 25, Figura 26 e Figura 27).

Figura 25 - Foto ilustrativa de subúrbio.



Fonte: zanimovel.com.br

Figura 26 - Foto ilustrativa de zona de parques



Fonte: cidadedesaopaulo.com

Figura 27 - Foto ilustrativa de áreas industriais



Fonte: <http://barradas.com.br>

- CATEGORIA V: Contém terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados tais como florestas com árvores altas, centros de grandes cidades, complexos industriais bem desenvolvidos, exemplificados na Figura 28, Figura 29 e Figura 30.

Figura 28 - Foto ilustrativa de complexo industrial.



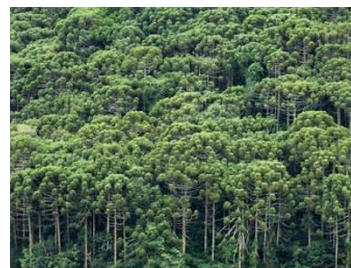
Fonte: <http://betaeq.blogspot.com.br>

Figura 29 - Foto ilustrativa de centros de grandes cidades.



Fonte: <http://www.estadosecapitaisdobrasil.com/>

Figura 30 - Foto ilustrativa de floresta com árvores altas.



Fonte: <https://extra.globo.com>

Como síntese das cotas média dos obstáculos em cada categoria tem-se a Tabela 2:

Tabela 2 - Resumo com descrição do terreno, cota média e categoria de acordo com NBR6123:1988

Categoria	Descrição do terreno	<i>Cota média dos obstáculos</i>
I	Superfícies lisas	0m
II	Terrenos abertos com poucos obstáculos	$\leq 1\text{m}$
III	Terrenos planos ou ondulados com obstáculos	3m
IV	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados	10m
V	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados	$\geq 25\text{m}$

Fonte: NBR6123:1988

II) Dimensões da edificação:

Segundo BLESSMANN (1988), a velocidade do vento aumenta com a altura acima do terreno, dependendo de sua rugosidade (discutida anteriormente) e do intervalo de tempo considerado na determinação da velocidade. Tal intervalo de tempo está relacionado com as dimensões da edificação: edificações menores são mais afetadas por rajadas de curta duração em relação às grandes edificações que, por sua vez, são mais afetadas por rajadas de intervalos de tempo maiores.

Para compreender melhor o efeito das dimensões da edificação sobre a velocidade, GONÇALVES (2007) materializa a rajada de vento como um grande tubo

que envolve a edificação. O tempo que este tubo despenderá para ultrapassá-la é considerado o tempo de rajada, ou seja, quanto maiores as dimensões da edificação, maior será as dimensões do tubo e, portanto, maior será o tempo de rajada.

A NBR6123:1988 define três classes de acordo com as dimensões das edificações:

CLASSE A: A NBR6123:1988 constatou que o intervalo mais curto das medidas usuais (3s) corresponde a rajadas cujas dimensões envolvem convenientemente obstáculos de até 20m. Sendo assim, a Classe A é composta por todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estrutura sem vedação e toda edificação na qual a maior direção horizontal e vertical não exceda 20m.

CLASSE B: Compreende toda edificação, ou parte de edificação para qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20m e 50m

CLASSE C: Inclui toda edificação ou parte da edificação para qual a maior dimensão horizontal ou vertical exceda 50m

A superfície frontal apontada na descrição das classes é referente à superfície de incidência do vento.

III) Altura sobre terreno:

Conforme a NBR6123:1988, a partir da escolha da categoria de rugosidade e classe da dimensão da edificação, é possível obter o coeficiente S_2 pela equação a seguir:

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

Sendo:

b = parâmetro meteorológico encontrado na Tabela 3;

p = correção da classe da edificação encontrado na Tabela 3;

F_r = fator de rajada correspondente à categoria II;

z = altura do ponto da edificação em estudo em metros, a partir da superfície do terreno.

Tabela 3 - Relação entre categorias, classes e parâmetros

CATEGORIA	z_g (m)	Param.	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		F_r	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,94	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Fonte: NBR6123:1988

Uma forma alternativa de obter o coeficiente fator S_2 , de acordo com a NBR6123:1988, é em função da determinação da categoria, classe e altura da edificação em estudo.

4.2.1.2.3 Fator estatístico S_3

O fator estatístico S_3 pondera o grau de segurança requerido e o tempo de vida útil da edificação. É baseado na definição dada para a velocidade básica V_0 no item 4.2.1.1 é “o vento que apresenta o tempo de retorno³ médio de 50 anos”, sendo que a probabilidade da velocidade V_0 ser igualada ou excedida é de 63%. Tais índices de vida útil e de nível de probabilidade presentes na definição de V_0 são considerados adequados para edificações como hotéis, residências, edifícios comerciais e industriais. Sendo assim, a NBR 6123:1988 atribuiu para tal grupo de edificações o coeficiente mínimo de $S_3 = 1$.

³ Período de retorno ou tempo de recorrência, segundo VILLELA e MATOS (1975), é o período de tempo médio (medido em anos) em que um determinado evento deve ser igualado ou superado pelo menos uma vez.

Devido à falta de norma específica para segurança em relação às ações do vento, a NBR 6123/1988 estabeleceu fatores mínimos de S_3 para grupos diferentes de edificações, conforme indica a Tabela 4.

Tabela 4 – Resumo dos valores mínimos do fator estatístico S_3 com informações da NBR6123/1988

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.).	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação.	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.).	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.).	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos Grupos 1 a 3 durante a construção.	0,83

Fonte: Autoria própria

Através do Anexo B da NBR6123:1988, há possibilidade de utilização de outros níveis de probabilidade assim como outros períodos de exposição da edificação à ação do vento para a determinação do S_3 .

4.2.1.2.4 Cálculo da velocidade característica V_k

A velocidade característica do vento V_k é obtida, posteriormente ao cálculo dos coeficientes de ponderação de V_0 , pela seguinte equação:

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (11)$$

4.2.1.3 Pressão dinâmica q

Como dito no item 4.2.1., a pressão dinâmica q pode ser obtida pela seguinte equação:

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (12)$$

Com q em N/m² e V_k em m/s. Ela está associada à velocidade característica V_k em condições normais de temperatura e pressão, ou seja, 15°C e 1 atm (101325 Pa).

4.2.1.4 Coeficientes de pressão

Os coeficientes de pressão são parâmetros adimensionais que descrevem a distribuição da pressão sobre a edificação. Eles podem ser externos (C_{pe}) ou internos (C_{pi}) em relação à superfície em estudo, sendo que a diferença entre as pressões efetivas de cada face define a pressão efetiva da superfície:

$$\Delta p = \Delta p_e - \Delta p_i \quad (13)$$

Onde:

$$\Delta p_e = \text{pressão efetiva externa} = q C_{pe}$$

$$\Delta p_i = \text{pressão efetiva interna} = q C_{pi}$$

Portanto:

$$\Delta p = (C_{pe} - C_{pi}) q \quad (14)$$

O vento que incide sobre um edifício pode provocar sucção ou sobrepressão na superfície em estudo. Sucção ocorre quando a pressão efetiva está abaixo da pressão atmosférica de referência e a sobrepressão quando está acima. Assim,

valores positivos dos coeficientes indicam sobrepressão, enquanto valores negativos indicam sucção.

Os valores de coeficiente de pressão externa podem ser determinados, de acordo com o tipo do edifício e as direções críticas do vento, através de tabelas presentes nos ANEXOS E e F da Norma NBR6123. Quanto ao coeficiente de pressão interna, os valores podem ser determinados através da permeabilidade das paredes ao ar, de acordo com os materiais e as aberturas existentes.

4.2.1.5 Coeficiente de forma

Assim como os coeficientes de pressão, os coeficientes de forma podem ser externos (C_e) ou internos (C_i) e indicam sobrepressão quando positivos e sucção quando negativos. A força do vento, incidindo perpendicularmente sobre uma superfície de área A, é dado pela diferença entre as forças efetivas externa e interna:

$$F = F_e - F_i \quad (15)$$

Onde:

$$F_e = \text{força efetiva externa} = q A C_e$$

$$F_i = \text{força efetiva interna} = q A i$$

Portanto:

$$F = F_e - F_i \quad (16)$$

Uma força F que atua para o interior apresenta valores positivos, enquanto que, para o exterior, F é negativo.

4.2.1.6 Coeficiente de força

As forças atuantes que compõem a força global (obtida através da soma vetorial) do vento que incide sobre um edifício ou parte dela, podem ser obtidas pela seguinte equação:

$$F = C_f q A \quad (17)$$

Onde:

C_f = coeficiente de força, especificado em cada caso: $C_x, C_y, etc.$

A = área de referência, especificada em cada caso.

5. EDIFÍCIO MODELO

5.1 Caracterização Geral

O Eldorado Business Tower é um icônico edifício corporativo localizado no bairro de Pinheiros, em São Paulo. Concebido pelo escritório *Aflalo/Gasperini Arquitetos* em 1998 e com projeto estrutural de *França & Associados*, o edifício possui 142,5 metros de altura com 36 pavimentos de aproximadamente $2000m^2$ cada. O empreendimento se destaca pela obtenção da primeira Certificação *LEED* de Sustentabilidade do país devido à integração de sistemas de automação e à racionalização de recursos.

Finalizado em 2008, o edifício apresenta uma solução estrutural em laje cogumelo protendida que permitiu a abertura de vãos maiores e de pé-direito mais alto nas áreas úteis dos escritórios. Além disso, o núcleo central da estrutura possui pilares paredes ligados por vigas, formando pórticos rígidos com maior capacidade de absorção dos esforços horizontais e transmissão à base, garantindo assim seu contraventamento. Soluções em vigas e escadas pré-moldadas também foram adotadas, conferindo maior rapidez em etapas construtivas da torre (Figura 34). Possui dois pavimentos de estacionamentos abaixo do térreo, além de uma torre de estacionamentos a esse anexa. As fundações foram executadas com a solução técnica de sapatas isoladas, conforme Figura 31.

Figura 31 – Execução da fundação em sapata de um pilar do núcleo.



Fonte: TQS®.

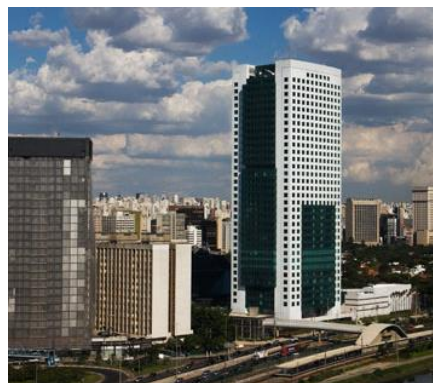
Quanto à região do entorno, as construções são predominantemente médias e baixas, compondo as residências, comércios do Bairro Jardins e o Jockey Club (Figura 32). Ocupando o terreno do Shopping Eldorado junto à margem do rio Pinheiros, o edifício se sobressai pela altura, acompanhado de mais dois edifícios próximos: o edifício Unibanco e o Condomínio Edifício Nações Unidas (Figura 33).

Figura 32 - Vista do Edifício Eldorado Business Tower, com destaque para o Jockey Club e entorno.



Fonte: aflalo/gasperini arquitetos – divulgação.

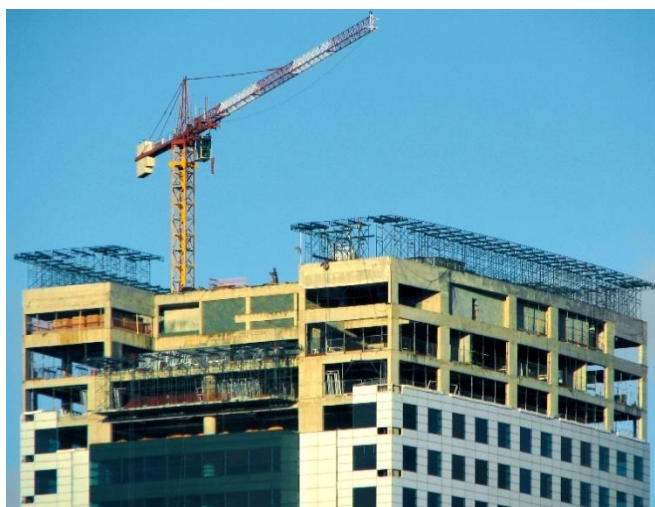
Figura 33 - Edifício Unibanco, Condomínio Nações Unidas e Eldorado Business Tower, respectivamente.



Fonte: aflalo/gasperini arquitetos – divulgação.

O estudo específico do comportamento estrutural desse edifício sob efeito do carregamento de vento será desenvolvido a partir dos próximos itens, visando a documentação das técnicas exigidas e inerentes à produção das representações físicas e computacionais.

Figura 34 – Últimas fases da construção dos pavimentos superiores do Eldorado Business Tower.



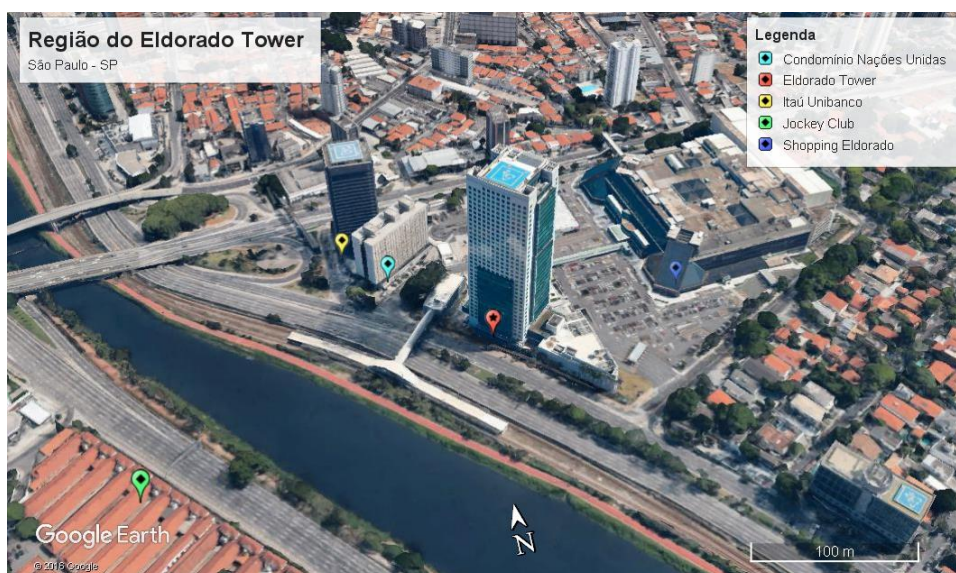
Fonte: mapio.net

6. MODELO FÍSICO

6.1 Material e técnicas

A partir das imagens de referências e dados de projeto (os mesmos utilizados no desenvolvimento do modelo computacional), o modelo físico foi elaborado com auxílio do software Autodesk/AutoCAD®. Foram reproduzidas as faces principais do edifício, bem como foram representadas a torre de garagem a ele anexa e dois edifícios adjacentes, ilustrados na Figura 35.

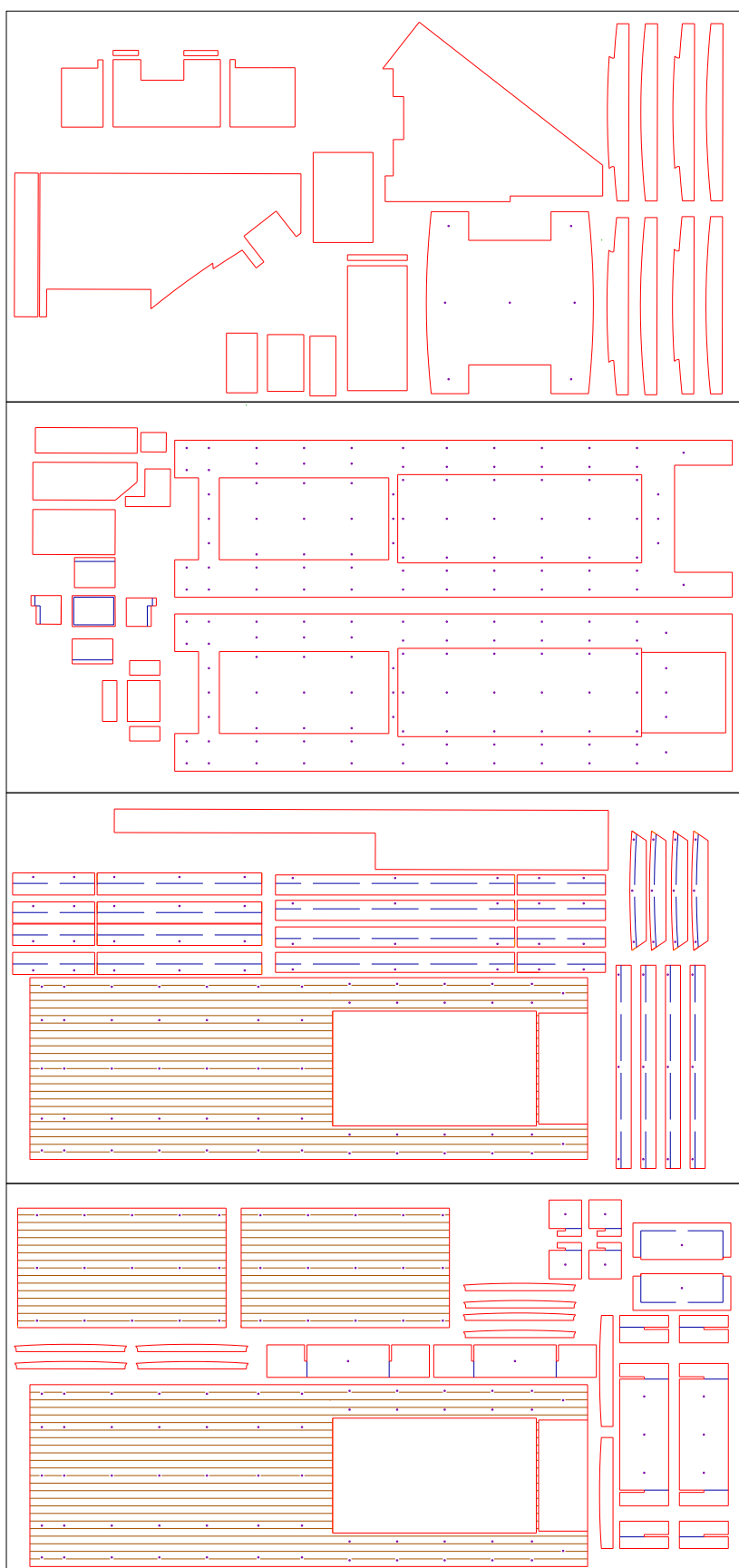
Figura 35 - Vista da Região de interesse, com edifícios indicados.



Fonte: Google Earth

Para a confecção das peças, foi utilizada a cortadora a laser do Inovalab@Poli (Figura 37), do prédio da Produção da Escola Politécnica da USP. O material empregado, madeira *mdf* crua de espessura 3 mm, foi previamente cortado em placas de tamanho conveniente para inserção na cortadora e para correta alocação dos desenhos nas placas, conforme visto na Figura 36. As placas, já cortadas, foram unidas com uso de cola instantânea.

Figura 36 - Folhas da Cortadora a Laser.



Fonte: Autoria Própria

A escala do modelo, para as suas dimensões de 142,5 m de altura foi convencionada em 1:200. Assim, a altura do modelo será de 0,713 m. A escala adotada foi indicada, de acordo com a altura do edifício, visando satisfazer as dimensões impostas pelo Túnel de Vento. A camada limite atmosférica se desenvolve em grandes centros urbanos a alturas da ordem de 0,5 km acima do solo, devido às interferências e turbulências nesses ambientes. Assim, considerando a escala citada acima e a altura $H_{túnel} = 200 \text{ cm}$, tem-se uma altura de aproximadamente 400 m, na proporção, para desenvolvimento do perfil de velocidades do vento.

Figura 37 - Cortadora a laser disponível no Inovalab@Poli



Fonte: Autoria Própria

6.2 Tomadas de pressão

Os atributos mais importantes a serem considerados na caracterização do modelo físico, além de sua geometria, são a quantidade e a distribuição das tomadas de pressão. Para cada tipo de modelo, essas variam de acordo com três condições principais.

A primeira é o tipo de estrutura a ser estudada, seja um edifício, um estádio esportivo ou seções de pontes, por exemplo, visto que cada uma apresenta diferente fenômeno de interesse a ser analisado. No caso de um estádio esportivo, por exemplo, há maior preocupação em se determinar os esforços de sucção e de sobrepressão atuantes na cobertura do estádio, sendo que assim uma maior densidade de tomadas de pressão nessas regiões deve ser considerada.

A segunda é a capacidade de operação simultânea de tomadas de pressão pelo Sistema de Aquisição de Dados do Túnel de Vento, além da conveniência e relevância em se adotar mais ou menos tomadas. No caso do Túnel de Vento do IPT o número usual em ensaios de edifícios varia entre 300 a até 500 tomadas de pressão.

Já a terceira é, fundamentalmente, a geometria do modelo. O padrão de escoamento do vento na superfície do modelo, a tendência de desprendimento e formação de vórtices em algumas faces ou a assimetria do projeto governam, por exemplo, o interesse em se discretizar melhor algumas regiões do modelo. É natural esperar, dessa forma, que as bordas das faces e regiões com reentrâncias apresentem maior densidade de tomadas de pressão, visto que a variação de coeficiente nessas regiões tende a ser mais sensível.

Assim sendo, para esse modelo foram contabilizadas 392 tomadas de pressão, distribuídas entre as quatro faces e o teto do edifício. Por simplificação, foi desconsiderada a aplicação de tomadas de pressão no edifício garagem. A Figura 38 ilustra o processo de colocação dos tubos nos furos previamente executados pela cortadora a laser. Esses furos, propositalmente de diâmetro maior, foram preenchidos com cola epóxi, visando melhor fixação, vedação e acabamento dos terminais dos tubos.

O resultado final da colagem dos tubos das tomadas de pressão e das faces do modelo físico pode ser observado na Figura 39.

Figura 38 - Montagem do modelo físico a partir das chapas cortadas



Fonte: Autoria Própria

Figura 39 – Faces montadas e colagem final



Fonte: Autoria Própria

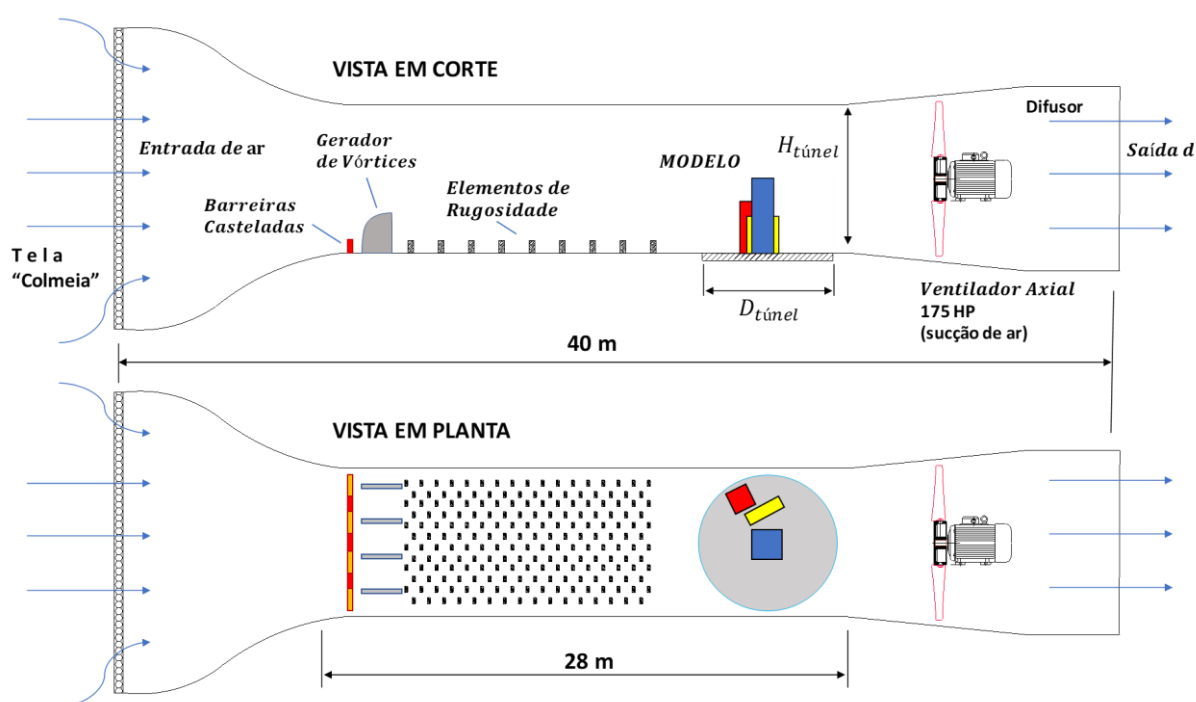
7. TÚNEL DE VENTO

7.1 Caracterização Geral

O Túnel de Vento de camada limite atmosférica, equipamento do Laboratório de Vazão do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) é o maior da América Latina, com 40 metros de comprimento e 28 metros úteis (câmara de ensaio), sendo largamente utilizado no país para a caracterização da ação de ventos sobre estruturas civis e navais, bem como análises de turbinas eólicas e avaliação de conforto térmico, dinâmico e de dispersão de poluentes, entre outros (FARIA, 2014).

A Figura 40 representa um esquema simplificado do Túnel de Vento em estudo e seus respectivos sistemas de sucção de ar, de controle da entrada do ar e medidas de interesse.

Figura 40 - Esquema simplificado do Túnel de Vento do IPT.



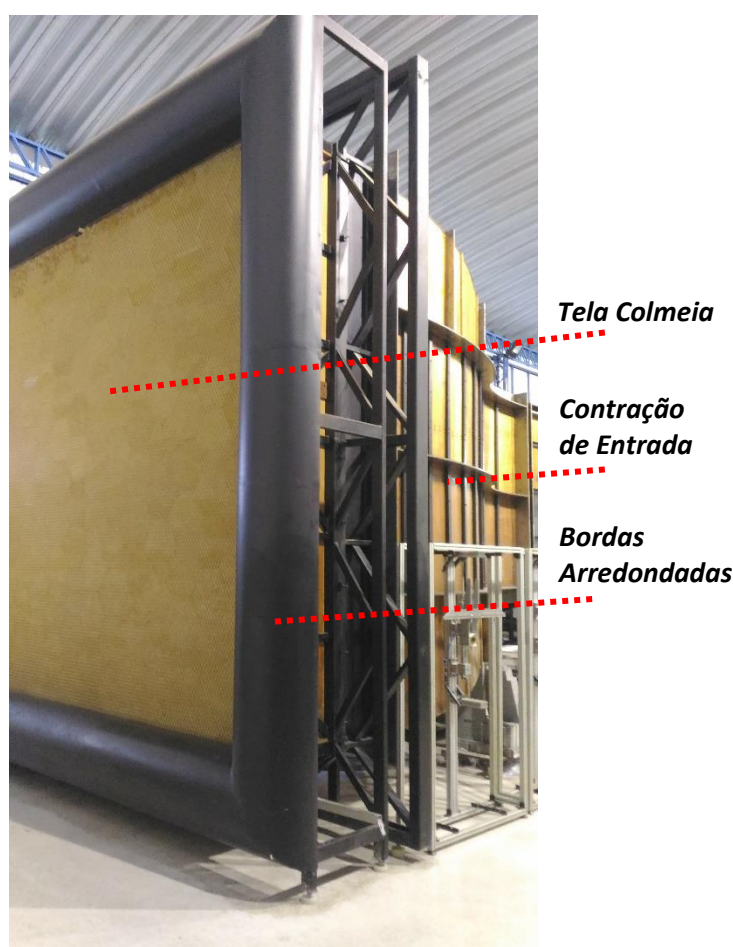
Fonte: Autoria própria

Trata-se de um túnel de vento de circulação direta, isto é, sem retorno do ar à câmara, como ocorre no túnel de circuitação fechada. O escoamento do ar é exercido

por um ventilador axial de 175cv associado ao difusor (alargamento do trecho final) do túnel, sendo assim sua função succionar o ar de dentro da câmara para o ambiente externo. Segundo Holmes (2001, p. 140), a função do difusor ao fim da câmara de ensaio é garantir a conservação de energia, reduzindo as perdas de energia cinética na saída do ar com o propósito principal de redução de consumo elétrico do ventilador.

O controle e a redução da turbulência do ar de entrada são garantidas através de três sistemas (Figura 41): telas formadas por unidades hexagonais (tal qual a formação de uma colmeia), canalizando o ar e uniformizando o escoamento; um “quadro” de bordas arredondadas, com função de evitar formação de vórtices pelas quinas da entrada; e uma contração de entrada (relação entre a área de entrada do ar e a área do trecho útil do túnel). No caso do túnel em questão, a razão entre essas áreas é de 2,50.

Figura 41 - Indicação dos elementos de prevenção de turbulência no túnel de vento



Fonte: Autoria própria

Como a evolução natural da camada limite até seu total desenvolvimento se dá de forma relativamente lenta – dependendo da rugosidade do terreno (LOREDO-SOUZA, SCHETTINI, & PALUCH, 2004), seu crescimento é limitado por problemas de escala, mesmo em muitos túneis considerados longos. Dessa forma, é comum a utilização dos genericamente denominados “*Roughness, barrier and mixing-device methods*” (COOK, 1990, p. 79) para definir a camada limite com mais acurácia e escala. Na câmara de ensaio do IPT, a simulação do vento de interesse é assegurada através de três desses mecanismos: os elementos de rugosidade, as barreiras casteladas e os geradores de vórtice (Figura 42).

O primeiro é um método passivo formado por pequenos blocos de madeira com alturas variadas - com espaçamentos e dimensões determinadas para cada caso de rugosidade previsto em norma. Esses elementos são posicionados ao longo de todo o túnel e simulam a rugosidade terrestre do local em estudo, sendo consideradas a parte “natural” dos mecanismos. É muito importante que seja preparado de forma correta, pois estabelece os parâmetros que definem o perfil de velocidades.

Figura 42 - Aparatos de simulação do ambiente e do vento na câmara de ensaio



Fonte: Autoria própria

Os outros dois métodos, também passivos, são considerados a parte “artificial do ensaio”. A barreira castelada é formada por uma pequena parede responsável por um déficit de quantidade de movimento logo à entrada do túnel. No caso do IPT, a barreira tem a borda superior em forma castelar. Já o gerador de vórtices, é formado por uma série de barreiras de formato e posição específica que, como o próprio nome diz, provoca a formação de vórtices no escoamento. Estudada por Counihan (1969), o objetivo dessas barreiras é a formação de turbulências que aumentam sua intensidade quanto mais próximas ao solo. Isso permite que haja uma diminuição da quantidade de movimento próximo ao piso e um ganho de espessura da camada limite. No caso do IPT, essas barreiras são de formato elíptico: lateralmente correspondem a um quarto de elipse, com o eixo maior igual a duas vezes o eixo menor. Os geradores de vórtices podem ser observados na Figura 42, em destaque.

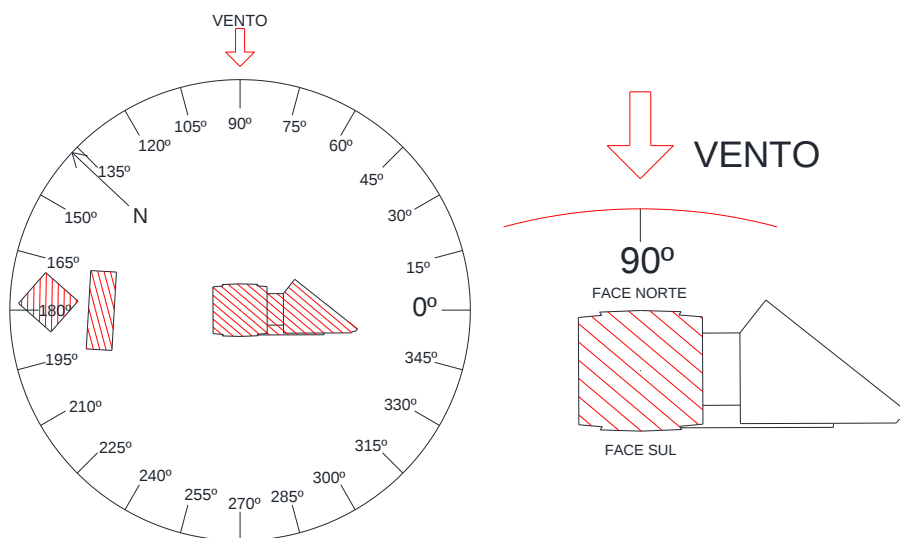
Para o desenvolvimento do projeto são dimensões de interesse a altura do túnel ($H_{túnel} = 200cm$) e o diâmetro útil da bandeja giratória ($D_{túnel} = 300cm$) na qual será posicionado o modelo físico do edifício. Esses valores são limitantes para a definição da escala a ser utilizada no modelo, visto que é de interesse tanto respeitar a camada limite atmosférica (relativa a $H_{túnel}$) como representar as estruturas e outros obstáculos que interferem no escoamento do vento às redondezas do edifício modelo (relativa a $D_{túnel}$). A partir desses valores a definição da escala do modelo físico será dada em 6.1.

A bandeja na qual o modelo se apoia tem capacidade de rotação, permitindo que se obtenha com facilidade, através de operação remota, os coeficientes de pressão e de arrasto para ventos incidentes em diversos ângulos α em relação à fachada principal. As medições dos coeficientes de interesse para diversos ângulos de ataque do vento comporão o banco de dados necessário para a análise desse projeto.

De forma geral e devido à simetria que a seção transversal desse projeto apresenta, pode-se inferir que os ângulos α de maior interesse nesse estudo serão aqueles relativos ao vento incidindo perpendicularmente às faces do edifício ($\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 90^\circ$).

Ainda assim, serão obtidos e analisados os resultados para vento incidindo a cada rotação de 15° da bandeja giratória, a partir da posição inicial indicada como 0° na Figura 43. A Figura 48 também ilustra a posição inicial do modelo no ensaio.

Figura 43 – Referência de ângulo inicial de incidência de vento para o ensaio.



Fonte: Autoria própria

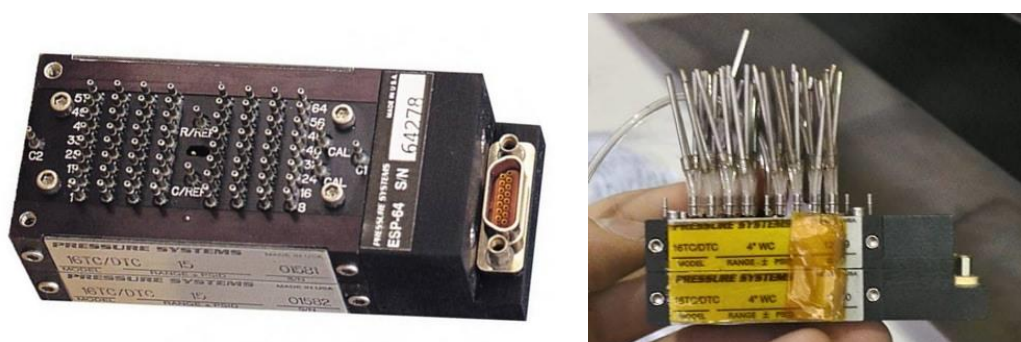
7.2 Registro descritivo do ensaio

A instrumentação e o ensaio do modelo real foram realizados em julho de 2017, nas dependências do Laboratório do IPT. Ao longo de uma semana foram desenvolvidas as etapas (geralmente executadas pelo corpo técnico do laboratório) necessárias para a correta tomada de dados do ensaio, as quais serão brevemente descritas nesse item.

O modelo chegou desmontado ao laboratório, sendo remontado *in loco*. As peças dos edifícios de entorno foram fixadas à chapa base com uso de cola instantânea. Como o edifício principal (Figura 46) exigiria mais a chapa base (tendendo a fletir a mesma com o movimento oscilatório gerado pelo escoamento do vento no ensaio), a fixação do mesmo também requisitou o uso de cantoneiras “L” aparafusadas no edifício e na chapa (Figura 47).

Os tubos, já fixados à superfície do modelo, foram conectados aos blocos de aquisição de dados do equipamento (comercialmente denominados *Electronic Pressure Scanners*). Esses blocos são compostos por 64 canais de entrada para os tubos do modelo e outros canais de referência (importantes para a obtenção dos coeficientes de pressão). Funcionam ligando a ponta livre dos tubos a sensores (transdutores) piezoresistivos que permitem coletar dados do desenvolvimento da pressão ao longo de um período de tempo pré-determinado. Foram utilizados, ao todo, 7 blocos iguais ao da Figura 44.

Figura 44 – Electronic Pressure Scanner



Fonte: chell.co.uk / Autoria própria.

A chapa usada como base era de madeira tipo MDF, de espessura 9 mm. Sua espessura é uma característica importante, por duas razões: primeiramente, como a bandeja giratória apresenta um espaço próprio para o encaixe do modelo, uma chapa muito grossa (maior que 12 mm) poderia interferir no escoamento do ar, sobretudo nas redondezas da base do edifício. O segundo motivo pode ser observado na Figura 49. Como há um vão na bandeja para passagem dos tubos, conforme ilustrado na Figura 45, uma chapa muito fina poderia fletir mais, sendo que seus deslocamentos poderiam tanto prejudicar os resultados quanto danificar o modelo ao longo dos ensaios.

Figura 45 - Detalhe do vão no centro da bandeja giratória.



Fonte: Autoria própria

Figura 46 – Fixação do modelo no centro da bandeja giratória.



Fonte: Autoria própria

Figura 47 – Uso de cantoneiras na base do modelo.



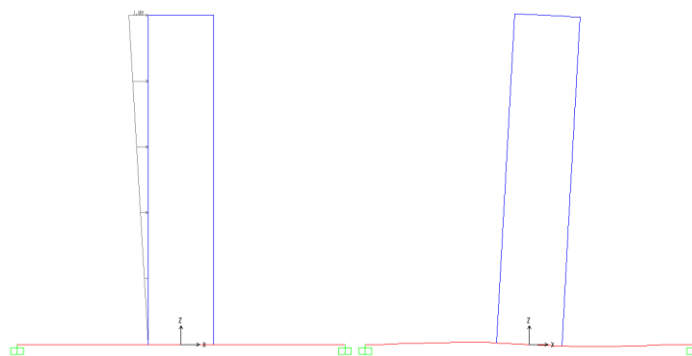
Fonte: Autoria própria

Figura 48 - Modelo montado e posicionado para início do ensaio.



Fonte: Autoria própria

Figura 49 – Exemplo de modelo carregado mobilizando deslocamentos na chapa base.



Fonte: Autoria própria

Após o correto posicionamento dos blocos e do modelo (com sua fixação por parafusos à bandeja giratória, representado pela Figura 48), os ensaios foram executados. Ao todo, foram realizados 24 ensaios para tomada das pressões no edifício (variando o ângulo de ataque do vento a cada 15°), bem como um ensaio variando a velocidade do vento para um único ângulo de ataque. A ideia desse último ensaio foi descrita no item 4.1.6 e indicada no Gráfico 2 do relatório: a velocidade de vento de 15 m/s fora suficiente para que fossem obtidos os resultados de interesse.

Executados os ensaios, os dados foram registrados, transferidos em arquivo de formato *.txt* e disponibilizados ao grupo. Os arquivos apresentavam, nesse caso, para cada ângulo, as pressões (em Pa) observada em cada tubo (colunas do arquivo), para uma certa frequência de leitura por segundo (linhas do arquivo). Dessa forma, cada arquivo de texto apresenta tamanho de 448 colunas, contemplando as 392 tomadas de pressão, as três tomadas de referência e os terminais de leitura não utilizados (e descartados da análise) dos sete blocos (7×64), e, em média, 12000 linhas de leitura de pressões por arquivo.

É prática comum entre os projetistas (clientes) e o corpo técnico do Túnel de Vento o pedido dos dados já em arquivo de entrada do TQS®, com as forças e momentos separados previamente em arquivo de texto para cada pavimento do edifício. Apesar disso, é parte da ideia do escopo obter esses dados independentemente.

8. TRATAMENTO DOS DADOS DE ENSAIO

8.1 Comportamento do vento no modelo físico

Através da simulação dos coeficientes de pressão sobre cada área de influência das tomadas de pressão nos diferentes ângulos de vento ensaiados, é possível fazer a verificação do comportamento do vento no modelo físico, ou seja, atestar se o resultado obtido estava de acordo com o esperado para sucção e sobrepressão nas diferentes áreas do modelo. Tal verificação inicial, antes do tratamento dos dados, é imprescindível para identificar e descartar possíveis tomadas de pressão com comportamento atípico que podem acarretar distorções no resultado final.

A seguir, será descrito o passo a passo para obtenção dos gráficos 3D de cores dos coeficientes de pressão, seguido da análise do comportamento do vento e dos possíveis erros encontrados.

8.1.1 Construção tridimensional do modelo físico

Primeiramente, construiu-se um sólido 3D do Eldorado Business Tower em escala 1:200 no software *SolidWorks*®, adotando-se como parâmetro as medidas finais do modelo físico, assim como as simplificações adotadas na construção do mesmo, de forma que o sólido 3D fosse o mais próximo possível do modelo ensaiado.

O *SolidWorks*®, utilizado para esta construção, é um software de desenho assistido por computador (CAD) e de engenharia assistida por computador (CAE) que busca facilitar a criação de desenhos técnicos e projetos em 3D.

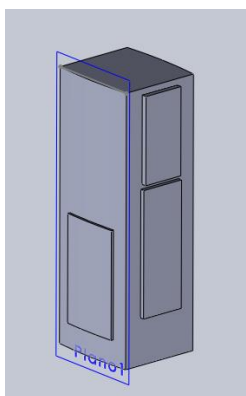
Os seguintes passos foram executados na construção 3D do modelo:

- Construção do corpo sólido do edifício;
- Extrusão dos blocos laterais (Figura 50.a);
- Cortes no topo e na base do edifício (Figura 50.b);

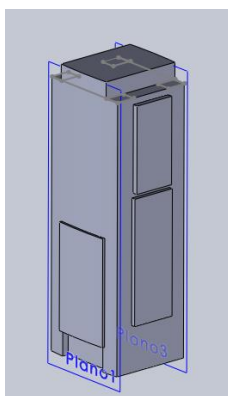
- Execução de superfícies sobre o sólido representando as alvenarias do topo (Figura 50.c).

Figura 50 - Processo de modelagem 3D do Eldorado Business Tower no SolidWorks

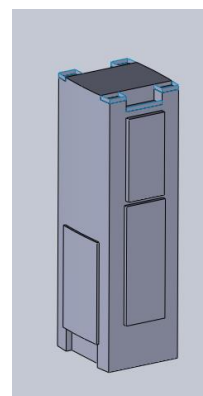
(a) Extrusão dos blocos laterais



(b) Corte no topo e laterais



(c) Superfícies e detalhes finais no topo



Fonte: Autoria própria

8.1.2 Coordenadas das tomadas de pressão

Além da execução de modelos 3D, o *SolidWorks*® também permite obter as coordenadas x, y, z de pontos posicionados no modelo de acordo com uma origem preestabelecida. A origem foi adotada previamente à construção do modelo com a preocupação de que o sólido estivesse como um todo no primeiro quadrante, ou seja, sem coordenadas negativas.

No resultado final do sólido 3D do modelo físico (Figura 50.c), foram alocados pontos representando as 392 tomadas de pressão para encontrar suas coordenadas, que serão utilizadas tanto nesta verificação inicial do comportamento do vento, quanto na próxima etapa de tratamento dos dados no *MatLab*® para cálculo dos esforços.

As coordenadas obtidas em cada ponto foram transcritas para uma planilha onde se associava as coordenadas espaciais ao respectivo número da tomada de pressão (1 a 392), ao número do bloco do equipamento ao qual estava encaixada no ensaio de túnel de vento (1 ao 8) e, por fim, a sua posição relativa neste bloco (1 a 64), conforme exemplifica o trecho da Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 – Trecho exemplificativo da tabela utilizada para associação do número do ponto de tomada de pressão adotado no modelo, às suas coordenadas espaciais no modelo 3D, ao seu número do bloco do equipamento e posição no sensor do ensaio

BLOCO 7				
Tomadas		Coordenadas		
Bloco	Modelo	x	y	z
1	1	16,65	208,98	697,27
2	2	16,65	180,83	697,27
3	3	16,65	56,03	697,27
4	4	16,65	27,88	697,27
5	5	16,65	208,98	668,74
6	6	16,65	180,83	668,74
7	7	16,65	149,63	668,74
8	8	16,65	118,43	668,74
9	9	16,65	87,23	668,74
10	10	16,65	56,03	668,74
11	11	16,65	27,88	668,74
12	12	16,65	208,98	607,96
13	13	16,65	180,83	607,96
14	14	3,25	162,10	607,97
15	15	3,25	117,55	607,97
16	16	3,25	73,00	607,97
17	17	16,65	56,03	607,96
18	18	16,65	27,88	607,96

BLOCO 8				
Tomadas		Coordenadas		
Bloco	Modelo	x	y	z
1	65	16,65	184,93	182,50
2	66	5,86	168,08	182,50
3	67	5,86	118,43	182,50
4	68	5,86	68,78	182,50
5	69	16,65	51,93	182,50
6	70	16,65	27,88	182,50
7	71	16,65	208,98	121,72
8	72	16,65	184,93	121,72
9	73	5,86	168,08	121,72
10	74	5,86	118,43	121,72
11	75	5,86	68,78	121,72
12	76	16,65	51,93	121,72
13	77	16,65	27,88	121,72
14	78	16,65	149,62	94,85
15	79	16,65	118,42	94,85
16	80	16,65	87,22	94,85
17	81	16,65	202,95	62,28
18	82	16,65	33,90	62,28

Fonte: Autoria própria

8.1.3 Verificação do comportamento dos coeficientes de pressão

Na obtenção dos gráficos 3D de cores com os coeficientes (que serão apresentados a seguir), contou-se com o apoio do Engenheiro Gabriel Borelli Martins, pesquisador no Laboratório de Vazão do IPT, na construção da malha no modelo 3D além do apoio na importação e tratamento dos dados obtidos para o software *VisIt*.

O *VisIt* é uma ferramenta de código aberto, com fins de visualização, animação e análise de dados, permitindo aos usuários visualizar campos escalares e vetoriais definidos em malhas de duas e três dimensões (2D e 3D).

A partir das coordenadas das tomadas de pressão no modelo (obtidas conforme item 8.1.2), cada célula da malha foi associada à tomada de pressão que estivesse mais próxima, resultando nas áreas de influência de cada uma.

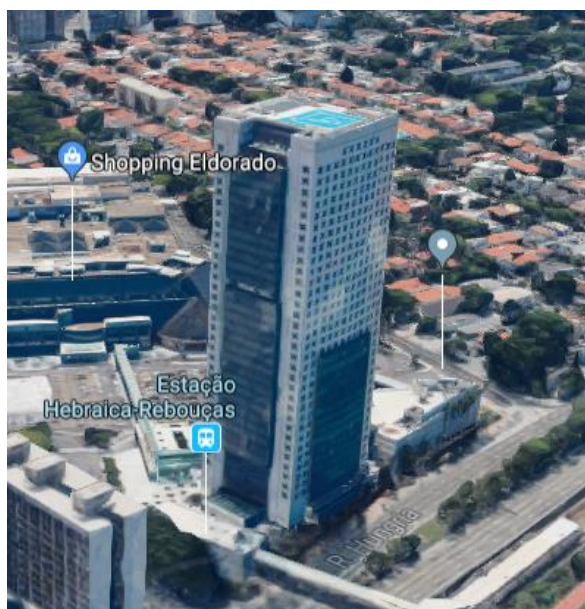
Com a associação de cada tomada de pressão a uma das 43 superfícies do modelo 3D na qual pertencem (por exemplo, na superfície 40, estão as tomadas 351, 352 e 353), foi obtida uma relação da posição das tomadas no modelo 3D e dos dados do ensaio de túnel de vento.

Por fim, foram extraídos arquivos *.vtk* (*visualization toolkit*) com a entrada de todos os dados de posicionamento dos nós das células das malhas; posicionamento

das áreas de influência; o número das faces, seus posicionamentos e suas normais; numeração das tomadas de pressão e suas coordenadas; associação de coordenadas com as posições das tomadas no bloco; e os dados de coeficientes de pressão obtidos em um dos ângulos ensaiados (de 0 grau a 360 graus variando de 15 em 15 graus, temos 28 arquivos .vtk resultantes).

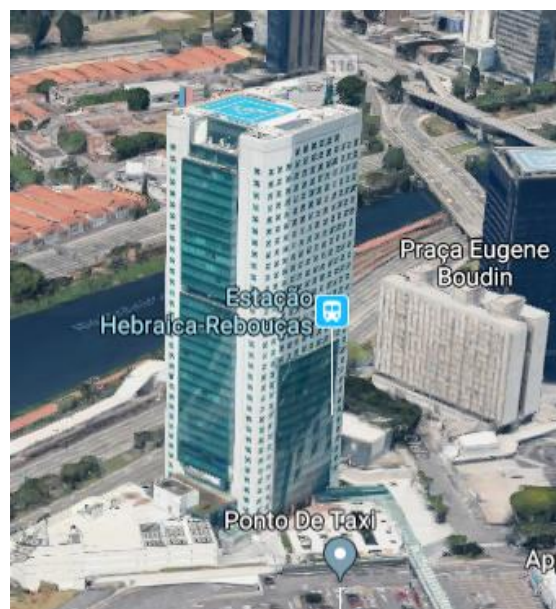
Para a retirada de imagens do software *VisIt*, foram adotadas duas vistas do Eldorado Business Tower, conforme Figura 51 e Figura 52, obtendo-se, portanto, duas vistas do modelo a cada 45 graus.

Figura 51 - Vista 1



Fonte: Autoria própria

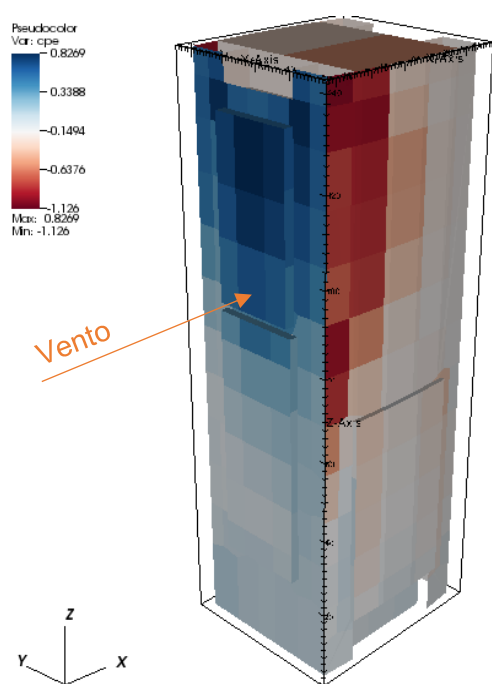
Figura 52 - Vista 2



Fonte: Autoria própria

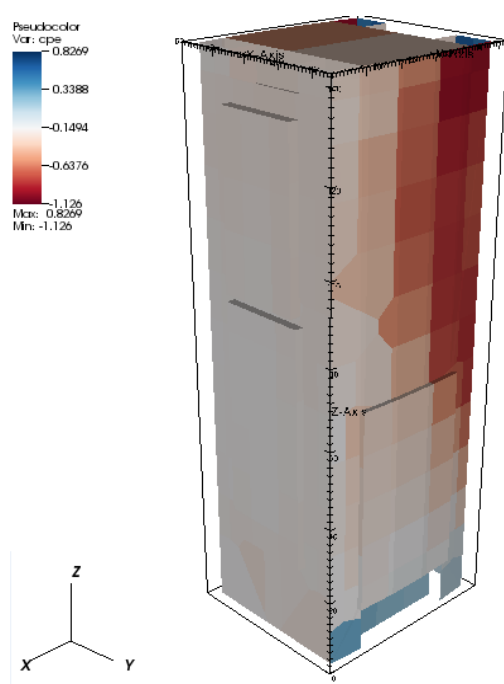
As ilustrações das próximas páginas representam a variação de coeficientes de pressão para as vistas 1 e 2, com variação do ângulo de ataque. De forma resumida, elementos em cor azul representam sobrepressão e em vermelho, sucção.

Figura 53 - Vento incidente a 0 grau - Vista 1



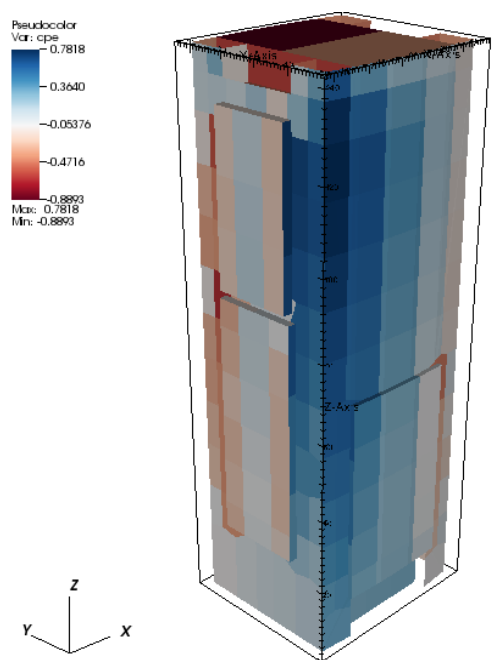
Fonte: Autoria própria

Figura 54 - Vento incidente a 0 grau - Vista 2



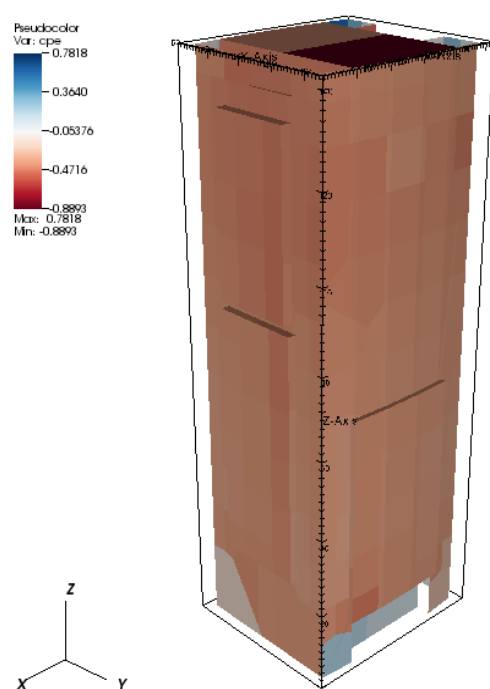
Fonte: Autoria própria

Figura 55 - Vento incidente a 45 graus - Vista 1



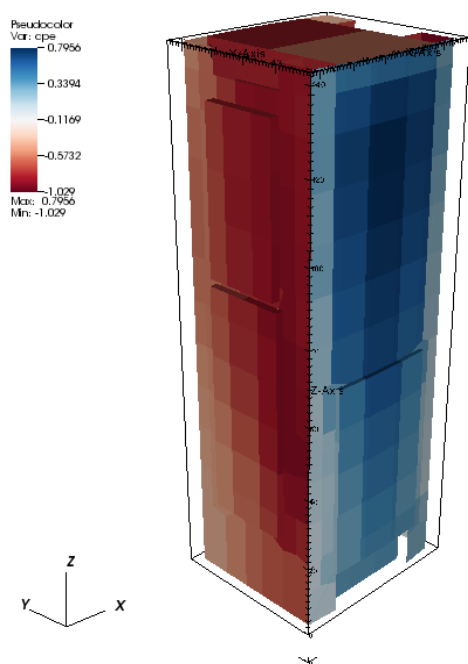
Fonte: Autoria própria

Figura 56 - Vento incidente a 45 graus - Vista 2



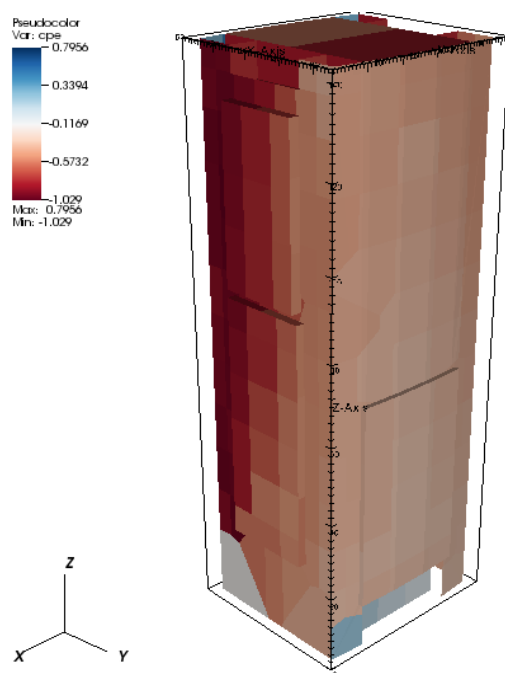
Fonte: Autoria própria

Figura 57 - Vento incidente a 90 graus - Vista 1



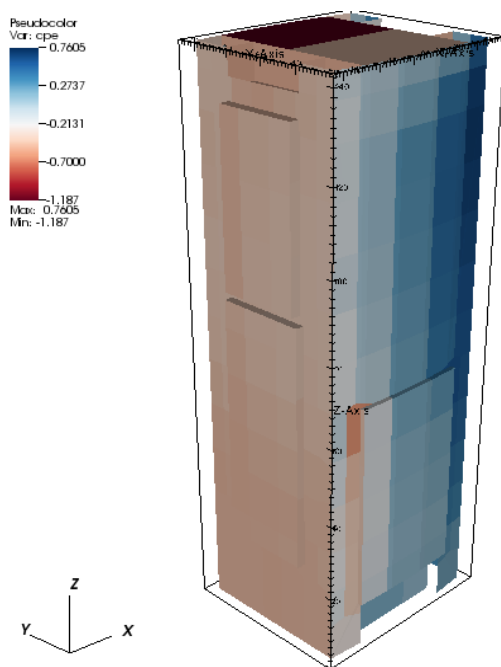
Fonte: Autoria própria

Figura 58 - Vento incidente a 90 graus - Vista 2



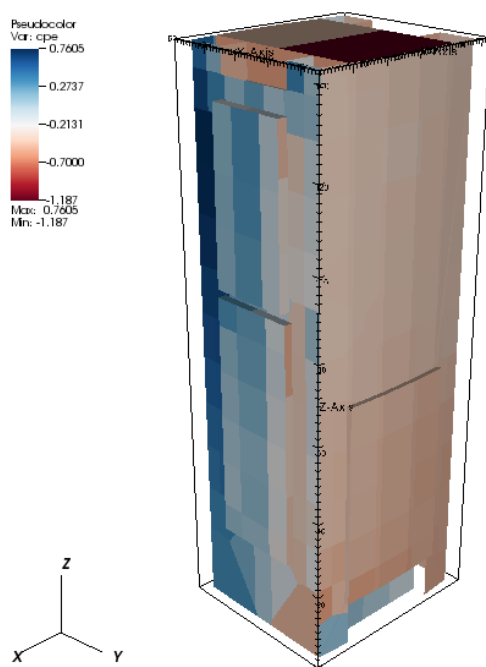
Fonte: Autoria própria

Figura 59 - Vento incidente a 135 graus - Vista 1



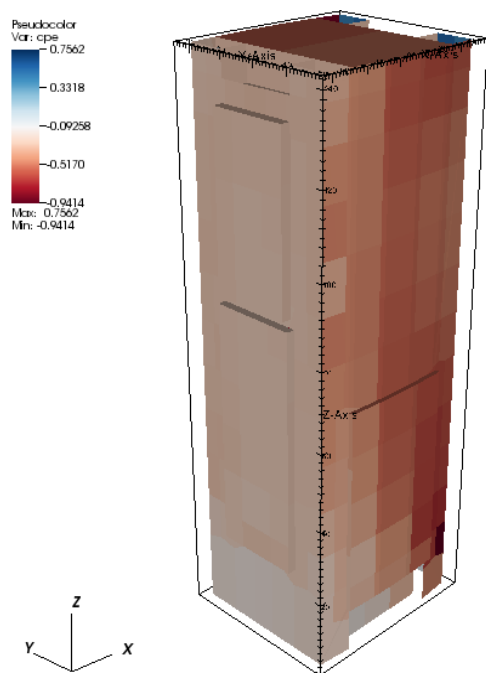
Fonte: Autoria própria

Figura 60 - Vento incidente a 135 graus - Vista 2



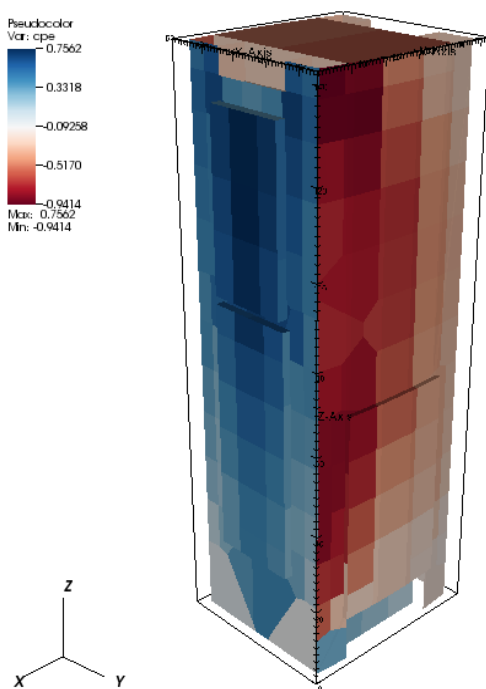
Fonte: Autoria própria

Figura 61 - Vento incidente a 180 graus -
Vista 1



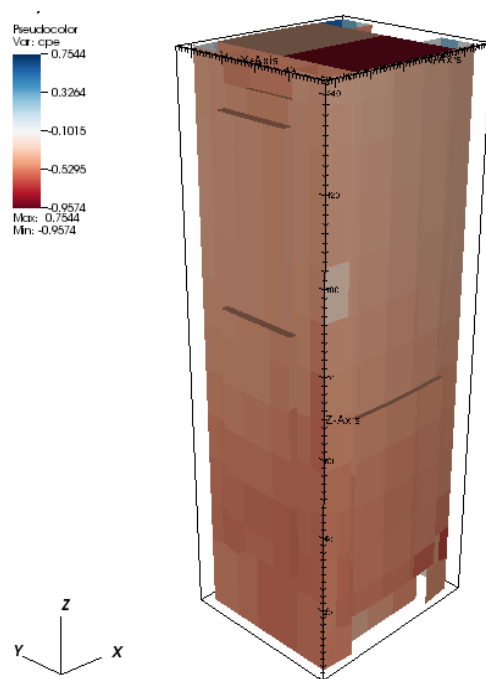
Fonte: Autoria própria

Figura 62 - Vento incidente a 180 graus -
Vista 2



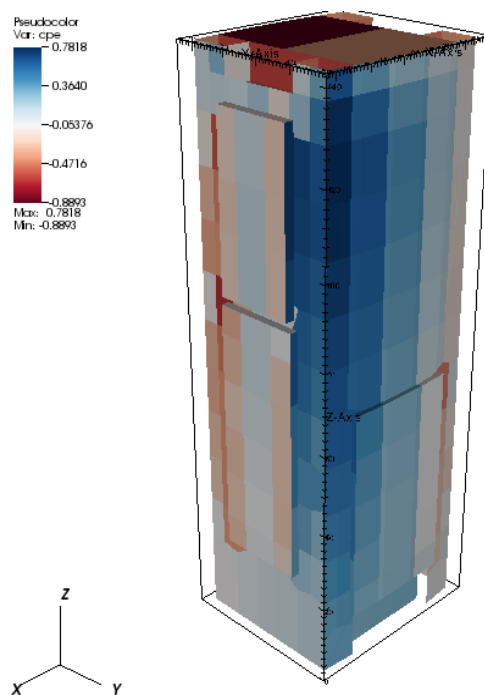
Fonte: Autoria própria

Figura 63 - Vento incidente a 225 graus -
Vista 1



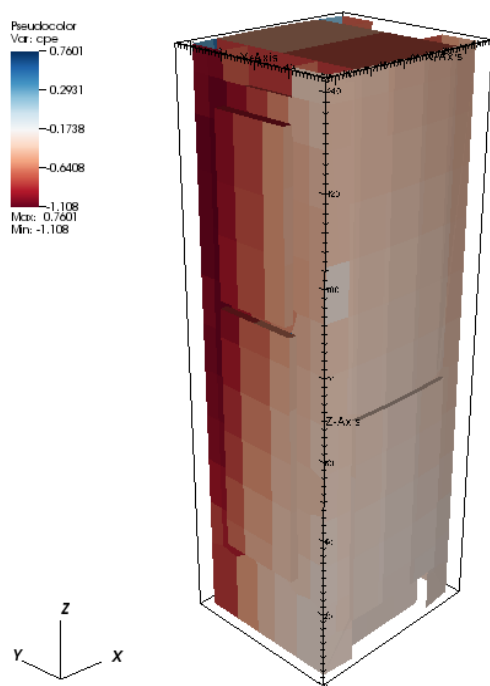
Fonte: Autoria própria

Figura 64 - Vento incidente a 225 graus -
Vista 2



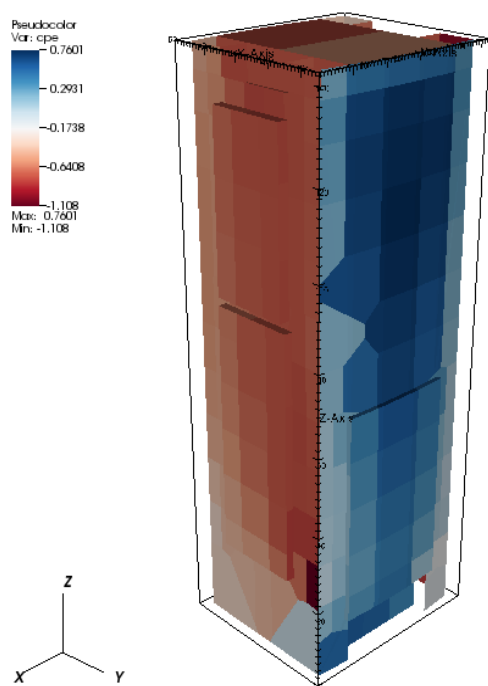
Fonte: Autoria própria

Figura 65 - Vento incidente a 270 graus -
Vista 1



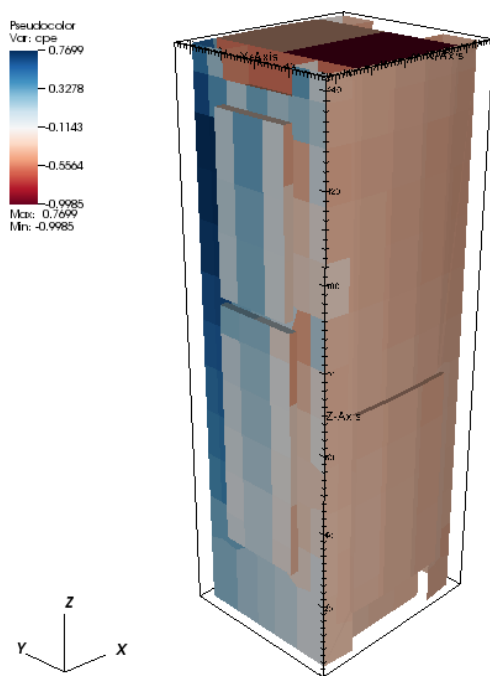
Fonte: Autoria própria

Figura 66 - Vento incidente a 270 graus -
Vista 2



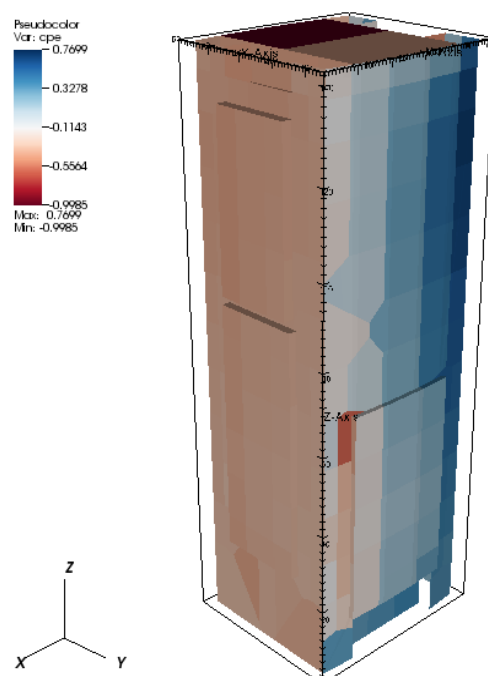
Fonte: Autoria própria

Figura 67 - Vento incidente a 315 graus -
Vista 1



Fonte: Autoria própria

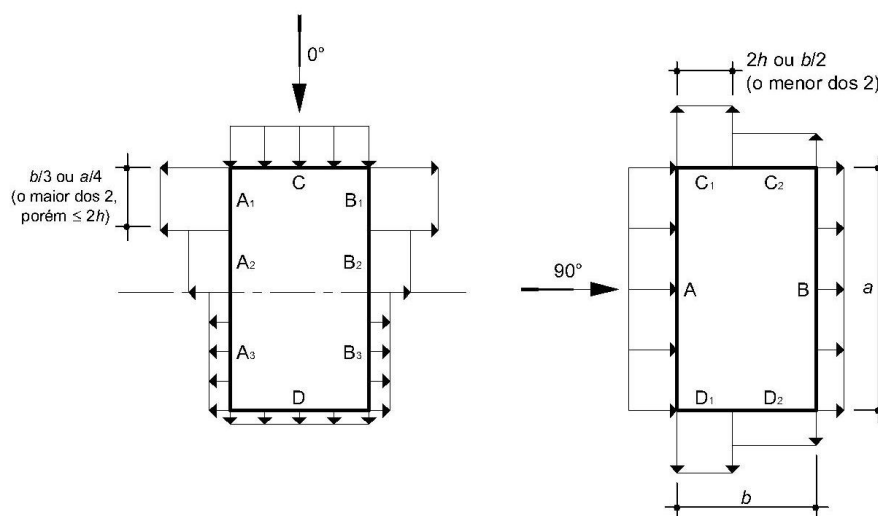
Figura 68 - Vento incidente a 315 graus -
Vista 2



Fonte: Autoria própria

Através dos resultados contidos entre a Figura 53 e a Figura 68 pode ser observado que, desconsiderando defeitos locais da malha executada com o uso do *SolidWorks*®, como claramente observado na Figura 66, por exemplo, os resultados são consistentes com a distribuição de pressões esperadas, com formação de sobrepressão sobre as faces de barlavento, e a sucção a sotavento, variável. Apesar dos erros acima descritos e observados nas figuras quanto à concepção da malha, as etapas subsequentes não serão afetadas de forma alguma, uma vez que utilizarão de outra modelagem para obtenção dos esforços de interesse. Além disso, os resultados visualmente obtidos podem ser facilmente comparados com a norma, como indicado na Figura 69. Por exemplo, no caso da Figura 65, observa-se com clareza a atenuação dos coeficientes de sucção na face lateral à incidência do vento, no sentido de barlavento a sotavento. Os coeficientes associados às letras da figura em questão podem ser observados na tabela 4 da NBR6123.

Figura 69 - Padrão de distribuição de pressões para edifício de planta retangular



Fonte: NBR6123:1988

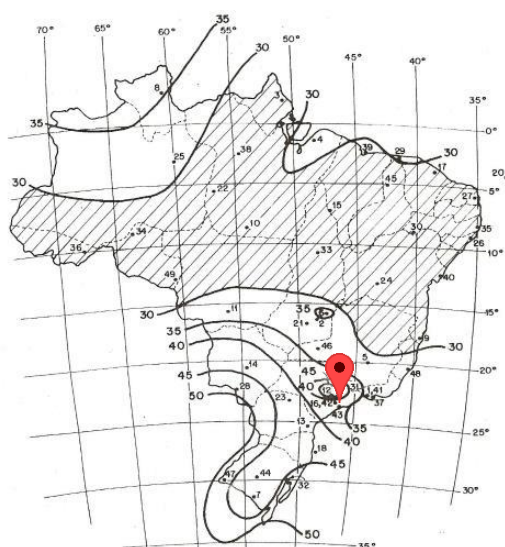
8.2 Cálculo da pressão dinâmica segundo a NBR6123:1988

Para iniciar a análise de dados obtidos no túnel de vento, é necessário primeiramente obter a pressão dinâmica q do edifício em estudo para o cálculo das forças estáticas, de acordo a NBR6123:1988.

8.2.1 Velocidade básica V_0 do modelo

O edifício Eldorado Business Tower se localiza na cidade de São Paulo. A partir da Figura 71, com a posição relativa do edifício no mapa do Brasil e a partir das isopletas da Figura 70 apresentadas no item 4.2.1.1, a velocidade básica encontrada é de 40 m/s.

Figura 70 (Figura 11 adaptada) - Isopletas de velocidade básica do vento com V_0 em m/s



Fonte: NBR 6123:1988

Figura 71 - Posição do Edifício Eldorado Business Tower



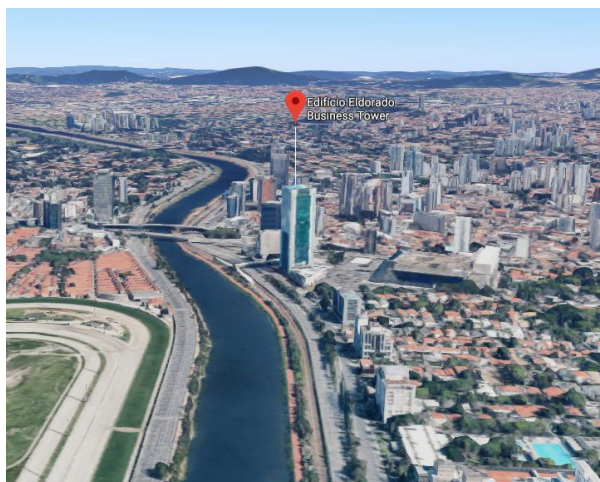
Fonte: Google Maps

8.2.2 Fator topográfico S_1 do modelo

Conforme apontado no item 4.2.1.2.1, o fator S_1 está relacionado com o relevo no qual a edificação em estudo se encontra. A Figura 72 mostra o relevo plano e pouco

ondulado do entorno do Eldorado Business Tower, o que, da Tabela 1, tem-se $S_1 = 1$, ou seja, a influência do terreno sobre a velocidade básica não é significativa.

Figura 72 - Imagem do relevo do entorno do Eldorado Business Tower



Fonte: Google Earth

8.2.3 Fator S_2 do modelo

O fator S_2 depende de três características: a rugosidade do terreno, das dimensões da edificação e da altura sobre o terreno (apresentado com mais detalhes no item 4.2.1.2.2):

Rugosidade:

A partir da caracterização do edifício modelo no item 5 e a Figura 72, pode-se notar que as construções do entorno do edifício em estudo são numerosas e predominantemente médias e baixas, compondo residências e comércios do Jardins. A maioria dos obstáculos do entorno têm, portanto, cota máxima de 10 m, se enquadrando na Categoria IV de rugosidade do terreno com base na Tabela 2.

Dimensões da edificação:

O Eldorado Business Tower tem 142,5 m de altura e, portanto, de acordo com a NBR6123:1998, o edifício está na Classe C dado que sua maior dimensão excede 50 m.

Altura sobre terreno:

A partir da Tabela 3, retirada da NBR6123:1988, obtemos os parâmetros b e p da equação (10) dadas a Categoria IV e a Classe C. O fator de rajada Fr é obtido na categoria II, e assim:

$$\begin{aligned} b &= 0,84 \\ p &= 0,135 \\ Fr_{II} &= 0,9 \end{aligned} \tag{18}$$

Substituindo-se os parâmetros na equação (8), obtém-se uma expressão de S_2 em função da altura (z):

$$\begin{aligned} S_2 &= b Fr \left(\frac{z}{10}\right)^p = 0,84 \cdot 0,95 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,135} \\ S_2 &= 0,585 (z)^{0,135} \end{aligned} \tag{19}$$

8.2.5 Fator S_3 do modelo

O Eldorado Business Tower é um edifício comercial com alto fator de ocupação pertencendo ao grupo 2, então, conforme indica a Tabela 5 apresentada no item 4.2.1.2.3, o fator mínimo de S_3 é 1,0.

8.2.6 Cálculo da velocidade característica V_k do modelo

Substituindo na equação (11) com os fatores e a velocidade básica obtidos, tem-se a expressão para a velocidade característica de acordo com a altura z de cada ponto em estudo:

$$V_0 = 40 \frac{m}{s} \tag{20}$$

$$S_1 = 1,0$$

$$S_2 = 0,585 (z)^{0,135}$$

$$S_3 = 1,0$$

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 = 40 \cdot 1 \cdot 0,585 (z)^{0,135} \cdot 1$$

$$V_k = 23,4 \cdot (z)^{0,135} \quad (21)$$

8.2.7 Cálculo da pressão dinâmica

Substituindo a expressão de V_k na equação (12), obtém-se, por fim, a expressão da pressão dinâmica:

$$q = 0,613 V_k^2 = 0,613 \cdot (23,4 \cdot (z)^{0,135})^2$$

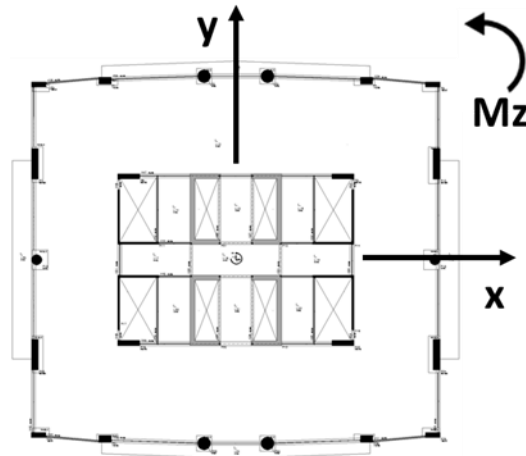
$$q = 335,654 \cdot (z)^{0,27} (Pa) \quad (22)$$

8.3 Tratamento dos dados no MatLab®

Visando a correta introdução de esforços no modelo computacional a ser desenvolvido no *software* TQS® e considerando a dificuldade de se analisar o volume de dados gerado através dos ensaios, a solução mais prudente foi a adoção e uso de um programa específico para o cálculo numérico e matricial necessário. Convencionou-se utilizar, nesse caso, o programa MatLab®.

Dessa maneira, este item do trabalho busca elucidar os passos utilizados visando a solução – nesse caso, com o objetivo de se obter as colunas das tabelas de esforços na direção x, os esforços na direção y e o momento na z, F_x , F_y , e M_z , respectivamente - discriminada por pavimento do edifício e para cada ângulo de ataque do vento, conforme referência da Figura 73.

Figura 73 - Eixos de referência para esforços calculados



Fonte: Autoria própria

Assim, seja **A** a matriz composta por todos os dados medidos na tomada de pressão em determinado ângulo:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{A}]_{1200 \times 392} \quad (23)$$

Cada linha de **A** representa um instante de tempo da medição, o vetor para cada linha de dados de pressão será chamado de **a**:

$$\mathbf{a} = [\mathbf{a}]_{1 \times 392} \quad (24)$$

Portando a matriz **A** é composta dos vetores **a**₁ até **a**₁₂₀₀₀, e para a análise dos dados será necessário escolher apenas um desses vetores para representar a pressão em cada ângulo.

Para cada vetor **a** foi calculado o vetor **cp** que representa os coeficientes de pressão para cada tomada de dados.

$$\mathbf{cp} = [\mathbf{cp}]_{1 \times 392} \quad (25)$$

Cada coeficiente de pressão foi calculado a partir da expressão a ser deduzida a seguir. A equação de Cp (MUNSON, YOUNG, & OKIISHI, 2004) é:

$$Cp = \frac{(p - p_0)}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (26)$$

Em que p é a pressão em uma tomada, p_0 é a pressão de referência (no caso, a pressão na seção do ensaio que denominamos de p_{mesa}), ρ a densidade do fluido no fluxo.

Utilizando a equação de Bernoulli entre dois pontos do Tubo de Pitot, ponto 1 em uma posição distante do tubo e ponto 2 no orifício frontal (ponto de estagnação), tem-se:

$$\frac{1}{2}\rho V_1^2 + p_1 + \rho g z_1 = \frac{1}{2}\rho V_2^2 + p_2 + \rho g z_2 \quad (27)$$

De modo que V_1 é a velocidade do fluido em posição distante, V_2 é a velocidade do fluido no orifício frontal do Pitot (admitida como zero, por ser um ponto de estagnação), p_1 a pressão estática que possui velocidade v_1 , p_2 é a pressão total medida no orifício frontal do Pitot. Adotou-se que altura dos pontos considerados em relação à uma horizontal de referência pode ser dada como a mesma, portanto $z_1 = z_2$. Assim:

$$V_1 = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}} \text{ ou } V = V_1 = \sqrt{\frac{2(p_{tref} - p_{eref})}{\rho}} \quad (28)$$

Onde p_{tref} é a pressão total do Pitot de referência e p_{eref} é a pressão estática do Pitot de referência.

Substituindo (28) na equação (26), tem-se, por fim, a expressão de Cp que será utilizada nos cálculos.

$$Cp = \frac{(p - p_{mesa})}{(p_{tref} - p_{eref})} \quad (29)$$

No cálculo da pressão dinâmica, deve considerar-se um fator de correção f devido à diferença entre a altura do modelo e a altura de medições das pressões de referência. Esse fator é característica dos ensaios no Túnel de Vento, e foi obtido a partir da relação entre a pressão dinâmica no Tubo de Pitot de referência e a pressão

dinâmica do Tubo de Pitot na altura do edifício (utilizada na coleta dos dados de velocidade). O fator f , considerado como 0,879 indica que a pressão dinâmica no topo do edifício é aproximadamente 88% da pressão dinâmica no Tubo de Pitot de referência. As pressões supracitadas (chamadas genericamente no item 7.2 por “tomadas de referência”) estão alocadas nas três últimas colunas de cada matriz **A**.

O vetor de pressões reais (***pr***), que serão distribuídas nas fachadas do modelo é definido por:

$$\mathbf{pr} = [\mathbf{pr}]_{1 \times 392} \quad (30)$$

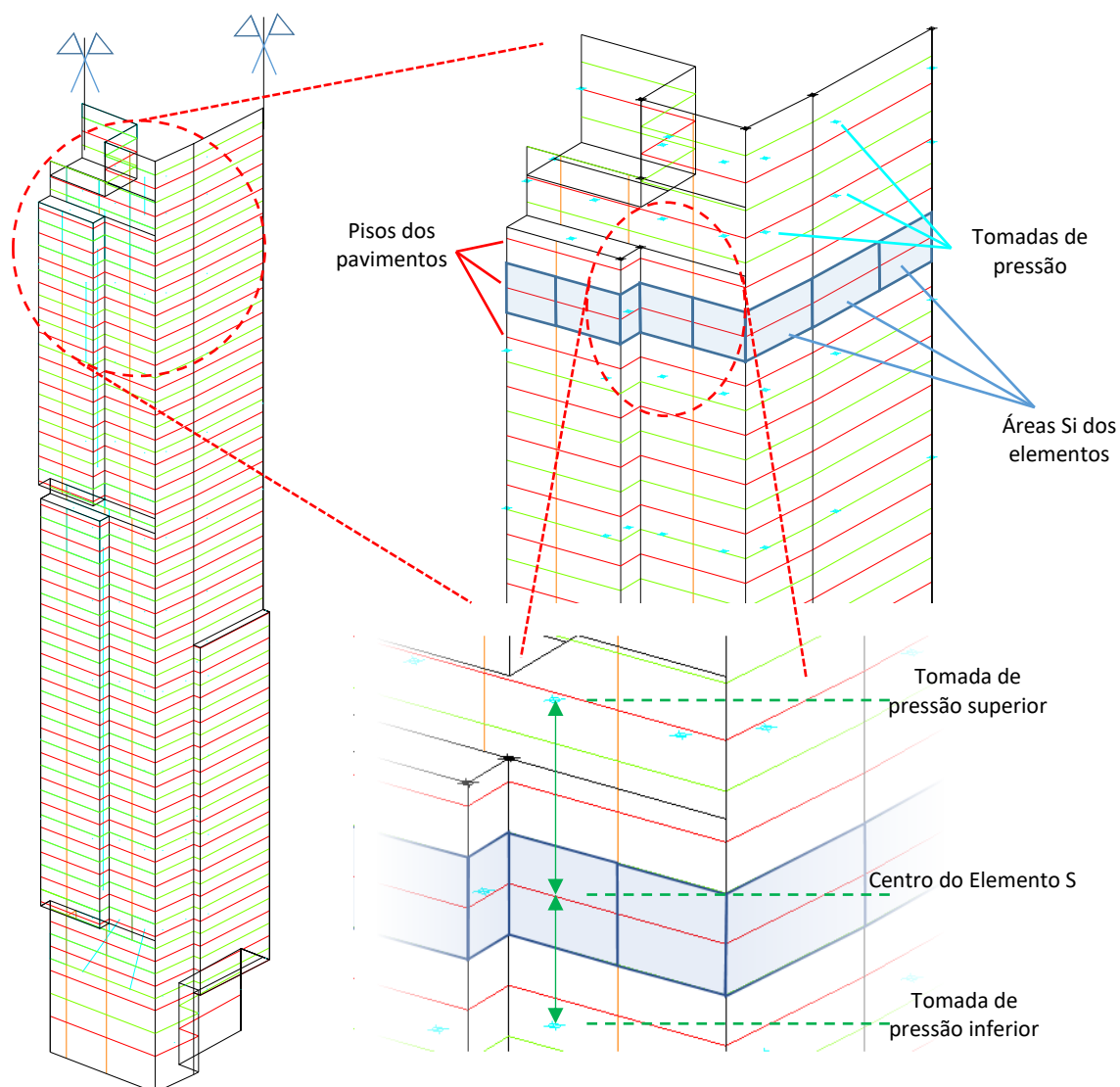
Esse vetor é calculado por:

$$\mathbf{pr} = \mathbf{cp} * \mathbf{q} \quad (31)$$

Onde ***q*** é o vetor com as pressões dinâmicas de cada tomada de pressão calculados pela NBR 6123:1988, a partir da equação (22), considerando a incógnita z como constante e igual à altura do edifício.

Para cálculo dos esforços nas fachadas do edifício foi necessário a concepção de uma malha com 1278 elementos de área S variável envolvendo as quatro faces do modelo, para uma fácil representação de cada um dos 36 pavimentos. Por simplificação, cada elemento possui pressão constante, tornando a integração dos esforços simplesmente a multiplicação da pressão do elemento pela sua área. A pressão de cada elemento foi calculada a partir da interpolação da média das pressões entre as tomadas de pressão imediatamente acima e abaixo do centro do elemento (salvo casos em que o elemento se encontra à mesma altura de uma tomada). Esse método está exemplificado na Figura 74.

Figura 74 - Indicação dos elementos e da obtenção das pressões médias atuantes



Fonte: Autoria própria

O vetor força (f), que é constituído da força no centro de cada elemento, é definido por:

$$f = [f]_{1 \times 1278} \quad (32)$$

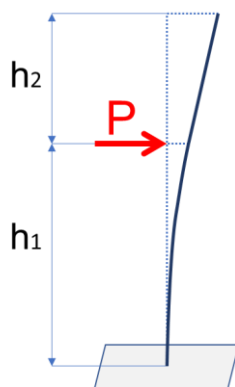
E é calculado pela equação (33):

$$\mathbf{f} = \mathbf{pr} * \mathbf{B} \quad (33)$$

Onde **B** é a matriz de ordem 392x1278 que relaciona a pressão das tomadas com as pressões de cada elemento já integradas em sua área.

Para cada vetor **a** derivado da matriz **A** foi calculado um vetor **f** que representa as forças no centro de cada elemento no instante de ensaio de (linha) **a**. Para a escolha dos esforços que serão inseridos no modelo computacional, foram escolhidas duas formas de análises: encontrar o vetor **f** que apresente maior deslocamento total no topo da estrutura (chamando esse **f** genericamente de **caso 1**), quando aplicado em um modelo simplificado de barra engastada conforme Figura 75, e o vetor **f** que apresente maior deslocamentos no topo da estrutura, na direção de incidência do vento (**caso 2**), buscando minimizar os deslocamentos na direção transversal. Dessa forma, o objetivo é obter as linhas de **A** cujas pressões apresentem maior deslocamento do topo do edifício para esses critérios. Além desses casos também será considerado um **caso 3** com seus valores referentes à média total dos valores de cada tomada de pressão, obtidos para um ângulo de incidência do vento. Tal consideração busca verificar e anular os efeitos de vibração do modelo no momento dos ensaios. O valor médio das pressões é usualmente utilizado na análise estática das estruturas, quando esta é executada comercialmente.

Figura 75 - Barra engastada com esforço aplicado



Fonte: Autoria própria

Exemplificando para o caso 1, da resistência dos materiais é sabido que o deslocamento da barra no ponto de aplicação de P é:

$$\delta_h = \frac{P * h_1^3}{3EI} \quad (34)$$

E é a rotação nesse mesmo ponto:

$$\phi_h = \frac{P * h_1^2}{2EI} \quad (35)$$

Portanto o deslocamento no ponto superior é:

$$\delta_H = \frac{P * h_1^3}{3EI} + \frac{P * h_1^2}{2EI} h_2 \quad (36)$$

Ou, escrito de outra forma:

$$\delta_H = \frac{2 * P * h_1^3 + 3 * P * h_1^2 * h_2}{6EI} \quad (37)$$

No modelo computacional desenvolvido (a ser descrito no próximo item) chegou-se à conclusão que as inércias em x e y são muito semelhantes e que, para este cálculo de deslocamentos, era plausível considerá-las iguais. Dessa forma, o valor que será comparado será o numerador de δ_H .

Para cada vetor **f** será calculado um vetor **d** que representa o numerador dos deslocamentos δ_H da estrutura para o esforço de cada elemento.

$$\mathbf{d} = [d]_{1 \times 1278} \quad (38)$$

E será calculado por:

$$d_i = 2 * f_i * h_{1i}^3 + 3 * f_i * h_{1i}^2 * (142,5 - h_{1i}) \quad (39)$$

A partir do vetor $\mathbf{d}$ foram calculados os deslocamentos nas direções principais x e y, d_x e d_y respectivamente:

$$\begin{aligned} d_x &= \mathbf{d} * \mathbf{m}_x \\ d_y &= \mathbf{d} * \mathbf{m}_y \end{aligned} \quad (40)$$

Onde $\mathbf{m}_x$ é o vetor de ordem 1278x1 com valores 1 para deslocamentos em x e 0 para deslocamentos em y, analogamente $\mathbf{m}_y$ é o vetor de ordem 1278x1 com valores 0 para deslocamentos em x e 1 para deslocamentos em y.

E assim o deslocamento total (Δ):

$$\Delta = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \quad (41)$$

A partir desse procedimento, a linha de pressões de $\mathbf{A}$ considerada critica será a que proporcionar esforços que causam maior deslocamento total Δ .

Escolhido o vetor crítico (em relação a essa hipótese de decisão assumida) de pressões medidas, e consequentemente vetor crítico das forças no centro de cada elemento, foram calculados os esforços de entrada no modelo computacional, que são

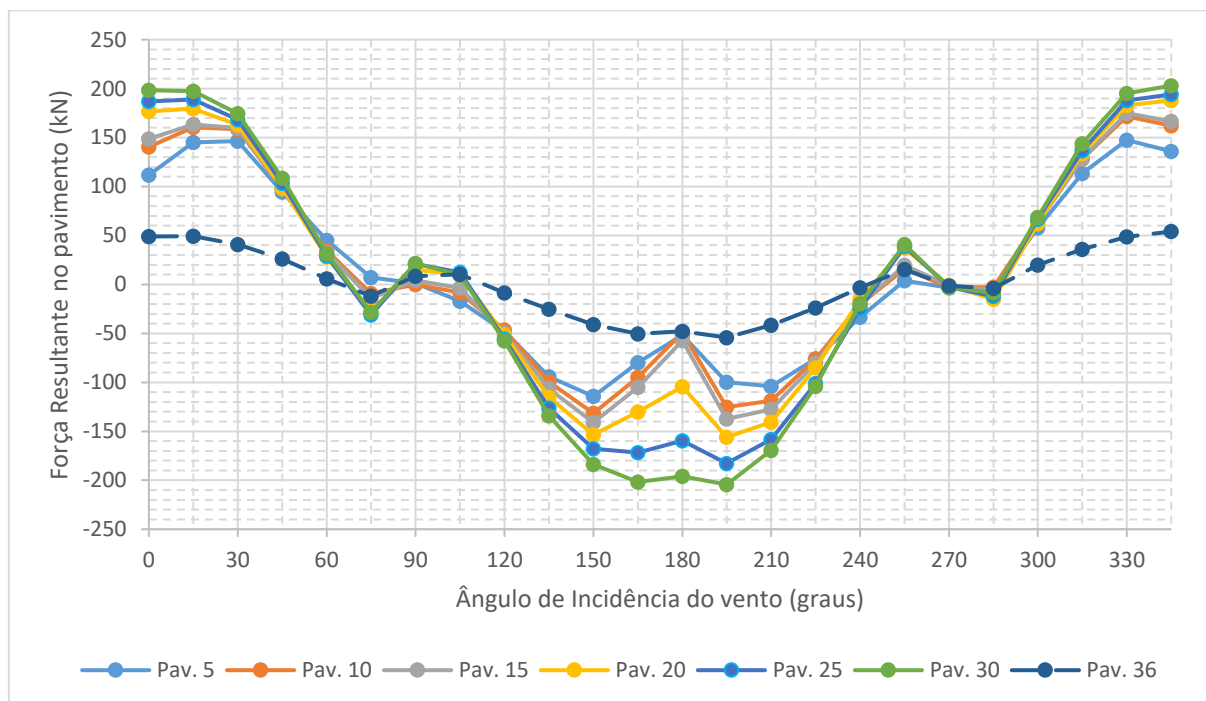
a somatória de esforços em x (F_x), somatória de esforços em y (F_y) e momento torsor (M_z) para cada pavimento.

$$\begin{aligned} F_x &= f * P_x \\ F_y &= f * P_y \\ M_z &= f * C_y - f * C_x \end{aligned} \quad (42)$$

Onde P_x e P_y são matrizes de ordem 1278 x 36 que soma os esforços, em Newtons (N), de cada pavimento, em x e em y respectivamente. C_y e C_x são matrizes de ordem 1278 x 36 que permitem calcular os momentos dos esforços na direção x e y respectivamente por pavimento.

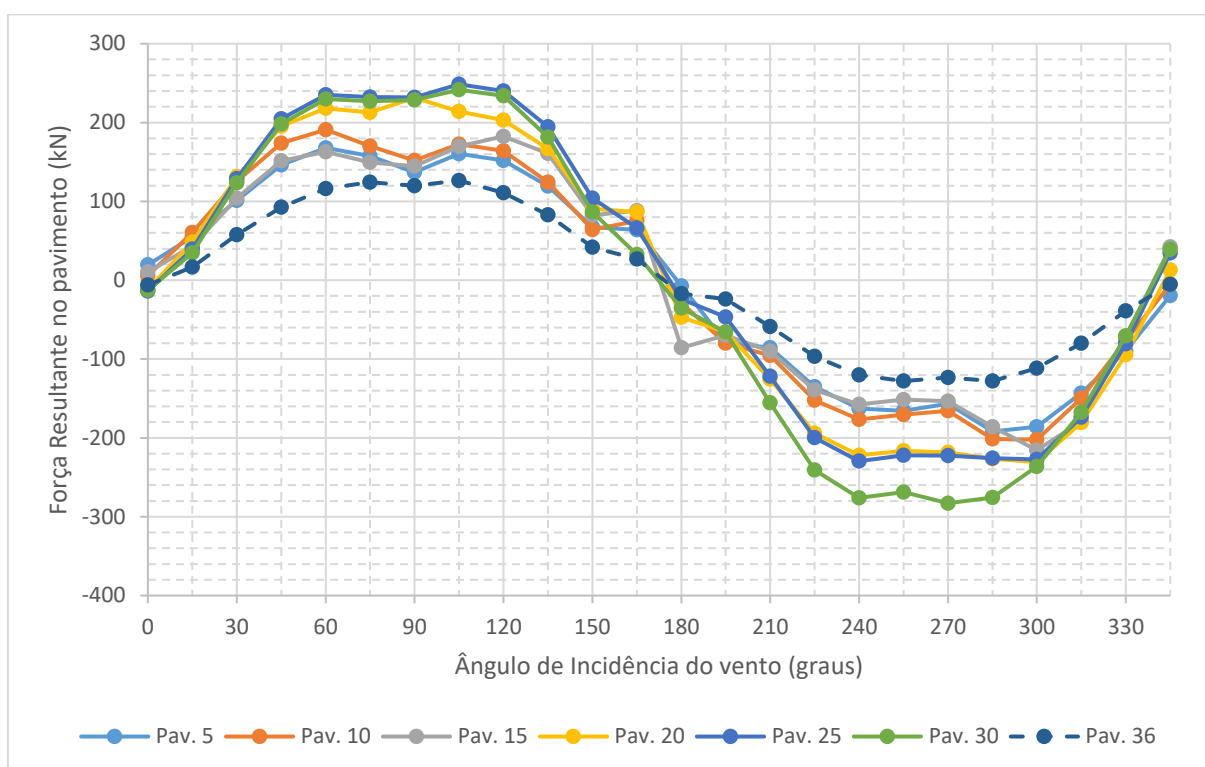
Os gráficos a seguir buscam representar de forma sintética os valores obtidos nas matrizes F_x , F_y e M_z para alguns pavimentos, considerando a solução para valor médio das séries temporais (caso 3). Essas matrizes completas estão indicadas no Apêndice A deste relatório.

Gráfico 4 - Forças no sentido da atuação do vento



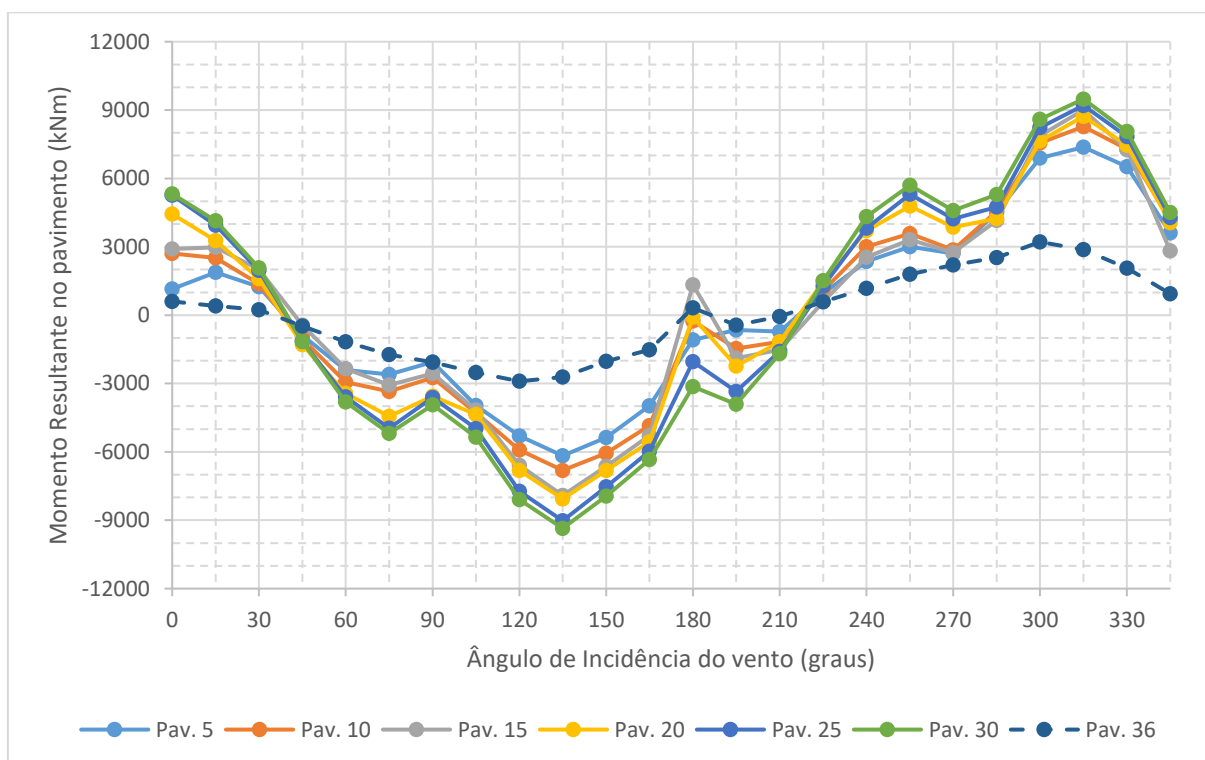
Fonte: Autoria própria

Gráfico 5 - Forças no sentido transversal ao da atuação do vento



Fonte: Autoria própria

Gráfico 6 - Momentos relativos ao sentido de atuação do vento



Fonte: Autoria própria

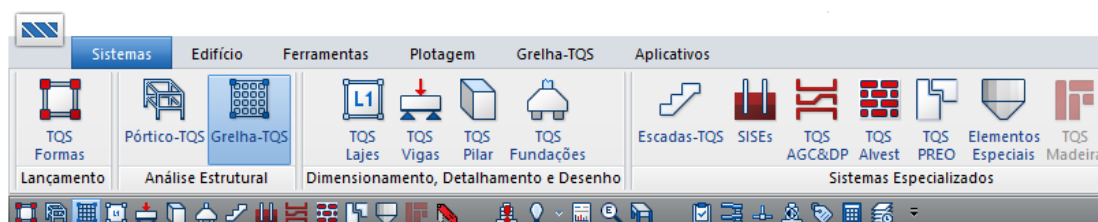
9. MODELAGEM ESTRUTURAL EM PROGRAMA COMERCIAL

9.1 Introdução ao software utilizado

O modelo estrutural do edifício foi desenvolvido a partir do uso do *software* comercial CAD/TQS®. Este programa é largamente utilizado no país para o cálculo e verificação de estruturas de concreto armado e protendido, dentre outras soluções que fogem do escopo desse trabalho. De origem nacional, o TQS® apresenta em seu banco de dados critérios de dimensionamento, detalhamento e verificação em plena conformidade com as normas brasileiras vigentes, tal como a NBR6118:2014 e a NBR6123:1988, por exemplo. Além disso, ainda é possível resgatar normas passadas (como NBR6118:2003 e NB1-78), visando principalmente o estudo, verificação e validação de projetos antigos.

O TQS® é composto por sistemas computacionais gráficos integrados que atuam nas fases de lançamento das plantas (através de um modelador estrutural CAD), de análise estrutural (grelhas planas e pórticos espaciais) e dimensionamento, detalhamento e desenho da solução proposta (lajes, vigas, pilares, elementos de fundação, etc.), conforme exemplificado na Figura 76. Apresenta também outros sistemas, como dimensionamento de escadas e de interação entre solo e estrutura (SISEs), e diversos módulos, dentro desses sistemas, tal como os de análise de estabilidade global e de efeitos dinâmicos, solução de grelha não linear, entre outros (TQS INFORMÁTICA LTDA., 2016).

Figura 76 – Interfaces básicas do software com sistemas do TQS.



Fonte: Extraído do TQS®.

As referências utilizadas para o desenvolvimento do modelo estrutural foram plantas de arquitetura, desenhos em elevação das faces externas do edifício e imagens da construção e da obra acabada. Estas foram obtidas a partir da galeria de

fotos da empresa responsável pela arquitetura do edifício, a aflalo/gasperini arquitetos. Devido às limitações das referências, bem como outras restrições para o desenvolvimento do projeto em todas suas especificidades, certas considerações simplificadoras foram tomadas. Essas considerações serão ponderadas no decorrer do item 9.2.

Os textos que se seguem são registros do processo de construção do modelo computacional. Baseiam-se nos manuais do programa e em textos extraídos da biblioteca digital e suporte técnico da TQS® Ltda.

9.2 Considerações adotadas e critérios de projeto

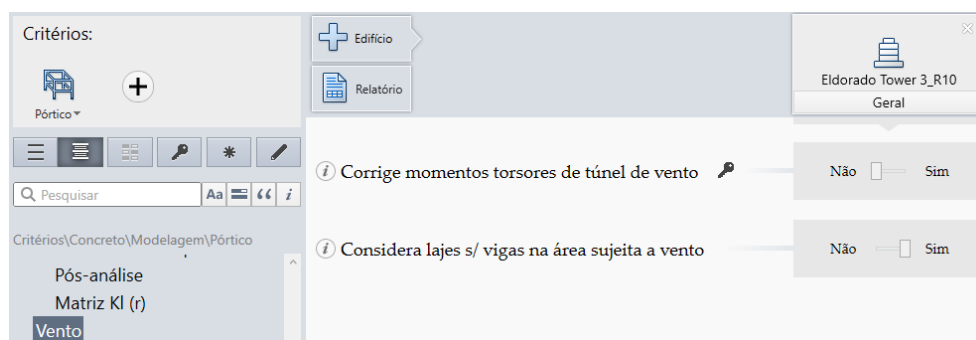
As considerações de projeto a serem adotadas estão, dentro do Sistema TQS®, subdivididas em alguns níveis. Logo que se cria um novo modelo, há uma série de dados do edifício a serem indicados, como identificação, a norma de dimensionamento a ser utilizada, o modelo estrutural a ser adotado, os níveis e tipos de pavimento, além de considerações de materiais (resistências do concreto diferenciadas nos elementos estruturais e pavimentos), cobrimentos e cargas. Uma descrição detalhada da aplicação das cargas de vento nessa entrada de dados será descrita no tópico 9.4.

O modelo espacial global do edifício é uma consideração fundamental a ser feita para o sistema TQS®, visto que essa escolha pautará como o *software* irá tratar a transferência de cargas entre as lajes e o pórtico espacial. Para esse projeto, foi mantido o Modelo IV (*default*). Dessa maneira, segundo manual da TQS®, a modelagem será executada por um pórtico espacial mais os modelos do pavimento (grelhas, no caso). As ações verticais e horizontais serão calculadas sobre as vigas e pilares no pórtico espacial, enquanto nas lajes apenas os efeitos das ações verticais serão considerados, com incorporação do efeito de diafragma rígido.

No item “Critérios” da aba de ferramentas do TQS® é possível visualizar e editar atributos de projeto e desenho, relativos ao edifício como um todo ou aplicáveis a pavimentos específicos. Esse editor de critérios é também particionado entre os diversos sistemas componentes do programa (TQS Pilar, TQS Formas etc.). Por exemplo, a Figura 77 indica as considerações feitas nos critérios gerais de pórticos

quanto à atuação do vento. O primeiro item do critério foi desativado, visto que o centro geométrico a ser definido no modelo estrutural será o mesmo no qual o momento torsor foi aplicado pelo processo descrito no item 8.3. O segundo se refere à existência de elementos de vedação nas lajes em balanço (sem vigas), mantido assim ativo, visto que todo o contorno externo do Eldorado Tower é completamente vedado.

Figura 77 – Critério geral de pórticos quanto à incidência de carga de vento.



Fonte: Extraído do TQS®.

Por fim, dentro do modelador estrutural, cada entrada de um novo elemento (laje, viga, pilar etc.) implica na definição de suas características geométricas, carregamentos e como cada um deverá ser modelado. Por exemplo, pode-se definir onde um pilar se apoia, como trabalha e se recebe vento diretamente ou apenas o recebe através da redistribuição de esforços no pórtico (importante para a correta aplicação das cargas de vento em cada pavimento). Para lajes, é importante garantir o funcionamento destas (sobretudo a que está entre o contorno externo e o núcleo do edifício) como diafragma rígido visando o desempenho esperado dos pórticos do núcleo. A adoção desse critério pode ser observada na Figura 78 (a).

Figura 78 – Adoção dos dados nos elementos estruturais.

(a)

(b)

Fonte: Extraído do TQS®.

Devido à complexidade para implementação do modelo estrutural conforme projeto, além do limitado acesso às informações, características e definições construtivas do Eldorado Business Tower, decidiu-se prudente considerar algumas simplificações, adotadas no decorrer da modelagem estrutural do mesmo. Dentre essas considerações, as principais foram:

- Adoção de dupla simetria em todos os pavimentos do edifício: a dificuldade de tornar precisa e compatível com a realidade a posição do centro geométrico do edifício, considerada ainda a variação da estrutura em seus pavimentos fez-se optar por garantir a posição do centro geométrico da estrutura através da modelagem desta. A consideração da posição do centro geométrico dos pavimentos é fundamental para a correta aplicação dos esforços de vento oriundos do Túnel de Vento, como será discutido no item 9.4;
- Padronização do *core* (núcleo rígido) do edifício em todos os pavimentos: a padronização dos *cores* permitiu facilitar o lançamento das plantas de forma do edifício, além de permitir maior facilidade em garantir a simetria deste. Apesar disso, foram consideradas normalmente (ainda que de forma simplificada) reduções de seção dos pilares e pilares-parede nos lances superiores.
- Base do pilar engastada no solo, no nível da fundação: como esse modelo estrutural desenvolvido não contempla os pavimentos-garagem existentes abaixo do nível térreo do edifício, optou-se por engastar as bases dos pilares do lance inferior no solo, através de edição dos dados dos pilares. Tal consideração implica na não verificação de eventuais problemas com a

transferência de esforços para o solo e suas implicações, porém ainda assim resulta em um valor de cargas válido para o dimensionamento dos blocos de fundação.

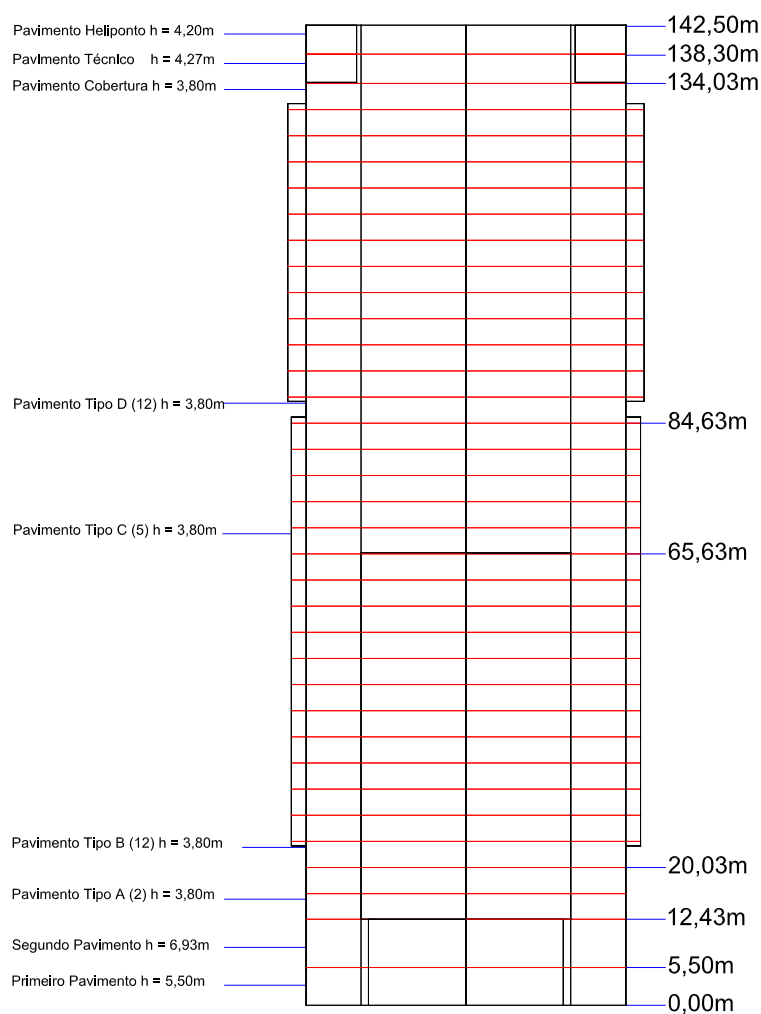
- Não utilização de protensão nas lajes: a principal influência da protensão das lajes é quanto ao desempenho dessas, em relação ao serviço (flechas, fissuração etc.) e segurança, na atuação das cargas verticais. Considerando a análise do carregamento de vento (limitado ao plano horizontal dos pavimentos) e a correta transferência das cargas dos pórticos externos aos pórticos do núcleo rígido (garantido através do comportamento da laje como diafragma rígido), foi considerada a simplificação de não simular a atuação da protensão nas lajes. Tal decisão afeta, naturalmente, na obtenção das armaduras ativas e passivas da laje, através do processamento global, bem como flechas consideráveis (e inadmissíveis) nas lajes que deveriam ser protendidas. Tal efeito, porém, não varia de forma substancial as cargas nos pilares e pórticos (de 5 a 10%⁴), no nível da fundação, de forma a viabilizar a análise que será feita, considerando ainda que, utilizando o Modelo IV do TQS[®] conforme supracitado, a atuação de cargas horizontais (vento) na grelha linear do pavimento não será verificada.

9.3 Concepção da solução estrutural

Observadas as considerações tomadas no item 9.2, a concepção da estrutura foi feita com intuito de ser aplicada ao modelador estrutural do *software*. Primeiramente foram obtidas as seções dos pavimentos do edifício, com suas variações e respectivos pés-direitos, baseado nos desenhos de elevação utilizados tanto na modelagem das faces do modelo físico quanto na análise e obtenção dos carregamentos de vento, conforme observado na Figura 79 e na Figura 7 (p.22). Essas seções foram tratadas em programa CAD para serem utilizadas, dentro do modelador estrutural, como imagens de referência para as plantas de forma.

⁴ Como referência tem-se o estudo comparativo do Eng. Alexandre Domingues Campos, em “Influência da Protensão na Carga dos Pilares”, disponível na Biblioteca Digital TQS. Acesso em outubro/2017.

Figura 79 – Elevação do edifício com indicação do pé-direito e número de repetição dos andares (em parênteses).



Fonte: Autoria própria.

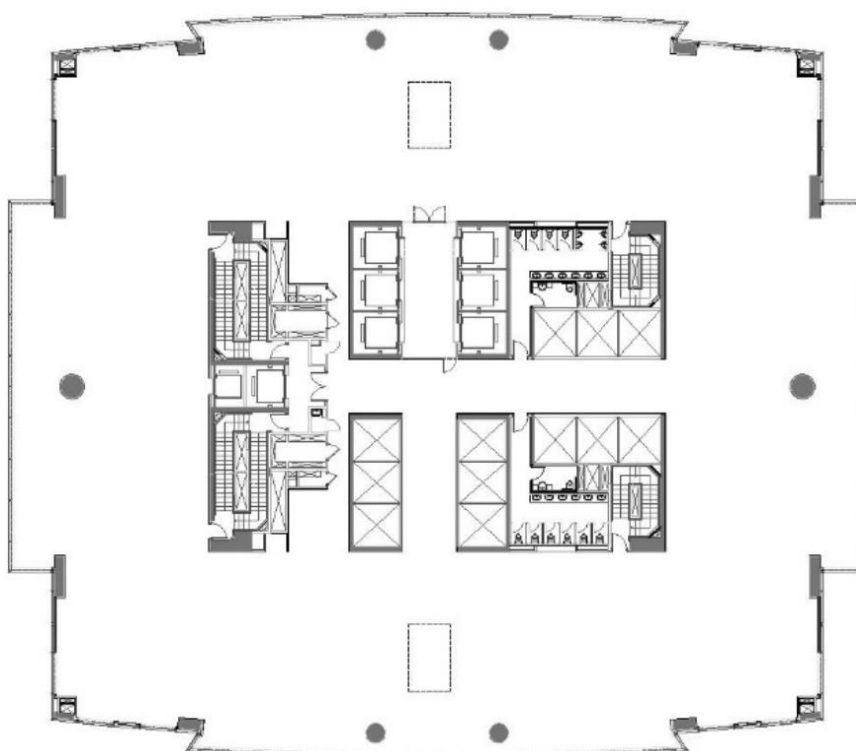
A solução estrutural de fato concebida no Eldorado Business Tower contempla uso de laje cogumelo protendida, com espessura de 20 cm. Essa informação⁵ pautou a concepção dos outros elementos estruturais necessários. Diferentemente da laje lisa, a laje cogumelo prevê a existência de capitéis na interface entre laje e pilar, dimensionados para diminuir a punção (ruptura por solicitação tangencial na interface) das lajes. Para tanto, devem ser observados no projeto os contornos críticos C , C'_1 para os pilares centrais, de borda e de canto, conforme item 19.5.2 da NBR6118:2014.

⁵ Obtida em texto descritivo, na galeria de projetos da plataforma online da TQS Ltda. Acesso em outubro/2017.

Partindo dessas considerações, as dimensões dos capitéis foram estimadas e a solução pôde ser verificada no pós-processamento.

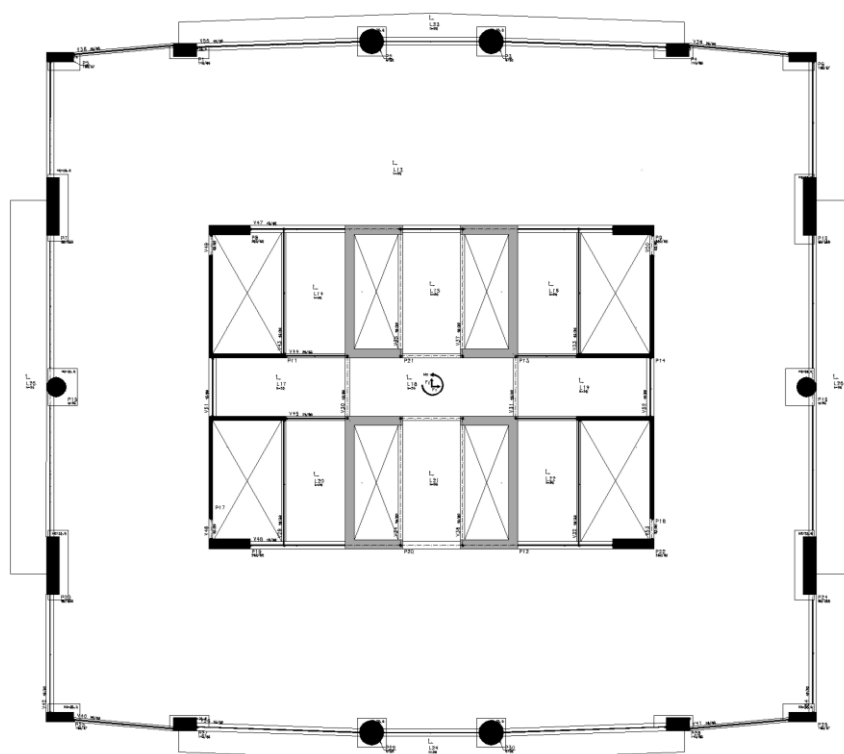
De forma análoga, os pilares e vigas foram dimensionados a partir de sua projeção nas plantas (Figura 80 e Figura 81), feitas as simplificações para garantir a simetria dos pavimentos. Durante as verificações dos resultados de processamento global, foram observados e corrigidos os erros de dimensionamento, caso a caso. Por exemplo, foi sinalizada a ruína de biela comprimida em algumas vigas e tração elevada em outras. Com a análise dos diagramas de esforços do pós-processamento (cortantes e tração, respectivamente), foi possível redimensionar esses elementos e obter uma solução possível.

Figura 80 – Exemplo de planta utilizada como referência.



Fonte: aflalo/gasperini arquitetos.

Figura 81 – Exemplo de planta de formas lançada a partir da referência.



Fonte: Autoria Própria.

9.4 Adoção do carregamento de vento no modelo estrutural

O sistema TQS® permite a entrada de carregamentos de vento na estrutura a partir de dois modos a serem considerados na edição deste edifício.

O primeiro possibilita a entrada de até 24 casos com diferentes ângulos de ataque de vento e com intensidade definida através das premissas da NBR6123:1988 (considerando assim a geometria do edifício, a velocidade básica indicada pelo usuário e os coeficientes S_1 , S_2 e S_3 da norma). O segundo permite a entrada direta dos dados tabelados obtidos no túnel de vento, com os esforços já determinados para cada pavimento e ângulo de ataque do vento em relação ao referencial do modelo.

Apesar do escopo deste trabalho ser a análise do comportamento estrutural do edifício sob carregamento de vento obtido pelo ensaio técnico, o estudo a partir dos carregamentos de vento previstos pela norma também foi efetuado, com intuito de avaliar o modelo e comparar seus resultados em cada situação. A NBR6123:1988 prevê e recomenda o ensaio em Túnel de Vento para edifícios com características de altura e seção tais quais as do Eldorado Business Tower. A adaptação dos critérios

da norma para esses casos pode apresentar soluções de maior custo por fazer o engenheiro projetista, devido à confiança sobre os resultados, trabalhar mais a favor da segurança.

O carregamento de vento observado é, por padrão do TQS®, distribuído entre todos os pilares, nos nós em cada pavimento, obtendo-se assim combinações de carregamentos para a análise estática da estrutura. Dessa forma, todos os pilares expostos ou não (pilares internos) ao vento recebem uma parcela deste, referente às áreas da fachada. Dentro do modelador estrutural (Figura 78 (b)), os pilares internos podem ser configurados para não receber esse vento diretamente e, sob essa configuração, receberão carregamento oriundo apenas do comportamento de diafragma rígido das lajes.

Figura 82 – Entrada de dados de vento – manual (a) e por tabelas de túnel de vento (b)

The screenshot shows the 'Cargas' (Loads) tab in the TQS software. The 'Vento' (Wind) sub-tab is active. The interface is divided into two main sections: (a) manual input and (b) wind tunnel tables.

Section (a) - Manual Input:

- V0 - Velocidade básica: 41
- S1 - Fator do terreno: 1.00
- S2 - Categoria de rugosidade: IV
- S2 - Classe da edificação: A
- S3 - Fator estatístico: 1.00
- ☐ Casos de vento nas plantas de formas
- Diagrama de incidência de vento: 90°, 180°, 0°, 270°
- Avançado...

Section (b) - Wind Tunnel Tables:

Ângulo	C.A.	Def Cot	Cot ini
1	90	1.34	Não
2	270	1.34	Não
3	0	1.31	Não
4	180	1.31	Não

Buttons: Inserir, Apagar, Calcular CAs

Section (b) - Wind Tunnel Tables (continued):

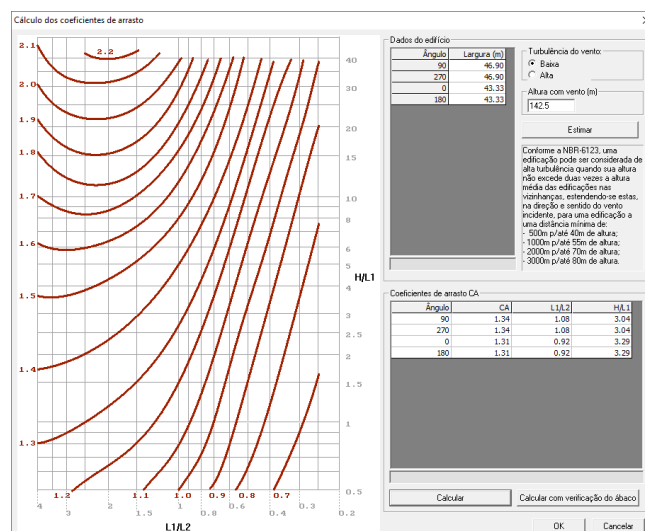
- ☐ Tabelas de excentricidades e forças impostas
- Excentricidades do caso selecionado
- Carregar tabelas de túnel de vento
- ☐ Forças impostas no sistema global
- ☐ Inverter o sinal das forças impostas

Footer: Forneça as variáveis para cálculo de vento conforme a norma ou especifique valores especiais ou de ensaio no item "Excentricidades".

Fonte: Extraído do TQS®

Por fim, na edição de dados do edifício, são valores de entrada os Coeficientes de Arrasto do edifício, estimados (conforme gráfico da Figura 83) pelo próprio programa a partir da NBR6123:1988 para cada ângulo de ataque do vento. Os coeficientes calculados a partir desse método estão indicados na do item 10.

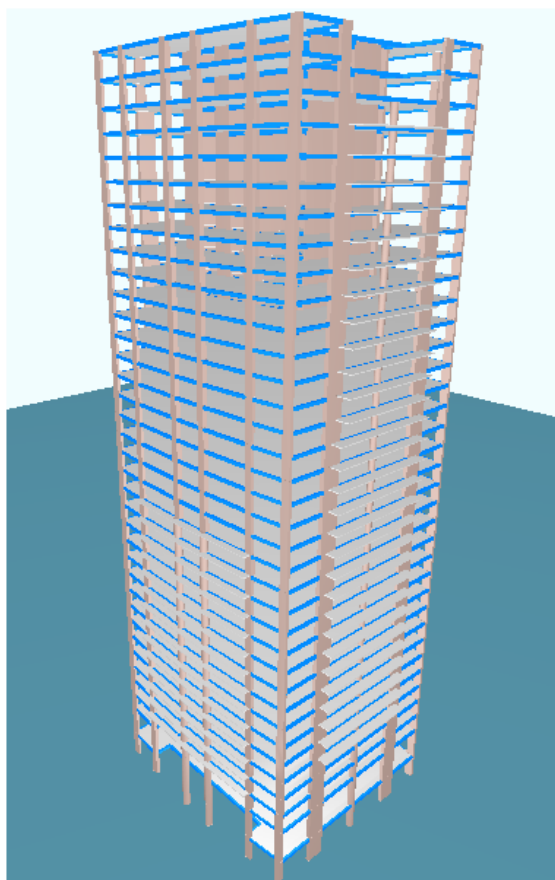
Figura 83 – Caracterização dos coeficientes de arrasto a partir da norma.



Fonte: Extraído do TQS®

Executadas essas etapas, o modelo pôde ser processado para a extração dos resultados, conforme apresentado pela Figura 84.

Figura 84 - Edifício modelado em visualização 3D do TQS®



Fonte: Adaptado do TQS®

10. RESULTADOS DO MODELO

Executado o processamento do modelo estrutural, o *software* dispõe de várias interfaces para a análise dos resultados, verificação de possíveis erros e avisos e a visualização de detalhamentos derivados.

A partir desse item, serão analisados os resultados obtidos pelas modelagens, buscando a comparação entre essas quando justificável, conforme casos indicados na Tabela a seguir.

Tabela 6 - Casos de vento considerados

Caso	Descrição dos carregamentos adotados
Caso 1	Carregamentos que geram maior deslocamento global da estrutura;
Caso 2	Carregamentos que geram maior deslocamento na direção de incidência de vento;
Caso 3	Carregamento gerado a partir do valor médio da série temporal de cada tomada de pressão, para cada ângulo de incidência do vento;
Caso 4	Carregamento gerado no TQS a partir dos parâmetros da NBR6123.

10.1 Análise de Vibrações

A verificação dos modos de vibração de uma estrutura representa uma boa maneira de se inferir o comportamento global do edifício, permitindo avaliar se os elementos estruturais concebidos realmente atuam de forma a contribuir com o comportamento rígido da solução inicial. A análise dinâmica das estruturas mostra-se necessária e importante sempre que a primeira frequência de vibração resulta em valor abaixo de 1 Hz (BRASIL & SILVA, 2013). A busca pelos modos principais de vibração da estrutura recai, resumidamente, da solução de autovalores do sistema formado pela equação matricial (46):

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (45)$$

$$\det[\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}] = 0 \quad (46)$$

A atuação do carregamento de vento na excitação da vibração do edifício tem impacto no conforto dos usuários que podem estar sujeitos ao surgimento de acelerações no plano horizontal. Dificilmente o impacto da ação do vento na estrutura gerará problemas de estabilidade e segurança nesta, sendo seu estudo mais crítico quanto às possibilidades de geração de efeitos excessivos de fadiga e fissuração e consequentemente durabilidade inferior à prevista (BRASIL & SILVA, 2013).

Segundo Bachmann (1995, p. 74), a primeira frequência de oscilação natural da estrutura pode ser aproximada pela seguinte fórmula:

$$f_1 = 0,4 * \left(100/h\right)^{1,6} \quad (47)$$

Para $h = 142,5 \text{ m}$ é obtido $f_1 = 0,227 \text{ Hz}$. A análise dinâmica do TQS® indicou modos de vibração transcritos na Tabela 7.

Tabela 7 - Modos de vibração da estrutura

Modal	Período (s)	Frequência (Hz)	Descrição
1	4,749	0,211	<i>torção</i>
2	4,517	0,221	<i>flexão em y</i>
3	4,335	0,231	<i>flexão em x</i>
4	1,491	0,671	<i>torção</i>
5	1,374	0,728	<i>flexão em y</i>
6	1,087	0,920	<i>flexão em x</i>
7	0,787	1,271	<i>torção</i>

$$f = 1/T = (1/2\pi) * \sqrt{k/m} \quad (48)$$

Assim, a vibração do edifício causada pelo vento se dará através da superposição⁶ dos modais descritos na Tabela 7, considerando a contribuição de cada modal à excitação pelos esforços de rajada de vento em certo sentido e sua variação

⁶ Segundo item 9.9.2.1 da NBR6123:1988 (pg.34), para estruturas apoiadas exclusivamente na base e de altura inferior a 150 m, é suficiente considerar nas análises simplificadas a contribuição apenas do modo fundamental de oscilação. Tal imposição geraria erros de ordem inferior a 10%. Para a análise de conforto dos usuários, devem ser considerados os eixos partindo da altura do coração do indivíduo, e as acelerações geradas devem ser projetadas nesses eixos e analisadas separadamente (ISO2631, 1985).

no tempo. A fórmula (45) mostrou-se eficiente em indicar a frequência do primeiro modal. É importante frisar que o aumento de massa do sistema sem a alteração da solução estrutural, conforme observado na equação (48), tenderá a diminuir as frequências de vibração obtidas. Como não foram contabilizados nesse estudo os pesos de maquinário (sistemas prediais, p.e. elevadores) e as escadas pré-moldadas, além da consideração de engaste perfeito no apoio dos pilares do primeiro pavimento, tal condição deve ser observada em um estudo mais detalhado da dinâmica da estrutura.

10.2 Estado Limite Último

O resultado da análise do estado limite último do modelo permite a obtenção dos carregamentos de cálculo para a verificação, dimensionamento e detalhamento das peças estruturais de concreto armado.

Tabela 8 - Área projetada e pressões médias

Ângulo (graus)	Coef. arrasto	Área (m²)	Pressão (tf/m²)			
			Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
0	1,28	6125,7	0,143	0,137	0,091	0,148
15	1,27	7296,2	0,112	0,115	0,087	0,145
30	1,27	8320,9	0,112	0,112	0,087	0,143
45	1,27	8778,6	0,110	0,098	0,083	0,143
60	1,29	8638,0	0,107	0,089	0,083	0,146
75	1,31	7908,7	0,107	0,107	0,086	0,148
90	1,33	7143,2	0,157	0,147	0,096	0,152
105	1,31	7909,2	0,109	0,110	0,089	0,148
120	1,29	8638,4	0,103	0,098	0,080	0,146
135	1,27	8778,9	0,090	0,090	0,065	0,143
150	1,27	8321,1	0,099	0,099	0,070	0,143
165	1,27	7296,3	0,087	0,093	0,068	0,145
180	1,28	6125,7	0,069	0,078	0,060	0,148
195	1,27	7296,2	0,107	0,107	0,079	0,145
210	1,27	8320,9	0,104	0,103	0,074	0,143
225	1,27	8778,6	0,103	0,087	0,077	0,143
240	1,29	8638,0	0,101	0,091	0,079	0,146
255	1,31	7908,7	0,113	0,106	0,085	0,148
270	1,33	7143,2	0,149	0,152	0,101	0,152
285	1,31	7909,2	0,121	0,118	0,094	0,148
300	1,29	8638,4	0,122	0,113	0,088	0,146
315	1,27	8778,9	0,104	0,105	0,082	0,143
330	1,27	8321,1	0,103	0,104	0,079	0,143
345	1,27	7296,3	0,099	0,096	0,078	0,145

10.2.1 Estabilidade Global (parâmetros γ_z , α e Fav_t)

Os parâmetros de estabilidade global permitem inferir a influência da não linearidade física (comumente denominada por efeito de 2ª ordem) quanto aos carregamentos de 1ª ordem, através da redução das rigidezes à flexão de vigas e pilares do pórtico espacial (ELU). São, assim, parâmetros que avaliam a deslocabilidade e instabilidade da estrutura sob efeito de esforços a ela aplicados. A determinação desses parâmetros acima de valores mínimos de referência exige a consideração desses efeitos, que podem ser tomadas a partir da avaliação por análise não linear da estrutura ou por majoração dos carregamentos considerados.

O parâmetro γ_z , cuja teoria fora desenvolvida por Mário Franco e Augusto Vasconcelos e incorporada à norma brasileira, determina a relação entre os momentos de 1ª ordem e os momentos resultantes da variação pela influência de carregamentos horizontais. Quando essa influência representa entre 9,1% e 23,1% dos momentos de 1ª ordem, a estrutura é considerada de nós móveis e o parâmetro pode ser utilizado para majorar os carregamentos verticais. O parâmetro α relaciona, por sua vez, as cargas verticais do edifício com a rigidez deste à flexão, e o parâmetro Fav_t (TQS®) é calculado como o γ_z , porém também incorporando a contribuição ao deslocamento horizontal das cargas verticais.

Os valores calculados para cada um dos casos seguem na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros de estabilidade

Parâmetro	Valor máximo observado			
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
γ_z	1,12	1,11	1,11	1,11
Fav_t	1,12	1,11	1,11	1,11
α	0,77	0,76	0,75	0,75

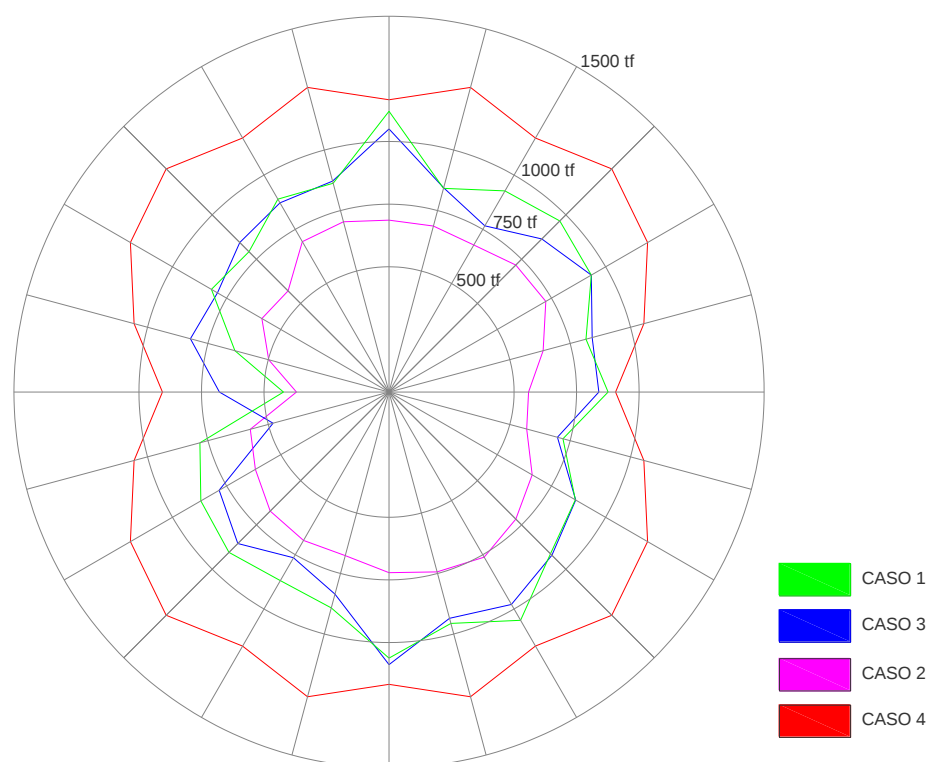
Referência	$\gamma_z \leq 1,1$	$1,1 < \gamma_z \leq 1,3$
	$\alpha < 0,6$	$\alpha > 0,6$
	nós fixos	nós móveis

Como era esperado, os parâmetros de instabilidade de cada caso apresentaram valores muito próximos, visto que estes estão mais relacionados à resposta da estrutura ao carregamento (sendo assim, sua rigidez global), que à relação entre os carregamentos verticais (iguais) e horizontais (diferentes) dos casos. Apesar disso a variação de carregamentos de vento pode influir no estado de rigidez da estrutura (caracterizada pela curva dos estádios de solicitações do concreto armado), ocasionando fissurações e perda de seção útil do concreto, que por sua vez tendem a variar esses parâmetros.

10.2.2 Diagramas de esforços

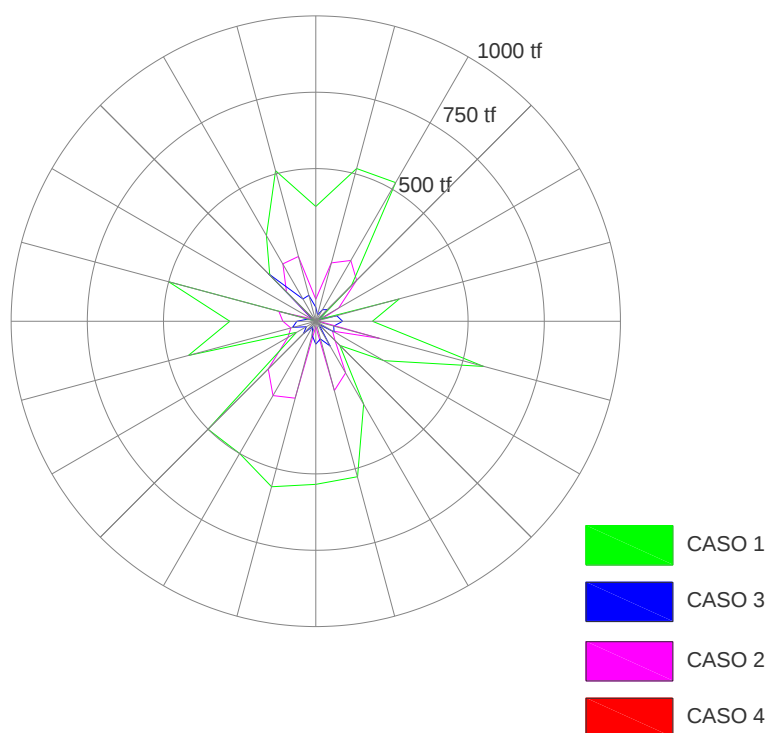
Os diagramas de esforços resultante da solução do pórtico espacial podem ser avaliados no TQS® dentro do Visualizador de pórticos, referente ao modelo ELU. Neste, são indicados os diagramas de carregamentos, esforços, bem como as reações e o campo de deslocamentos, considerando as reduções de rigidez de pilares, vigas e lajes conforme NBR6118 (essa redução que diferencia, a priori, os modelos de ELS e ELU no TQS®). Nessa seção serão apresentados os diagramas relativos à atuação do vento para o carregamento da Norma e os dois casos experimentais. Esses carregamentos representam a somatória dos esforços ao longo dos pavimentos, projetada na base. Além disso, o valor observado em cada posição do diagrama é relativo ao ângulo de ataque do vento que produziu tal resultado (ou seja, é referente ao vento cujo sentido é definido partindo da origem até o ponto em análise, conforme convenção adotada na Figura 43). Tabelas com valores referentes à essa seção podem ser observadas no Apêndice B deste texto.

Figura 85 - Diagrama de esforços normais à direção do vento (tf)



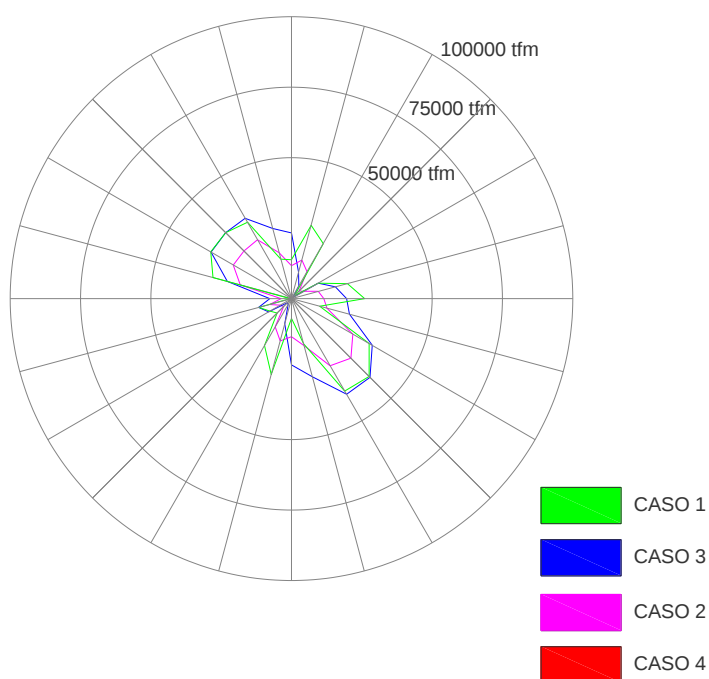
Fonte: Autoria própria

Figura 86 - Diagrama de esforços perpendiculares à direção do vento (tf)



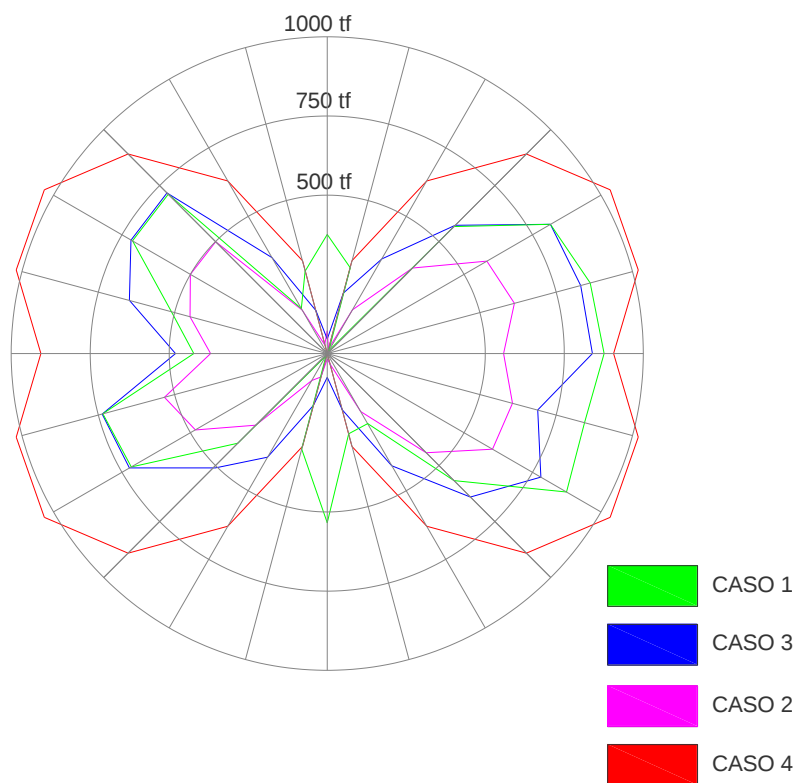
Fonte: Autoria própria

Figura 87 - Diagrama de momentos torsores (tf.m)



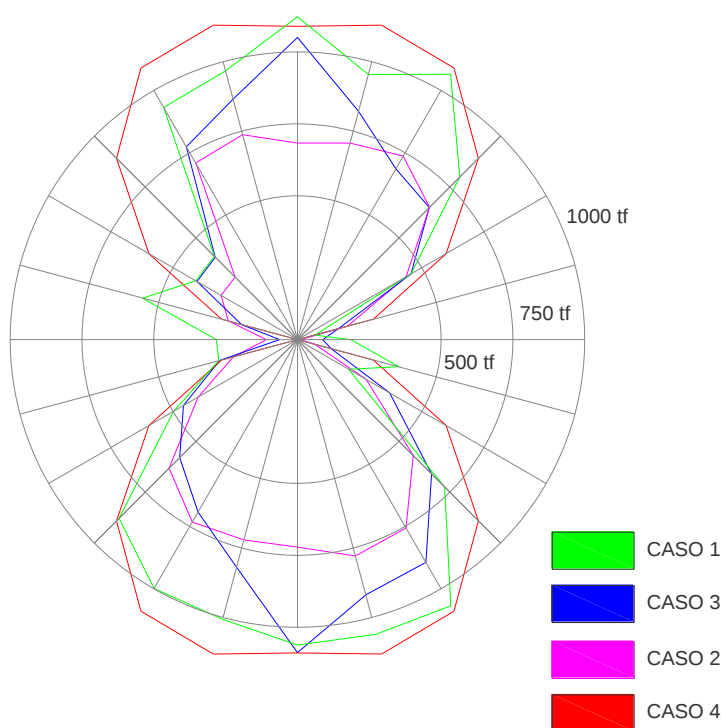
Fonte: Autoria própria

Figura 88 - Diagrama de forças totais na direção x (tf)

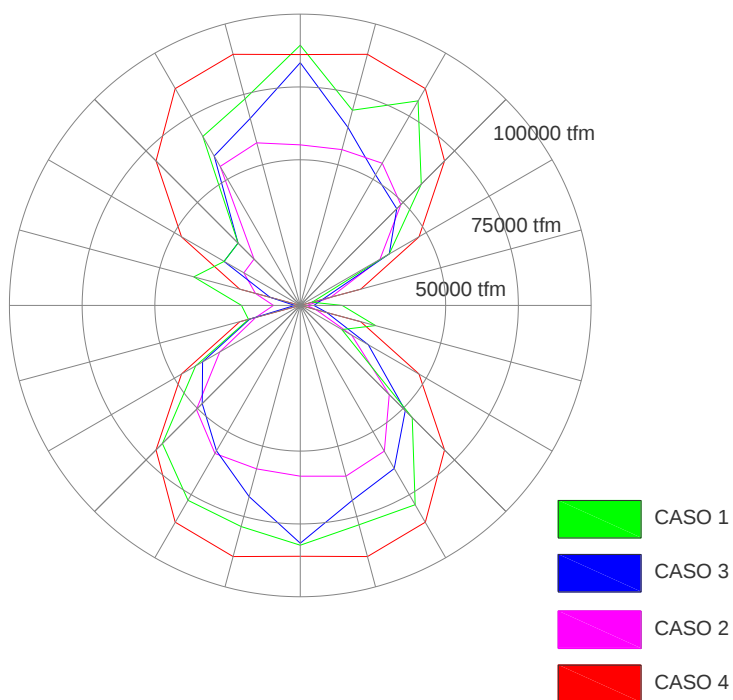


Fonte: Autoria própria

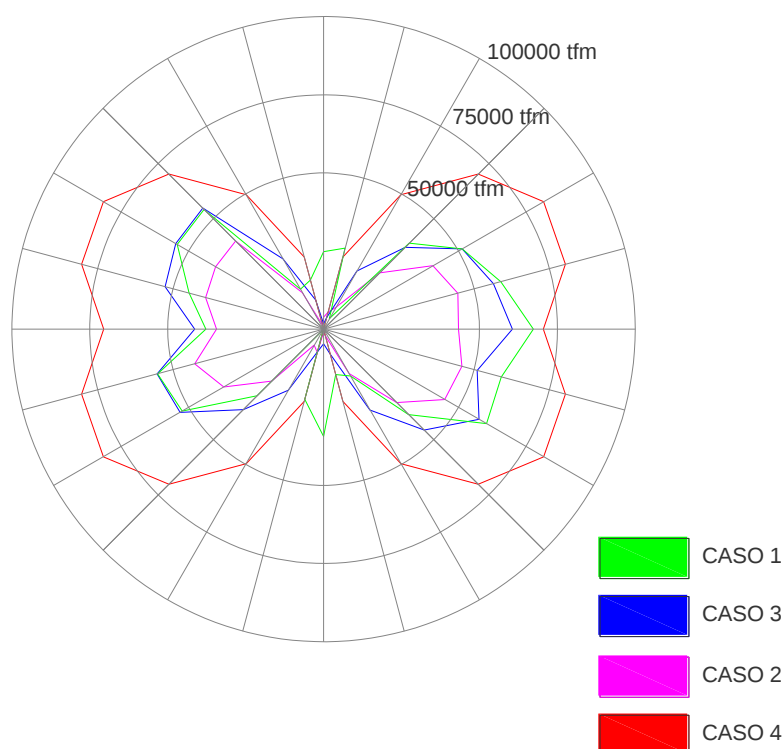
Figura 89 - Diagrama de forças totais na direção y (tf)



Fonte: Autoria própria

Figura 90 - Diagrama de momentos fletores M_x (tf.m)

Fonte: Autoria própria

Figura 91 - Diagrama de Momentos fletores M_y (tf.m)

Fonte: Autoria própria

Observou-se para todos os casos nessa seção indicados que, quando existente, os resultados de carregamento da norma apresentam em geral valores em módulo maiores que os observados nos outros casos de carregamento experimentais considerados. Além disso, como esperado, o vento resultante da simples aplicação dos parâmetros da norma mostra-se insensível às características do entorno, de forma mais específica que aquelas contempladas pelos coeficientes S_1 e S_2 . No caso do Eldorado Tower, a existência e interferência do edifício ao lado fica evidenciada através da comparação entre os resultados obtidos a 0° e 180° , por exemplo, onde em alguns diagramas se mostra a atenuação da pressão do vento quando este incide a barlavento do Edifício Unibanco.

A análise desse resultado também permitiu observar que, em casos onde a aplicação de carregamentos no TQS® a partir da NBR6123 não gera resultados significativos (diagramas de esforços perpendiculares ao vento e momentos torsões na base), os casos experimentais o indicaram, inclusive de mesma ordem de grandeza dos resultados de esforços normais ao vento, para a primeira situação apresentada. Essa observação é importante e altera consideravelmente o comportamento da

estrutura à incidência do vento, como poderá ser observado, exemplificadamente, no item 10.3.1. Também pode se concluir que os três casos do túnel de vento selecionados conduziram a resultados semelhantes, ao menos em relação à ordem de grandeza obtida nos carregamentos.

10.3 Estado Limite de Serviço

10.3.1 Deslocamentos Horizontais

Para os deslocamentos horizontais máximos no topo do edifício e entre pavimentos foram verificados os deslocamentos em ELS para combinação frequente dos casos de vento (segundo tabela 11.2 da NBR6118, adota-se $\psi_1 = 0,3$).

Tabela 10 - Deslocamentos horizontais máximos observados

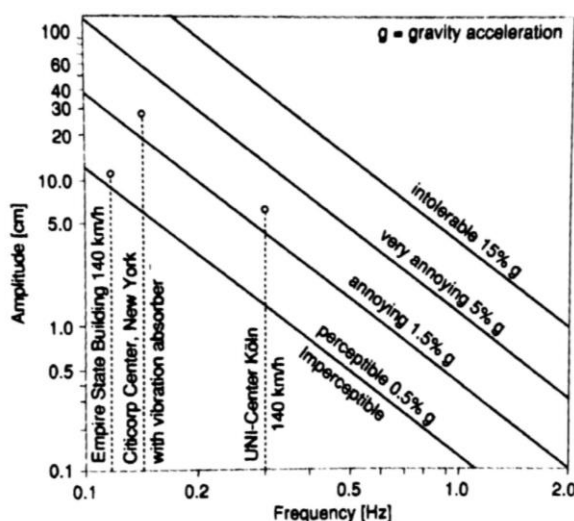
Deslocamento	Valor máximo (cm)				Referência (cm)	Situação
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4		
Topo do edifício (cm)	(H/2193) 6,50	(H/2091) 6,81	(H/2668) 5,34	(H/6003) 2,37	(H/1700) 8,38	OK
Entre pisos (cm)	(Hi/1546) 0,25	(Hi/1494) 0,25	(Hi/1929) 0,20	(Hi/4961) 0,08	(Hi/850) 0,45	

Uma importante observação deve ser feita: os deslocamentos para os casos experimentais foram superiores aos calculados com os carregamentos da norma de forma coerente pelo TQS®, apesar de ser contraintuitivo considerando as pressões indicadas na Tabela 8. Isso é devido à consideração, nessa tabela, apenas dos esforços na direção de atuação do vento para a consideração da pressão média. Assim, com base ainda nos resultados das Figuras 85, 86 e 87, observa-se que os esforços para os casos experimentais não estão contidos apenas nessa direção e portanto os carregamentos que produziram os deslocamentos indicados na Tabela 10 são maiores para os casos experimentais.

10.3.2 Conforto perante a ação do vento

Os critérios que determinam o conforto perante a ação do vento são fortemente relacionados ao nível de acelerações a que os usuários estão submetidos, ao tempo de exposição a essas acelerações e a outras questões mais subjetivas e individuais. As curvas indicadas no Gráfico 7 indicam uma referência ao nível de percepção humana a esses efeitos:

Gráfico 7 - Percepção humana à vibração devido ao vento



Fonte: (CHANG F. K., 1967, apud BACHMANN, 1995, p. 77)

Para a obtenção dos resultados observados, o *software* faz uso do método do vento sintético, de autoria do Prof. Dr. Mário Franco, com a superposição de séries de componentes harmônicas aleatórias com o resultado estático para a formação de um histórico temporal de carregamentos (BRASIL & SILVA, 2013).

Utilizando-se o parâmetro da NBR6123:1988, a amplitude máxima é de 1% da aceleração da gravidade (g), ou seja, aproximadamente $0,1 \text{ m/s}^2$, e considera-se admissível que esta amplitude seja excedida, em média, 1 vez a cada 10 anos.

Considerando o caso em estudo, pode-se observar pelo resultado exposto na Tabela a seguir que o nível de desconforto causado nos usuários pela atuação do vento na estrutura mostra-se imperceptível ao usuário e abaixo do parâmetro estabelecido pela norma em todas as situações avaliadas.

Tabela 11 – Acelerações máximas observadas

Ângulo (graus)	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4		Percepção humana
	Ax (m/s²)	Ay (m/s²)	Ax (m/s²)	Ay (m/s²)	Ax (m/s²)	Ay (m/s²)	Ax (m/s²)	Ay (m/s²)	
0	0,030	0,029	0,026	0,025	0,019	0,018	0,030	0,000	Imperceptível
15	0,026	0,024	0,025	0,024	0,020	0,019	0,035	0,009	
30	0,028	0,025	0,028	0,025	0,023	0,021	0,036	0,021	
45	0,018	0,028	0,019	0,021	0,018	0,025	0,032	0,032	
60	0,035	0,037	0,020	0,026	0,024	0,026	0,023	0,040	
75	0,032	0,034	0,027	0,029	0,024	0,026	0,011	0,042	
90	0,038	0,043	0,036	0,038	0,024	0,026	0,000	0,041	
105	0,032	0,035	0,029	0,031	0,025	0,027	0,011	0,042	
120	0,030	0,031	0,028	0,029	0,025	0,026	0,023	0,040	
135	0,027	0,027	0,027	0,027	0,020	0,020	0,032	0,032	
150	0,027	0,027	0,027	0,027	0,020	0,020	0,036	0,021	
165	0,026	0,026	0,023	0,023	0,019	0,018	0,035	0,009	
180	0,018	0,011	0,018	0,017	0,016	0,013	0,030	0,000	
195	0,025	0,024	0,025	0,024	0,020	0,019	0,035	0,009	
210	0,030	0,027	0,030	0,027	0,022	0,019	0,036	0,021	
225	0,026	0,034	0,019	0,022	0,018	0,026	0,032	0,032	
240	0,033	0,035	0,020	0,029	0,025	0,027	0,023	0,040	
255	0,036	0,038	0,029	0,032	0,026	0,027	0,011	0,042	
270	0,032	0,041	0,035	0,037	0,026	0,027	0,000	0,041	
285	0,034	0,036	0,030	0,032	0,026	0,028	0,011	0,042	
300	0,035	0,037	0,031	0,032	0,026	0,027	0,023	0,040	
315	0,029	0,029	0,030	0,030	0,024	0,024	0,032	0,032	
330	0,027	0,026	0,028	0,027	0,022	0,021	0,036	0,021	
345	0,028	0,026	0,023	0,022	0,020	0,019	0,035	0,009	

< 0,049	até 0,147	até 0,490	até 1,471	> 1,471	Referência (BACHMANN, H. et al., 1995, p. 77)
Imperceptível	Perceptível	Incômoda	Muito Incômoda	Intolerável	

11. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido ao caráter técnico e descritivo que esse trabalho assume, as considerações finais foram divididas em 3 tópicos principais: quanto aos desafios observados ao longo dos processos executados, quanto aos resultados propriamente ditos do ensaio em Túnel de Vento, da tabela de esforços do MatLab® e da modelagem estrutural no TQS®, e quanto a considerações e recomendações para trabalhos futuros.

11.1 Processos técnicos

O desenvolvimento desse projeto permitiu, conforme desejado, elucidar as dificuldades e desafios inerentes ao processo de pesquisa, elaboração e constituição do modelo físico e computacional de um edifício ao qual se recomenda o ensaio de Túnel de Vento. No caso de grandes aglomerados urbanos, com baixa disponibilidade de terrenos livres, tendência à verticalização do espaço urbano e assim com aumento de projetos estruturais de edifícios de grande altura e esbeltez, o ensaio de Túnel de Vento é uma solução de estudo técnico em engenharia cada vez mais comum e necessária para se descrever a complexa característica de escoamento de vento desses ambientes. Dessa forma, espera-se que a exigência para o conhecimento integrado das áreas de engenharia de vento, engenharia estrutural, meteorologia e interação fluido-estrutura tenda a ser característica mais prestigiada entre os profissionais que desejarem atuar em projetos dessas escalas de grandeza.

A partir do método analisado percebeu-se como a integração entre as diversas áreas e personagens de desenvolvimento desse processo - arquiteto, projetista estrutural, maquetista e profissionais do túnel de vento - exigem comunicação constante e acesso a projetos e materiais, uns dos outros. Por ser um serviço altamente técnico, complexo e custoso que envolve, em geral, quatro empresas diferentes em seu processo, não é incomum que dificuldades apareçam e essas devem ser ao máximo evitadas através do pleno entendimento entre as partes. Por exemplo, desde o emprego de cotas erradas no posicionamento das tomadas de pressão a até a utilização de eixos de referência diferentes, podem gerar impasses e

atrasar todo andamento produtivo do projeto. Essas dificuldades foram em algum momento do trabalho percebidas de fato.

Em suma, um maior contato do engenheiro civil com as etapas de desenvolvimento técnico, laboratorial e investigativo acerca dos desafios dos projetos propostos é o diferencial que se espera de um profissional que deseje, de fato, conhecer a ciência e os problemas que envolvem as decisões de engenharia que toma. Essa seria, assim, parte da caracterização do estado da arte da engenharia na concepção de estruturas civis e essa qualidade inerente às de um engenheiro consciente.

11.2 Resultados observados

É importante salientar que os resultados demonstrados nesse relatório representam uma pequena parcela do total obtido, e inclusive do necessário para a correta análise estrutural e da verificação de conformidade da estrutura. Foram omitidos os dimensionamentos e detalhamentos das peças, visto que esses fogem do escopo principal deste relatório. Apesar disso, os resultados dependentes da aplicação de esforços de vento estão bem representados e sugerem coerência da solução estrutural, tanto a adotada quanto a modelada no *software*.

Os resultados indicam que o uso da norma, ainda que adaptado para situações com seção transversal mais complexa ou edifícios altos e esbeltos, apresenta resultados com ordem de grandeza compatível ao observado no ensaio, e assim poderá ser utilizado para a obtenção de uma solução estrutural inicial e estudos de viabilidade de projeto, ou em casos em que o ensaio de túnel de vento represente um custo não justificável. Para seções transversais muito arrojadas a sensibilidade e experiência do engenheiro é solicitada, buscando analisar, complementar e concluir sobre soluções observadas tanto na norma para casos genéricos como em estudos publicados e ensaios prévios. Os resultados obtidos no modelo computacional indicam que tanto a parcela advinda de esforços transversais à direção de atuação do vento como os momentos torsões a essa relacionados não devem ser desprezados, principalmente se os resultados da modelagem através da utilização dos parâmetros da NBR6123 já estiverem próximos dos limites por esta norma estabelecidos.

Ainda assim, qualquer solução tomada estará associada a certo nível de confiança, o que por consequência trará soluções de dimensionamento mais seguras e em geral custosas. Em casos que o carregamento de vento sobre a estrutura seja a componente horizontal de esforços mais representativa, sua redução a ser aplicada ao modelo sempre poderá trazer benefícios de volume de materiais e custos.

11.3 Recomendações para trabalhos futuros

O desenvolvimento desse projeto conduziu a uma análise restrita de parte dos resultados que poderiam ser de fato extraídos e explorados através do ensaio experimental desenvolvido. As possibilidades que este permite à elaboração de estudos técnicos das mais diferentes áreas de interesse, dentro ou não da engenharia civil estrutural, são grandes. Assim, são ponderados nessa seção itens de estudo adicional recomendado que o grupo desse trabalho julga interessantes e pertinentes.

- Generalização do processo de obtenção dos esforços para casos simplificados (seções constantes retangulares e /ou circulares: como observado no item 8.3, a obtenção dos esforços através do uso do MatLab® fez uso de tabelas complexas, relacionando a cada “parte” da fachada do edifício valores como área, pressão e vetor normal. Tal procedimento pode ser generalizado de forma muito mais abrangente para casos simples de seções transversais de edifícios. Assim, é recomendada uma otimização desse processo realizado;
- Análise dinâmica da estrutura: como supracitado, os resultados de análise dinâmica observados pelo TQS® têm como base de dados apenas os carregamentos estáticos introduzidos no programa através da tabela do túnel de vento. Dessa forma, é perdido parte do potencial de análise que o ensaio em túnel de vento permite, com o uso das séries temporais fornecidas. Assim, é recomendada a análise dinâmica dos dados obtidos, através de modelos simplificados (sistemas massa-mola), visando obtenção do campo de acelerações da estrutura excitada pelo vento e permitindo inclusive a obtenção de condições de conforto da estrutura, com referência à ISO2631.

12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1988). *NBR 6123: Forças devido ao vento em edificações*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2014). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT.
- BACHMANN, H. et al. (1995). *Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines*. Basel: Birkhauser.
- BEARMAN, P. W. (Novembro de 2003). Vortex Shedding from Oscillating Bluff Bodies. *Annual Review of Fluid Mechanics*., pp. 195-222. doi:10.1146/annurev.fl.16.010184.001211.
- BLESSMANN, J. (1988). *Intervalo de tempo para cálculo da velocidade básica do vento*. 3 ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BLESSMANN, J. (1995). *O vento na Engenharia Estrutural*. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BRASIL, R. M., & SILVA, M. A. (2013). *Introdução à Dinâmica das Estruturas* (2ª ed.). São Paulo: Blucher.
- COOK, N. J. (1990). *The designer's Guide to Wind Loading of Building Structures* (Vols. 1,2). Garston, Watford: Building Research Establishment, Department Of The Environment.
- COUNIHAN, J. (1969). *An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel*. Surrey, UK: Atmospheric Environment.
- COUNIHAN, J. (1970). *Further measurements in a simulated atmospheric boundary layer*. Surrey, UK: Atmospheric Environment.
- CTBUH. (11 de Outubro de 2017). *Height and statistics*. Fonte: COUNCIL ON TALL BUILDINGS AND URBAN HABITAT: <http://www.ctbuh.org/>
- DASSAULT SYSTEMES. (3 de novembro de 2017). *SolidWorks Educational*. Fonte: Site da SolidWorks Corporation: <http://www.solidworks.com/sw/industries/engineering-education-software.htm>
- FARIA, R. (julho de 2014). *Visita técnica – Como funciona o túnel de vento do IPT*. Fonte: Técnica - Pini: <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/208/como-funciona-o-tunel-de-vento-do-ipt-319316-1.aspx>

- GONÇALVES, R. M. (2007). *Ação do vento em edificações: teoria e exemplos*. São Carlos: Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- HINZE, J. (1975). *Turbulence*. New York: McGraw-Hill.
- HOLMES, J. D. (2001). *Wind Loading of Structures*. New York: Taylor & Francis.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (1985). ISO2631. *Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure of Whole-Body Vibration: General requirements*.
- L.L.N.L. (25 de outubro de 2017). *Visit Homepage*. Fonte: Lawrence Livermore National Laboratory: <https://wci.llnl.gov/simulation/computer-codes/visit/>
- LOREDO-SOUZA, A. M., SCHETTINI, E. C., & PALUCH, M. (2004). Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. *ABCM: IV Escola de Primavera em Transição & Turbulência*, pp. 137-163.
- MUNSON, B. R., YOUNG, D. F., & OKIISHI, T. H. (2004). *Fundamentos da Mecânica dos Fluidos*. São Paulo: Edgard Blücher.
- PINI. (2016). Superedifícios brasileiros. *Revista Técnica*, 22-29.
- TÉCNICAS, A. B. (1988). *NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro: ABNT.
- TQS. (23 de 07 de 2009). *Dúvida tabela 13.2 - limites aceitáveis de deslocamentos*. Fonte: Biblioteca Digital TQS, Artigos: <http://www.tqs.com.br/suporte-e-servicos/biblioteca-digital-tqs/89-artigos/228-duvida-tabela-132-limites-aceitaveis-de-deslocamentos>
- TQS INFORMÁTICA LTDA. (2016). *Manual: Visão Geral & Exemplo Completo*. São Paulo: TQS.
- VILLELA, S., & MATTOS, A. (1975). *Hidrologia aplicada*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil.

APÊNDICE A

TABELAS DE CARREGAMENTOS DE VENTO APLICADAS
NO MODELO ESTRUTURAL DO TQS®

TQS		TABELA DE ESFORÇOS EM X - FX (kN) - CASO 1																							
		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345
TUNEL	36	69,59	70,53	45,31	47,44	-2,50	-22,07	37,18	15,06	-1,86	-30,39	-39,38	-37,60	-46,12	-61,64	-51,06	-20,20	13,57	30,19	-27,29	-12,69	19,19	37,31	65,82	53,01
	35	142,59	143,71	91,77	99,04	-7,13	-49,61	77,23	32,86	-5,37	-63,83	-81,87	-80,23	-94,88	-126,51	-104,79	-41,91	29,48	65,23	-55,08	-27,61	38,59	76,94	134,73	109,03
	34	250,55	241,67	193,98	213,54	23,67	-50,26	91,13	20,98	-77,67	-168,63	-206,43	-208,09	-210,41	-260,47	-233,81	-139,37	-26,37	53,89	-74,21	-12,02	102,68	162,11	242,64	195,04
	33	268,98	234,90	196,93	180,72	4,95	-87,55	83,30	33,89	-76,89	-155,18	-224,40	-217,43	-208,66	-239,19	-230,04	-137,72	-21,59	67,60	-73,67	-18,49	82,23	141,40	232,75	219,50
	32	288,03	243,99	203,75	174,83	-9,84	-107,38	94,43	43,35	-74,60	-151,10	-234,53	-223,65	-214,14	-239,43	-233,89	-135,68	-7,09	79,56	-85,49	-30,29	70,94	138,80	238,52	238,81
	31	289,56	243,55	205,63	173,87	-18,66	-110,10	99,71	47,38	-75,56	-149,25	-236,15	-222,35	-213,53	-237,37	-233,46	-136,00	1,06	80,45	-93,24	-38,88	64,92	138,38	237,56	241,75
	30	290,65	241,09	205,64	170,28	-19,97	-115,87	104,56	53,44	-75,94	-147,35	-233,35	-220,40	-211,21	-237,13	-232,55	-137,85	0,40	85,16	-101,10	-45,74	63,31	138,97	236,85	243,19
	29	291,60	237,97	205,00	165,77	-18,36	-122,61	109,18	59,99	-76,08	-145,48	-228,95	-218,38	-208,36	-237,69	-231,53	-140,24	-3,53	91,13	-108,91	-51,87	63,42	140,04	236,28	244,04
	28	292,65	234,81	204,37	161,18	-16,76	-129,61	113,95	66,81	-76,26	-143,59	-224,48	-216,31	-205,46	-238,28	-230,53	-142,74	-7,56	97,34	-116,96	-58,17	63,53	141,13	235,74	244,98
	27	294,14	232,47	203,81	159,13	-17,56	-133,13	116,82	71,89	-74,85	-141,73	-223,69	-214,51	-199,46	-237,46	-224,38	-143,28	-9,15	103,09	-124,67	-61,40	63,02	143,39	235,38	245,58
	26	296,06	230,93	203,33	159,42	-20,59	-133,44	117,93	75,36	-71,98	-139,90	-226,30	-213,00	-190,60	-235,34	-213,48	-142,00	-8,47	108,43	-132,07	-61,80	61,92	146,74	235,20	245,88
	25	298,10	229,42	202,90	159,77	-23,68	-133,79	119,10	78,90	-69,08	-138,09	-229,02	-211,52	-181,66	-233,26	-202,46	-140,75	-7,78	113,88	-139,64	-62,21	60,83	150,19	235,09	246,25
	24	301,16	229,81	202,70	158,99	-26,24	-134,13	118,82	80,87	-67,15	-136,75	-232,53	-209,63	-174,08	-232,47	-196,04	-139,11	-7,08	117,12	-145,97	-62,74	59,82	153,68	236,84	248,89
	23	306,23	234,13	202,97	155,81	-27,61	-134,39	115,47	79,44	-67,29	-136,41	-237,56	-206,86	-169,54	-234,38	-199,47	-136,66	-6,37	115,54	-149,49	-63,48	59,01	157,13	242,43	256,19
	22	309,11	237,91	197,72	148,44	-30,52	-136,38	115,86	84,80	-65,88	-138,15	-242,83	-199,30	-152,09	-228,99	-200,59	-128,13	-2,11	112,25	-160,96	-66,42	57,40	160,37	246,92	263,57
	21	306,83	239,39	194,60	140,89	-34,35	-133,59	113,48	90,17	-53,43	-129,69	-240,25	-182,06	-128,15	-218,28	-205,85	-114,78	1,76	104,76	-181,51	-72,94	58,74	163,01	253,85	270,22
	19	294,05	233,46	195,60	139,06	-32,53	-125,45	100,85	90,61	-44,99	-123,88	-229,38	-161,48	-101,74	-214,92	-204,90	-111,63	7,06	105,61	-195,21	-78,18	63,00	167,12	250,14	252,37
	18	287,14	230,39	194,10	136,12	-31,38	-122,05	95,07	92,36	-41,82	-122,75	-224,74	-150,12	-84,49	-212,15	-202,58	-108,62	10,92	106,31	-203,36	-80,42	64,44	169,06	247,02	242,17
	17	279,73	232,48	195,74	134,63	-29,36	-119,03	94,35	89,72	-40,21	-125,07	-222,21	-147,10	-82,00	-206,44	-199,36	-106,78	14,01	105,23	-200,11	-80,00	66,53	170,88	247,78	244,17
	16	267,96	233,02	189,53	123,97	-34,85	-119,79	89,34	84,83	-38,24	-125,34	-218,06	-146,17	-82,39	-201,17	-195,72	-103,25	20,77	107,06	-192,29	-76,29	71,68	174,48	245,38	238,26
	15	261,77	235,61	208,90	140,84	-18,70	-110,89	93,19	81,69	-44,09	-139,44	-226,98	-146,52	-75,36	-202,08	-203,48	-111,94	13,23	101,83	-195,17	-77,34	78,71	185,43	258,51	243,41
	14	249,05	232,44	209,77	132,58	-22,56	-107,43	77,35	72,68	-47,57	-144,81	-225,74	-142,82	-72,15	-196,43	-199,00	-107,61	10,46	91,39	-193,31	-85,31	74,00	179,24	253,40	239,70
	13	234,54	227,21	210,31	121,58	-28,82	-103,95	55,50	61,25	-53,13	-151,44	-225,28	-139,16	-68,55	-191,03	-194,25	-102,49	5,16	77,24	-192,21	-96,68	66,52	169,86	246,27	233,78
	12	219,71	222,00	211,08	110,28	-35,35	-100,43	32,85	49,43	-58,96	-158,47	-225,02	-135,50	-64,87	-185,60	-189,51	-97,27	-0,35	62,62	-191,26	-108,59	58,81	160,29	239,09	227,87
	11	208,99	223,72	221,71	108,10	-33,10	-95,45	28,54	45,93	-58,03	-155,41	-216,76	-124,08	-60,42	-180,91	-190,26	-90,02	2,34	60,10	-186,11	-109,51	60,86	160,49	241,46	226,82
	10	235,59	249,03	247,74	138,64	-12,47	-98,60	82,83	72,75	-42,29	-135,57	-208,38	-115,47	-65,03	-192,62	-210,41	-92,57	23,37	97,19	-185,01	-82,80	87,78	192,33	272,46	248,84
	9	209,03	248,14	265,40	131,14	-7,57	-86,46	71,89	64,14	-39,70	-127,11	-187,97	-90,16	-53,82	-179,46	-208,60	-76,15	27,89	89,84	-171,19	-83,48	90,25	189,09	273,48	242,17
	8	188,15	249,32	278,07	126,50	-4,18	-77,83	64,29	57,51	-38,15	-121,55	-172,58	-72,40	-47,60	-170,27	-203,70	-65,62	29,77	86,13	-160,84	-84,69	92,13	186,10	273,64	236,78
	7	179,60	253,52	279,84	129,01	-4,23	-77,05	63,47	53,93	-39,83	-122,44	-167,80	-71,34	-53,51	-170,05	-192,08	-68,24	26,17	90,13	-157,87	-86,99	93,27	184,34	269,01	232,88
	6	171,01	258,77	282,58	132,08	-4,30	-76,44	62,78	50,26	-41,74	-123,77	-163,20	-70,42	-59,97	-170,32	-180,24	-71,24	22,41	94,67	-155,18	-89,70	94,77	183,02	264,87	229,41
	5	160,29	260,26	282,98	138,71	1,52	-64,76	68,02	50,92	-52,12	-133,05	-165,46	-74,12	-67,82	-175,87	-169,72	-82,84	8,51	89,90	-150,87	-91,94	99,70	184,01	267,38	228,83
	4	126,25	225,60	280,54	179,33	39,69	-45,32	83,25	64,56	-62,85	-146,74	-173,53	-76,63	-72,53	-196,51	-181,79	-102,81	13,03	104,69	-141,88	-82,17	122,93	188,97	250,75	198,01
	3	121,50	234,62	286,64	163,40	53,90	35,89	115,42	43,43	-74,74	-141,86	-175,17	-78,22	-71,98	-189,92	-185,94	-97,44	0,28	111,30	-80,87	-26,52	119,92	178,27	253,05	203,36
	2	133,13	250,42	302,03	169,17	53,80	36,09	121,56	45,66	-77,82	-147,61	-183,50	-84,73	-75,92	-200,05	-195,24	-102,38	2,73	119,23	-86,49	-30,27	124,86	186,29	265,79	219,77
	1	335,29	548,37	651,94	599,75	529,88	514,82	628,07	499,08	310,86	217,05	74,00	174,59	-34,63	-198,60	-225,31	-217,56	-256,98	-117,22	-341,56	-345,49	-31,34	108,03	331,76	414,98

TQS		TABELA DE ESFORÇOS EM V - FY (kN) - CASO 1																											
		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345				
TUNEL	36	-16,36	3,19	73,15	106,73	169,28	138,73	196,55	149,49	111,86	111,02	50,00	51,77	-32,69	-18,24	-91,97	-114,79	-142,85	-162,80	-152,72	-157,40	-138,45	-93,98	-29,70	13,64				
	35	-35,82	2,02	144,85	214,27	333,84	273,99	387,85	294,99	224,69	221,37	98,73	102,34	-61,43	-34,54	-181,51	-230,06	-284,56	-319,27	-297,51	-308,39	-274,07	-187,11	-56,42	35,85				
	34	-51,60	3,35	154,38	240,26	362,33	303,67	443,12	327,07	255,20	245,84	114,06	121,29	-50,79	-52,93	-201,82	-257,64	-310,45	-352,69	-328,83	-332,89	-299,41	-206,62	-66,13	53,43				
	33	-52,05	0,37	149,18	241,15	345,79	273,56	416,00	300,55	250,41	245,40	121,50	113,19	-52,49	-61,14	-203,62	-261,62	-301,70	-325,70	-307,85	-305,85	-301,44	-209,14	-76,80	64,18				
	32	-38,50	3,47	146,95	228,91	316,01	247,20	395,74	287,32	246,92	240,59	118,80	97,42	-62,19	-72,81	-224,90	-291,96	-332,90	-348,14	-351,09	-336,34	-293,93	-195,40	-58,85	90,30				
	31	-44,06	-5,68	145,80	234,42	319,11	253,88	401,99	289,57	251,69	243,27	124,42	87,64	-64,29	-69,09	-225,19	-300,87	-344,70	-355,21	-355,97	-337,33	-302,79	-202,65	-63,87	103,68				
	30	-45,03	-9,82	145,82	236,36	321,36	257,87	395,49	290,29	250,96	243,52	127,58	89,35	-68,20	-67,93	-218,72	-301,91	-344,05	-353,32	-362,19	-338,18	-307,08	-204,20	-64,47	113,73				
	29	-51,28	-17,11	139,52	227,34	313,61	250,73	372,41	283,59	241,90	236,50	128,51	99,30	-61,46	-52,85	-196,26	-287,38	-346,62	-374,39	-378,06	-346,41	-315,91	-210,77	-70,28	115,91				
	28	-43,86	-13,29	145,70	233,47	321,26	255,70	371,23	294,88	247,62	243,47	129,73	102,72	-77,12	-68,44	-204,58	-301,32	-343,09	-345,64	-376,53	-340,01	-310,99	-203,90	-62,17	129,20				
	27	-59,10	-24,03	148,46	245,25	343,92	278,98	378,79	310,02	262,86	258,04	139,86	125,46	-68,25	-56,11	-180,03	-282,07	-326,28	-321,31	-339,45	-294,82	-320,08	-228,07	-86,95	120,50				
	26	-50,29	-22,58	149,34	242,03	340,58	284,30	363,84	310,44	269,29	261,46	140,70	138,40	-57,83	-54,59	-167,77	-273,81	-320,50	-311,67	-338,39	-282,95	-316,10	-222,80	-81,71	128,29				
	25	-41,35	-21,12	150,27	238,83	337,29	289,80	348,74	310,96	275,91	265,00	141,59	151,60	-47,25	-53,06	-155,36	-265,48	-314,72	-301,97	-337,43	-270,97	-312,15	-217,52	-76,41	136,26				
	24	-36,52	-17,59	149,98	235,28	332,86	290,74	338,36	308,39	278,36	264,37	140,19	165,48	-44,61	-54,09	-146,19	-260,12	-310,72	-295,32	-336,14	-265,48	-310,50	-216,05	-73,93	139,64				
	23	-40,32	-9,74	147,12	231,17	326,31	281,89	338,21	299,14	271,86	255,01	133,99	180,39	-58,92	-60,52	-144,44	-261,27	-310,35	-295,21	-333,89	-273,76	-313,65	-222,58	-77,51	133,33				
	22	-43,31	-3,14	139,10	220,59	318,43	277,17	342,64	292,76	260,03	238,75	122,44	191,03	-71,57	-62,44	-138,60	-255,57	-306,70	-300,41	-332,22	-285,63	-311,13	-222,35	-77,15	127,13				
	21	-47,56	6,28	136,80	219,01	315,60	268,47	345,59	283,27	251,33	230,00	118,01	212,48	-89,75	-71,52	-139,94	-257,91	-306,60	-302,45	-331,39	-297,62	-316,30	-228,64	-82,07	118,24				
	20	-61,97	-5,63	139,60	230,56	319,54	270,57	337,20	283,46	262,49	233,66	121,61	223,12	-104,08	-81,17	-143,03	-266,26	-302,73	-297,17	-332,48	-296,40	-325,73	-234,19	-81,76	118,71				
	19	-77,81	-23,06	138,02	236,86	321,81	278,46	329,83	288,36	273,11	231,97	120,61	225,60	-114,82	-85,76	-141,08	-268,38	-294,15	-295,10	-333,04	-294,98	-329,78	-233,55	-76,03	121,94				
	18	-94,10	-40,96	136,51	243,53	324,33	286,69	322,44	293,53	284,15	230,44	119,70	228,32	-125,93	-90,54	-139,18	-270,74	-285,58	-293,09	-333,89	-293,68	-334,15	-233,04	-70,23	125,28				
	17	-96,59	-42,84	137,74	246,21	328,42	291,19	326,14	297,95	288,63	232,37	120,47	230,74	-127,99	-91,61	-140,43	-273,80	-287,58	-297,22	-337,15	-297,38	-338,21	-235,79	-70,22	127,64				
	16	-85,04	-43,00	124,36	227,34	286,45	251,71	277,64	256,48	305,66	248,38	118,23	219,21	-147,83	-90,73	-122,68	-248,23	-263,42	-248,00	-275,40	-266,06	-339,13	-256,10	-63,42	143,67				
	15	-81,17	-60,84	94,96	189,38	247,02	229,46	249,27	233,22	306,80	238,98	106,56	208,66	-172,24	-86,54	-90,28	-209,43	-238,01	-223,46	-242,88	-246,97	-331,75	-250,05	-36,95	165,49				
	14	-86,30	-58,74	100,33	197,98	253,74	240,88	256,24	238,68	301,79	228,20	102,98	202,63	-155,29	-95,62	-93,45	-216,99	-243,36	-231,10	-249,26	-261,07	-325,95	-238,69	-36,07	152,24				
	13	-92,96	-55,40	107,64	209,80	262,33	255,81	264,89	245,06	293,04	212,27	97,74	193,27	-130,53	-108,14	-97,66	-226,84	-250,45	-240,39	-257,73	-279,83	-316,49	-221,42	-34,91	132,37				
	12	-99,60	-52,03	115,54	223,59	272,84	272,04	274,76	252,03	284,09	196,63	92,76	183,51	-104,71	-121,21	-102,24	-237,42	-259,53	-249,77	-268,05	-300,33	-308,05	-203,75	-34,04	111,59				
	11	-99,50	-46,44	119,25	230,33	277,15	277,83	274,85	253,61	276,70	187,52	88,61	171,38	-91,36	-126,25	-102,90	-240,94	-262,89	-252,12	-271,94	-310,08	-302,24	-194,57	-33,36	97,41				
	10	-93,10	-38,75	119,09	230,57	275,78	273,93	265,86	250,23	270,84	184,59	85,25	157,02	-89,73	-123,81	-99,91	-237,95	-260,97	-250,90	-269,91	-309,89	-299,00	-193,40	-32,88	89,41				
	9	-86,51	-30,72	119,10	231,17	274,75	270,24	256,80	247,05	265,09	181,78	81,85	142,13	-88,13	-121,44	-96,90	-235,15	-259,35	-248,95	-268,19	-310,17	-296,04	-192,47	-32,43	81,12				
	8	-78,46	-23,14	118,43	231,45	274,23	267,01	249,15	244,41	258,82	181,59	80,07	131,23	-85,49	-119,22	-97,35	-232,92	-256,86	-246,46	-265,98	-310,86	-293,99	-190,89	-34,18	74,28				
	7	-67,39	-16,79	116,05	230,57	274,32	264,39	244,42	242,60	251,14	186,81	81,80	129,29	-80,47	-117,20	-105,18	-231,57	-252,95	-242,41	-262,27	-311,86	-293,46	-187,57	-40,65	70,77				
	6	-55,91	-10,01	113,99	230,21	274,84	262,16	239,88	241,32	243,81	193,07	84,06	128,07	-75,60	-115,64	-114,03	-231,11	-247,55	-238,92	-259,09	-313,62	-293,59	-184,71	-47,79	67,12				
	5	-52,36	-25,54	83,31	193,46	254,04	275,17	238,97	237,99	225,93	192,84	84,64	124,38	-60,15	-89,55	-99,77	-210,85	-245,69	-261,49	-252,07	-306,68	-278,84	-175,86	-60,29	39,34				
	4	-22,14	-12,44	99,76	202,95	252,26	256,06	238,25	237,49	220,91	187,24	77,58	119,37	-62,13	-98,73	-113,22	-223,33	-238,39	-253,19	-264,57	-312,08	-272,08	-167,50	-60,29	39,34				
	3	-0,05	-15,42	100,54	199,85	248,53	243,26	234,30	226,59	218,21	191,08	81,50	121,94	-57,81	-97,36	-113,22	-232,00	-238,39	-255,51	-260,69	-315,40	-274,42	-172,84	-76,35	17,13				
	2	67,43	57,87	154,02	268,12	325,65	318,96	310,76	292,15	300,66	291,81	181,80	202,34	-17,09	-62,17	-93,80	-202,03	-259,04	-272,40	-260,51	-331,72	-265,40	-166,31	-49,72	84,99				
	1	102,63	39,40	58,73	146,61	186,07	166,07	219,99	188,05	168,96	233,03	264,34	208,19	35,68	-4,22	-40,33	-86,13	-95,29	-103,58	-94,04	-153,45	-122,93	-39,79	19,77	162,41				

TABELA DE MOMENTO EM Z - MZ (kNm) - CASO 1																								
TQS	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345
TUNEL	90	75	60	45	30	15	0	345	330	315	300	285	270	255	240	225	210	195	180	165	150	135	120	105
36	1309	1001	281	102	-2196	-2085	-2985	-2540	-2759	-3577	-2066	-1699	840	-699	155	935	1697	2692	2474	2759	3951	3292	2232	81
35	2819	2117	578	307	-4303	-4206	-5828	-4880	-5605	-7249	-4221	-3570	1505	-1481	285	1838	3416	5403	4744	5347	7887	6744	4571	75
34	5730	4339	1860	1763	-4985	-5500	-6525	-5856	-8010	-10517	-7917	-7529	-1070	-4350	-1788	783	3628	6528	4824	6316	9989	9552	7753	1826
33	7372	5159	2177	669	-6125	-7162	-5797	-5054	-8262	-10789	-9273	-8355	-1944	-4570	-2112	1134	4591	7396	4109	5576	9692	9517	8413	2924
32	8451	5760	2453	318	-6794	-8048	-5528	-4867	-8738	-11259	-10090	-8619	-2351	-4784	-2185	1480	5398	8000	3736	5290	10021	10062	9071	3292
31	8794	5859	2418	-146	-7234	-8436	-5560	-4899	-9131	-11527	-10403	-8414	-2381	-4730	-1974	1832	6007	8283	3604	5139	10297	10440	9274	3018
30	8987	5882	2419	-146	-7240	-8639	-5278	-4766	-9210	-11605	-10405	-8523	-2311	-4715	-2062	1830	6058	8400	3483	4927	10293	10613	9310	2960
29	9028	5819	2325	-368	-7261	-8887	-5048	-4754	-9290	-11703	-10318	-8702	-2067	-4481	-2013	1965	5896	8141	3231	4638	10159	10587	9187	2890
28	9268	5914	2408	-379	-7066	-8971	-4498	-4483	-9162	-11606	-10227	-8981	-2137	-4681	-2404	1697	5820	8596	3226	4554	10224	10754	9263	2976
27	9371	5948	2409	-430	-7056	-9067	-4072	-4339	-9137	-11571	-10203	-9212	-1998	-4607	-2438	1673	5770	8687	3103	4349	10226	10820	9252	3024
26	9439	5997	2424	-411	-7099	-9091	-3612	-4185	-9110	-11513	-10231	-9452	-1818	-4484	-2355	1674	5774	8760	2995	4121	10242	10889	9253	3109
25	9512	6048	2439	-392	-7146	-9117	-3146	-4031	-9086	-11456	-10263	-9699	-1635	-4360	-2272	1676	5780	8837	2886	3891	10262	10963	9257	3197
24	9630	6078	2460	-370	-7155	-9098	-2856	-3890	-9061	-11367	-10309	-10004	-1455	-4288	-2273	1669	5751	8842	2717	3747	10266	11051	9295	3348
23	9840	6060	2492	-344	-7081	-8985	-2948	-3779	-9034	-11213	-10379	-10425	-1296	-4324	-2454	1640	5645	8693	2429	3791	10227	11166	9402	3627
22	9538	5694	2140	-627	-6974	-8755	-3224	-3684	-8811	-10839	-10011	-10380	-628	-3875	-2327	1935	5609	8384	2232	3949	9986	11000	9075	3542
21	9284	5362	1833	-1045	-7035	-8468	-3571	-3470	-8334	-10364	-9680	-10203	320	-3243	-2300	2417	5577	8034	1683	3843	9866	10973	9008	3610
20	9856	5717	2145	-952	-7103	-8508	-3510	-3304	-8471	-10404	-9959	-10343	545	-3362	-2600	2312	5470	8088	1142	3649	10177	11349	9325	3689
19	10051	5818	2181	-1026	-7092	-8459	-3574	-3256	-8602	-10276	-9901	-10131	1016	-3220	-2604	2369	5429	8048	847	3610	10344	11438	9200	3348
18	10244	5913	2214	-1109	-7088	-8405	-3657	-3208	-8734	-10142	-9835	-9898	1532	-3063	-2602	2433	5395	8013	532	3573	10523	11539	9067	2982
17	10111	5990	2209	-1135	-7119	-8388	-3704	-3365	-8815	-10245	-9773	-9923	1624	-2942	-2525	2515	5474	8066	560	3659	10709	11669	9091	2953
16	9478	6191	2400	-832	-6478	-7774	-2801	-2828	-9435	-10916	-9685	-9706	2516	-2707	-2703	2220	5288	7309	-486	3123	11149	12407	9008	2386
15	8984	7010	3429	153	-5579	-7314	-2525	-2840	-9949	-11368	-9921	-9943	3197	-3140	-3633	1369	4780	6869	-810	3007	11643	12932	9019	1790
14	8779	6977	3439	-88	-5744	-7324	-2980	-3104	-9777	-11154	-9781	-9616	2794	-2843	-3458	1637	4993	6978	-618	3237	11547	12641	9006	2076
13	8564	6905	3449	-435	-5979	-7359	-3612	-3417	-9499	-10800	-9614	-9152	2188	-2472	-3239	1990	5259	7118	-354	3534	11335	12173	8983	2494
12	8337	6835	3456	-827	-6252	-7414	-4289	-3748	-9193	-10428	-9439	-8658	1561	-2078	-2989	2378	5536	7267	-79	3856	11120	11686	8960	2923
11	7918	6728	3673	-1000	-6292	-7337	-4417	-3876	-8967	-10111	-9148	-7984	1224	-1890	-2923	2650	5732	7276	93	4062	11027	11483	9014	3185
10	7965	6798	3904	-766	-6115	-7650	-3233	-3451	-8985	-9926	-9059	-7693	865	-2282	-3343	2593	5863	7408	-165	4333	11181	11877	9342	3589
9	6964	6539	4457	-851	-5936	-7145	-3303	-3610	-8744	-9616	-8470	-6494	974	-2064	-3280	2903	5993	7147	112	4343	11150	11771	9380	3539
8	6027	6378	4916	-875	-5804	-6769	-3322	-3704	-8479	-9418	-8012	-5596	929	-1980	-3131	3075	6011	6987	334	4375	11143	11616	9443	3505
7	5262	6410	5129	-761	-5779	-6703	-3230	-3671	-8182	-9467	-7841	-5367	517	-2173	-2770	2948	5789	7026	433	4444	11177	11363	9475	3469
6	4475	6468	5371	-637	-5771	-6653	-3132	-3645	-7898	-9556	-7694	-5150	80	-2388	-2404	2817	5566	7092	542	4525	11246	11134	9543	3450
5	3463	6215	5302	-520	-5596	-6273	-2922	-3610	-7712	-9641	-7518	-4902	-331	-2574	-1997	2536	5044	6929	987	4781	11144	10689	9345	3385
4	2147	5078	4706	195	-4626	-5512	-2635	-3485	-7622	-9553	-7295	-4638	-368	-2715	-2028	2283	5009	7550	1875	5466	11346	10328	8717	2736
3	1932	5623	4858	110	-4443	-4389	-2097	-4293	-7754	-9148	-7201	-4296	-521	-2778	-2211	2591	5074	8671	4044	7403	11109	10083	9090	3613
2	1226	4908	4655	-319	-5211	-5055	-2498	-4627	-8878	-10985	-9337	-5682	-1487	-3818	-3128	1567	5055	9016	3633	7437	11129	10431	9184	2769
1	-209	4272	4800	-2138	-8885	-10005	-6546	-8445	-14368	-17978	-15880	-10248	-3136	-5740	-4334	978	6996	12447	5548	11454	14927	13970	11050	1660

		TABELA DE ESFORÇOS EM X - FX (kN) - CASO 2																											
TQS		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345				
TUNEL	90	75	60	45	30	15	0	345	330	315	300	285	270	255	240	225	210	195	180	165	150	135	120	105					
36	69,47	46,69	45,31	27,20	14,08	-4,92	0,12	6,64	-22,31	-29,33	-40,20	-57,28	-48,30	-62,29	-50,10	-43,01	-11,14	21,75	-4,17	0,65	33,27	49,73	50,44	47,97					
35	142,60	96,57	91,77	56,78	28,47	-13,39	-0,02	14,97	-47,59	-61,72	-83,94	-119,90	-101,25	-127,63	-102,72	-88,89	-22,00	47,01	-8,63	-1,30	69,26	102,20	102,72	99,32					
34	238,29	194,85	193,98	153,50	64,85	-6,14	-2,04	-19,22	-129,32	-163,04	-209,82	-256,94	-217,70	-258,59	-235,24	-186,31	-90,26	5,38	-13,17	13,47	155,87	211,51	213,39	208,18					
33	236,45	209,37	196,93	145,63	65,31	4,84	-3,44	-30,34	-108,56	-174,24	-225,60	-249,38	-220,33	-239,51	-232,69	-160,84	-75,81	-0,86	-11,72	17,47	127,05	189,94	237,29	217,00					
32	247,85	221,71	203,75	143,41	67,48	2,84	-2,94	-27,84	-100,44	-181,31	-236,07	-253,80	-227,24	-241,01	-236,66	-155,68	-67,02	8,42	-13,63	14,87	118,42	187,83	251,90	225,18					
31	247,08	223,11	205,63	142,41	70,83	-0,61	-2,46	-23,93	-97,30	-183,74	-238,43	-251,42	-224,85	-239,57	-236,77	-154,60	-63,95	13,72	-14,30	11,31	115,84	185,98	253,98	223,73					
30	248,49	224,81	205,64	143,01	74,80	-2,25	-7,24	-26,23	-97,71	-183,23	-235,95	-247,15	-220,59	-238,55	-236,91	-153,17	-66,51	10,98	-13,31	9,28	115,45	186,11	254,09	220,70					
29	250,77	226,63	205,00	144,20	78,96	-3,17	-13,80	-30,83	-99,52	-181,69	-231,69	-242,28	-215,79	-237,82	-237,07	-151,59	-71,16	5,39	-11,74	7,87	115,92	187,09	253,54	217,19					
28	253,14	228,54	204,37	145,46	83,25	-4,13	-20,60	-35,56	-101,37	-180,13	-227,38	-237,32	-210,89	-237,09	-237,29	-150,03	-75,95	-0,41	-10,12	6,42	116,42	188,10	253,01	213,61					
27	254,77	231,35	203,81	147,33	88,09	-7,12	-23,73	-37,42	-102,63	-178,93	-226,67	-233,55	-204,97	-236,37	-231,53	-148,12	-79,55	-8,90	-11,14	8,95	116,68	187,34	251,70	211,39					
26	255,72	234,99	203,33	149,79	93,45	-11,97	-23,46	-36,64	-103,34	-178,08	-229,31	-230,91	-198,13	-235,69	-220,24	-145,90	-82,05	-19,89	-14,60	15,18	116,73	184,95	249,69	210,42					
25	256,76	238,77	202,90	152,33	98,93	-16,91	-23,20	-35,85	-104,09	-177,27	-232,06	-228,30	-191,24	-235,06	-208,83	-143,69	-84,62	-31,07	-18,12	21,52	116,82	182,58	247,72	209,51					
24	258,66	242,19	202,70	154,54	102,65	-19,35	-22,15	-35,39	-104,88	-176,92	-235,79	-226,12	-184,97	-235,19	-201,88	-142,52	-87,23	-40,47	-20,68	25,62	116,93	181,57	247,28	209,14					
23	262,25	244,71	202,97	155,96	102,54	-16,44	-19,48	-35,64	-105,69	-177,52	-241,47	-224,88	-180,10	-236,84	-204,50	-143,57	-89,81	-45,87	-21,13	24,88	117,06	183,40	250,03	209,90					
22	266,05	245,88	197,72	155,93	102,69	-11,42	-13,02	-38,26	-111,00	-178,69	-246,75	-216,71	-166,02	-231,46	-204,02	-141,74	-94,11	-58,31	-23,36	30,17	118,44	181,26	249,53	208,96					
21	265,26	245,88	194,60	161,73	100,44	-8,70	1,37	-33,26	-109,84	-174,19	-243,67	-200,14	-146,15	-220,73	-211,17	-142,86	-98,58	-79,99	-29,95	34,66	124,29	176,07	250,05	204,94					
20	256,25	244,83	196,90	163,80	102,03	-3,73	6,06	-31,02	-104,08	-167,61	-236,47	-193,30	-139,09	-220,19	-212,84	-144,06	-102,55	-81,09	-30,10	33,20	124,25	176,47	244,45	208,59					
19	248,09	243,85	195,60	162,05	103,64	5,35	9,60	-34,39	-101,44	-162,38	-231,53	-185,72	-129,39	-218,30	-209,75	-141,90	-106,92	-84,25	-29,67	35,95	121,42	175,48	235,69	213,76					
18	239,04	242,67	194,10	160,08	105,35	15,30	13,49	-38,07	-98,50	-156,58	-226,02	-177,34	-118,70	-216,14	-206,27	-139,48	-111,67	-87,69	-29,18	38,96	118,27	174,33	225,98	219,33					
17	238,89	242,59	195,74	159,52	104,84	24,94	10,35	-41,24	-98,30	-158,13	-224,15	-175,64	-113,11	-209,40	-203,53	-137,42	-111,40	-81,28	-25,47	45,54	118,76	174,10	221,92	219,76					
16	234,09	237,47	189,53	149,16	97,41	29,74	2,52	-46,84	-97,07	-157,14	-221,25	-172,30	-112,09	-202,98	-200,12	-134,84	-109,75	-73,05	-17,84	53,84	120,98	174,14	215,18	213,03					
15	237,17	241,11	208,90	168,82	110,36	52,87	2,97	-52,89	-105,87	-173,26	-229,56	-181,88	-97,92	-203,00	-208,81	-142,49	-117,95	-69,55	-15,17	68,94	128,12	184,90	219,09	220,98					
14	231,89	234,31	209,77	160,47	101,99	55,29	-9,80	-66,38	-111,01	-176,15	-227,53	-180,10	-94,17	-195,45	-203,07	-140,39	-120,02	-71,50	-23,96	68,39	120,28	179,34	211,63	208,85					
13	224,76	224,81	210,31	149,16	90,57	54,68	-26,36	-83,98	-118,43	-179,81	-225,63	-178,65	-90,94	-187,85	-196,37	-138,52	-123,10	-76,90	-37,75	64,83	109,06	171,78	202,90	191,75					
12	217,57	215,17	211,08	137,56	78,80	54,09	-43,57	-102,34	-126,25	-183,80	-223,88	-177,33	-87,67	-180,14	-189,61	-136,70	-126,42	-82,60	-52,11	61,20	97,52	164,10	194,03	174,17					
11	215,35	213,29	221,71	133,72	73,76	63,41	-45,83	-108,98	-126,36	-179,09	-215,53	-171,20	-82,35	-175,12	-189,22	-132,00	-126,55	-82,87	-54,20	66,05	98,49	166,59	194,19	166,14					
10	237,67	243,86	247,74	161,84	98,35	84,73	-5,14	-75,44	-108,97	-164,29	-211,22	-167,47	-85,85	-192,00	-212,48	-131,64	-121,88	-70,85	-21,47	87,50	135,22	197,35	225,44	204,51					
9	228,99	235,17	265,40	151,06	85,97	102,82	-9,95	-88,35	-107,87	-152,43	-190,35	-152,64	-71,81	-178,28	-208,24	-119,96	-120,18	-70,25	-25,47	95,82	134,44	199,28	221,39	183,66					
8	221,97	229,24	278,07	143,68	77,30	118,26	-12,96	-96,75	-107,38	-144,17	-173,82	-140,87	-63,04	-169,12	-201,35	-112,66	-120,10	-67,68	-23,65	102,51	132,49	199,87	215,84	168,74					
7	217,94	228,27	279,84	143,95	77,21	127,01	-13,06	-95,84	-107,87	-143,10	-166,86	-135,27	-68,43	-169,83	-188,74	-114,86	-123,60	-61,21	-9,84	106,78	128,52	197,12	208,09	166,53					
6	214,28	227,92	282,58	144,67	77,34	136,74	-13,21	-95,14	-108,71	-142,38	-159,93	-129,71	-74,39	-171,10	-175,85	-117,56	-127,71	-54,49	4,88	111,66	124,66	194,78	200,45	164,68					
5	208,51	228,91	282,98	148,90	78,61	142,13	2,23	-85,61	-115,45	-148,28	-160,73	-127,81	-83,90	-176,51	-164,66	-124,03	-133,94	-55,32	10,76	121,07	120,77	192,09	193,99	162,54					
4	180,61	217,20	280,54	162,14	92,49	115,48	34,65	-57,66	-116,41	-158,74	-169,59	-129,95	-94,36	-195,78	-175,29	-133,00	-137,14	-68,55	6,80	128,10	131,73	190,89	178,36	143,91					
3	164,54	212,79	286,64	168,31	96,92	163,71	98,51	-40,32	-123,03	-157,91	-171,92	-130,47	-95,97	-190,31	-179,80	-130,63	-138,93	-24,55	37,96	146,54	125,25	182,06	170,37	133,14					
2	179,26	224,68	302,03	176,74	101,33	171,69	103,71	-43,16	-129,40	-165,56	-180,20	-139,19	-101,89	-200,54	-189,14	-137,44	-145,90	-25,25	39,51	154,26	129,04	189,82	180,61	141,02					
1	440,43	557,89	651,94	598,64	459,39	581,20	531,04	303,03	163,30	120,22	65,65	47,60	-38,01	-204,21	-221,58	-243,65	-288,37	-240,91	-215,38	10,58	-28,38	157,69	232,40	248,87					

TQS		TABELA DE ESFORÇOS EM V - FY (kN) - CASO 2																									
		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345		
TUNEL	36	-1,00	11,33	73,15	82,03	86,75	132,30	169,21	153,66	111,78	83,38	50,59	22,76	-1,90	-16,97	-91,78	-96,25	-131,69	-166,44	-145,43	-127,08	-111,68	-87,27	-52,68	-43,43		
	35	-0,46	16,55	144,85	163,75	176,07	260,92	330,78	303,42	223,23	167,74	100,46	39,69	-3,43	-32,45	-180,28	-191,45	-260,55	-330,76	-285,23	-251,73	-220,48	-173,46	-99,59	-77,15		
	34	5,90	8,31	154,38	180,47	205,86	283,28	374,47	322,60	247,86	187,94	116,81	31,08	-4,42	-53,47	-196,63	-206,99	-280,85	-356,50	-322,14	-272,76	-241,52	-191,73	-103,80	-68,94		
	33	5,65	6,79	149,18	180,79	206,51	251,28	356,80	286,62	245,13	184,30	123,29	31,29	-4,85	-61,82	-196,27	-211,88	-268,74	-318,61	-308,21	-248,72	-199,63	-109,44	-70,55			
	32	23,33	16,11	146,95	167,76	201,94	234,53	339,34	263,50	240,41	177,70	119,59	20,02	-15,09	-73,63	-215,36	-240,44	-294,20	-338,82	-335,47	-281,55	-239,05	-186,16	-86,67	-52,88		
	31	23,11	12,09	145,80	169,51	209,07	234,67	344,11	260,59	244,10	179,84	124,37	17,76	-16,20	-69,33	-213,62	-247,40	-297,42	-342,69	-340,12	-290,02	-246,63	-195,05	-88,59	-51,49		
	30	27,82	10,49	145,82	173,21	213,37	240,86	344,90	257,10	242,76	178,38	126,32	17,24	-14,00	-68,16	-206,91	-243,89	-293,48	-337,02	-343,44	-293,77	-246,91	-197,64	-89,01	-42,08		
	29	28,57	5,07	139,52	169,95	205,24	237,33	334,31	247,30	233,61	171,98	126,49	23,65	-2,11	-53,34	-183,73	-225,23	-280,68	-346,14	-354,75	-303,11	-254,10	-207,38	-96,06	-35,22		
	28	40,56	9,29	145,70	179,99	216,75	255,88	341,40	251,91	239,35	173,39	126,72	16,20	-5,18	-68,89	-192,98	-235,15	-280,98	-319,89	-348,93	-297,86	-245,77	-200,67	-89,02	-16,82		
	27	24,72	3,00	148,46	194,42	229,18	271,30	361,46	273,54	254,24	187,14	137,54	27,55	13,55	-55,26	-168,37	-212,54	-251,71	-288,13	-325,47	-274,21	-268,30	-228,08	-117,05	-29,55		
	26	25,43	13,72	149,34	196,05	224,02	270,23	358,89	272,24	255,85	187,11	139,28	31,29	24,90	-52,60	-154,71	-200,49	-232,95	-277,28	-320,99	-269,40	-264,02	-223,07	-110,11	-26,78		
	25	26,16	24,63	150,27	197,77	218,85	269,22	356,39	271,00	257,56	188,11	141,08	35,10	36,44	-49,90	-140,87	-188,29	-213,94	-266,33	-316,53	-264,60	-259,74	-218,04	-103,08	-23,98		
	24	25,34	37,11	149,98	199,01	215,59	266,85	356,31	267,34	255,84	186,46	140,70	39,47	38,41	-49,67	-130,34	-179,43	-200,26	-258,74	-314,72	-262,51	-257,03	-215,74	-100,72	-23,03		
	23	21,29	52,48	147,12	199,16	216,44	261,60	361,10	258,58	246,89	180,24	135,67	44,83	20,21	-54,72	-127,52	-178,09	-198,47	-258,26	-318,40	-266,02	-257,80	-219,28	-108,34	-25,80		
	22	17,72	65,71	139,10	193,33	210,51	259,45	365,41	250,28	231,32	168,06	125,40	47,99	2,16	-55,23	-120,96	-171,59	-192,75	-261,26	-321,32	-269,46	-252,10	-216,72	-111,42	-24,07		
	21	14,75	83,85	136,80	195,33	209,01	254,90	369,72	240,85	220,59	160,83	121,73	57,35	-16,88	-62,11	-122,23	-171,31	-191,41	-260,33	-323,51	-273,43	-255,79	-220,39	-120,69	-23,89		
	20	16,27	72,77	139,60	202,66	214,35	252,51	352,36	241,49	226,49	164,72	124,01	60,23	-10,80	-73,21	-127,30	-172,67	-192,15	-241,04	-326,70	-271,35	-258,96	-221,32	-123,64	-21,52		
	19	18,79	53,88	138,02	204,53	214,87	253,20	331,07	245,01	229,41	165,07	121,62	58,79	-0,83	-80,27	-127,47	-168,51	-188,97	-220,71	-329,78	-267,83	-254,29	-215,60	-120,18	-15,67		
	18	21,39	34,52	136,51	206,61	215,56	254,02	309,38	248,72	232,58	165,55	119,29	57,37	9,46	-87,59	-127,75	-164,36	-185,82	-200,02	-333,12	-264,38	-249,70	-209,89	-116,73	-9,68		
	17	21,97	33,49	137,74	208,81	217,84	257,57	312,01	252,74	235,36	167,33	120,03	57,77	9,63	-88,98	-128,93	-165,65	-187,83	-200,33	-337,63	-267,32	-251,68	-211,65	-117,36	-9,20		
	16	25,44	48,73	124,36	195,85	195,73	216,41	261,12	243,74	239,66	187,04	115,92	56,55	23,13	-85,86	-110,36	-143,59	-170,59	-139,03	-306,77	-262,14	-274,16	-225,52	-120,89	-4,34		
	15	25,06	44,40	94,96	159,09	168,00	189,10	235,78	247,52	232,52	179,88	102,02	57,96	-67,20	-84,39	-80,86	-105,71	-142,42	-96,92	-291,01	-262,97	-279,02	-215,16	-109,73	12,98		
	14	20,57	44,74	100,33	164,75	171,37	202,07	241,87	246,03	222,91	167,76	99,18	58,03	-54,92	-95,18	-82,75	-112,68	-146,04	-112,51	-296,95	-265,34	-272,89	-204,18	-107,64	2,96		
	13	13,99	44,98	107,64	172,27	175,52	219,43	249,14	242,19	208,23	149,90	94,98	57,92	-36,68	-110,00	-85,20	-122,18	-150,47	-134,67	-303,70	-267,73	-263,31	-187,83	-104,50	-11,35		
	12	6,98	45,05	115,54	180,85	180,27	238,23	256,76	237,67	192,96	131,68	90,98	57,82	-16,67	-125,27	-87,76	-132,13	-155,24	-159,19	-310,60	-272,00	-254,46	-171,33	-101,86	-26,36		
	11	2,92	46,82	119,25	183,03	182,19	243,20	257,45	231,19	183,91	122,39	87,31	57,53	-13,42	-130,86	-89,06	-134,14	-157,03	-170,04	-310,41	-273,21	-253,22	-161,35	-102,16	-35,29		
	10	1,61	50,22	119,09	179,29	181,51	235,27	251,71	222,91	180,75	121,49	83,96	57,06	-25,93	-127,42	-89,19	-128,72	-156,07	-168,16	-303,67	-271,64	-259,22	-157,52	-105,27	-38,55		
	9	0,24	53,87	119,10	175,62	181,07	227,28	246,06	214,53	177,69	120,73	80,56	56,66	-39,13	-123,98	-89,47	-123,21	-155,31	-166,43	-297,03	-270,41	-265,93	-153,72	-108,70	-42,04		
	8	-0,90	56,66	118,43	173,40	178,73	218,16	239,36	206,63	174,88	121,18	78,33	58,92	-50,61	-120,79	-91,37	-120,91	-154,81	-167,08	-289,59	-266,93	-270,23	-152,15	-111,84	-47,44		
	7	-1,47	57,34	116,05	174,11	171,94	206,48	230,16	199,71	172,36	124,03	78,60	66,84	-57,72	-118,02	-96,60	-125,52	-154,63	-172,63	-280,12	-258,12	-268,53	-155,27	-114,01	-56,76		
	6	-2,05	58,40	113,99	175,45	165,39	194,37	221,13	193,09	170,54	127,54	79,29	75,64	-65,67	-115,67	-102,76	-131,13	-155,02	-178,89	-271,13	-248,95	-267,58	-159,20	-116,74	-66,91		
	5	-12,75	36,37	83,31	152,78	143,00	178,52	214,14	195,26	168,43	127,25	79,35	85,62	-61,56	-87,96	-89,02	-121,13	-133,47	-195,52	-267,08	-232,36	-256,85	-161,41	-121,46	-81,43		
	4	27,18	50,05	99,76	172,01	147,88	171,75	205,78	187,58	159,35	122,57	73,45	78,35	-68,44	-99,39	-103,77	-130,98	-143,33	-205,45	-275,88	-217,23	-250,87	-150,05	-117,91	-78,89		
	3	57,35	48,50	100,54	185,75	147,89	157,30	196,92	185,54	158,55	128,54	78,86	83,20	-67,98	-97,78	-111,39	-135,25	-143,72	-207,48	-280,49	-204,65	-255,48	-152,04	-129,63	-89,51		
	2	132,61	128,24	154,02	258,12	215,80	210,12	260,81	249,37	228,38	217,78	174,77	161,88	-33,36	-61,98	-89,14	-127,48	-141,67	-223,52	-296,52	-204,33	-249,38	-135,36	-88,83	-31,40		
	1	194,72	103,79	58,73	125,00	139,19	101,71	160,46	181,79	191,51	210,64	201,96	205,76	4,07	1,31	-31,81	-34,33	-37,76	-100,13	-143,26	-80,26	-116,37	-28,11	18,23	67,29		

TABELA DE MOMENTO EM Z - MZ (kNm) - CASO 2																										
TQS	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345		
TUNEL	90	75	60	45	30	15	0	345	330	315	300	285	270	255	240	225	210	195	180	165	150	135	120	105		
36	1671	461	281	-324	-489	-1410	-3457	-3255	-3408	-2852	-2104	-1634	-17	-764	120	-58	783	2082	2945	2728	3763	3467	2394	1543		
35	3390	1070	578	-573	-1068	-2816	-6752	-6363	-6911	-5860	-4324	-3269	-251	-1599	200	-186	1537	4188	5787	5348	7612	7108	4806	3003		
34	5526	3420	1860	848	-1624	-3893	-7610	-7485	-9430	-9089	-8103	-6225	-3158	-4352	-1981	-1499	1454	5014	6571	6187	10207	10481	8047	5688		
33	6300	4637	2177	577	-1887	-4118	-7328	-7207	-9294	-9914	-9394	-6935	-4181	-4597	-2317	-641	2428	5733	6339	6131	9890	10613	9363	6794		
32	6961	5236	2453	408	-2082	-4265	-7470	-7174	-9661	-10595	-10192	-7461	-4702	-4846	-2424	-278	2884	6194	6358	6377	10323	11254	10124	7366		
31	7054	5318	2418	184	-2327	-4426	-7633	-7068	-9950	-10918	-10491	-7513	-4751	-4813	-2264	66	3223	6477	6402	6563	10694	11637	10281	7436		
30	7074	5405	2419	174	-2331	-4578	-7864	-7159	-10068	-11010	-10469	-7384	-4700	-4780	-2358	100	3037	6227	6528	6592	10839	11847	10349	7222		
29	6981	5428	2325	100	-2408	-4891	-8219	-7383	-10215	-11056	-10353	-7118	-4530	-4516	-2279	282	2844	5594	6545	6453	10776	11851	10282	6814		
28	7047	5590	2408	213	-2206	-4898	-8333	-7407	-10154	-10993	-10237	-7045	-4571	-4682	-2665	58	2458	5454	6812	6524	10937	12093	10419	6562		
27	7075	5664	2409	230	-2050	-5027	-8443	-7397	-10146	-10931	-10211	-6929	-4523	-4601	-2697	20	2205	5036	6857	6604	10990	12103	10407	6415		
26	7145	5717	2424	249	-1810	-5122	-8434	-7274	-10095	-10827	-10259	-6863	-4494	-4496	-2633	-53	1963	4583	6812	6784	11047	12019	10356	6439		
25	7218	5774	2439	269	-1565	-5219	-8428	-7150	-10046	-10724	-10312	-6797	-4466	-4391	-2569	-127	1719	4124	6769	6970	11109	11936	10307	6466		
24	7316	5752	2460	303	-1373	-5238	-8440	-7025	-9967	-10622	-10387	-6862	-4281	-4335	-2566	-216	1480	3689	6724	7083	11120	11881	10289	6450		
23	7465	5562	2492	363	-1300	-5083	-8484	-6902	-9825	-10526	-10502	-7200	-3772	-4386	-2697	-340	1258	3322	6676	7030	11020	11890	10337	6344		
22	7226	4976	2140	161	-1381	-4843	-8412	-6813	-9558	-10129	-10163	-7012	-2765	-3964	-2513	-234	1151	2853	6581	7043	10695	11477	9891	5820		
21	6966	4412	1833	6	-1543	-4641	-8137	-6522	-9283	-9770	-9847	-6743	-1583	-3388	-2486	-174	941	1948	6306	6954	10633	11115	9594	5334		
20	7007	4728	2145	239	-1382	-4433	-7681	-6506	-9415	-9916	-10080	-6937	-1834	-3539	-2794	-414	629	1302	6282	6968	10828	11406	9866	5689		
19	6697	4782	2181	269	-1304	-4151	-7174	-6619	-9425	-9796	-9955	-6764	-1904	-3416	-2769	-448	476	773	6332	7084	10709	11357	9683	5764		
18	6363	4831	2214	296	-1224	-3852	-6647	-6746	-9434	-9663	-9820	-6573	-1955	-3281	-2737	-480	318	226	6385	7209	10586	11310	9484	5849		
17	6329	4794	2209	275	-1261	-3650	-6783	-6933	-9500	-9739	-9755	-6560	-1753	-3104	-2673	-438	361	315	6526	7460	10666	11316	9386	5812		
16	5931	4397	2400	391	-941	-2633	-5935	-7211	-9854	-10256	-9637	-6565	-628	-2830	-2877	-825	193	-575	6282	7987	11492	11812	9464	5818		
15	5593	4687	3429	1388	-402	-1723	-5679	-7828	-10144	-10608	-9828	-7225	288	-3175	-3764	-1771	-378	-1197	6432	8922	12120	12102	9668	5671		
14	5621	4640	3439	1163	-565	-1755	-5995	-8069	-9883	-10325	-9680	-7149	-34	-2778	-3581	-1602	-314	-793	6413	9181	11880	11815	9564	5756		
13	5674	4596	3449	841	-793	-1901	-6379	-8328	-9488	-9892	-9498	-7051	-598	-2293	-3346	-1374	-241	-265	6333	9437	11500	11406	9455	5890		
12	5723	4552	3456	468	-1062	-2073	-6774	-8591	-9070	-9434	-9310	-6946	-1209	-1786	-3083	-1117	-169	283	6233	9704	11109	10992	9345	6032		
11	5705	4513	3673	266	-1222	-1915	-6769	-8597	-8766	-9082	-9028	-6799	-1301	-1585	-2983	-930	-181	510	6072	9884	11096	10828	9371	6106		
10	5799	4779	3904	466	-1092	-1789	-6032	-7789	-8652	-8970	-9046	-6920	-1265	-2140	-3420	-912	-246	273	6136	9755	11829	11067	9807	6848		
9	5623	4578	4457	280	-1263	-1093	-5852	-7899	-8415	-8641	-8446	-6559	-636	-1959	-3258	-727	-356	293	5751	10013	11978	11065	9818	6438		
8	5407	4457	4916	166	-1354	-442	-5584	-7870	-8208	-8392	-7948	-6276	-194	-1914	-3063	-600	-469	423	5571	10147	12009	11045	9739	6201		
7	5112	4490	5129	198	-1270	76	-5154	-7530	-8056	-8310	-7685	-6137	-198	-2148	-2773	-594	-590	778	5810	10035	11777	10974	9484	6322		
6	4818	4544	5371	244	-1175	626	-4713	-7189	-7929	-8258	-7440	-6015	-201	-2407	-2480	-596	-722	1165	6093	9941	11571	10937	9246	6478		
5	4160	4452	5302	238	-1087	1006	-3909	-6523	-7792	-8171	-7199	-5764	-225	-2610	-2132	-624	-797	1543	6252	9721	11150	10600	8783	6417		
4	2662	3889	4706	104	-862	565	-2894	-5557	-7443	-8016	-7039	-5385	-363	-2727	-2065	-592	-629	1749	6560	9300	11072	10041	8022	5753		
3	1853	4157	4858	-144	-746	1282	-1756	-5505	-7543	-7843	-7037	-5032	-670	-2847	-2194	-477	-749	3656	8067	9464	10913	9752	7904	5671		
2	759	3330	4655	-735	-1482	1235	-2095	-6213	-8689	-9521	-9039	-6416	-1580	-3926	-3037	-1027	-1307	3633	8296	9596	10944	9846	7409	4707		
1	-2809	1681	4800	-1932	-4185	-651	-5409	-10439	-13477	-15367	-15406	-10386	-3752	-5983	-4428	-1678	-1968	5900	12033	1318	14301	12112	8142	3860		

TOS		TABELA DE ESFORÇOS EM X - FX (kN) - CASO 3																							
		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345
TUNEL	36	48,81	49,19	40,82	26,07	5,67	-11,92	8,47	10,26	-8,74	-25,25	-41,07	-50,29	-47,93	-54,23	-41,49	-24,09	-3,40	15,28	-1,27	-4,05	19,77	35,85	48,72	54,03
35	100,93	101,07	83,39	54,36	11,17	-26,26	17,99	22,33	-18,78	-53,56	-85,29	-104,75	-99,92	-111,59	-85,14	-49,74	-5,90	33,39	-3,21	-10,42	40,97	73,78	99,48	111,13	
34	190,60	190,76	172,10	128,33	52,77	-19,01	23,18	2,26	-76,64	-145,87	-189,22	-218,43	-209,30	-218,07	-180,27	-124,32	-47,67	26,60	-4,46	8,24	97,96	160,55	192,24	201,61	
33	194,00	191,87	170,29	113,74	42,98	-18,08	17,86	-0,28	-65,73	-138,06	-184,26	-205,47	-200,47	-205,49	-170,06	-110,71	-34,51	28,06	-2,08	4,69	79,86	147,45	191,02	198,95	
32	202,15	199,15	174,90	110,44	36,45	-23,62	19,44	4,78	-60,03	-136,39	-187,08	-207,65	-203,43	-208,41	-171,01	-105,87	-24,81	35,77	-2,28	-1,60	72,88	145,93	196,70	206,02	
31	200,63	198,66	175,51	109,82	32,74	-27,22	21,09	8,75	-58,05	-135,58	-186,27	-205,90	-200,81	-207,19	-170,58	-104,49	-19,89	40,07	-2,87	-5,95	69,68	144,75	196,17	204,77	
30	198,41	197,23	174,64	108,61	31,44	-28,58	21,52	9,70	-57,68	-134,17	-183,90	-201,84	-196,06	-204,37	-169,35	-104,01	-19,86	40,82	-2,86	-8,59	68,56	143,68	195,10	203,05	
29	196,01	195,54	173,29	107,23	31,12	-29,06	21,51	9,47	-57,98	-132,58	-181,02	-197,04	-190,65	-201,07	-167,87	-103,87	-21,66	40,24	-2,64	-10,59	68,25	142,70	193,89	201,21	
28	193,58	193,82	171,93	105,83	30,77	-29,58	21,49	9,25	-58,27	-130,97	-178,09	-192,14	-185,12	-197,70	-166,37	-103,76	-23,51	39,65	-2,42	-12,64	67,94	141,72	192,69	199,36	
27	191,30	192,12	170,65	104,73	30,28	-30,09	21,38	9,82	-57,85	-129,41	-174,86	-186,09	-177,74	-193,34	-164,11	-103,15	-24,43	39,28	-2,37	-13,30	67,53	140,31	191,21	197,55	
26	189,16	190,43	169,46	103,92	29,68	-30,60	21,17	11,12	-56,75	-127,90	-171,37	-178,99	-168,67	-188,06	-161,14	-102,09	-24,49	39,11	-2,49	-12,69	67,01	138,49	189,50	195,78	
25	187,05	188,78	168,31	103,13	29,08	-31,13	20,96	12,43	-55,66	-126,41	-167,87	-171,83	-159,50	-182,76	-158,16	-101,04	-24,55	38,95	-2,62	-12,08	66,51	136,68	187,81	194,04	
24	185,99	188,03	167,88	102,50	28,66	-31,16	20,51	13,02	-55,04	-125,49	-165,95	-165,93	-151,69	-178,91	-156,13	-99,87	-24,36	38,79	-2,48	-11,60	65,83	135,83	187,35	193,48	
23	187,16	189,17	168,95	102,23	28,62	-30,14	19,54	12,03	-55,44	-125,77	-167,34	-162,83	-146,94	-178,18	-156,12	-98,43	-23,62	38,62	-1,80	-11,42	64,75	136,99	189,46	195,38	
22	185,95	187,18	166,50	100,20	27,79	-28,99	19,26	10,01	-57,83	-126,73	-166,95	-154,26	-133,41	-171,12	-150,80	-93,70	-19,76	38,26	-3,32	-12,26	63,12	135,92	188,36	195,00	
21	181,80	182,88	163,47	98,36	27,57	-28,16	17,45	9,87	-55,52	-124,26	-159,77	-137,56	-113,92	-160,55	-143,53	-86,33	-14,90	38,93	-2,31	-15,04	62,52	135,28	185,63	192,25	
20	176,67	179,46	162,97	98,43	27,88	-27,32	14,98	10,09	-51,40	-115,10	-153,32	-130,15	-104,40	-155,99	-140,78	-85,14	-15,32	37,35	-0,96	-15,23	61,93	133,55	183,08	187,93	
19	171,08	175,06	160,61	96,51	27,67	-25,37	12,84	7,84	-49,31	-110,40	-147,83	-122,49	-91,88	-148,95	-135,37	-82,28	-15,02	33,80	-1,62	-14,16	59,98	129,58	179,21	183,04	
18	164,88	170,16	157,95	94,37	27,43	-23,21	10,48	5,37	-47,00	-105,20	-141,76	-114,04	-78,11	-141,18	-129,39	-79,11	-14,67	29,89	-2,34	-12,98	57,82	125,18	174,90	177,61	
17	161,40	167,81	156,42	93,45	27,58	-21,02	8,64	3,42	-46,33	-103,59	-139,53	-110,20	-71,93	-138,34	-126,75	-77,63	-15,05	27,35	-2,02	-11,63	57,61	124,09	173,21	175,12	
16	155,29	160,82	147,17	85,44	22,24	-22,35	4,04	0,13	-45,34	-100,74	-136,27	-107,19	-68,32	-136,50	-123,77	-74,92	-13,66	26,49	0,09	-8,23	59,00	123,51	169,67	167,14	
15	148,71	163,22	159,71	97,82	32,54	-13,99	4,15	-3,69	-49,86	-106,82	-141,03	-105,13	-57,24	-137,33	-127,49	-80,55	-20,37	19,60	-1,22	-6,29	62,42	128,51	174,92	166,68	
14	140,61	155,71	152,87	91,71	27,51	-17,37	-2,48	-10,85	-53,71	-108,39	-140,62	-104,87	-55,92	-134,59	-124,57	-80,04	-25,16	10,02	-8,43	-11,05	56,18	121,48	167,03	159,01	
13	130,79	146,25	144,06	83,61	20,42	-23,03	-10,99	-20,08	-59,44	-111,38	-141,12	-106,16	-56,52	-132,01	-121,69	-80,03	-31,75	-2,34	-18,65	-18,29	47,55	112,16	156,80	149,34	
12	120,71	136,57	135,06	75,28	13,08	-28,93	-19,85	-29,68	-65,45	-114,59	-141,77	-107,62	-57,19	-129,45	-118,82	-80,11	-38,63	-15,18	-29,29	-25,84	38,63	102,59	146,33	139,45	
11	116,63	134,16	133,24	74,42	13,56	-27,31	-21,01	-30,94	-63,94	-111,31	-137,41	-103,40	-54,09	-124,14	-114,87	-78,06	-38,41	-16,35	-29,80	-24,57	38,81	101,37	143,70	136,28	
10	140,44	160,43	158,35	97,65	34,71	-9,25	0,07	-8,24	-46,63	-99,62	-131,56	-94,82	-49,05	-125,18	-118,62	-76,24	-20,38	15,79	-3,00	-2,59	64,57	128,19	171,66	162,01	
9	129,15	152,44	151,87	94,15	35,03	-5,73	-2,49	-10,96	-42,97	-91,40	-120,49	-84,47	-41,14	-111,85	-108,48	-70,88	-19,87	12,74	-4,22	-0,06	63,64	123,34	163,16	152,21	
8	121,11	147,15	147,47	92,06	36,03	-2,48	-4,05	-13,34	-40,76	-86,00	-112,65	-77,31	-36,79	-101,83	-101,56	-67,65	-20,49	10,30	-4,64	1,20	62,41	119,28	156,48	144,78	
7	119,73	147,13	147,21	92,82	38,30	-0,27	-3,99	-15,45	-41,92	-86,66	-111,68	-77,24	-41,24	-99,58	-101,58	-69,02	-23,63	9,08	-3,48	-0,17	60,82	117,11	153,59	142,36	
6	118,61	147,54	147,37	93,91	40,84	2,09	-3,93	-17,76	-43,28	-87,63	-110,99	-77,40	-46,12	-97,48	-101,91	-70,69	-27,05	7,79	-2,25	-1,64	59,30	115,13	150,96	140,20	
5	111,81	145,20	146,37	94,40	44,99	7,17	1,17	-16,95	-47,75	-94,09	-114,29	-79,87	-51,73	-99,93	-104,12	-75,98	-33,49	3,90	-3,20	-3,58	57,90	113,23	147,48	135,84	
4	87,00	130,69	147,26	109,52	64,56	15,49	8,38	-6,99	-48,52	-101,53	-117,30	-82,36	-53,38	-99,93	-114,68	-85,22	-27,80	20,30	4,09	4,75	68,17	114,23	147,48	135,84	
3	78,61	128,55	147,80	105,68	71,12	46,00	30,96	-6,99	-56,21	-103,46	-120,91	-80,38	-58,46	-116,47	-117,79	-85,36	-29,86	27,53	32,70	25,71	65,66	107,73	132,31	111,41	
2	86,13	136,60	155,39	109,80	73,28	47,38	31,89	-7,54	-58,98	-108,65	-127,31	-84,93	-61,80	-122,59	-123,71	-89,25	-30,60	30,04	34,74	26,22	67,79	112,55	139,77	120,70	
1	264,24	403,39	462,34	454,84	440,03	395,50	343,67	311,71	227,53	145,02	81,17	101,26	26,34	-97,73	-146,50	-186,96	-160,88	-90,82	-82,27	-114,65	-41,60	83,85	197,56	256,38	

TABELA DE ESFORÇOS EM Y - FY (kN) - CASO 3																														
TQS	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	360	375	390	405	420	435	
TUNEL	75	60	45	30	15	0	345	330	315	300	285	270	255	240	225	210	195	180	165	150	135	120	105	90	75	60	45	30	15	
36	-6,04	16,71	57,50	92,78	116,17	124,36	119,91	126,43	110,83	82,71	41,70	26,99	-16,85	-23,88	-58,98	-96,79	-120,17	-127,95	-123,22	-127,73	-111,51	-80,01	-39,06	13,64	-12,83	29,92	114,20	185,23	230,21	245,73
35	-12,83	29,92	114,20	185,23	230,21	245,73	236,23	250,20	220,31	165,36	81,67	49,17	-31,99	-44,28	-117,23	-193,04	-237,74	-251,72	-241,78	-251,36	-220,12	-158,36	-73,51	35,85	-19,86	34,05	124,76	204,91	253,03	273,21
34	-19,86	34,05	124,76	204,91	253,03	273,21	272,47	275,94	242,52	183,74	89,65	46,54	-29,27	-51,89	-132,56	-213,42	-258,83	-275,78	-274,87	-270,01	-238,37	-172,45	-76,68	53,43	-20,61	34,14	123,28	202,91	244,39	247,16
33	-20,61	34,14	123,28	202,91	244,39	247,16	249,15	254,13	237,05	183,39	92,03	45,75	-28,44	-56,42	-136,66	-214,07	-253,17	-251,55	-253,17	-250,22	-237,80	-175,60	-83,85	64,18	-8,70	40,27	122,37	192,93	226,37	226,49
32	-8,70	40,27	122,37	192,93	226,37	226,49	230,31	241,78	232,85	179,30	85,43	35,31	-35,46	-67,44	-154,58	-237,27	-274,25	-268,24	-281,93	-272,42	-231,48	-162,73	-67,01	90,30	-10,90	36,60	123,01	195,92	229,08	227,15
31	-10,90	36,60	123,01	195,92	229,08	227,15	230,20	243,39	236,22	182,18	86,39	32,28	-35,36	-65,96	-156,66	-242,30	-279,83	-271,15	-284,34	-276,24	-236,81	-167,39	-69,81	103,68	-12,75	34,58	123,52	198,02	230,04	227,05
30	-12,75	34,58	123,52	198,02	230,04	227,05	228,78	241,52	234,04	181,50	86,48	32,44	-35,39	-65,84	-155,40	-240,56	-276,10	-268,73	-282,79	-275,60	-236,35	-167,68	-70,60	113,73	-18,46	28,75	118,30	192,78	222,24	217,40
29	-18,46	28,75	118,30	192,78	222,24	217,40	219,42	232,05	224,20	175,52	85,99	38,07	-26,90	-55,21	-142,87	-227,60	-271,91	-282,48	-293,37	-280,85	-241,05	-173,26	-76,14	115,91	-15,60	32,53	123,74	199,47	228,57	223,96
28	-15,60	32,53	123,74	199,47	228,57	223,96	224,10	237,32	229,29	179,40	86,21	34,70	-35,68	-67,07	-152,76	-236,06	-267,86	-262,21	-271,27	-271,46	-232,90	-166,66	-70,67	129,20	-26,59	27,98	127,12	210,37	242,43	236,86
27	-26,59	27,98	127,12	210,37	242,43	236,86	237,02	250,05	240,36	191,45	98,22	49,08	-28,31	-55,10	-136,65	-217,86	-248,25	-240,65	-241,03	-242,61	-242,58	-185,88	-91,02	120,50	-20,14	33,59	128,01	207,45	238,72	234,49
26	-20,14	33,59	128,01	207,45	238,72	234,49	234,52	249,26	240,17	192,94	101,14	57,64	-26,17	-50,82	-129,33	-208,78	-238,93	-231,46	-231,83	-234,14	-234,96	-179,83	-85,92	128,29	-13,58	39,30	128,95	204,55	235,02	232,14
25	-13,58	39,30	128,95	204,55	235,02	232,14	232,04	248,53	240,05	194,50	104,14	66,36	-24,00	-46,47	-121,92	-199,61	-229,51	-222,19	-222,55	-225,61	-227,27	-173,74	-80,76	136,26	-9,15	44,09	129,72	201,71	231,34	229,17
24	-9,15	44,09	129,72	201,71	231,34	229,17	231,54	245,19	236,83	193,02	104,58	72,81	-24,61	-44,99	-117,63	-193,63	-223,17	-216,08	-216,63	-220,47	-222,92	-170,73	-79,04	139,64	-9,34	46,85	130,23	199,18	227,82	224,81
23	-9,34	46,85	130,23	199,18	227,82	224,81	235,11	236,24	227,16	185,19	99,74	74,31	-31,05	-49,68	-120,14	-194,64	-223,54	-216,71	-217,86	-222,64	-225,88	-174,45	-84,70	133,33	-9,65	47,58	127,09	191,86	221,57	223,27
22	-9,65	47,58	127,09	191,86	221,57	223,27	242,94	227,47	213,29	172,57	91,80	73,85	-36,88	-51,69	-118,89	-190,65	-221,94	-220,38	-223,49	-226,37	-224,91	-173,75	-87,14	127,13	-9,62	51,20	128,65	190,36	217,70	219,30
21	-9,62	51,20	128,65	190,36	217,70	219,30	247,79	217,24	201,90	164,57	88,25	78,06	-44,07	-59,43	-122,45	-191,76	-223,12	-222,60	-226,22	-230,01	-229,19	-178,44	-93,42	118,24	-14,37	41,85	129,45	195,87	216,74	208,38
20	-11,69	48,30	131,06	195,28	218,21	212,72	231,58	213,89	203,15	166,94	90,77	86,44	-47,01	-65,77	-125,30	-193,90	-221,99	-216,29	-218,29	-226,46	-230,67	-180,52	-94,61	118,71	-17,11	35,26	127,91	196,62	215,36	204,01
19	-14,37	41,85	129,45	195,87	216,74	208,38	215,27	212,55	202,83	166,08	90,60	92,67	-48,42	-68,11	-123,63	-190,87	-217,83	-210,86	-212,10	-222,61	-226,79	-177,21	-91,32	121,94	-17,55	35,00	129,01	198,55	217,79	206,62
18	-17,11	35,26	127,91	196,62	215,36	204,01	198,60	211,29	202,64	165,33	90,51	99,15	-49,90	-70,58	-122,02	-187,91	-213,71	-205,38	-205,84	-218,76	-222,98	-173,95	-88,02	125,28	-10,55	43,26	104,13	151,32	162,70	149,46
17	-17,55	35,00	129,01	198,55	217,79	206,62	200,26	214,13	204,88	166,81	91,25	100,53	-50,61	-71,20	-122,95	-189,51	-215,79	-207,78	-208,26	-221,41	-224,95	-175,47	-88,53	127,64	-1,50	44,80	122,14	179,21	188,54	169,93
16	-1,50	44,80	122,14	179,21	188,54	169,93	163,37	186,61	195,11	170,38	91,22	94,70	-66,16	-73,19	-110,97	-167,76	-184,57	-171,68	-170,78	-197,55	-222,11	-184,02	-85,84	143,67	10,55	43,26	104,13	151,32	162,70	149,46
15	10,55	43,26	104,13	151,32	162,70	149,46	144,52	169,61	182,48	160,88	82,42	88,31	-85,69	-69,81	-89,99	-139,15	-157,64	-151,45	-153,31	-186,05	-215,57	-179,51	-73,26	165,49	8,47	46,06	109,11	156,98	169,77	155,29
14	8,47	46,06	109,11	156,98	169,77	155,29	148,26	171,93	179,84	153,92	78,93	86,83	-74,49	-71,63	-91,25	-142,71	-162,78	-156,83	-157,40	-190,16	-213,48	-173,89	-73,83	152,24	5,48	49,89	115,83	164,59	179,15	162,72
13	5,48	49,89	115,83	164,59	179,15	162,72	152,71	174,24	175,37	143,56	73,77	84,43	-58,20	-74,03	-92,87	-147,37	-169,46	-163,61	-162,37	-195,06	-209,81	-165,27	-74,44	132,37	2,42	53,95	123,23	173,31	189,69	171,07
12	2,42	53,95	123,23	173,31	189,69	171,07	157,65	176,91	171,19	133,36	68,67	82,11	-41,16	-76,70	-95,02	-152,80	-177,01	-171,02	-167,98	-200,80	-206,92	-156,75	-75,31	111,59	2,53	57,51	126,41	176,24	193,46	173,39
11	2,53	57,51	126,41	176,24	193,46	173,39	157,25	176,32	167,42	127,07	65,53	78,96	-31,47	-78,68	-95,76	-154,35	-179,25	-173,12	-168,96	-202,74	-204,40	-151,71	-76,12	97,41	5,62	60,65	125,69	173,81	190,94	170,12
10	5,62	60,65	125,69	173,81	190,94	170,12	151,89	172,75	164,08	124,46	64,24	75,05	-28,65	-80,03	-95,20	-152,32	-176,58	-170,32	-165,67	-201,19	-207,31	-149,96	-76,89	89,41	8,88	64,05	125,12	171,51	188,59	166,94
9	8,88	64,05	125,12	171,51	188,59	166,94	146,47	169,25	160,81	121,90	62,98	71,04	-25,72	-81,58	-94,76	-150,41	-174,03	-167,63	-162,45	-199,87	-200,42	-148,35	-77,81	81,12	12,67	67,09	122,12	167,80	184,42	161,23
8	12,67	66,61	124,16	169,49	186,43	163,96	141,33	166,14	158,27	120,33	62,52	67,68	-22,69	-83,67	-95,03	-149,15	-171,80	-165,02	-159,18	-198,50	-198,50	-147,09	-79,07	74,28	6,79	67,09	122,12	167,80	184,42	161,23
7	17,47	67,09	122,12	167,80	184,42	161,23	136,73	163,71	157,13	120,76	63,69	65,74	-19,52	-86,70	-96,67	-149,06	-170,00	-162,37	-155,58	-196,22	-196,22	-146,38	-80,88	70,77	22,63	67,92	120,42	166,56	182,73	158,52
6	22,63	67,92	120,42	166,56	182,73	158,52	132,10	161,52	156,46	121,69	65,25	64,00	-16,27	-90,37	-98,81	-149,52	-168,62	-159,93	-152,05	-195,16	-194,38	-146,18	-83,17	67,12	19,70	54,89	100,94	146,15		

APÊNDICE B

TABELAS DE ESFORÇOS OBTIDAS DO MODELO ELU
PARA DIAGRAMAS DE VENTO

Ângulo (graus)	Forças na direção de incidência do vento (tf)			
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
0	875,9	839,1	557,7	905,9
15	815,4	840,5	637,9	1055
30	934,1	934,1	723,7	1193,8
45	966	863,8	729,6	1259,5
60	927,5	766	717,4	1258,8
75	848,2	844,3	678,4	1171,2
90	1121,6	1049,8	686	1089,2
105	863,8	872,2	703,9	1171,2
120	888,9	844,8	693	1258,8
135	791,9	792,4	570,6	1259,5
150	820,4	822,6	586,5	1193,8
165	637,5	677,6	498,3	1055
180	422	480,2	369,5	905,9
195	783,3	784,1	574,2	1055
210	869	854,9	616,5	1193,8
225	904,6	764,1	672,2	1259,5
240	868,8	788,2	683,5	1258,8
255	891,9	834,8	676,2	1171,2
270	1061,9	1087,6	721,2	1089,2
285	956,2	934,6	743,4	1171,2
300	1052,9	978,6	761	1258,8
315	913,3	920,5	716,6	1259,5
330	860,4	861,6	661,2	1193,8
345	720	697,1	570	1055

Ângulo (graus)	Forças perpendiculares à incidência do vento (tf)			
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
0	-185,8	87,9	10,4	0
15	-283,6	-71	14,2	0
30	-12,4	-12,4	86,7	0
45	164,8	54,4	190	0
60	523,9	43,9	230	0
75	517,8	21,6	198,1	0
90	-376,3	-45,9	-71,5	0
105	-510,4	-88,1	-219	0
120	-323,5	-84,2	-216,8	0
135	214,1	221	136	0
150	1,8	8,3	-16,3	0
165	-406,7	-26,9	-125	0
180	282,4	61,9	107,6	0
195	83,8	78,9	85	0
210	72,5	35,9	104,8	0
225	337,9	56,2	221	0
240	492,7	19,3	281,4	0
255	561,3	47,4	260,8	0
270	-533,9	-75,1	-16,8	0
285	-527,4	-59,6	-234,6	0
300	-313,4	-93,3	-195,5	0
315	-111,2	-14,2	-89,7	0
330	258,8	69,4	63,4	0
345	570,7	60,7	216,5	0

Ângulo (graus)	Momentos torsores (tfm)			
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
0	25995	19643	11524	0
15	20581	16129	9867	0
30	10979	10979	5280	0
45	-1519	765	-3831	0
60	-22566	-5212	-11063	0
75	-26898	-9775	-14200	0
90	-13849	-23267	-11687	0
105	-14498	-25754	-16826	0
120	-31281	-32920	-24190	0
135	-33137	-33030	-23864	0
150	-33136	-33029	-23864	0
165	-28919	-23645,3	-18852	0
180	-469	-7675	-3709	0
195	-11989	-12095	-8066	0
210	-8840	-9357	-4571	0
225	7235	-2050	3984	0
240	19218	2424	11563	0
255	27900	9252	15555	0
270	6967	23488	13472	0
285	16612	28650	17162	0
300	37872	39119	27442	0
315	39101	39457	29861	0
330	31886	33090	25168	0
345	10302	21278	13082	0

Ângulo (graus)	Forças totais no sentido de x (tf)			
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
0	875,9	839,1	557,7	905,9
15	861,1	830,2	612,5	1019,1
30	815,2	815,2	583,4	1033,9
45	566,5	572,3	381,5	890,6
60	10,1	345	159,6	629,4
75	-280,6	197,7	-15,8	303,1
90	376,3	45,9	71,5	0
105	269,5	-140,6	29,4	-303,1
120	-164,3	-349,5	-158,7	-629,4
135	-711,3	-716,6	-499,7	-890,6
150	-711,3	-716,5	-499,7	-1033,9
165	-510,5	-647,6	-448,9	-1019,1
180	-422	-480,2	-369,5	-905,9
195	-735	-736,9	-532,7	-1019,1
210	-716,3	-722,4	-481,5	-1033,9
225	-400,7	-500,6	-319	-890,6
240	-7,7	-377,4	-98	-629,4
255	311,4	-170,3	76,9	-303,1
270	-533,9	-75,1	-16,8	0
285	-261,9	184,3	-34,2	303,1
300	255	408,5	211,2	629,4
315	567,2	640,8	443,3	890,6
330	874,6	780,9	604,3	1033,9
345	843,1	689,1	606,6	1019,1

Ângulo (graus)	Forças totais no sentido de y (tf)			
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
0	-185,8	87,9	10,4	0
15	-62,9	148,9	178,8	273,1
30	456,3	456,3	436,9	596,9
45	799,5	649,2	650,3	890,6
60	1065,2	685,3	736,3	1090,2
75	953,3	821,1	706,6	1131,3
90	1121,6	1049,8	686	1089,2
105	966,5	865,3	736,6	1131,3
120	931,5	773,7	708,5	1090,2
135	408,6	404	307,3	890,6
150	408,6	404,1	307,4	596,9
165	557,9	201,3	249,7	273,1
180	-282,4	-61,9	-107,6	0
195	-283,6	-279,1	-230,8	-273,1
210	-497,3	-458,5	-399	-596,9
225	-878,6	-580,1	-631,6	-890,6
240	-998,7	-692,3	-732,6	-1090,2
255	-1006,8	-818,7	-720,7	-1131,3
270	-1061,9	-1087,6	-721,2	-1089,2
285	-1060,1	-918,2	-778,8	-1131,3
300	-1068,5	-894,2	-756,7	-1090,2
315	-724,4	-660,9	-570,2	-890,6
330	-206,1	-370,7	-275,7	-596,9
345	365	-121,9	61,7	-273,1

Ângulo (graus)	Momentos fletores em y (tfm)			
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
0	67323	60582	43251	70523
15	58905	56388	44589	80345
30	51356	51356	40565	81512
45	38895	37058	25406	70215
60	-3886	21426	8059	49621
75	-26814	3802	-5714	23903
90	24771	-1672	3824	0
105	16247	-9579	1322	-23903
120	14776	-25924	-13511	-49621
135	-54174	-54723	-39898	-70215
150	-54172	-54721	-39903	-81512
165	-44634	-52584	-39183	-80345
180	-37662	-41304	-34326	-70523
195	-55099	-55286	-42750	-80345
210	-52330	-53149	-36958	-81512
225	-30056	-36356	-23409	-70215
240	279	-22539	-5935	-49621
255	23224	-7542	7622	-23903
270	-34347	-4661	-970	0
285	-15062	8158	-2201	23903
300	17339	29897	16375	49621
315	38645	45671	33288	70215
330	60348	57649	44967	81512
345	59043	51044	45935	80345

Ângulo (graus)	Momentos fletores em x (tfm)			
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
0	-14354	4716	-2277	0
15	-4242	7976	10620	21528
30	35319	35319	31645	47061
45	58819	46969	48944	70215
60	81080	51731	56308	85950
75	69337	63212	55361	89215
90	89263	83279	55131	86066
105	73399	66477	57795	89215
120	66987	59249	55029	85950
135	30275	30198	22419	70215
150	30278	30201	22425	47061
165	37924	10733	15918	21528
180	-20238	-1934	-9193	0
195	-18413	-18008	-15797	-21528
210	-41583	-38758	-31964	-47061
225	-67066	-47596	-50502	-70215
240	-77223	-57568	-58686	-85950
255	-78591	-67863	-58075	-89215
270	-82294	-81588	-58610	-86066
285	-78006	-69269	-60633	-89215
300	-79022	-64694	-57772	-85950
315	-54453	-51001	-43327	-70215
330	-16541	-26984	-20437	-47061
345	26841	-9454	5643	-21528