

UNIVERSIDADE DE SANTA CRUZ DO SUL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Kevin Diniz Furlan

**COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE CÁLCULO ESTÁTICO E DINÂMICO
PARA DETERMINAÇÃO DA AÇÃO DO VENTO EM ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS
SEGUNDO A NBR 6123:2023**

Santa Cruz do Sul

2025

Kevin Diniz Furlan

**COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE CÁLCULO ESTÁTICO E DINÂMICO
PARA DETERMINAÇÃO DA AÇÃO DO VENTO EM ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS
SEGUNDO A NBR 6123:2023**

Trabalho de conclusão apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
de Santa Cruz do Sul para a obtenção do
título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Christian Donin

Santa Cruz do Sul

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, meus pais, meus avós, meus irmãos que me apoiaram e deram todo o suporte necessário para que fosse possível estudar, trabalhar e ser pai ao mesmo tempo ao longo de uma jornada de 5 anos. Agradeço especialmente aos meus avós paternos e maternos pelo auxílio e incentivo dados nos momentos mais difíceis, bem como agradeço ao meu pai pela orientação e educação que me proporcionou ao longo dos anos e à minha mãe que me proporcionou a vida e o carinho.

Agradeço a todos os meus colegas de faculdade que tive a honra de conhecer e conviver ao longo dos anos, pelo companheirismo e pela troca de ideias que foram essenciais para o meu crescimento como profissional e como pessoa.

Agradeço ao professor e orientador Christian Donin e aos professores Henrique Rupp e Leandro Nervis que foram minhas as principais referências e os pilares fundamentais da minha formação. Agradeço por todo conhecimento que foi compartilhado, pelas provas e trabalhos que me desafiaram, mas especialmente por me despertarem o desejo e o fascínio pela engenharia e pela área de projetos. Obrigado por estarem sempre dispostos a ensinar unindo a teoria com a prática.

Além disso agradeço a todos os demais professores, das áreas de arquitetura, matemática, física e afins que me possibilitaram enxergar, de forma ampla, como todo o conhecimento se complementa e como nós podemos expandir as ferramentas de trabalho buscando soluções criativas.

Por fim, agradeço ao meu filho, Otávio, que foi meu principal motivador nessa conquista e minha principal fonte de energia. Brincar de construir cidades, pontes e estradas certamente fez de todo o processo algo leve e divertido.

RESUMO

O presente trabalho se insere na área da engenharia estrutural e teve como objetivo principal analisar e comparar o Método Estático e o Método Dinâmico (Modelo Contínuo Simplificado) para a determinação das forças devidas ao vento em edificações conforme a norma brasileira ABNT NBR 6123, bem como contrastar os parâmetros das versões de 1988 e 2023. O trabalho aborda o arcabouço teórico que trata o vento como uma ação estática e dinâmica trazendo os conceitos de vibrações mecânicas em estruturas em contraste com a abordagem estática. Para a análise comparativa, foram definidos dois modelos de edifícios aporticados de concreto, com a mesma projeção em planta, mas alturas distintas, sendo o Modelo A com 60 m e Modelo B com 78 m. Os resultados demonstraram diferenças significativas na distribuição do perfil de forças horizontais. Enquanto o Método Estático resultou em forças maiores na base dos edifícios, o Método Dinâmico produziu forças progressivamente maiores no topo, devido à inclusão do fator de amplificação dinâmica ou fator dinâmico. A nova versão da norma, ABNT NBR 6123:2023, que atualizou os ábacos para o fator dinâmico trouxe um aumento de 117% para o Modelo A e 100% para o Modelo B, em comparação com a norma de 1988. A análise do momento de primeira ordem na base confirmou que o Método Dinâmico de 2023 é o mais desfavorável para ambos os modelos. Ele resultou em momentos na base 45% maiores do que os obtidos pelo Método Estático e, aproximadamente, 50% maiores do que os obtidos pelo Método Dinâmico de 1988. Conclui-se que a atualização da NBR 6123 impôs um aumento substancial nas solicitações do vento, tornando o Método Dinâmico uma abordagem mais conservadora.

Palavras-chave: Análise estrutural. Ação do vento. Força de arrasto. Análise estática. Análise dinâmica.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resultados para força de arrasto – Modelo A (direção x).....	57
Gráfico 2 - Resultados para força de arrasto – Modelo A (direção y).....	57
Gráfico 3 - Resultados para força de arrasto – Modelo B (direção x).....	58
Gráfico 4 - Resultados para força de arrasto – Modelo B (direção y).....	58
Gráfico 5 - Resultados de momento em relação à base	60

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de isopletas	16
Figura 2 - Simbologia do perfil de velocidades	18
Figura 3 - Expoente de rugosidade	19
Figura 4 - Decomposição das forças aerodinâmicas.....	22
Figura 5 - Fator topográfico S_1 (talude).....	24
Figura 6 - Fator topográfico S_1 (morro)	24
Figura 7 - Dimensão L_t para o caso de edificações com juntas de dilatação	26
Figura 8 - Influência da forma geométrica	29
Figura 9 - Relações l_1 e l_2 para Ca	29
Figura 10 - Ca para edificações paralelepípedicas em vento de baixa turbulência ...	30
Figura 11 - Ca para edificações paralelepípedicas em vento de alta turbulência	31
Figura 12 - Efeito Venturi em edificações vizinhas.....	32
Figura 13 - Deflexão do vento na direção vertical	33
Figura 14 - Características da esteira	34
Figura 15 - Regime de escoamento de corpo isolado	35
Figura 16 - Regime de escoamento deslizante	35
Figura 17 - Regime de escoamento de interferência de esteira.....	36
Figura 18 - Notação para aplicação do fator de vizinhança	37
Figura 19 - Elementos do sistema linear fundamental	38
Figura 20 - Sistema massa-mola-amortecedor	39
Figura 21 - Curva de amortecimento supercrítico	41
Figura 22 - Razão de amortecimento	42
Figura 23 - Fator de amplificação dinâmica.....	43
Figura 24 - Método de Davenport.....	45
Figura 25 - Fator dinâmico segundo ABNT NBR 6123:1988.....	48
Figura 26 - Fator dinâmico segundo ABNT NBR 6123:2023.....	48
Figura 27 - Projeção em planta dos modelos (esquema estático).....	51
Figura 28 - Corte Esquemático.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Rugosidade do terreno.....	25
Tabela 2 - Classe de edificações	26
Tabela 3 - Parâmetros meteorológicos	27
Tabela 4 - Fator de rajada	27
Tabela 5 - Valores mínimos do fator estatístico S_3	28
Tabela 6 - Parâmetros para os efeitos dinâmicos	50
Tabela 7 – Coeficientes p e bm	50
Tabela 8 - Características geométricas dos modelos.....	51
Tabela 9 - Parâmetros meteorológicos e fator de rajada usados	53
Tabela 10 - Coeficiente de arrasto - Modelo A.....	53
Tabela 11 - Coeficiente de arrasto – Modelo B	53
Tabela 12 - Parâmetros dinâmicos usados	54
Tabela 13 - Interpolação do fator dinâmico de acordo com a ABNT NBR 6123:1988	54
Tabela 14 - Interpolação do fator dinâmico de acordo com a ABNT NBR 6123:2023	55
Tabela 15 - Força de arrasto por pavimento	56
Tabela 16 – Comparativo percentual	61
Tabela 17 - Valores de q em função da altura - Estático.....	64
Tabela 18 - Resultados de F_a e M_{1k} por pavimento - Modelo A - Estático	64
Tabela 19 - Resultados de F_a e M_{1k} por pavimento - Modelo B - Estático	65
Tabela 20 - Valores de q em função da altura – Dinâmico 1988.....	66
Tabela 21 - Resultados de F_a e M_{1k} por pavimento - Modelo A – Dinâmico 1988 ...	66
Tabela 22 - Resultados de F_a e M_{1k} por pavimento - Modelo B – Dinâmico 1988 ...	67
Tabela 23 - Valores de q em função da altura – Modelo A – Dinâmico 2023.....	68
Tabela 24 - Valores de q em função da altura – Modelo B – Dinâmico 2023.....	68
Tabela 25 - Resultados de F_a e M_{1k} por pavimento - Modelo A – Dinâmico 2023 ...	69
Tabela 26 - Resultados de F_a e M_{1k} por pavimento - Modelo B – Dinâmico 2023 ...	70

SUMÁRIO

1	Introdução	12
1.1	Área da pesquisa	13
1.2	Objetivos gerais	13
1.3	Objetivos específicos	13
1.4	Justificativa	14
2	Revisão Bibliográfica.....	15
2.1	Características básicas do vento	15
2.2	Perfil de velocidade.....	17
2.3	Método estático da NBR 6123	21
2.3.1	Força devida ao vento	21
2.3.2	Pressão dinâmica q	22
2.3.3	Velocidade básica $V0$	23
2.3.4	Fator $S1$	23
2.3.5	Fator $S2$	25
2.3.6	Fator $S3$	28
2.3.7	Coeficiente de arrasto Ca	29
2.3.8	Efeitos de vizinhança	31
2.3.9	Cálculo da força de arrasto	37
2.4	Método dinâmico.....	38
2.4.1	Sistema massa-mola-amortecedor	38
2.4.2	Vibrações mecânicas.....	39
2.4.3	Processo de Davenport	43
2.4.4	Processo da NBR 6123	45
2.4.5	Fatores dinâmicos de 1988 e 2023.....	47
2.4.6	Modelo contínuo simplificado.....	49
3	Metodologia.....	51

3.1	Definição dos modelos.....	51
3.2	Parâmetros para o cálculo do método estático	52
3.3	Parâmetros para o cálculo do método dinâmico contínuo simplificado.....	54
3.4	Comparativo entre os métodos	56
4	Resultados e Análises.....	57
4.1	Resultados para força de arrasto	57
4.2	Resultados para momento na base	60
5	Conclusões e recomendações	62
6	Referências Bibliográficas.....	63
APÊNDICE A – Resultados para o método estático		64
APÊNDICE B – Resultados para o método dinâmico de 1988.....		66
APÊNDICE C – Resultados para o método dinâmico de 2023		68

LISTA DE SÍMBOLOS

V_k – Velocidade característica

V_0 – Velocidade básica

S_1 – Fator topográfico

S_2 - Fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno

C_a – Coeficiente de arrasto

A_e – Área efetiva

z – Altura acima do terreno

F_r – Fator de rajada

b_m – Fator de rugosidade

p – Expoente de rugosidade

f_v – Fator de vizinhança

s – Afastamento entre planos

d^* - Menor dimensão entre lado e semidiagonal

ρ – Densidade do vento

Q – Vazão

v – Velocidade do fluido

A – Área da seção

F_a – Força de arrasto

q – Pressão dinâmica

F_{est} - Força axial estática

X_{est} – Deslocamento da mola

F_{am} – Força de amortecimento

c – Fator de amortecimento

m – Massa

ω_1^2 – Frequência circular natural

ζ – Razão de amortecimento crítico

ω – Frequência de excitação

X_1 – Amplitude da oscilação

\bar{V} – Velocidade média do vento

f – Frequência de incidência de rajadas ou natural de vibração da estrutura

L – Dimensão da edificação

λ – Coeficiente de correlação do método de Davenport

\bar{F}_i – Força correspondente à velocidade média

$\hat{F}(t)$ – Força correspondente à amplitude máxima da parcela flutuante

F_H – Força que relaciona q_{ref} com a amplificação gerada por ξ .

Ψ_i – Relação entre m_j/m_0 (massa do ponto sobre massa de referência)

x_i – Deslocamento provocado pelo modo de vibração

g – Fator de pico

γ – Coeficiente de amplificação dinâmica

ξ – Fator dinâmico

\bar{V}_p – Velocidade de projeto

h - Altura da edificação

T_1 – Período fundamental da estrutura

\bar{q}_0 – Pressão dinâmica no método dinâmico

z_g - Altura gradiente

l_1 – Dimensão da edificação para o coeficiente de arrasto

1 INTRODUÇÃO

O projeto de estruturas seguras e eficientes, notadamente aquelas de grande porte e esbeltas (como arranha-céus, pontes estaiadas e torres), exigem uma compreensão aprofundada das ações às quais elas estarão submetidas ao longo de sua vida útil. Dentre essas ações, o vento se destaca como uma fonte de carregamento significativa e que exige a análise através de métodos que unem a teoria de estruturas com dados experimentais e meteorológicos.

Os carregamentos em estruturas, por muito tempo, foram tratados exclusivamente como estáticos. Contudo, eventos catastróficos, como o colapso da primeira Ponte de Tacoma Narrows em 1940 causado pelo efeito de ressonância das rajadas de vento com a vibração da estrutura, reforçaram a urgência de rever as normas de dimensionamento trazendo para o campo da engenharia civil os conceitos referentes à análise dinâmica de estruturas tornando possível prever e quantificar, de forma aproximada, os efeitos dinâmicos.

Assim, temas relacionados à engenharia do vento e aerodinâmica estrutural emergiram como campos vitais de estudo, impulsionados por pesquisadores que se dedicaram a criar métodos de cálculo para aproximação dos efeitos estáticos e dinâmicos do vento, como Alan G. Davenport, Robert H. Scanlan, e Joaquim Blessmann, além da criação de métodos experimentais com os ensaios de túnel de vento que permitem reproduzir as condições reais do escoamento do vento em modelos de escala reduzida.

A norma brasileira ABNT NBR 6123, atualizada em 2023, oferece duas abordagens para o cálculo dos esforços horizontais provocados pelo vento, ou força de arrasto: o método estático, que utiliza o fator S_2 , e o método dinâmico (modelo contínuo simplificado ou modelo discreto), que leva em consideração os efeitos de vibrações mecânicas e amortecimento para determinar a amplificação da força do vento gerada na estrutura pelo fator dinâmico ξ . A norma sofreu ajustes importantes que alteram o cálculo do vento em comparação com os parâmetros da antiga norma de 1988, portanto, torna-se necessário o estudo comparativo entre os métodos propostos pela nova norma bem como o comparativo entre os resultados obtidos em 1988 com os de 2023.

1.1 Área da pesquisa

O estudo das forças de vento em edificações está contido na área da engenharia estrutural, sendo especialmente importante em projetos de grandes edifícios. Nesta área o foco está em quantificar a influência da consideração dos efeitos dinâmicos - incluindo o cálculo do coeficiente de amplificação dinâmica na determinação da força horizontal (ou força de arrasto) total. Assim, avalia-se em que medida o tratamento dinâmico das cargas eólicas pode resultar em valores de arrasto significativamente diferentes daqueles obtidos pela abordagem puramente estática.

1.2 Objetivos gerais

O objetivo geral do trabalho é analisar e comparar criticamente os diferentes métodos, procedimentos e parâmetros de cálculo para força de arrasto descritos pela norma técnica brasileira ABNT NBR 6123 que trata das forças devidas ao vento em edificações, de forma a identificar as principais diferenças entre os resultados e as implicações sobre o dimensionamento de edifícios.

Desse modo, busca-se fornecer um panorama abrangente sobre as metodologias da norma e estabelecer um fundamento sólido para a tomada de decisão em projetos reais, permitindo ao engenheiro projetista avaliar o impacto da escolha do método de cálculo no dimensionamento final.

1.3 Objetivos específicos

Os objetivos específicos estão agrupados na seguinte ordem:

- Analisar o embasamento teórico para o cálculo dos Métodos Estático e Dinâmico (Modelo Contínuo Simplificado) da NBR 6123;
- Aplicar os métodos em dois modelos base (60 e 78 m) para obter o perfil de forças horizontais atuantes nas edificações;
- Comparar as forças de arrasto finais avaliando como cada método influencia o dimensionamento estrutural, através dos momentos de primeira ordem.
- Entender os efeitos práticos causados pela atualização da norma de 1988 para de 2023.

1.4 Justificativa

O presente trabalho se justifica pela necessidade de quantificar e contrastar os resultados das duas abordagens normativas, assim como dos parâmetros utilizados na norma de 1988 e 2023. Ao comparar a força de arrasto obtida em modelos de base e seus respectivos momentos gerados na estrutura, o estudo visa fornecer dados concretos para que os engenheiros estruturais possam atribuir a abordagem mais apropriada ou conservadora, garantindo a segurança e a eficiência econômica dos projetos frente às solicitações de vento, conforme preconiza a regulamentação brasileira.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Características básicas do vento

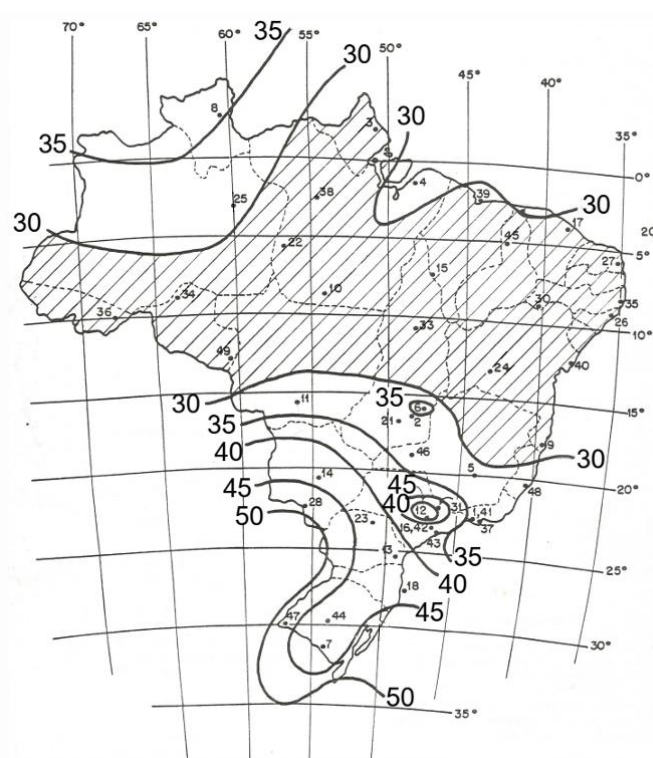
Anterior à análise dos modelos de cálculo do vento em edifícios, é preciso compreender e classificar o vento em relação às suas propriedades intrínsecas, como velocidade, origem meteorológica e efeitos de escoamento, dentre outros, que impactam a abordagem física. A análise do vento se dá sob dois aspectos: meteorológicos e aerodinâmicos. O primeiro, diz respeito às condições naturais pelas quais o vento escoa na atmosfera, o segundo está relacionado às formas usuais de edificações, estruturas e componentes. É preciso compreender ambos aspectos para adequada aplicação dos modelos de cálculo da ABNT NBR 6123:2023.

De acordo com Blessmann (1995), principal estudioso brasileiro sobre o tema de vento e um dos responsáveis pela elaboração da norma brasileira, o movimento do ar é dado pelo gradiente de pressão atmosférica, este por sua vez, influenciado pelo aquecimento solar, rotação da Terra e o efeito secundário de aceleração denominado de força de Coriolis. A premissa central dos estudos sobre o vento consiste em interpretá-lo como um fluido que escoa livremente pela atmosfera terrestre sofrendo os efeitos mecânicos de fluidos em rotação e, também, sofrendo intercepções por edifícios, terrenos e vegetações.

Existem diversos fenômenos meteorológicos derivados dos gradientes de pressão, que tornam o estudo das correntes de vento algo extremamente complexo, como ciclones, anticiclones, tornados e furações, todos resultando em um aumento repentino das velocidades do vento em uma determinada região com consequências, por vezes, drásticas. A principal componente do vento de interesse da engenharia estrutural é, portanto, a velocidade, determinada no perfil de velocidades médias, pois é a responsável por gerar as solicitações horizontais em edifícios. Entretanto, “as normas estruturais não consideram no cálculo das estruturas a resistência a tornados violentos. É uma questão econômica: isso tornaria as estruturas muito caras, não compensando as perdas que ocorrem na pequena região atingida.” (BLESSMANN, 1995, p.41), torna-se mais eficiente o evacuamento das pessoas em caso de emergência. Apenas nos casos em que a falha estrutural pode ter consequências muito graves, como em centrais de energia nuclear, as estruturas são dimensionadas para resistir fenômenos meteorológicos extremos (BLESSMANN, 1995).

Sendo assim, para o dimensionamento das estruturas leva-se em conta a velocidade média observada e documentada por instrumentos meteorológicos através do mapa de isopletas, o que resulta em uma aproximação adequada, inicial, para a estimativa dos efeitos gerados pelo vento nas edificações em seu respectivo ponto geográfico. Assim, por exemplo, para uma edificação construída em Porto Alegre – RS a velocidade média, ou básica como é tratada na norma brasileira, do vento adotada seria de 45 m/s, o equivalente à 162 km/h.

Figura 1 - Mapa de isopletas



Fonte: ABNT (2023)

Porém, o conhecimento das velocidades básicas, apenas, não é suficiente para determinação adequada das forças de vento. O vento não pode, simplesmente, ser traduzido em uma força estática e contínua nos edifícios, afinal, ele não escoa com a mesma velocidade ao longo do tempo, muito pelo contrário, a velocidade do vento, bem como sua trajetória, variam. Segundo Blessmann (1978, p. 15), “as cargas devidas ao vento são, na realidade, dinâmicas, pois as pressões exercidas sobre uma edificação variam tanto pelas flutuações da velocidade do vento, como pelos vórtices e pelas alterações nas linhas de corrente, causados pela própria edificação”.

Em acréscimo a essa definição, há natureza aleatória, assim como os deslocamentos na estrutura produzidos pela ação da força dinâmica, como proposto por Davenport (1967), um dos primeiros engenheiros e pesquisadores a se debruçar

sobre o assunto. Curiosamente, em seu artigo “*Past, present and future*”, Davenport (2002) analisa a perspectiva contraditória, nos anos de 1950, em que os carregamentos do vento eram tratados exclusivamente como estáticos.

Além disso, pela característica robusta dos edifícios, os impactos reais de rajadas, vórtices e outros fenômenos atmosféricos eram minimizados, da mesma forma que se desprezava, por completo, as interferências de vibrações mecânicas – conceitos ainda inconclusivos naquela época ao tratar-se de edificações. “In summary, the picture we get of wind loading in the 1950s is one in which the massiveness of the structure minimized its effects. The description was kept extremely simple (and static)” (Davenport, 2002, p.1).

Com o avanço das tecnologias construtivas do século XX e com os estudos impulsionados por Alan Garnett Davenport, uma série de propostas para determinação dos esforços de vento, seus efeitos secundários e parâmetros que os influenciam foram desenvolvidas. Em engenharia, as teorias de cálculo e dimensionamento se baseiam em modelos numéricos que buscam simplificar os efeitos físicos reais. Especialmente no campo das estruturas é fundamental conhecer a velocidade média, mas também, suas flutuações, ou picos máximos, de modo a poder considerar os efeitos dinâmicos do vento causados por rajadas, turbilhões e vórtices, além de todos efeitos secundários causados pela vizinhança.

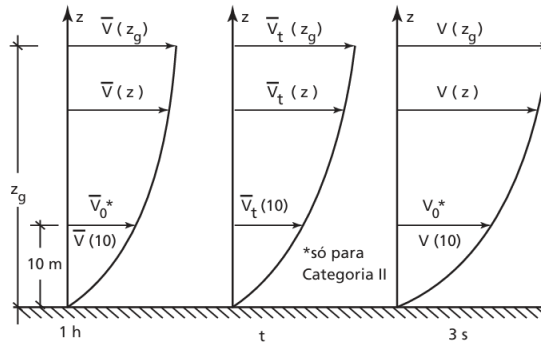
2.2 Perfil de velocidade

De acordo com Blessmann (1995, p. 23) as “flutuações têm sua origem tanto na agitação (turbulência) do escoamento médio causada pelas rugosidades natural e artificial da superfície terrestre como nos processos de convecção causados por gradientes térmicos”. Quanto maior for a rugosidade da superfície, maior será a agitação mecânica do ar, maior o intercâmbio turbulento de quantidade de movimento e maior a altura gradiente – esta que, por último, é a altura até onde o atrito da superfície com o ar é suficiente para influenciar as velocidades médias.

A variação da velocidade do ar em função da altura, denominada perfil de velocidades ou perfil vertical é definida dentro da camada limite atmosférica. A altura gradiente define a espessura da camada limite atmosférica, variando em centenas de metros e quilômetros acima do terreno. É possível descrever o perfil vertical da velocidade média através de uma lei logarítmica para grandes intervalos de tempo ou

uma lei potencial, de mais fácil aplicação, e que também serve para curtos intervalos de tempo sendo amplamente utilizada na engenharia civil (BLESSMANN, 1995).

Figura 2 - Simbologia do perfil de velocidades



Fonte: BLESSMANN (1995)

“A lei logarítmica apresenta um bom ajuste na camada próxima à superfície, porém não representa bem a região superior da camada limite atmosférica” (BÊNIA, 2013, p. 37). Deve ser utilizada para descrição do perfil de velocidades médias em intervalos de 10 min até 1 hora.

$$\frac{\bar{V}(z)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{z - z_d}{z_0} \right) \quad (1)$$

Onde:

$\bar{V}(z)$ = velocidade média do vento na altura de interesse;

u_* = velocidade de corte

k = constante de Von Kàrmàn, $k \cong 0,4$;

z = altura de interesse;

z_d = altura da subcamada sobre a superfície;

z_0 = rugosidade aerodinâmica.

Apesar de não representar exatamente a região mais próxima da superfície, a lei de potência pode ser utilizada como boa aproximação do perfil médio, devendo-se corrigir o expoente p em relação ao tipo de terreno, ou seja, rugosidade da superfície (BÊNIA, 2013).

$$\frac{\bar{V}(z)}{\bar{V}(z_{ref})} = \left(\frac{z - z_d}{z_{ref}} \right)^p \quad (2)$$

Onde:

$\bar{V}(z)$ = velocidade média do vento na altura de interesse;

$\bar{V}(z_{ref})$ = velocidade média do vento em uma altura de referência;

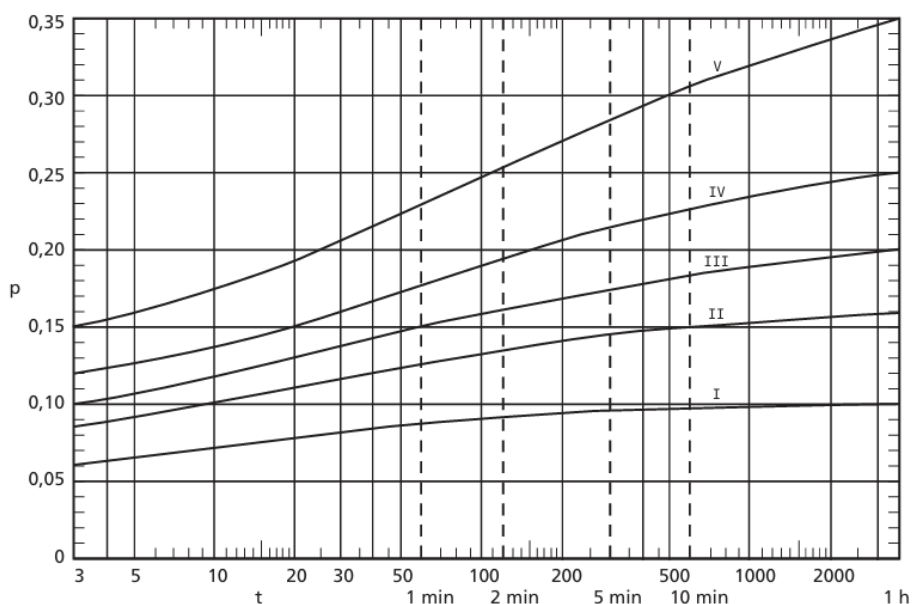
z = altura de interesse;

z_d = altura da subcamada sobre a superfície;

z_{ref} = altura de referência

p = expoente de rugosidade

Figura 3 - Expoente de rugosidade



Fonte: BLESSMANN (1995)

Os estudos propostos para o dimensionamento do vento aplicam-se aos ventos fortes com estabilidade neutra, gerando resultados aproximados para os ciclones extratropicais e tropicais. São ventos que sopram mantendo uma velocidade média constante por dezenas de minutos ou até horas. As flutuações de velocidade são causadas por agitação mecânica do ar, resultando em um grande número de turbilhões, ou redemoinhos. Estes, por sua vez, originam as rajadas de vento em sequência aleatória de frequências e intensidades (BLESSMANN, 1995).

Para analisar os efeitos de rajadas ou pulsos de vento de curta duração, fenômenos altamente localizados e não ocorrem com sua intensidade máxima ao longo da altura, é necessário determinar um perfil máximo envolvente. A este perfil, que representa a distribuição vertical das maiores velocidades instantâneas do vento (rajadas), dá-se o nome de perfil de rajadas. No caso de rajadas com duração de 3 segundos, tempo recomendado para análise no método da ABNT NBR 6123:2023, a

variação da velocidade com a altura é modelada pela lei das potências e pode ser reescrita de acordo com a equação 3:

$$\bar{V}_i(z) = b_i V_0 (z/10)^p \quad (3)$$

Sendo:

$\bar{V}_i(z)$ = velocidade de uma rajada de 3 segundos, na altura z , para categoria i (qualquer);

V_0 = velocidade básica de uma rajada de 3 segundos excedida uma vez em 50 anos, a 10 m de altura, em terreno aberto e plano (Categoria II);

b_i = é a relação entre a velocidade média sobre t segundos, a 10 m de altura, sobre terreno de Categoria i (qualquer), e esta mesma velocidade sobre terreno de Categoria II.

A fim de ajustar a velocidade do vento de um pico de 3 segundos para uma velocidade média correspondente em qualquer outra duração (t), emprega-se o conceito de fator de rajada, termo que representa a proporção entre velocidades considerando a mesma classificação de terreno e altura de referência.

$$F_{r,i} = V_{t,i}(10) / V_i(10) \quad (4)$$

Dessa forma é possível estabelecer uma correlação das amplitudes máximas utilizando coeficientes de equivalência dos efeitos dinâmicos do vento, processo que culmina na definição dos fatores de ajuste da velocidade, em especial, o Fator S_2 .

Este trabalho, tem por foco o estudo dos métodos propostos exclusivamente pela ABNT NBR 6123:2023 para a concepção dos esforços horizontais, tratando de duas abordagens para o cálculo do vento, uma estática, com o uso de um fator de correção dos efeitos dinâmicos equivalentes (S_2), e outra, dinâmica (método contínuo simplificado) que leva em consideração os efeitos de vibrações mecânicas e amortecimento – indispensáveis no projeto de edifícios altos.

2.3 Método estático da NBR 6123

2.3.1 Força devida ao vento

“De um modo geral, as forças devidas ao vento em edificações são obtidas a partir de coeficientes aerodinâmicos contidos em normas, manuais ou relatórios de pesquisas.” (CARPEGIANI, 2004). A NBR 6123 (ABNT, 2023) estabelece que as forças devidas ao vento devem ser calculadas separadamente para:

- a) elementos de vedação e suas fixações (telhas, vidros, esquadrias, painéis de vedação etc.);
- b) partes da edificação (telhados, paredes, etc.);
- c) a edificação como um todo.

Seguindo a equação 5 generalizada:

$$F = q C A f_v \quad (5)$$

Em que

q – Pressão dinâmica;

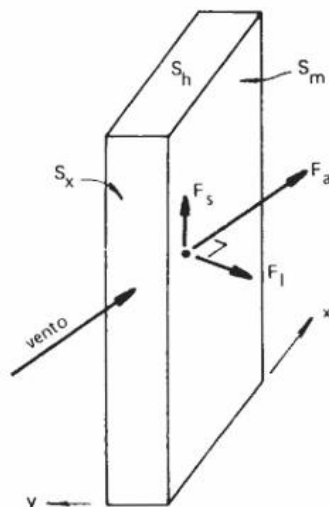
C – Coeficiente aerodinâmico, neste estudo consideraremos o arrasto (C_a);

A – Área de referência pela qual a força de distribui;

f_v – Fator de vizinha.

Blessmann (1989) descreve que a força global do vento sobre as edificações é obtida pela soma vetorial das forças do vento que atuam em todo o edifício, isso significa que se deve levar em consideração tanto os efeitos positivos de sobrepressão quanto os efeitos negativos de sucção, sendo de extrema importância o conhecimento desses fenômenos, especialmente em coberturas ventiladas em que as diferenças de pressões são altas podendo levá-las ao colapso. Neste trabalho, porém, estaremos interessados em uma componente da força global na direção do vento ou, força de arrasto (F_a), que provoca as solicitações horizontais no pórtico do edifício.

Figura 4 - Decomposição das forças aerodinâmicas



Fonte: BLESSMAN (1990)

2.3.2 Pressão dinâmica q

Pressão dinâmica é a força exercida sobre uma superfície, como a parede de um edifício ou mesmo asas de aviões, devido à velocidade. Em síntese, é a energia cinética do vento sendo convertida em pressão. A pressão dinâmica é determinada a partir de:

$$q = \frac{1}{2} \rho V_k^2 \quad (6)$$

Em que

ρ – é a massa específica do ar, que em condições normais de pressão (1 atm = 1013 mba) e de temperatura (15°C) é igual a 1,226 kg/m³ resultando $\frac{1}{2} \rho = 0,613$.

V_k – é a velocidade característica do vento em metros por segundo (m/s).

Considerando as condições normais de pressão e temperatura a equação 6 pode ser reescrita como a equação 7:

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (7)$$

2.3.3 Velocidade básica V_0

A velocidade básica do vento (V_0) é a velocidade de referência para uma região geográfica específica. Ela representa a velocidade média de três segundos do vento, em uma altura de dez metros, em terreno plano e aberto, excedida em média uma vez a cada 50 anos. É um valor puramente meteorológico, obtido a partir de dados históricos de estações meteorológicas e mapeado para o território brasileiro através do mapa de isopletras como posto anteriormente (ABNT, 2023).

Conforme Pitta (2013), deve-se levar em consideração, além da velocidade média obtida pelo mapa de isopletras, a velocidade característica V_k , aquela que atuará na edificação que se situa em uma região com determinada topografia local, rugosidade do terreno, altura e dimensões em planta particulares, condições específicas de vida útil, importância da edificação e consequências que sua ruína possa ocasionar ao meio ambiente. Portanto, visando determinar a pressão dinâmica é necessário primeiro converter a velocidade básica V_0 em velocidade característica V_k através da multiplicação por fatores que virão a seguir de modo a aproximar, ainda mais, o comportamento natural do vento na edificação em questão.

De acordo com a NBR 6123 (ABNT, 2023), admite-se que o vento básico pode soprar em qualquer direção horizontal e para incluir o efeito de direcionalidade no cálculo das forças deve-se considerar o tipo de evento meteorológico que dá origem aos valores máximos registrados de velocidade, a descontar de tempestades convectivas locais, como exemplo, *downbursts*.

2.3.4 Fator S_1

O fator S_1 , ou fator topográfico, é um dos coeficientes para o cálculo da velocidade característica do vento (V_k) na norma brasileira ABNT NBR 6123:2023. Ele é o responsável por ajustar a velocidade levando em conta a influência da topografia do terreno onde a edificação será construída. O vento pode ser desviado a depender das características geométricas do obstáculo.

A dinâmica dos fluidos mostra que, ao se deparar com uma elevação, o fluxo de ar é forçado a subir e contornar o obstáculo. Nesse processo, a velocidade do vento pode aumentar significativamente sobre o topo e nas proximidades da elevação, um fenômeno conhecido como aceleração orográfica. Da mesma forma, em vales ou

áreas de depressão, a velocidade do vento tende a diminuir. Por exemplo, um edifício construído no topo de um morro está sujeito a velocidades de vento significativamente maiores do que uma construção similar em um terreno plano.

Definição do fator S_1 :

a) terreno plano ou fracamente acidentado:

$$S_1 = 1,0$$

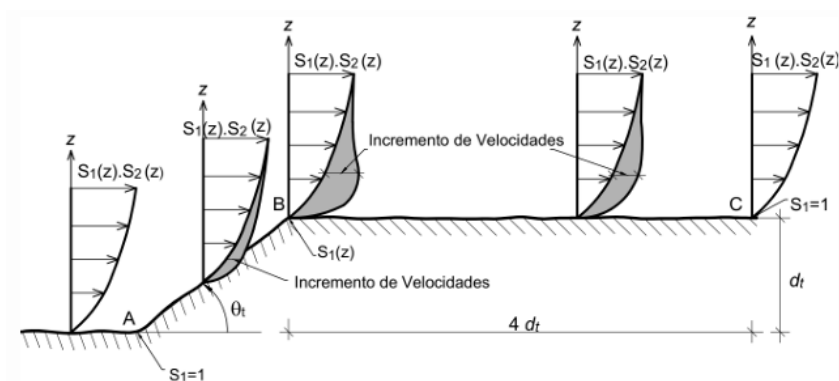
b) taludes e morros;

$S_1 = 1,0$ (com cálculo específico para o topo de morros e taludes onde há incremento de velocidades, resultando valores maiores que 1,0).

c) vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção

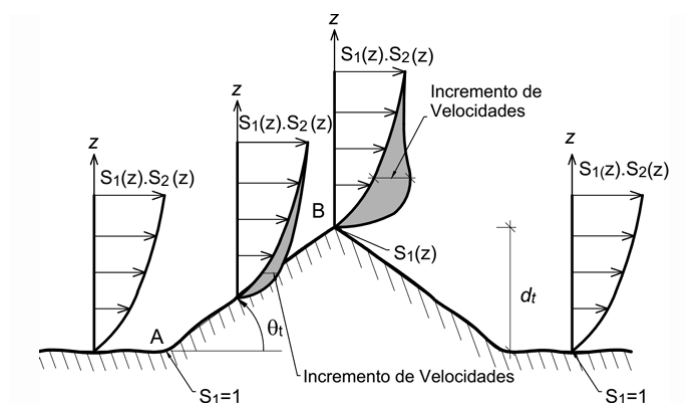
$$S_1 = 0,9$$

Figura 5 - Fator topográfico S_1 (talude)



Fonte: ABNT (2023)

Figura 6 - Fator topográfico S_1 (morro)



Fonte: ABNT (2023)

2.3.5 Fator S_2

De acordo com a NBR 6123 (ABNT, 2023, p.61), “em edificações com período fundamental T_1 igual ou inferior 1 s a influência da resposta flutuante é pequena, sendo seus efeitos já considerados na determinação do intervalo de tempo adotado para o fator S_2 ”. Portanto, esse fator é de suma importância na equivalência dos efeitos dinâmicos do vento.

O fator S_2 pode ser considerado como uma velocidade adimensional, normalizada em V_0 . Ele considera o efeito combinado da rugosidade média geral do terreno, da variação da velocidade do vento de acordo com a altura e do intervalo de tempo considerado na determinação dessa velocidade (BLESSMANN, 1989).

Durante vendavais, a velocidade do vento aumenta em função da altura acima do solo. Esse aumento é influenciado por dois fatores principais: a rugosidade da superfície (quantidade de obstáculos no terreno) e a duração das rajadas de vento. Estruturas menores, elementos e componentes avulsos são suscetíveis às rajadas mais rápidas e curtas, com maior intensidade. Por outro lado, para grandes construções, o cálculo da velocidade deve se basear em rajadas de maior duração, com a tendência de serem menos intensas, mas atuam sobre a área total da edificação uniformemente (ABNT, 2023).

Primeiramente, deve-se definir a categoria de rugosidade do terreno, dividida em cinco categorias:

Tabela 1 - Rugosidade do terreno

CATEGORIA I	superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente;
CATEGORIA II	terrenos abertos, em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas; Topo dos obstáculos inferior ou igual a 1,0 m.
CATEGORIA III	terrenos planos ou ondulados com obstáculos, como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas; Topo dos obstáculos inferior ou igual a 3,0 m.

CATEGORIA IV	terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada; Topo dos obstáculos inferior ou igual a 10 m
CATEGORIA V	terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e poucos espaçados. Topo dos obstáculos inferior ou igual a 25 m.

Fonte: ABNT (2023)

Na segunda etapa, relacionada às dimensões da edificação, a norma (ABNT, 2023) define três classificações, com intervalos de tempo das rajadas de, respectivamente, 3, 5 e 10 segundos.

Tabela 2 - Classe de edificações

CLASSE A	toda edificação, estrutura, parte de edificação ou de estrutura, unidades e sistemas de vedação e seus elementos de fixação, cuja maior dimensão vertical ou horizontal não exceda 20 m;
CLASSE B	toda edificação, estrutura, ou parte de edificação e estrutura, cuja maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal seja maior do que 20 m e menor ou igual a 50 m;
CLASSE C	toda edificação, estrutura ou parte de edificação e estrutura, cuja maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

Fonte: ABNT (2023)

O intervalo de tempo t a ser utilizado para edificação cuja maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 80 m pode ser determinado a partir da equação 8.

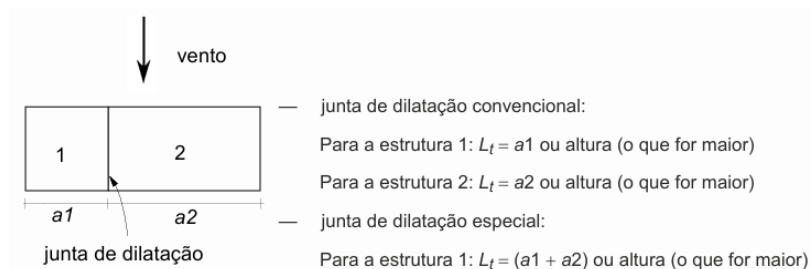
$$t = 7,5 L_t / V_t(h) \quad (8)$$

Onde,

L_t - é a altura ou largura da superfície frontal da edificação ou parte da edificação em estudo, adotando-se o maior dos dois valores;

$V_t(h)$ - é a velocidade média do vento sobre o intervalo de tempo t (s) no topo da edificação ou parte da edificação em estudo: $V_t(h) = S_1 S_2 V_0$.

Figura 7 - Dimensão L_t para o caso de edificações com juntas de dilatação



Fonte: ABNT (2023)

O cálculo de S_2 , dado em função da altura (z), é expresso pela equação 9 relação válida até o limite superior da Camada Limite Atmosférica (Z_g):

$$S_2 = b_m F_r (z/10)^p \quad (9)$$

Em que,

b_m – fator de rugosidade

F_r – fator rajada

z – cota analisada

p – expoente de rugosidade

O termo F_r (Fator de Rajada) quantifica a influência da turbulência atmosférica na estrutura e está sempre correlacionado à Categoria II de rugosidade para fins de cálculo dos coeficientes aerodinâmicos, independentemente da categoria de rugosidade do local de implantação.

Tabela 3 - Parâmetros meteorológicos

Categoria	Zg (m)	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b_m	1,10	1,11	1,12
		ρ	0,06	0,065	0,07
II	300	b_m	1,00	1,00	1,00
		ρ	0,085	0,09	0,10
III	350	b_m	0,94	0,94	0,93
		ρ	0,10	0,105	0,115
IV	420	b_m	0,86	0,85	0,84
		ρ	0,12	0,125	0,135
V	500	b_m	0,74	0,73	0,71
		ρ	0,15	0,16	0,175

Fonte: ABNT (2023)

Tabela 4 - Fator de rajada

F_r	Classes		
	A	B	C
	1,00	0,98	0,95

Fonte: ABNT (2023)

2.3.6 Fator S_3

O fator estatístico S_3 introduz o conceito de probabilidade e segurança estrutural relacionando-se diretamente com o tempo de retorno da ação do vento, a vida útil da edificação e às consequências de um eventual colapso. A velocidade básica V_0 apresenta um período de retorno médio T_p de 50 anos. A probabilidade de que a velocidade V_0 seja igualada ou excedida neste período é de 63% (ABNT, 2023). Esses números são considerados adequados para edificações normais destinadas a moradias, hotéis, escritórios dentre outros, seguindo as recomendações da Tabela 5.

Tabela 5 - Valores mínimos do fator estatístico S_3

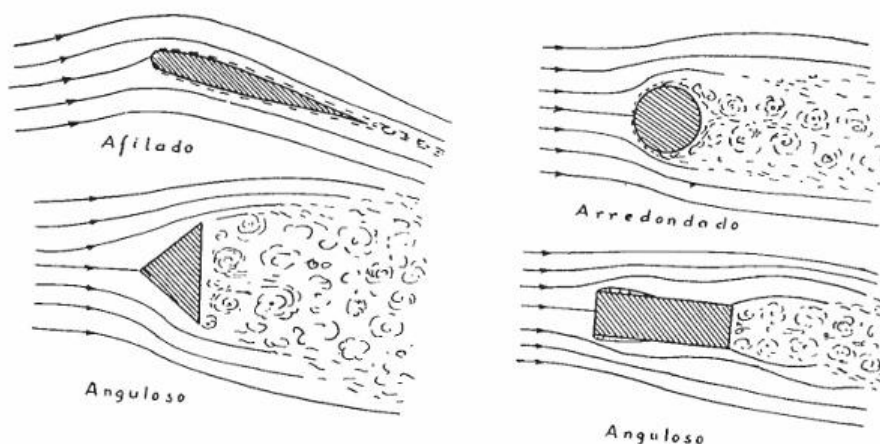
Grupo	Descrição	S_3	T_p
1	Estruturas cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, edifícios de centrais de controle, etc.). Pontes rodoviárias e ferroviárias. Estruturas que abrigam substâncias inflamáveis, tóxicas e/ou explosivas. Vedações das edificações do grupo 1 (telhas, vidros, painéis de vedação).	1,11	100
2	Estruturas cuja ruína represente substancial risco à vida humana, particularmente a pessoas em aglomerações, crianças e jovens, incluindo, mas não limitado a: <ul style="list-style-type: none"> • edificações com capacidade de aglomeração de mais de 300 pessoas em um mesmo ambiente, como centros de convenções, ginásios, estádios etc. • creches com capacidade maior do que 150 pessoas; $S_3 T_p$ (anos) • escolas com capacidade maior do que 250 pessoas; Vedações das edificações do grupo 2 (telhas, vidros, painéis de vedação).	1,06	75
3	Edificações para residências, hotéis, comércio, indústrias. Estruturas ou elementos estruturais desmontáveis com vistas a reutilização. Vedações das edificações do grupo 3 (telhas, vidros, painéis de vedação).	1,00	50
4	Edificações não destinadas à ocupação humana (depósitos, silos) e sem circulação de pessoas no entorno. Vedações das edificações do grupo 4 (telhas, vidros, painéis de vedação).	0,95	37
5	Edificações temporárias não reutilizáveis. Estruturas dos Grupos 1 a 4 durante a construção (fator aplicável em um prazo máximo de 2 anos). Vedações das edificações do grupo 5 (telhas, vidros, painéis de vedação).	0,83	15

Fonte: ABNT (2023)

2.3.7 Coeficiente de arrasto C_a

O coeficiente de arrasto é um número adimensional usado para quantificar a resistência que um objeto sofre ao se mover em um meio fluido como o ar. Ele ajusta a força resultante horizontal considerando os efeitos de pressão e sucção que ocorrem simultaneamente na direção do vento, dentre outros comportamentos aerodinâmicos. Está diretamente relacionado à forma da edificação e sua capacidade de sofrer ou não os esforços de vento. “A forma de maior arrasto é a seção quadrada, seguindo-se o retângulo de cantos vivos e os retângulos de borda de ataque em canto vivo e borda de fuga arredondada.” (BLESSMANN, 1990, p.108).

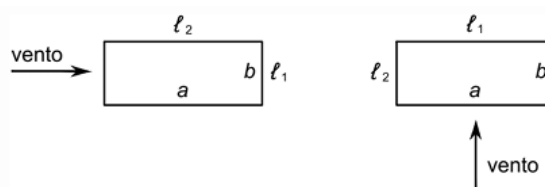
Figura 8 - Influência da forma geométrica



Fonte: BLESSMANN (1989)

Para a definição do coeficiente de arrasto é necessário conhecer as propriedades geométricas da edificação. Para o caso de aproximação a um retângulo visto em planta deve-se adotar a seguinte relação:

Figura 9 - Relações l_1 e l_2 para C_a



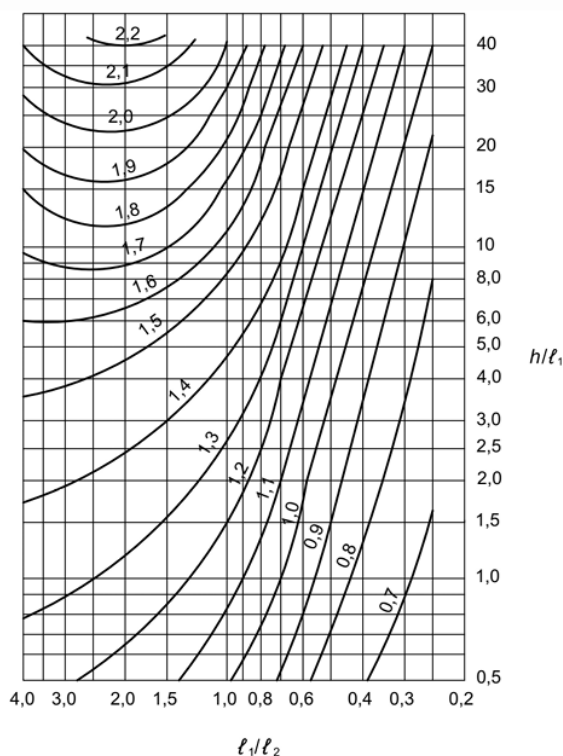
Fonte: ABNT (2023)

A NBR 6123 (ABNT, 2023) estabelece que os coeficientes propostos foram obtidos por ensaios com ventos de baixa turbulência, ou seja, velocidade quase constante. Entretanto, em ventos de alta turbulência, que ocorrem em grandes cidades, pode haver a diminuição da sucção na parede de sotavento em edificações

paralelepédicas. Portanto, os coeficientes podem ser reduzidos nesta condição. De acordo com a NBR 6123 (ABNT, 2023), pode-se considerar vento de alta turbulência em edificações até 80 m de altura quando:

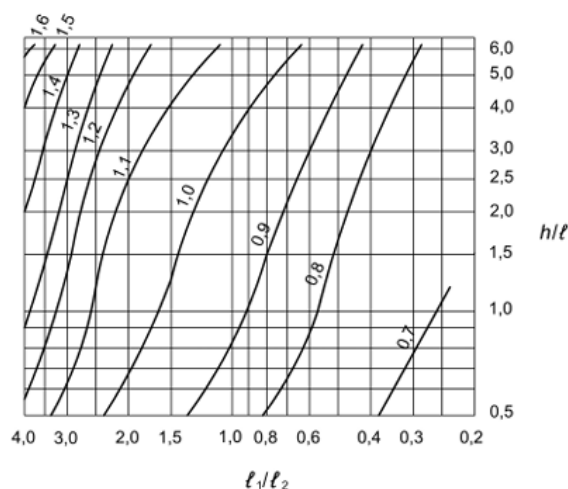
- a) sua relação profundidade/largura for maior que 1/3;
- b) sua altura não excede duas vezes a altura média das edificações nas vizinhanças, estendendo-se estas a barlavento, a uma distância mínima de:
 - 500 m para edificação até 40 m de altura;
 - 1 000 m para edificação até 55 m de altura;
 - 2 000 m para edificação até 70 m de altura;
 - 3 000 m para edificação até 80 m de altura;

Figura 10 - C_a para edificações paralelepédicas em vento de baixa turbulência



Fonte: ABNT (2023)

Figura 11 - C_a para edificações paralelepípedicas em vento de alta turbulência



Fonte: ABNT (2023)

2.3.8 Efeitos de vizinhança

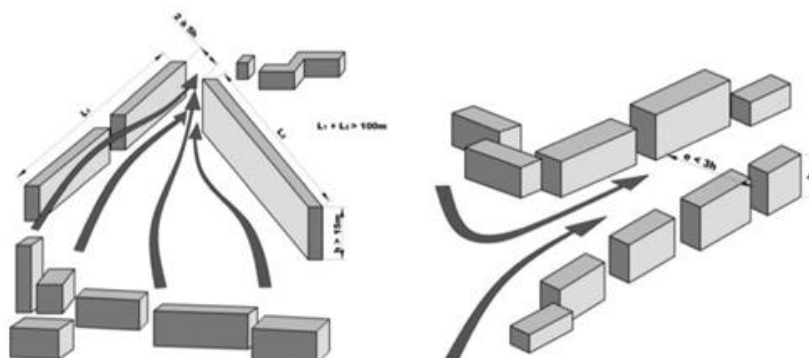
“Os coeficientes aerodinâmicos variam muito com as condições da vizinhança. Um obstáculo natural ou artificial existente nas proximidades de uma edificação ou elemento estrutural pode afetar consideravelmente o campo aerodinâmico” (BLESSMANN, 1989, p. 24). Os impactos, de modo geral, tendem a reduzir ou intensificar as pressões de vento na edificação em análise. Blessmann (1989) acrescenta que não é possível estabelecer valores numéricos universalmente aplicáveis para todos os efeitos de vizinhança sendo recomendável, para edifícios de grande porte ou cenários urbanos de alta densidade, a construção de modelos em escala reduzida para realização de ensaios de túneis de vento – única maneira de reproduzir as condições reais e determinar com exatidão as cargas eólicas.

Entretanto, os efeitos de vizinhança podem ser aproximados seguindo uma análise crítica do entorno – que considera as alterações desfavoráveis que podem ocorrer ao longo do tempo como urbanização futura - e os critérios da NBR 6123 (ABNT, 2023), esta que por sua vez considera três efeitos principais pelos quais outras edificações podem afetar o campo aerodinâmico da edificação em análise:

- a) Por efeito Venturi
- b) Por deflexão do vento da direção vertical
- c) Pela turbulência da esteira

2.3.8.1 Efeito Venturi

Figura 12 - Efeito Venturi em edificações vizinhas



Fonte: CARPEGIANI (2004)

O efeito Venturi é um fenômeno de interação entre a velocidade de um fluido e sua pressão ao passar por uma área de seção transversal reduzida (estreitamento). É consequência direta da equação da Continuidade e da equação de Bernoulli, em que, a vazão deve ser conservada, assim como para um fluido ideal (incompressível e sem viscosidade), a soma da pressão estática, da pressão dinâmica (proporcional à velocidade) e da pressão hidrostática (proporcional à altura) deve ser constante ao longo de uma linha de corrente.

$$Q = v A \quad (10)$$

Onde,

Q – é a vazão expressa pela quantidade de volume pelo tempo

v – é a velocidade do fluido

A – é a área da seção por onde ele escoar

Ou seja, o estreitamento do fluxo de escoamento provoca o aumento da velocidade do fluido de modo a manter a vazão Q constante.

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = constante \quad (11)$$

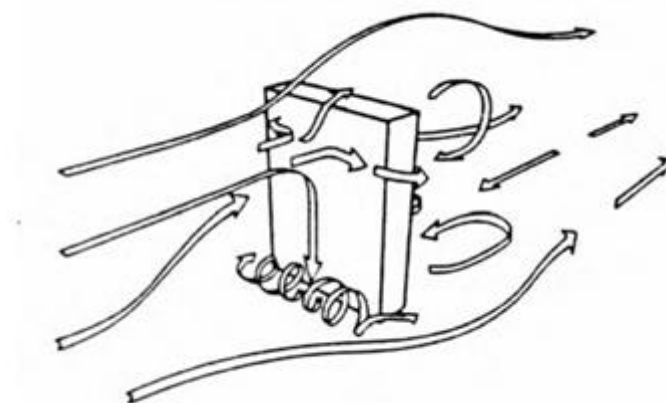
Da mesma forma que a vazão deve permanecer constante, a soma das pressões estática, dinâmica e hidrostática também devem permanecer constantes. Desconsideramos a pressão hidrostática ao avaliarmos uma linha única de corrente,

sem considerar os efeitos da gravidade. Dessa forma, o aumento da pressão dinâmica $\frac{1}{2} \rho v^2$ causada pelo aumento da velocidade v deve ser compensada pela redução da pressão estática p , o que causa o efeito de picos de sucção nas fachadas. Este efeito é verificado nas paredes confrontantes de duas edificações, próximas às arestas de barlavento (Blessmann, 1983).

O mesmo fenômeno de concentração e aceleração das linhas de fluxo ocorre quando só parte do andar térreo é livre (passagem de veículos, playground, etc.). Em Porto Alegre, em uma passagem de veículos no andar térreo de um edifício de 15 pisos, as placas de revestimento do forro foram arrancadas pela sucção. Acidentes envolvendo o efeito Venturi são muito comuns e também danificam os revestimentos das paredes de alvenaria em edificações, bem como telhados e elementos de fixação. (BLESSMANN, 2001).

2.3.8.2 Deflexão do vento na direção vertical

Figura 13 - Deflexão do vento na direção vertical



Fonte: CARPEGGIANI (2004)

A deflexão do vento na direção vertical é um fenômeno aerodinâmico que ocorre quando o vento incidente atinge perpendicularmente a fachada de barlavento de um edifício alto. Uma parte do escoamento do ar é defletida (desviada) para baixo em direção à base. Esse efeito impacta tanto a própria edificação, gerando um aumento das velocidades na base do edifício, quanto edificações vizinhas que podem sofrer com o aumento das cargas de vento e da turbulência de modo geral.

As altas velocidades próximas ao terreno só aparecem quando o edifício está diretamente exposto ao vento. Um edifício com 100 m de altura situado em zona

urbana densa terá um efeito de deflexão vertical menor do que um edifício de 40 m isolado sem edificações altas ao redor, portanto, sendo o único obstáculo de interceptação. Deve-se atentar ao problema sempre que o edifício tiver, no mínimo, o dobro da altura dos edifícios vizinhos situados a barlavento. (BLESSMANN, 1989).

2.3.8.3 Turbulência da esteira

Figura 14 - Características da esteira



Fonte: CARPEGIANI (2004)

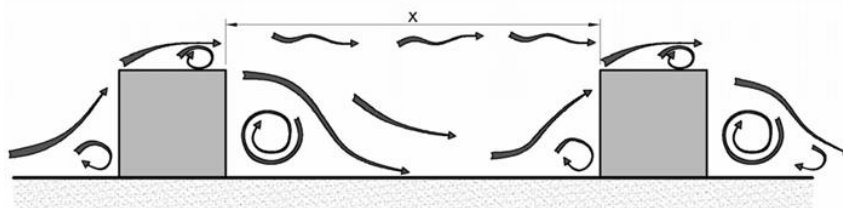
Uma construção localizada na região de sotavento em relação a outra pode ser significativamente influenciada pela turbulência provocada pelo fluxo de ar que se forma na esteira da edificação de barlavento. Essa turbulência pode gerar efeitos dinâmicos intensos, conhecidos como “efeitos de golpe”, além de modificar as pressões do vento que atuam sobre a estrutura. Tais efeitos são especialmente relevantes em edificações com coberturas ou fechamentos compostos por materiais leves. Ocorrem devidos à separação do fluxo de ar nas bordas da edificação, formando vórtices que se desprendem e se movem para baixo na corrente de ar. (CARPEGIANI, 2004).

Os efeitos de golpe, martelamento, ou *buffeting*, são respostas dinâmicas de uma estrutura (geralmente da edificação a sotavento) causadas pela turbulência intensa e flutuante da esteira da edificação a barlavento. A alta turbulência da esteira atinge a edificação vizinha com rajadas ou "pancadas" irregulares e sucessivas, solicitando a estrutura com cargas dinâmicas que variam rapidamente em magnitude e ponto de aplicação. (BLESSMANN, 1998).

Embora a pressão média na região da esteira possa ser menor, as flutuações de pressão são significativamente maiores. Essas flutuações podem causar

oscilações (movimentos vibratórios) consideráveis na estrutura a sotavento. Torna-se perigoso quando afeta estruturas com baixa rigidez e amortecimento ou elementos como coberturas, painéis de vedação ou fachadas revestidas com materiais leves que podem sofrer danos devido às altas sucções flutuantes.

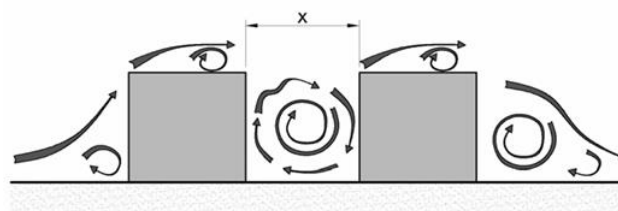
Figura 15 - Regime de escoamento de corpo isolado



Fonte: CARPEGGIANI (2004)

No padrão de escoamento de corpo isolado, conforme ilustrado na figura 15, as estruturas encontram-se dispostas com um espaçamento considerável. Isso assegura que cada construção reaja à ação do vento de forma independente. Um vórtice de rotação é gerado na base da fachada de cada estrutura individualmente. O fluxo de ar perturbado na esteira que se forma a sotavento do primeiro edifício retorna à superfície antes de impactar a edificação seguinte. Neste cenário, a distância de separação x é superior à soma das extensões de separação (a barlavento) e de retorno do fluxo (a sotavento). Por conseguinte, o efeito de blindagem aerodinâmica, ou *sheltering*, é reduzido, e as solicitações de força que incidem em cada edifício são próximas dos valores correspondentes a uma estrutura totalmente isolada. (CARPEGGIANI, 2004).

Figura 16 - Regime de escoamento deslizante

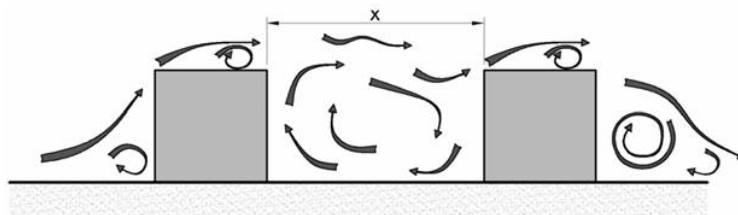


Fonte: CARPEGGIANI (2004)

Nesta configuração de fluxo, ilustrada na figura 16, a proximidade das edificações é tão acentuada que um turbilhão aerodinâmico (vórtice) persistente é estabelecido e mantido no vão entre elas. O vento incidente principal contorna as estruturas, parecendo transitar ou deslizar sobre os seus telhados. Isso faz com que o conjunto de edifícios se comporte como um único corpo. Como resultado, o nível de

proteção (*sheltering*) contra o vento é elevado. As forças atuantes sobre os edifícios localizados a sotavento são notavelmente reduzidas, visto que essas estruturas ficam imersas quase totalmente na região de esteira turbulenta gerada pelo edifício de barlavento. (CARPEGGIANI, 2004).

Figura 17 - Regime de escoamento de interferência de esteira.

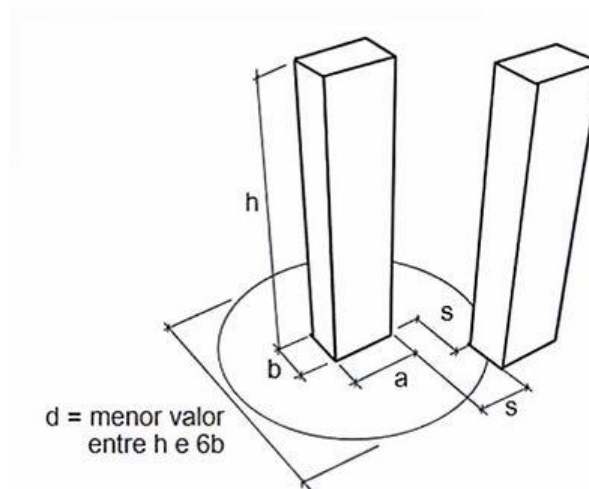


Fonte: CARPEGGIANI (2004)

O regime de escoamento de interferência de esteira, demonstrado na figura 17, configura-se como uma condição intermediária que se situa entre o escoamento de corpo isolado e o escoamento deslizante. Nesta situação, o espaçamento entre as edificações não é amplo o suficiente para permitir o desenvolvimento completo da esteira gerada pelo primeiro edifício (como ocorre no corpo isolado). Contudo, a separação é excessiva para que se estabeleça um vórtice de recirculação estável e duradouro no vão entre as estruturas (característica do regime deslizante). Em suma, a distância é demasiadamente curta para escoamento isolado e demasiadamente longa para escoamento por cobertura. (CARPEGGIANNI, 2004).

De acordo com a NBR 6123 (ABNT, 2023) o fator de vizinhança f_v é dado pelo quociente do coeficiente aerodinâmico C na edificação com vizinhança com o mesmo coeficiente C na edificação isolada, sendo esse coeficiente qualquer um que se pretende estudar (C_e , $C_{pe\text{ médio}}$, C_a). A norma também estabelece os critérios de aumento dos coeficientes quando duas edificações altas se encontram a certa distância uma da outra baseando-se em ensaios com modelos de alturas aproximadas. Para a relação $s/d^* \leq 1,0$, consideramos um fator máximo de ampliação dos efeitos de vizinhança $f_v = 1,3$, já para relação $s/d^* \geq 3,0$ temos que a edificação não é influenciada pela outra, portanto $f_v = 1,0$ não havendo efeitos de vizinhança.

Figura 18 - Notação para aplicação do fator de vizinhança



Fonte: ABNT (2023)

A figura 18 descreve a notação utilizada para as relações entre edificações, os termos s e d^* são descritos como:

s – O afastamento entre os planos das faces confrontantes de duas edificações altas vizinhas, sendo $a \times b$ as dimensões em planta

d^* - A menor das duas dimensões:

- Lado menor b
- Semidiagonal $1/2 \sqrt{a^2 + b^2}$

2.3.9 Cálculo da força de arrasto

A partir da determinação dos três fatores é possível seguir com o cálculo, realizando o ajuste da velocidade básica V_0 para velocidade característica V_k , definição da pressão dinâmica q , definição do coeficiente de arrasto C_a e, por fim, determinação da força de arrasto F_a exercida pelo vento em função da altura analisada.

$$F_a = q C_a A f_v \quad (12)$$

2.4 Método dinâmico

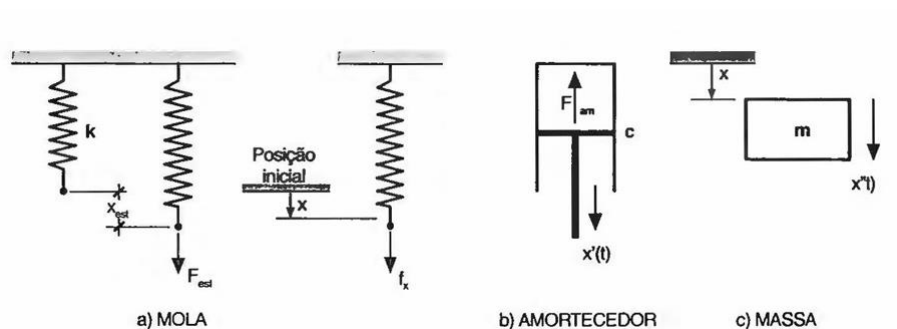
Nesta etapa, revisaremos as teorias acerca da análise dinâmica e o método descrito pela ABNT NBR 6123 de modo a possibilitar uma comparação entre ambos. Para tanto são necessários os conhecimentos acerca da composição de sistemas dinâmicos, das vibrações mecânicas e seus efeitos aliados à carga dinâmica do vento.

Conforme Galindez (1979), alguns anos atrás, a ação do vento sobre estruturas era avaliada através da distribuição das pressões calculadas sob fluxo uniforme do vento, desprezando os efeitos dinâmicos, em especial a resposta ressonante, devidos à turbulência atmosférica. A análise dinâmica objetiva determinar deslocamentos, velocidades e acelerações de elementos constituintes de uma estrutura submetida a cargas dinâmicas.

2.4.1 Sistema massa-mola-amortecedor

Em um sistema dinâmico clássico, tido como sistema linear fundamental, teremos três elementos principais: massa, mola e amortecedor em um grau de liberdade. A massa em movimento acelerado origina uma força F_i que corresponde a aceleração $x''(t)$, a mola é um elemento sem massa, com rigidez k (constante de mola) dada pela divisão da força axial estática F_{est} introduzida no sistema sobre o deslocamento da mola X_{est} , e o amortecimento gera uma força F_{am} contrária ao movimento $x'(t)$ dado pelo fator de amortecimento c . Já o número de graus de liberdade indica o número mínimo de coordenadas independentes necessárias para descrever o movimento do sistema. (BLESSMANN, 1998).

Figura 19 - Elementos do sistema linear fundamental



Fonte: BLESSMANN (1998)

Quando o sistema é submetido a uma força excitatória $f(t)$ variável no tempo a equação diferencial do movimento da massa m é descrita pela equação 13.

$$m x''(t) + c x'(t) + k x(t) = f(t) \quad (13)$$

Sendo,

m – Massa do sólido em oscilação

$x(t)$ – Deslocamento em relação à posição de equilíbrio estático para o instante t

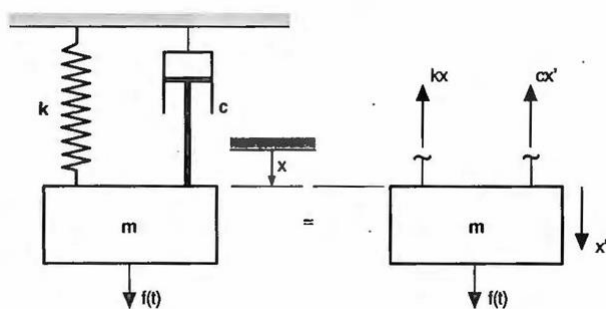
k – Constante de mola

c – Fator de amortecimento viscoso

$x'(t)$ e $x''(t)$ – Velocidade e aceleração da massa, respectivamente

$f(t)$ – Força excitadora

Figura 20 - Sistema massa-mola-amortecedor



Fonte: BLESSMANN (1998)

2.4.2 Vibrações mecânicas

As vibrações mecânicas constituem o tema principal dentro da dinâmica das estruturas, pois é através do conhecimento das vibrações que se pode analisar o comportamento de corpos e sistemas (como edifícios, pontes, máquinas e componentes) submetidos a movimentos oscilatórios, ou seja, movimentos que se repetem em torno de uma posição de equilíbrio. “Todos os corpos que possuem massa e elasticidade podem entrar em vibração” (BLESSMANN, 1998, p. 13).

Ao vibrar, a estrutura desloca-se em torno de sua deformada elástica. Sendo seu comportamento linear, os efeitos estático e dinâmico podem ser obtidos separadamente somando-os no final. (LIMA, 2008). A grande maioria das cargas

consideradas em obras civis têm natureza dinâmica. Por efeitos práticos, são tratadas como estáticas, pois sua pequena variação com o tempo não é suficiente para gerar forças de inércia e amortecimento significativas.

Em estruturas que suportam cargas de turbinas, geradores e compressores, dentre outros, ou, estruturas esbeltas que sofrem grandes deslocamentos em função das cargas de vento, estas, devem ser tratadas através de análises dinâmicas. Em relação ao tipo de carga, considera-se a carga dinâmica como sendo “aquela que apresenta variação no tempo, seja em sua magnitude, direção ou posição”. (LIMA e SANTOS, 2008, p.1).

Quanto à variação em função do tempo, existem 4 classificações para as cargas dinâmicas, são elas: harmônica, periódica, transiente e impulsiva. Uma carga harmônica pode ser representada pela função seno (ou cosseno), característica de máquina rotativa. Carga periódica apresenta repetições em um intervalo regular de tempo, denominado período. A carga de uma máquina rotativa também é periódica. Carga transiente apresenta variação aleatória com o tempo, sem periodicidade, como é o caso do vento e terremotos. Já a carga impulsiva é também uma carga transiente, porém de curta duração. (LIMA e SANTOS, 2008).

O vento natural provoca vibração nas estruturas, esta, por sua vez pode ser caracterizada como uma vibração amortecida pois a edificação quando excitada pelo vento tende a voltar a posição de equilíbrio seguindo uma taxa de amortecimento. Para tratar das características do amortecimento podemos descrever um sistema de vibração livre amortecida no qual $f(t) = 0$ seguindo as operações de solução das equações diferenciais homogêneas de segunda ordem em sequência.

$$m x''(t) + c x'(t) + k x(t) = 0 \quad (14)$$

Cuja solução de forma é:

$$x(t) = e^{st} \quad (15)$$

Logo,

$$(m s^2 + c s + k) e^{st} = 0 \quad (16)$$

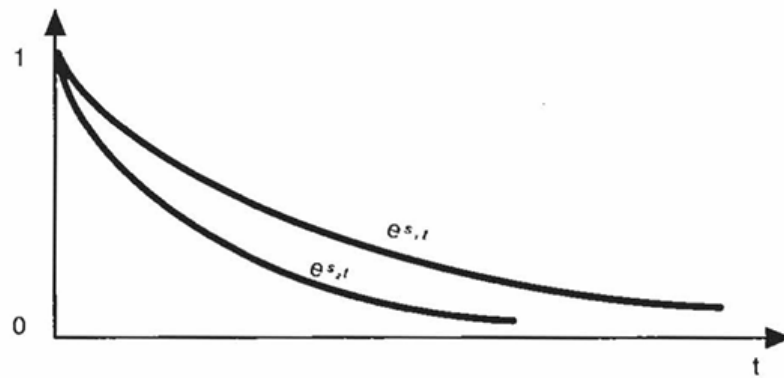
Sendo s uma constante a determinar e admitindo que a frequência circular natural $\omega_1^2 = k/m$, a equação tem duas soluções S_1 e S_2 .

$$S_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm [(c/2m)^2 - \omega_1^2]^{1/2} \quad (17)$$

E a solução geral dada por:

$$x(t) = A e^{s_1 t} + B e^{s_2 t} \quad (18)$$

Figura 21 - Curva de amortecimento supercrítico



Fonte: BLESSMANN (1998)

A solução geral determina a curva de retorno da oscilação em função do tempo e ela depende da relação do radical $(c/2m)^2$ sendo maior, igual ou menor do que ω_1^2 para determinar o tipo de amortecimento. Quando $(c/2m)^2 > \omega_1^2$ o termo entre colchetes para equação 17 terá raízes positivas e os valores de S serão reais e negativos. Neste caso não haverá vibração, pois o movimento não ultrapassa a posição de equilíbrio no sentido oposto, apenas decai no tempo tendendo ao infinito. Essa condição é tratada como amortecimento supercrítico.

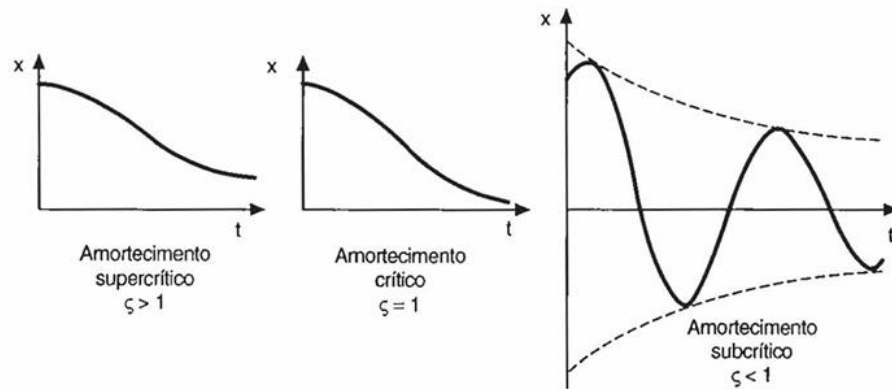
Quando $(c/2m)^2 = \omega_1^2$ temos que o valor do radical na equação 17 é zero, tratando-se do amortecimento crítico que corresponde ao limite para um movimento sem oscilações e a condição em que o retorno é alcançado o mais rápido possível. Realizando as operações matemáticas para isolar c , teremos um fator de amortecimento crítico dado por:

$$c_c = 2m \omega_1 \quad (19)$$

“O amortecimento de um sistema pode ser indicado como uma fração do amortecimento crítico (razão de amortecimento crítico)” (BLESSMANN, 1998, p. 22).

$$\zeta = c/c_c \quad (20)$$

Figura 22 - Razão de amortecimento



Fonte: BLESSMANN (1998)

Em estruturas civis (prédios de múltiplos andares e pontes) a razão de amortecimento crítico é $\zeta < 1$. Elas trabalham, portanto, no regime de amortecimento subcrítico onde há oscilação a partir do ponto de equilíbrio. Isso significa que quando excitadas por forças dinâmicas elas tendem a vibrar com amplitudes decrescentes até que a energia seja completamente dissipada pelas perdas por atrito interno e estrutural (LIMA e SANTOS, 2008).

Até então fizemos a descrição de um sistema de vibração livre quando $f(t) = 0$, porém, sendo o vento uma carga dinâmica, ela pode entrar em ressonância com a frequência natural de vibração da estrutura gerando uma amplificação da vibração. Assim teremos uma vibração forçada com excitação harmônica. (BLESSMANN, 1998). Neste caso o movimento é descrito pela equação 21, sendo F_1 a amplitude da força excitadora harmônica.

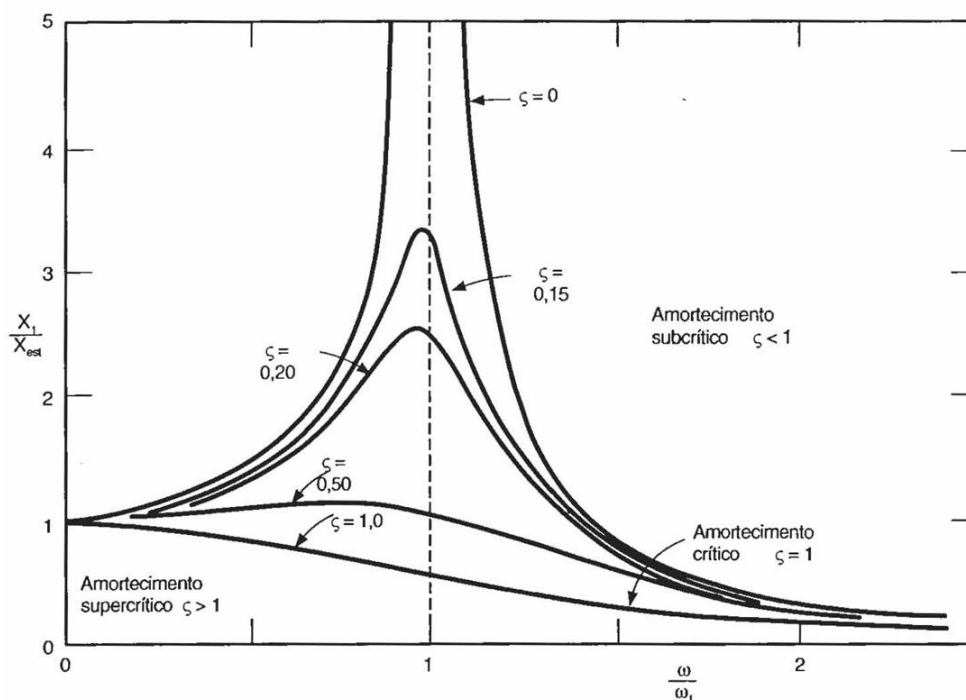
$$m x''(t) + c x'(t) + k x(t) = F_1 \sin \omega t \quad (21)$$

A ressonância ocorre quando a frequência de excitação ω causada pelas cargas dinâmicas fica próxima ou igual a frequência natural ω_1 da estrutura, ou seja $\omega / \omega_1 = 1$. Isso significa que no instante de amplitude máxima da ω_1 haverá um incremento de F_1 . Matematicamente, a amplitude da vibração é multiplicada pelo fator

de amplificação dinâmica, sendo este inversamente proporcional ao amortecimento ζ . A amplitude de oscilação X_1 na ressonância é determinada pela equação 22.

$$X_1 = F_1 / (c \omega_1) \quad (22)$$

Figura 23 - Fator de amplificação dinâmica



Fonte: BLESSMANN (1998)

2.4.3 Processo de Davenport

Alan G. Davenport foi fundamental para transformar a forma como as ações dinâmicas do vento são consideradas em projetos de grande porte. Foi responsável pela criação do Espectro de Potência de Davenport (ou Modelo de Davenport). O modelo consiste em ferramentas probabilísticas usadas para descrever a distribuição de energia contida nas flutuações da velocidade do vento em diferentes frequências, “[...] teve o mérito de adaptar à engenharia estrutural conceitos já conhecidos e em uso na engenharia mecânica e na de comunicações”. (BLESSMANN, 1998, p. 78) através da teoria de Taylor e da resposta de filtros eletrônicos a ruídos aleatórios.

No processo de Davenport o vento natural é decomposto em uma parte média e outra flutuante. Desse modo existem esforços estáticos correspondentes ao vento

médio e esforços dinâmicos decorrentes da parcela flutuante. O deslocamento de pico ou máximo é obtido através do produto do deslocamento médio estático por um coeficiente adimensional constante, o fator de rajada, levando em conta apenas o modo fundamental de vibração. (LAVOR, 2017 apud DAVENPORT, 1967).

A resposta longitudinal (na direção do vento) da maioria das estruturas é causada primariamente pela componente longitudinal da turbulência do vento incidente, que se superpõe ao deslocamento médio causado pela velocidade média do vento. É possível adotar o conceito de comprimento de onda para descrever as dimensões dos turbilhões que produzem as cargas flutuantes na frequência f .

$$\lambda = \bar{V} / f = \bar{V} T_r \quad (23)$$

Em que,

\bar{V} – Velocidade média do vento

f – Frequência de incidência de rajadas

$T_r = 1 / f$ – Período

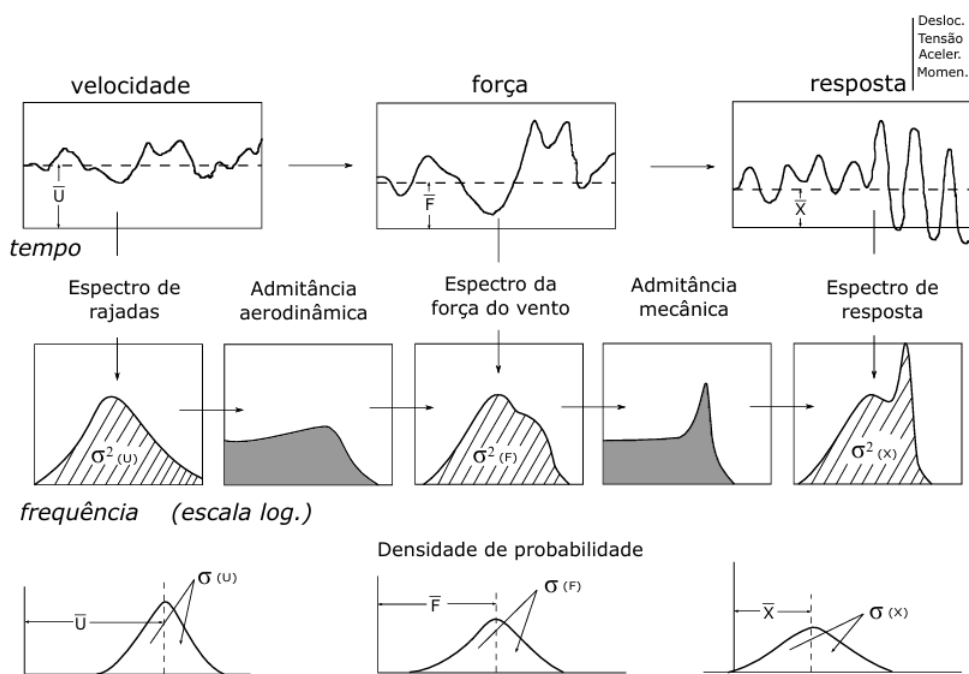
“A efetividade da rajada para produzir ações dinâmicas na estrutura dependerá da relação entre as dimensões do respectivo turbilhão e as da construção.” (BLESSMANN, 1998, p. 77). Sendo L a altura, ou outra dimensão característica da construção, temos que para $L/\lambda \geq 1$ a correlação espacial das rajadas é muito pequena, correspondendo a turbilhões menores, cujos efeitos são apenas locais. Já, para $L/\lambda \leq 1$ há boa correlação espacial da turbulência incidindo sobre toda a edificação.

O espectro das flutuações indica a distribuição de energia total nas diversas frequências. As correlações espaciais permitem obter a correlação entre as flutuações em dois pontos, para uma certa frequência. A partir delas são obtidas as escalas longitudinal, lateral e vertical de uma dada componente das flutuações resultando em uma medida das dimensões dos turbilhões. (BLESSMANN, 1998).

A figura 24 ilustra o processo de análise da resposta dinâmica de uma estrutura quando submetida à ação do vento turbulento (rajadas). O diagrama conecta a descrição do vento (velocidades) com a força que ele exerce e, finalmente, com a resposta da estrutura em deslocamento, tensão, aceleração ou momentos. Cada

coluna é analisada em três domínios diferentes: domínio do tempo, domínio da frequência e domínio da probabilidade.

Figura 24 - Método de Davenport



Fonte: BLESSMANN (1998)

2.4.4 Processo da NBR 6123

Os métodos de análise dinâmica surgem como uma abordagem para a determinação da resposta dinâmica das estruturas em relação ao vento. É um procedimento analítico que busca considerar a contribuição do modo fundamental, ou primeiro modo de vibração, da estrutura, oferecendo um caminho de cálculo simplificado em comparação aos ensaios de Túnel de Vento. Segundo Blessmann (1998), em seu livro “Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento”, salienta que:

O processo que a norma brasileira NBR-6123 apresenta para a determinação da ação estática equivalente do vento, embora baseada no método de vibração aleatória proposto por Davenport, difere dele na determinação dos parâmetros que definem essa ação, além de destacar que a vibração da estrutura em seus modos naturais dá-se em torno da posição deformada (isto é, pela velocidade média). (BLESSMANN, 1998, p. 93)

De acordo com a NBR 6123 (ABNT, 2023, p. 61), “edificações com período fundamental superior a 1 segundo, em particular aquelas fracamente amortecidas, podem apresentar uma importante resposta flutuante na direção do vento médio”. Portanto, é necessário antecipar a superposição das respostas média e flutuante através da aplicação dos modelos contínuo simplificado ou discreto. De acordo com Blessmann (1998), o processo da ABNT NBR 6123 admite 3 hipóteses fundamentais:

1. As componentes flutuantes do vento (rajadas) são processos estacionários, com médias zero.
2. Na determinação da resposta estrutural na direção do vento é considerada a influência da componente flutuante apenas nesta direção.
3. A estrutura é discretizada em N partes. Em um dado instante, a ação total do vento, na direção da velocidade média, em cada parte da estrutura, é composta de duas parcelas: uma ação média e uma ação flutuante. Assim temos que a força máxima em função do tempo $\bar{F}_{max}(t)$ para coordenada i é representada pela equação 23.

$$\bar{F}_{imax}(t) = \bar{F}_i + \hat{F}(t) \quad (24)$$

Em que,

\bar{F}_i – Força correspondente à velocidade média

$\hat{F}(t)$ – Força correspondente à amplitude máxima da parcela flutuante

A força correspondente à velocidade média, ou força média, é determinada pela lei potencial do perfil de velocidades médias. Já a parcela flutuante (equação 24) é resultado de processos matemáticos envolvendo o espectro de turbulência de Harris que foi desenvolvido através de dados de tormentas extratropicais, mas que também se aplica a ventos de tormentas tropicais. (BLESSMANN, 1998).

$$\hat{F}_i = F_H \Psi_i x_i \quad (25)$$

Sendo,

F_H – Força que relaciona q_{ref} com a amplificação gerada por ξ .

Ψ_i – Relação entre m_j/m_0 (massa do ponto sobre massa de referência)

x_i – Deslocamento provocado pelo modo de vibração

“Os fatores de amplificação dinâmica ξ (equação 26) foram calculados por Galindez, admitindo um fator de pico $g = 4$ e uma forma modal $x(z) = z/h$.” (BLESSMANN, 1998, p. 99). Eles dependem do:

- Perfil de velocidades do vento;
- Razão de amortecimento crítico ζ ;
- Dimensões da superfície frontal da construção;
- Frequência do modo considerado e velocidade do vento.

$$\xi = g \omega^2 \gamma \quad (26)$$

Em que,

g – Fator de pico

ω^2 – Frequência natural de vibração

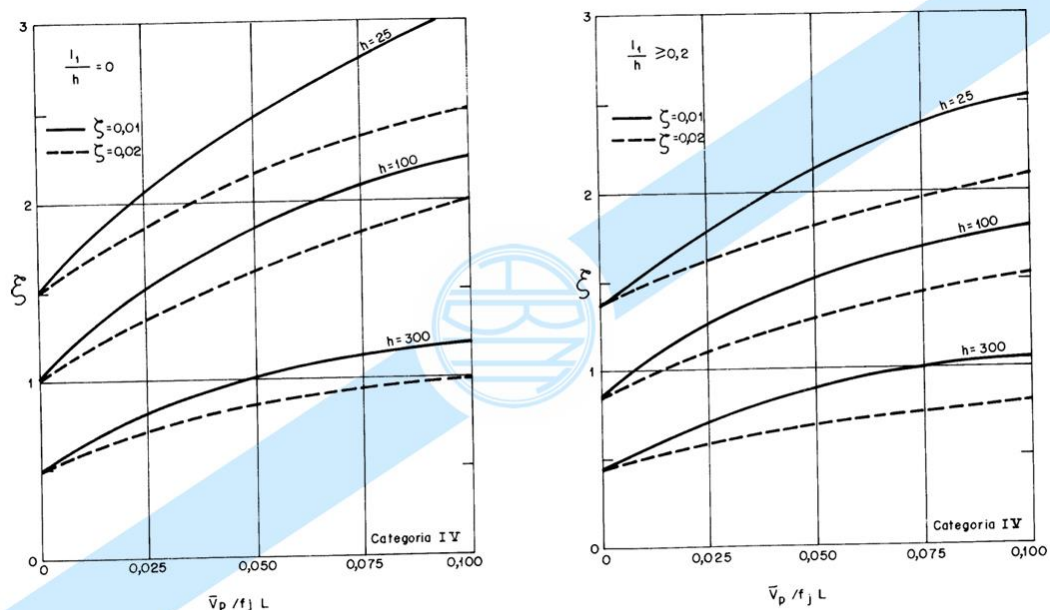
γ – Coeficiente de amplificação dinâmica

2.4.5 Fatores dinâmicos de 1988 e 2023

Em 2023 a norma brasileira de ABNT NBR 6123 de 1988 sofreu alterações importantes especialmente ao tratar-se dos valores propostos para o fator de amplificação dinâmica ou fator dinâmico ξ . Como descrito anteriormente (equação 26) ele é obtido através de uma série de correlações que envolvem as características do vento e estrutura.

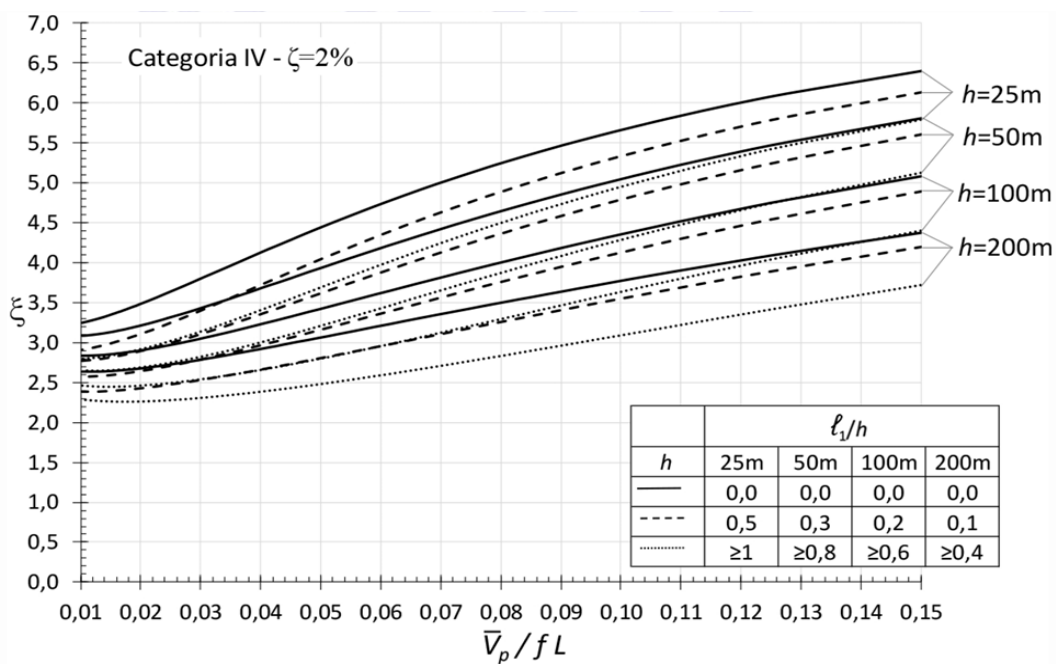
Em ambas as normas o fator dinâmico é obtido através da interpolação dos valores de ξ presentes nos ábacos do capítulo 9 (ABNT, 2023, p. 66). Eles dependem da relação entre a velocidade de projeto \bar{V}_p sobre o produto da frequência f_j pelo comprimento L ($L = 1800 \text{ m}$), da relação entre as dimensões l_1/h da edificação e a razão de amortecimento crítico ζ .

Figura 25 - Fator dinâmico segundo ABNT NBR 6123:1988



Fonte: ABNT (1988)

Figura 26 - Fator dinâmico segundo ABNT NBR 6123:2023



b) Taxa de amortecimento $\zeta = 2\%$

Figura 23 – Fator dinâmico ξ para terreno de Categoria IV ($L = 1800$ m; h em m; l_1 definido na Figura 19)

Fonte: ABNT (2023)

2.4.6 Modelo contínuo simplificado

O modelo contínuo simplificado é aplicável a edificações que apresentam seção constante e distribuição de massa aproximadamente uniforme ao longo da altura, permitindo que a estrutura seja idealizada como um modelo contínuo. Quando há variação na geometria da edificação ao longo da altura é necessário discretizar a estrutura em n partes, levando em consideração a massa de cada seção.

A análise dinâmica pelo método contínuo se concentra na avaliação das componentes média e flutuante da ação do vento, através da pressão dinâmica equivalente, permitindo assim estimar os efeitos dinâmicos, como o fator de amplificação dinâmica (fator dinâmico) causado pelos efeitos de turbulência (do ar) e ressonância (da interação vento-estrutura).

Admite-se a contribuição única do modo fundamental pois, em geral, conduz a erros inferiores a 10% (BLESSMANN, 1998). “A retenção de um único modo é suficiente, exceto no caso de edificações muito esbeltas e/ou com rigidez fortemente variável” (BLESSMANN, 1998, p.103). Para estes casos devem ser computadas sucessivamente as contribuições dos modos 1, 2, 3 etc. de modo que as forças calculadas no último modo sejam desprezíveis.

Os procedimentos do modelo não são aplicáveis a:

- a) edificações com frequência natural fundamental menor que 0,2 Hz;
- b) edificações com altura maior do que 200 m;
- c) edificações em que os dois modos fundamentais de flexão tenham frequências próximas (com diferença de até 10%) e com valores de até 0,4 Hz;
- d) modos de vibração de torção.

Deve-se, primeiramente, calcular a velocidade de projeto V_p que corresponde à velocidade média sobre 10 min a 10 m de altura sobre o solo, dada pela equação 27.

$$V_p = 0,69 V_0 S_1 S_3 \quad (27)$$

Após, para o cálculo da resposta dinâmica utilizando o modelo contínuo simplificado a norma NBR 6123 (ABNT, 2023) estabelece parâmetros para a determinação dos efeitos dinâmicos que podem ser obtidos através da tabela ou empregando métodos da teoria de vibrações de estruturas como a análise modal para estruturas com geometria complexa. A maioria das edificações recai sobre a classe de “Edifícios com estrutura aporticada de concreto, sem cortinas”.

Tabela 6 - Parâmetros para os efeitos dinâmicos

Tipo de edificação	γ	ζ	$T_1 = 1/f_1$
Edifícios com estrutura aporticada de concreto, sem cortinas	1,2	0,020	$0,05 + 0,015 h$
Edifícios com estrutura de concreto, com cortinas para absorção de forças horizontais	1,6	0,015	$0,05 + 0,012 h$
Torres e chaminés de concreto, seção variável	2,7	0,015	$0,02 h$
Torres, mastros e chaminés de concreto, seção uniforme	1,7	0,010	$0,015 h$
Edifícios com estrutura de aço soldada	1,2	0,010	$0,29\sqrt{h} - 0,4$
Torres e chaminés de aço, seção uniforme	1,7	0,008	
Estruturas de madeira	---	0,030	

Fonte: ABNT (2025)

O cálculo da pressão dinâmica pela cota z é dado pela equação 28.

$$q(z) = \bar{q}_0 b_m^2 \left[\left(\frac{z}{z_r} \right)^{2p} + \left(\frac{z}{h} \right)^\gamma \frac{1 + 2\gamma}{1 + \gamma + p} \xi \right] \quad (28)$$

Onde,

b_m – Coeficiente que depende da categoria de rugosidade do terreno

p – Expoente que depende da categoria de rugosidade do terreno

z_r – é a altura de referência, igual a 10 metros

γ – é o coeficiente obtido na tabela 6

ξ – é o fator dinâmico, função das dimensões da edificação

h – é a altura do solo até o topo da edificação

\bar{q}_0 é a pressão dinâmica, em N/m

Podemos segregar os termos referentes à concepção teórica, em que:

$\left(\frac{z}{z_r} \right)^{2p}$ - é a resposta média;

$\left(\frac{z}{h} \right)^\gamma \frac{1+2\gamma}{1+\gamma+p} \xi$ - é a amplitude máxima da resposta flutuante;

Tabela 7 – Coeficientes p e b_m

Categoria de rugosidade	I	II	III	IV	V
p	0,095	0,15	0,185	0,23	0,31
b_m	1,23	1,00	0,86	0,71	0,5

Fonte: ABNT (2025)

3 METODOLOGIA

3.1 Definição dos modelos

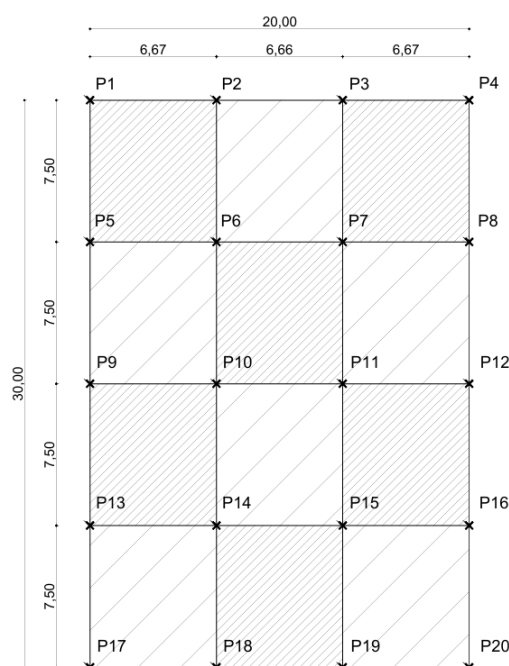
A fim de possibilitar as análises em relação aos diferentes métodos de cálculo foram concebidas duas edificações em Porto Alegre – RS ($V_0 = 45$ m/s) em terreno plano ou fracamente acidentado, situada em região urbanizada de categoria de rugosidade IV com a mesma projeção na base, porém, alturas distintas, compostas por n pavimentos de 3 m (piso a piso), seguindo as respectivas dimensões (x, y, h) de acordo com a tabela 8. Através da geometria proposta em cada modelo foram definidas as características e parâmetros para o cálculo da força de arrasto utilizando o método estático e o método dinâmico contínuo simplificado da norma NBR 6123:1988 e da NBR 6123:2023.

Tabela 8 - Características geométricas dos modelos

Modelo	x (m)	y (m)	h (m)	n
A	20	30	60	20
B	20	30	78	26

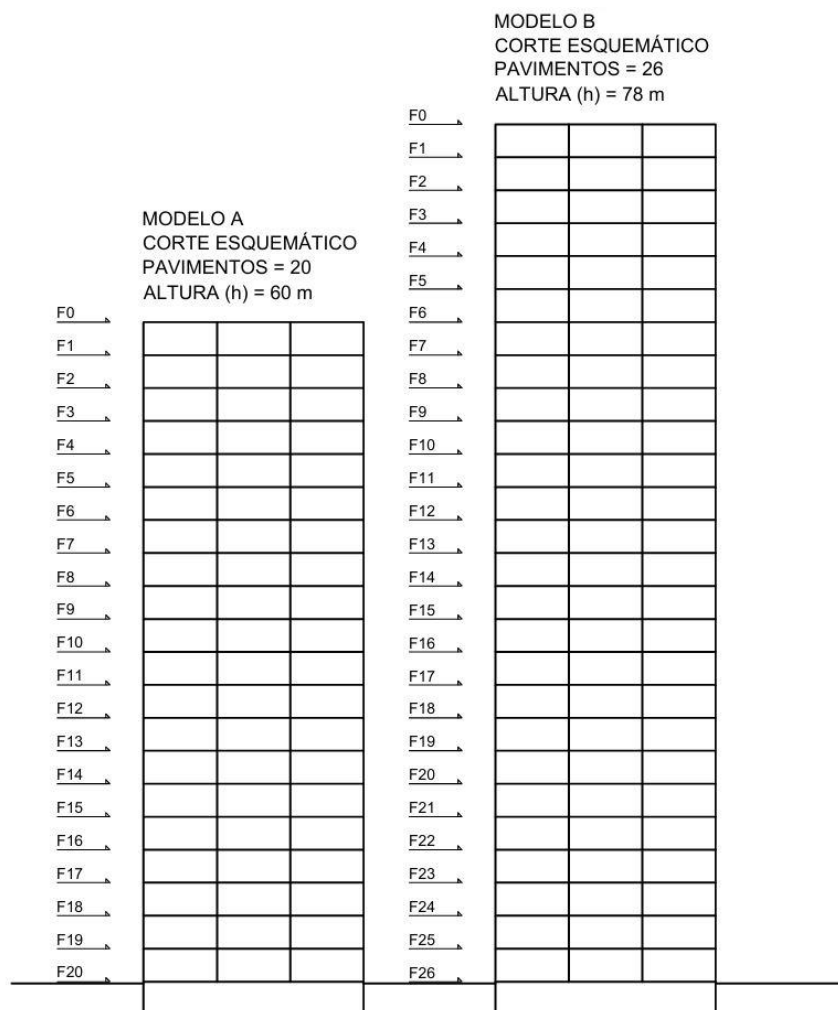
Fonte: Autor (2025)

Figura 27 - Projeção em planta dos modelos (esquema estático)



Fonte: Autor (2025)

Figura 28 - Corte Esquemático



Fonte: Autor (2025)

3.2 Parâmetros para o cálculo do método estático

Em relação ao fator topográfico S_1 considerando terreno plano o valor utilizado será de $S_1 = 1$. Para toda edificação, estrutura ou parte de edificação cuja dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m adotamos a classe C para o fator S_2 . Desse modo, para categoria de rugosidade IV em que $z_g=420$ metros definimos os parâmetros meteorológicos de acordo com a tabela 9. Os valores de S_2 que variam com a altura estão presentes na análise dos resultados. Além disso, para o fator estatístico S_3 ambas edificações são consideradas no grupo 3 como edificações para residências, hotéis, comércio ou indústrias, com tempo de retorno de 50 anos, portanto $S_3 = 1$.

Tabela 9 - Parâmetros meteorológicos e fator de rajada usados

Parâmetro	A e B
b_m	0,84
ρ	0,135
F_r	0,95

Fonte: Autor (2025)

As relações h/l_1 e l_1/l_2 que permitem determinar o coeficiente de arrasto C_a para cada direção de vento estão definidas na tabela 9 para o modelo A ($h = 60\text{ m}$) e modelo B ($h = 78\text{ m}$). Em ambos modelos a edificação foi elevada 15 centímetros do solo, portanto, a cota do piso térreo está em 0,15 metros enquanto o solo é a referência 0 da altura da edificação, pois, para o cálculo do vento a altura h é considerada do solo até o topo do edifício. Assim, para o modelo A temos $h = 60,15\text{ m}$ e para o modelo B temos $h = 78,15\text{ m}$.

Para a relação l_1/l_2 , por sua vez, l_1 é a largura que está perpendicular ao vento incidente, logo, para o vento incidindo a 0° ou 180° (x) temos $l_1 = 30\text{ m}$ e $l_2 = 20\text{ m}$, enquanto para o vento incidindo a 90° ou 270° (y) temos $l_1 = 20\text{ m}$ e $l_2 = 30\text{ m}$. Serão calculadas as forças de vento positivas no sentido 0° e 90° , considerando que seus valores negativos possuem a mesma intensidade em 180° e 270° , respectivamente. Não serão considerados efeitos de vizinhança.

Tabela 10 - Coeficiente de arrasto - Modelo A

Relação	Vento 0° (x)	Vento 90° (y)
h/l_1	2,01	3,01
l_1/l_2	1,50	0,67
C_a	1,34	1,24

Fonte: Autor (2025)

Tabela 11 - Coeficiente de arrasto – Modelo B

Relação	Vento 0° (x)	Vento 90° (y)
h/l_1	2,61	3,91
l_1/l_2	1,50	0,67
C_a	1,37	1,19

Fonte: Autor (2025)

Os parâmetros e valores definidos, incluindo o fator S_2 e a pressão dinâmica q , por cota estão demonstrados nas tabelas do apêndice A.

3.3 Parâmetros para o cálculo do método dinâmico contínuo simplificado

Para o cálculo da velocidade de projeto \bar{V}_p foram adotados os mesmos valores de S_1 e S_3 do modelo estático, obtendo, portanto, $\bar{V}_p = 31,05$ (m/s), bem como os valores dos coeficientes de arrasto, pois, as relações de altura e largura das edificações não se alteram. Já, para ambas as normas de 1988 e 2023 foram adotados os seguintes parâmetros de determinação dos efeitos dinâmicos considerando edifícios com estrutura aporricada de concreto, sem cortinas, de acordo com a tabela 6.

Tabela 12 - Parâmetros dinâmicos usados

Modelo	γ	ζ	$T_1 = 1/f_1$ (s)	f_1 (hertz)	V_p / fL
A	1,2	0,02	0,95	1,05	0,016
B	1,2	0,02	1,22	0,82	0,021

Fonte: Autor (2025)

A partir dos valores propostos foram realizadas as interpolações necessárias para determinação do fator dinâmico ξ como é descrito pela ABNT NBR 6123:2023 ou coeficiente de amplificação dinâmica, como é descrito pela ABNT NBR 6123:1988 através de seus respectivos ábacos. Para a norma de 1988, com relação $l_1/h \geq 0,2$ em ambos modelos, pegamos o valor para altura de 25 m e altura de 100 m, obtendo por interpolação linear o valor correspondente para edificações de 60,15 m e 78,15 m. Já para a norma de 2023 foram feitas duas interpolações, uma para a relação l_1/h e outra para o valor entre 50 m e 100 m.

Tabela 13 - Interpolação do fator dinâmico de acordo com a ABNT NBR 6123:1988

Modelo A	ξ
25 m	1,50
100 m	1,00
60,15 m	1,27
Modelo B	ξ
25 m	1,60
100 m	1,25
78,15 m	1,35

Fonte: Autor (2025)

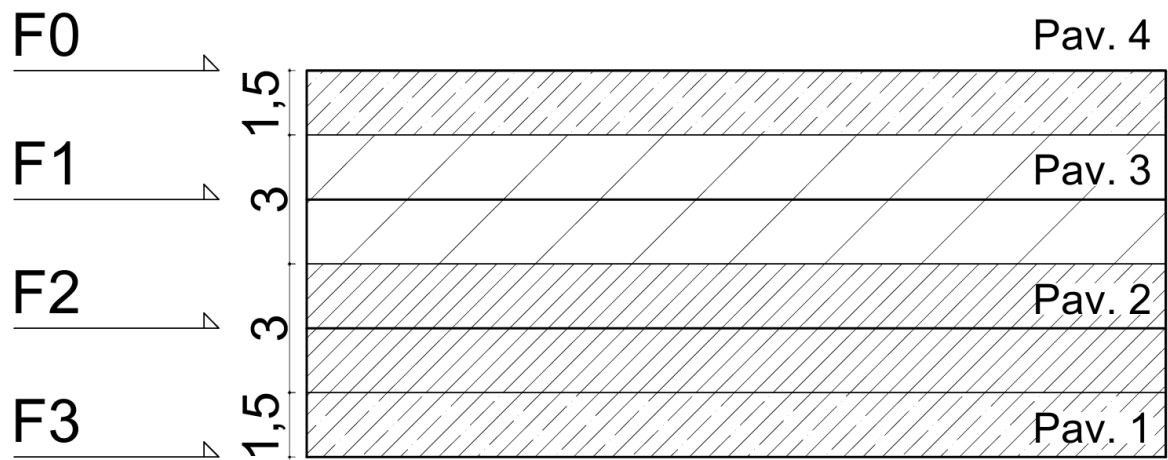
Tabela 14 - Interpolação do fator dinâmico de acordo com a ABNT NBR 6123:2023

Modelo A (x)			
50 m		100 m	
l_1/h	ξ	l_1/h	ξ
0,3	2,85	0,2	2,60
0,8	2,65	0,6	2,49
0,5	2,77	0,5	2,52
60,15 m		2,72	
Modelo A (y)			
50 m		100 m	
l_1/h	ξ	l_1/h	ξ
0,3	2,85	0,2	2,60
0,8	2,65	0,6	2,49
0,33	2,84	0,33	2,56
60,15 m		2,78	
Modelo B (x)			
50 m		100 m	
l_1/h	ξ	l_1/h	ξ
0,3	2,85	0,2	2,60
0,8	2,65	0,6	2,49
0,38	2,82	0,38	2,55
78,15 m		2,67	
Modelo B (y)			
50 m		100 m	
l_1/h	ξ	l_1/h	ξ
0	3,20	0,2	2,60
0,3	2,90	0,6	2,49
0,26	2,94	0,26	2,58
78,15 m		2,74	

Fonte: Autor (2025)

A força de arrasto será calculada conforme o esquema de forças da tabela 15 em que a força por pavimento será composta pela pressão dinâmica na cota do pavimento multiplicada pela área perpendicular (face frontal) multiplicada pela altura h - que corresponde à metade do pavimento inferior até metade do pavimento em análise.

Tabela 15 - Força de arrasto por pavimento



Fonte: Autor (2025)

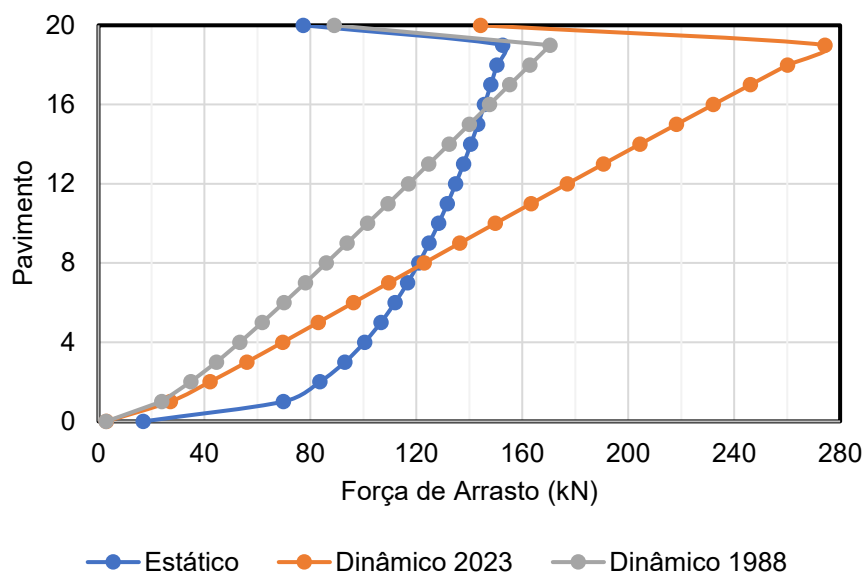
3.4 Comparativo entre os métodos

Após o cálculo das forças de arrasto para os diferentes métodos de cálculo, foram calculados os momentos característicos de 1º ordem global gerados pelo vento em cada cota, comparando os somatórios de momento na base de cada modelo. Desse modo, tornou-se possível identificar qual dos métodos é mais desfavorável e o quanto cada método difere em relação ao método estático. Bem como tornou-se possível quantificar a diferença entre os métodos dinâmicos das normas de 1988 e 2023.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

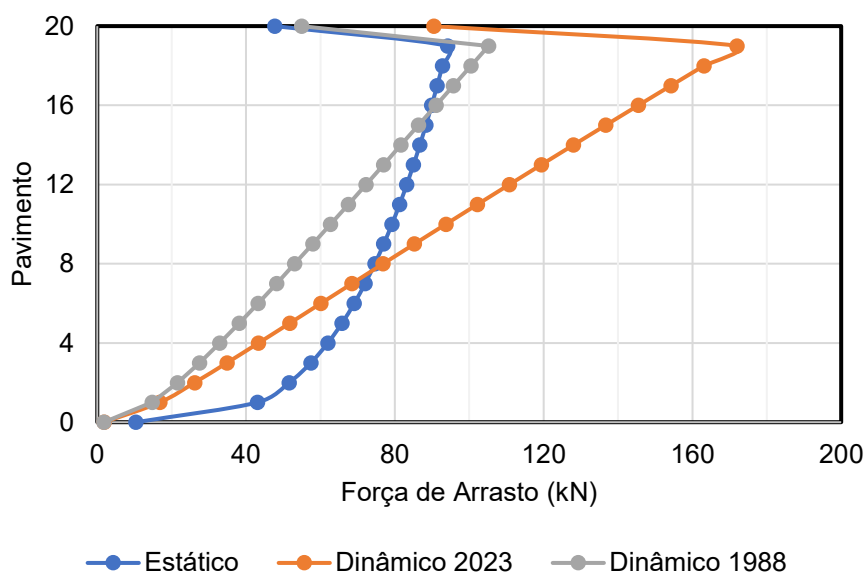
4.1 Resultados para força de arrasto

Gráfico 1 - Resultados para força de arrasto – Modelo A (direção x)



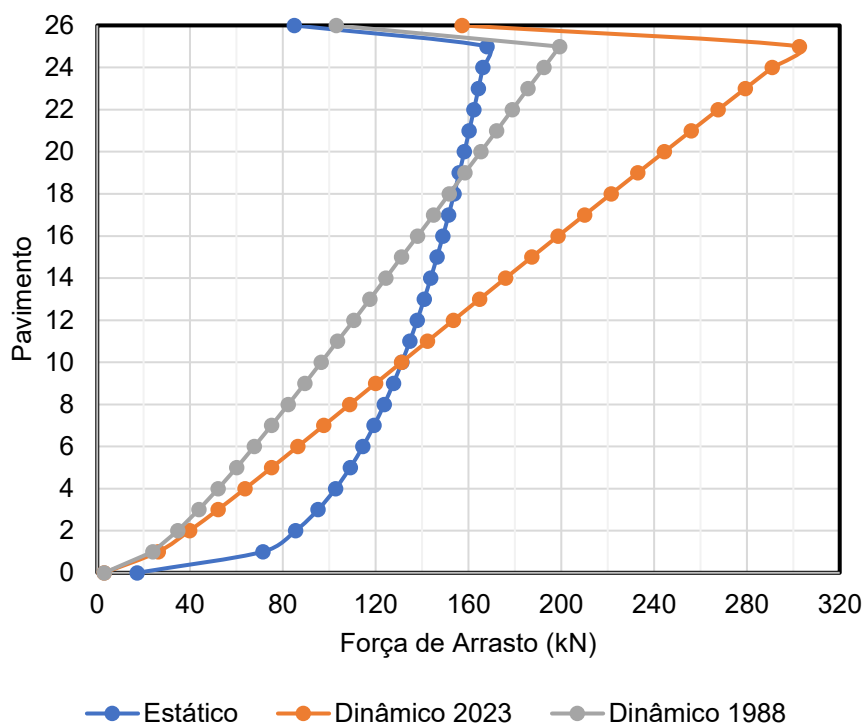
Fonte: Autor (2025)

Gráfico 2 - Resultados para força de arrasto – Modelo A (direção y)



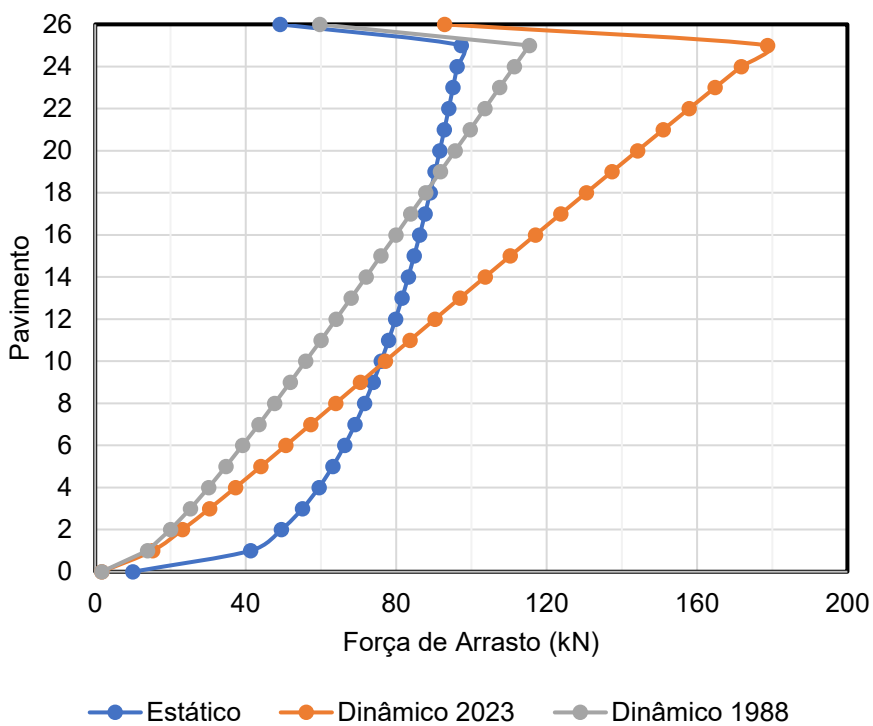
Fonte: Autor (2025)

Gráfico 3 - Resultados para força de arrasto – Modelo B (direção x)



Fonte: Autor (2025)

Gráfico 4 - Resultados para força de arrasto – Modelo B (direção y)



Fonte: Autor (2025)

O método estático produz uma curva de crescimento exponencial proporcionada pelo expoente de rugosidade p na fórmula de S_2 , enquanto que o método dinâmico possui uma taxa de crescimento linear determinada pelo fator dinâmico ξ . O método estático resulta em forças maiores na base do edifício, já o método dinâmico tende a produzir forças maiores no topo do edifício. A variação entre os métodos dinâmicos de 1988 e 2023 é dada, exclusivamente, pela atualização dos valores para o fator dinâmico ξ propostos pelos novos ábacos. A alteração desse fator impactou profundamente na inclinação da linha de tendência para as forças com aumento médio de 117% para o modelo A e 100% para o modelo B (valores de ξ).

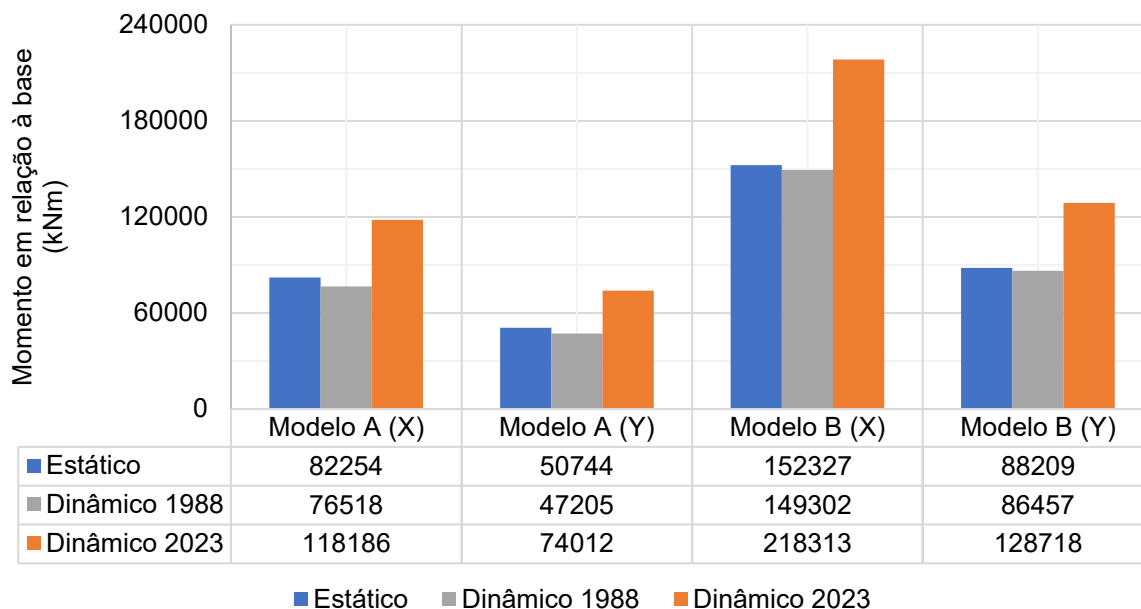
As forças do método dinâmico de 1988 superam as do método estático a partir do 16º pavimento para o modelo A (0,8 h) e do 19º pavimento para o modelo B (0,73 h). O método dinâmico de 2023 supera o método estático a partir de uma altura menor, a partir do 8º pavimento para o modelo A (0,4 h) e a partir do 10º pavimento para o modelo B (0,38 h) – os resultados podem ser consultados pelas tabelas na seção dos apêndices com os valores por cota e pavimento.

Os efeitos dinâmicos são maiores a partir de determinada altura em função da consideração do 1º modo de vibração em que os deslocamentos crescem em função da altura. Quanto maior o deslocamento proporcionado pelo vento médio, maior será o efeito ressonante da parcela flutuante – o que está contido pela fórmula do método contínuo simplificado.

O método estático resulta em forças menores no topo do edifício pois ele não considera a amplificação das forças pela relação entre o modo de vibração e o amortecimento da estrutura. Ele é uma simplificação dos efeitos do vento diretamente aplicados na estrutura com limitações de aplicação quando os efeitos dinâmicos passam a ser significativos a depender das características da estrutura como em edifícios muito altos ou esbeltos. Entretanto costuma apresentar boa correlação para edificações não muito esbeltas.

4.2 Resultados para momento na base

Gráfico 5 - Resultados de momento em relação à base



Fonte: Autor (2025)

O resultado do somatório dos momentos de primeira ordem gerados na base possibilita determinar qual dos métodos considera o efeito mais desfavorável para estrutura. Esses resultados para os métodos estático e dinâmico de 1988 são quase equivalentes considerando os modelos estudados, sendo o dinâmico apenas ligeiramente menor, 7% para o modelo A e 2% para o modelo B, em relação ao método estático.

Entretanto, o método dinâmico de 2023 é, em média, 44,77% maior do que o estático para o modelo A e 44,62% maior para o modelo B. Já, comparando os métodos dinâmicos de 2023 e 1988, o primeiro é 55,62% maior do que o segundo para o modelo A e 47,55% maior para o modelo B. Na prática, o aumento dos fatores dinâmicos da nova norma ocasionou um aumento dos momentos de primeira ordem próximos de 50% (48,14% considerando a média dos dois modelos). A relação entre o método dinâmico de 2023 com o de 1988 e o estático está na tabela

Percebe-se, entretanto, que quanto maior a altura dos modelos menor é a diferença entre os métodos de 1988 e 2023 o que pode ser estudado através da implementação do dimensionamento do vento em edifícios maiores, acima de 100 metros de altura. Através desses resultados é possível estimar que o método dinâmico de 2023 é o mais desfavorável em todas as situações.

Tabela 16 – Comparativo percentual

Modelo	Direção	Dinâmico 2023 / Estático		Dinâmico 2023 / 1988	
A	X	43,68 %	44,77 %	54,46 %	55,62 %
	Y	45,86 %		56,79 %	
B	X	43,32 %	44,62 %	46,22%	47,55 %
	Y	45,92 %		48,88%	

Fonte: Autor (2025)

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conclui-se que os métodos estático e dinâmico para o cálculo da força de arrasto possuem origens semelhantes, porém resultados e aplicações diferentes. O método estático resulta em forças maiores na base do edifício enquanto que o método dinâmico resulta em forças maiores no topo do edifício. Esse efeito se dá pela consideração da amplificação dinâmica, dada pela parcela flutuante do vento, que ocorre onde a amplitude de vibração é maior (topo). Entretanto, os fatores de amplificação da norma de 1988 são consideravelmente baixos. Desse modo, para os modelos estudados com 60 m e 78 m de altura, os métodos estático e dinâmico de 1988 geram momentos na base equivalentes, portanto, não há diferença prática entre eles para as alturas analisadas.

A norma de 2023 trouxe, porém, uma atualização para determinação do fator dinâmico, gerando um aumento considerável das forças geradas pela parcela flutuante do vento. Ao compararmos os resultados entre os métodos dinâmicos de 1988 e 2023, percebemos que a nova versão resulta em um aumento de até 50% dos momentos na base do edifício. Os efeitos dinâmicos, para as alturas estudadas, tornaram-se mais significativos, isso se deve a estudos recentes que buscam aproximar os resultados com métodos mais precisos e normas internacionais.

Por fim, deve-se compreender que os métodos propostos pela ABNT NBR 6123, por mais que baseados em estudos, experimentos e dados estatísticos são estimativas de fenômenos aleatórios e complexos cuja modelagem matemática é aproximada devido ao número de incertezas e características do entorno.

Os estudos sobre o vento ainda seguem, novos métodos e parâmetros continuam a ser desenvolvidos de modo a aproximar ao máximo os efeitos reais. Recomenda-se, portanto, que novos trabalhos na área foquem em experimentos que levem em consideração o efeito de chuvas intensas, de vizinhança e de análises modais para que se possa melhor correlacionar as características dinâmicas da estrutura com a influência das rajadas em condições atípicas de vento. Bem como, recomenda-se que sejam desenvolvidos estudos comparativos entre métodos nacionais e internacionais com simulações em túnel de vento para que se possa validar os valores propostos para amplificação dinâmica.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

BÊNIA, Maria Cristina Dolz. **Determinação dos efeitos de vizinhança na resposta dinâmica de edifícios altos sob a ação do vento**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

BLESSMANN, Joaquim. **Aerodinâmica das construções**. 3. ed. Porto Alegre: Sagra, 1990.

BLESSMANN, Joaquim. **Ação do vento em edifícios**. 2. ed. rev. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 1989. (Série Engenharia Estrutural).

BLESSMANN, Joaquim. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**. 1. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 1998.

BLESSMANN, Joaquim. **O vento na engenharia estrutural**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 1995.

CARPEGGIANI, Elvis Antônio. **Determinação dos efeitos estáticos de torção em edifícios altos devidos à ação do vento**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

DAVENPORT, A. G. Past, present and future of wind engineering. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 90, n. 14, p. 1371-1380, 2002.

DONIN, Christian. **Projeto de Estruturas de Concreto Armado: Parte 3 – Ação do Vento nas Estruturas de Edifícios**. Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), Departamento de Engenharias, Arquitetura e Computação, 2024. Material didático.

GALINDEZ, Enrique E. **Resposta dinâmica de estruturas na direção da velocidade média do vento**. 1979. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1979.

LAVOR, Thiarly Feitosa Afonso. **Análise dinâmica do modelo padrão de edifício alto sob a ação do vento**. 2017. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.

LIMA, Silvio de Souza; SANTOS, Sergio Hampshire de Carvalho. **Análise dinâmica das estruturas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008.

APÊNDICE A – RESULTADOS PARA O MÉTODO ESTÁTICO

Tabela 17 - Valores de q em função da altura - Estático

Cota	Modelo A			Modelo B		
	S_2	V_k (m/s)	q (kN/m ²)	S_2	V_k (m/s)	q (kN/m ²)
0,15	0,45	20,37	0,254	0,45	20,37	0,254
3,15	0,68	30,72	0,579	0,68	30,72	0,579
6,15	0,75	33,63	0,693	0,75	33,63	0,693
9,15	0,79	35,48	0,772	0,79	35,48	0,772
12,15	0,82	36,87	0,833	0,82	36,87	0,833
15,15	0,84	37,98	0,884	0,84	37,98	0,884
18,15	0,86	38,92	0,929	0,86	38,92	0,929
21,15	0,88	39,73	0,968	0,88	39,73	0,968
24,15	0,90	40,45	1,003	0,90	40,45	1,003
27,15	0,91	41,09	1,035	0,91	41,09	1,035
30,15	0,93	41,68	1,065	0,93	41,68	1,065
33,15	0,94	42,22	1,093	0,94	42,22	1,093
36,15	0,95	42,71	1,118	0,95	42,71	1,118
39,15	0,96	43,18	1,143	0,96	43,18	1,143
42,15	0,97	43,61	1,166	0,97	43,61	1,166
45,15	0,98	44,01	1,188	0,98	44,01	1,188
48,15	0,99	44,40	1,208	0,99	44,40	1,208
51,15	0,99	44,76	1,228	0,99	44,76	1,228
54,15	1,00	45,11	1,247	1,00	45,11	1,247
57,15	1,01	45,44	1,266	1,01	45,44	1,266
60,15	1,02	45,75	1,283	1,02	45,75	1,283
63,15				1,02	46,05	1,300
66,15				1,03	46,34	1,317
69,15				1,04	46,62	1,332
72,15				1,04	46,89	1,348
75,15				1,05	47,15	1,363
78,15				1,05	47,40	1,377

Fonte: Autor (2025)

Tabela 18 - Resultados de F_a e M_{1k} por pavimento - Modelo A - Estático

Modelo A		Vento X (0°)			Vento Y (90°)		
		Ca		1,34	Ca		1,24
Pav	q (kN/m ²)	Ae (m ²)	Fa (kN)	M1k (KNm)	Ae (m ²)	Fa (kN)	M1k (kNm)
0	0,254	49,50	16,87	2,53	33,00	10,41	1,56
1	0,579	90,00	69,79	219,83	60,00	43,05	135,62
2	0,693	90,00	83,61	514,17	60,00	51,58	317,20
3	0,772	90,00	93,07	851,62	60,00	57,42	525,37
4	0,833	90,00	100,48	1220,82	60,00	61,99	753,14
5	0,884	90,00	106,65	1615,71	60,00	65,79	996,75
6	0,929	90,00	111,98	2032,41	60,00	69,08	1253,83
7	0,968	90,00	116,70	2468,21	60,00	71,99	1522,68
8	1,003	90,00	120,96	2921,08	60,00	74,62	1802,06

9	1,035	90,00	124,84	3389,43	60,00	77,02	2090,99
10	1,065	90,00	128,42	3871,98	60,00	79,23	2388,69
11	1,093	90,00	131,76	4367,70	60,00	81,28	2694,50
12	1,118	90,00	134,87	4875,69	60,00	83,21	3007,89
13	1,143	90,00	137,81	5395,20	60,00	85,02	3328,39
14	1,166	90,00	140,58	5925,59	60,00	86,73	3655,59
15	1,188	90,00	143,22	6466,27	60,00	88,35	3989,14
16	1,208	90,00	145,73	7016,75	60,00	89,90	4328,74
17	1,228	90,00	148,12	7576,57	60,00	91,38	4674,10
18	1,247	90,00	150,42	8145,33	60,00	92,80	5024,98
19	1,266	90,00	152,63	8722,67	60,00	94,16	5381,15
20	1,283	45,00	77,38	4654,12	30,00	47,73	2871,20

Fonte: Autor (2025)

Tabela 19 - Resultados de F_a e M_{1k} por pavimento - Modelo B - Estático

Modelo B		Vento X (0°)			Vento Y (90°)		
		Ca		1,37	Ca		1,19
Pav	q (kN/m²)	Ae (m²)	Fa (kN)	M1k (kNm)	Ae (m²)	Fa (kN)	M1k (kNm)
0	0,254	49,50	17,25	2,59	33,00	9,99	1,50
1	0,579	90,00	71,35	224,75	60,00	41,32	130,15
2	0,693	90,00	85,48	525,69	60,00	49,50	304,41
3	0,772	90,00	95,16	870,68	60,00	55,10	504,19
4	0,833	90,00	102,73	1248,15	60,00	59,49	722,77
5	0,884	90,00	109,03	1651,88	60,00	63,14	956,56
6	0,929	90,00	114,49	2077,91	60,00	66,30	1203,27
7	0,968	90,00	119,31	2523,47	60,00	69,09	1461,28
8	1,003	90,00	123,66	2986,48	60,00	71,61	1729,40
9	1,035	90,00	127,64	3465,31	60,00	73,91	2006,68
10	1,065	90,00	131,30	3958,67	60,00	76,03	2292,37
11	1,093	90,00	134,71	4465,48	60,00	78,00	2585,85
12	1,118	90,00	137,89	4984,85	60,00	79,85	2886,60
13	1,143	90,00	140,89	5515,99	60,00	81,59	3194,18
14	1,166	90,00	143,73	6058,25	60,00	83,23	3508,18
15	1,188	90,00	146,42	6611,04	60,00	84,79	3828,29
16	1,208	90,00	148,99	7173,84	60,00	86,28	4154,19
17	1,228	90,00	151,44	7746,19	60,00	87,70	4485,63
18	1,247	90,00	153,79	8327,69	60,00	89,06	4822,36
19	1,266	90,00	156,04	8917,95	60,00	90,36	5164,17
20	1,283	90,00	158,22	9516,64	60,00	91,62	5510,85
21	1,300	90,00	160,31	10123,45	60,00	92,83	5862,24
22	1,317	90,00	162,33	10738,10	60,00	94,00	6218,17
23	1,332	90,00	164,29	11360,32	60,00	95,13	6578,48
24	1,348	90,00	166,18	11989,87	60,00	96,23	6943,04
25	1,363	90,00	168,02	12626,53	60,00	97,29	7311,72
26	1,377	45,00	84,90	6635,05	30,00	49,16	3842,19

Fonte: Autor (2025)

APÊNDICE B – RESULTADOS PARA O MÉTODO DINÂMICO DE 1988

Tabela 20 - Valores de q em função da altura – Dinâmico 1988

Cota	Modelo A				Modelo B			
	q0	média	flutuante	q (kN/m ²)	q0	média	flutuante	q (kN/m ²)
0,15	0,59	0,14	0,002	0,044	0,59	0,14	0,002	0,044
3,15	0,59	0,59	0,078	0,198	0,59	0,59	0,064	0,194
6,15	0,59	0,80	0,173	0,290	0,59	0,80	0,144	0,281
9,15	0,59	0,96	0,279	0,369	0,59	0,96	0,231	0,355
12,15	0,59	1,09	0,392	0,443	0,59	1,09	0,325	0,423
15,15	0,59	1,21	0,511	0,513	0,59	1,21	0,424	0,487
18,15	0,59	1,32	0,635	0,581	0,59	1,32	0,526	0,549
21,15	0,59	1,41	0,763	0,648	0,59	1,41	0,633	0,609
24,15	0,59	1,50	0,895	0,714	0,59	1,50	0,742	0,668
27,15	0,59	1,58	1,030	0,779	0,59	1,58	0,854	0,726
30,15	0,59	1,66	1,168	0,843	0,59	1,66	0,968	0,783
33,15	0,59	1,74	1,309	0,907	0,59	1,74	1,085	0,840
36,15	0,59	1,81	1,452	0,971	0,59	1,81	1,203	0,897
39,15	0,59	1,87	1,598	1,034	0,59	1,87	1,324	0,953
42,15	0,59	1,94	1,746	1,098	0,59	1,94	1,447	1,009
45,15	0,59	2,00	1,896	1,161	0,59	2,00	1,571	1,064
48,15	0,59	2,06	2,049	1,224	0,59	2,06	1,698	1,120
51,15	0,59	2,12	2,203	1,287	0,59	2,12	1,825	1,175
54,15	0,59	2,17	2,359	1,351	0,59	2,17	1,954	1,230
57,15	0,59	2,23	2,516	1,414	0,59	2,23	2,085	1,285
60,15	0,59	2,28	2,676	1,477	0,59	2,28	2,217	1,341
63,15					0,59	2,33	2,350	1,396
66,15					0,59	2,38	2,485	1,451
69,15					0,59	2,43	2,621	1,506
72,15					0,59	2,48	2,758	1,561
75,15					0,59	2,53	2,896	1,616
78,15					0,59	2,57	3,035	1,671

Fonte: Autor (2025)

Tabela 21 - Resultados de F_a e M_{1k} por pavimento - Modelo A – Dinâmico 1988

Modelo A		Vento X (0°)			Vento Y (90°)		
		Ca	1,34		Ca	1,24	
Pav	q (kN/m ²)	Ae (m ²)	Fa (kN)	M1k (KNm)	Ae (m ²)	Fa (kN)	M1k (kNm)
0	0,254	49,50	2,90	0,44	33,00	1,79	0,27
1	0,579	90,00	23,91	75,32	60,00	14,75	46,46
2	0,693	90,00	34,96	215,00	60,00	21,57	132,63
3	0,772	90,00	44,52	407,40	60,00	27,47	251,33
4	0,833	90,00	53,40	648,79	60,00	32,94	400,25
5	0,884	90,00	61,87	937,36	60,00	38,17	578,27
6	0,929	90,00	70,09	1272,14	60,00	43,24	784,80
7	0,968	90,00	78,14	1652,56	60,00	48,20	1019,49
8	1,003	90,00	86,06	2078,29	60,00	53,09	1282,13

9	1,035	90,00	93,89	2549,16	60,00	57,92	1572,62
10	1,065	90,00	101,66	3065,09	60,00	62,72	1890,90
11	1,093	90,00	109,38	3626,06	60,00	67,48	2236,97
12	1,118	90,00	117,07	4232,11	60,00	72,22	2610,85
13	1,143	90,00	124,73	4883,31	60,00	76,95	3012,59
14	1,166	90,00	132,38	5579,75	60,00	81,67	3442,23
15	1,188	90,00	140,01	6321,55	60,00	86,38	3899,86
16	1,208	90,00	147,64	7108,82	60,00	91,08	4385,54
17	1,228	90,00	155,26	7941,71	60,00	95,78	4899,36
18	1,247	90,00	162,89	8820,35	60,00	100,49	5441,41
19	1,266	90,00	170,51	9744,91	60,00	105,19	6011,78
20	1,283	45,00	89,07	5357,76	30,00	54,95	3305,28

Fonte: Autor (2025)

Tabela 22 - Resultados de F_a e M_{1k} por pavimento - Modelo B – Dinâmico 1988

Modelo B		Vento X (0°)			Vento Y (90°)		
		Ca		1,37	Ca		1,19
Pav	q (kN/m²)	Ae (m²)	Fa (kN)	M1k (kNm)	Ae (m²)	Fa (kN)	M1k (kNm)
0	0,254	49,50	2,96	0,44	33,00	1,71	0,26
1	0,579	90,00	23,96	75,46	60,00	13,87	43,70
2	0,693	90,00	34,65	213,10	60,00	20,07	123,40
3	0,772	90,00	43,76	400,44	60,00	25,34	231,88
4	0,833	90,00	52,12	633,29	60,00	30,18	366,73
5	0,884	90,00	60,04	909,57	60,00	34,77	526,71
6	0,929	90,00	67,66	1228,03	60,00	39,18	711,12
7	0,968	90,00	75,08	1587,93	60,00	43,48	919,53
8	1,003	90,00	82,35	1988,76	60,00	47,69	1151,64
9	1,035	90,00	89,51	2430,19	60,00	51,83	1407,26
10	1,065	90,00	96,58	2912,02	60,00	55,93	1686,28
11	1,093	90,00	103,59	3434,10	60,00	59,99	1988,60
12	1,118	90,00	110,55	3996,37	60,00	64,02	2314,20
13	1,143	90,00	117,47	4598,79	60,00	68,02	2663,05
14	1,166	90,00	124,35	5241,36	60,00	72,01	3035,14
15	1,188	90,00	131,21	5924,11	60,00	75,98	3430,50
16	1,208	90,00	138,05	6647,06	60,00	79,94	3849,15
17	1,228	90,00	144,87	7410,30	60,00	83,89	4291,12
18	1,247	90,00	151,69	8213,87	60,00	87,84	4756,45
19	1,266	90,00	158,49	9057,86	60,00	91,78	5245,19
20	1,283	90,00	165,29	9942,36	60,00	95,72	5757,38
21	1,300	90,00	172,09	10867,46	60,00	99,65	6293,08
22	1,317	90,00	178,89	11833,25	60,00	103,59	6852,34
23	1,332	90,00	185,68	12839,83	60,00	107,52	7435,23
24	1,348	90,00	192,48	13887,31	60,00	111,46	8041,80
25	1,363	90,00	199,28	14975,78	60,00	115,40	8672,11
26	1,377	45,00	103,04	8052,68	30,00	59,67	4663,11

Fonte: Autor (2025)

APÊNDICE C – RESULTADOS PARA O MÉTODO DINÂMICO DE 2023

Tabela 23 - Valores de q em função da altura – Modelo A – Dinâmico 2023

Modelo A								
Cota	Vento X (0°)				Vento Y (90°)			
Z (m)	q0	média	flutuante	q (kN/m2)	q0	média	flutuante	q (kN/m2)
0,15	0,59	0,14	0,004	0,044	0,59	0,14	0,004	0,044
3,15	0,59	0,59	0,167	0,225	0,59	0,59	0,171	0,226
6,15	0,59	0,80	0,372	0,349	0,59	0,80	0,381	0,352
9,15	0,59	0,96	0,600	0,465	0,59	0,96	0,614	0,469
12,15	0,59	1,09	0,843	0,577	0,59	1,09	0,863	0,583
15,15	0,59	1,21	1,099	0,688	0,59	1,21	1,124	0,696
18,15	0,59	1,32	1,365	0,799	0,59	1,32	1,396	0,808
21,15	0,59	1,41	1,640	0,909	0,59	1,41	1,678	0,920
24,15	0,59	1,50	1,923	1,020	0,59	1,50	1,967	1,033
27,15	0,59	1,58	2,213	1,131	0,59	1,58	2,264	1,146
30,15	0,59	1,66	2,510	1,243	0,59	1,66	2,567	1,260
33,15	0,59	1,74	2,812	1,355	0,59	1,74	2,877	1,374
36,15	0,59	1,81	3,120	1,468	0,59	1,81	3,192	1,489
39,15	0,59	1,87	3,433	1,581	0,59	1,87	3,512	1,604
42,15	0,59	1,94	3,752	1,695	0,59	1,94	3,838	1,721
45,15	0,59	2,00	4,074	1,810	0,59	2,00	4,168	1,838
48,15	0,59	2,06	4,401	1,925	0,59	2,06	4,502	1,955
51,15	0,59	2,12	4,732	2,041	0,59	2,12	4,841	2,073
54,15	0,59	2,17	5,067	2,158	0,59	2,17	5,183	2,192
57,15	0,59	2,23	5,406	2,275	0,59	2,23	5,530	2,312
60,15	0,59	2,28	5,748	2,393	0,59	2,28	5,880	2,432

Fonte: Autor (2025)

Tabela 24 - Valores de q em função da altura – Modelo B – Dinâmico 2023

Modelo B								
Cota	Vento X (0°)				Vento Y (90°)			
Z (m)	q0	média	flutuante	q (kN/m2)	q0	média	flutuante	q (kN/m2)
0,15	0,59	0,14	0,003	0,044	0,59	0,14	0,003	0,044
3,15	0,59	0,59	0,127	0,213	0,59	0,59	0,131	0,214
6,15	0,59	0,80	0,283	0,323	0,59	0,80	0,291	0,325
9,15	0,59	0,96	0,456	0,422	0,59	0,96	0,469	0,426
12,15	0,59	1,09	0,641	0,517	0,59	1,09	0,660	0,522
15,15	0,59	1,21	0,836	0,610	0,59	1,21	0,860	0,617
18,15	0,59	1,32	1,038	0,701	0,59	1,32	1,068	0,710
21,15	0,59	1,41	1,247	0,792	0,59	1,41	1,283	0,803
24,15	0,59	1,50	1,463	0,883	0,59	1,50	1,504	0,895
27,15	0,59	1,58	1,683	0,973	0,59	1,58	1,731	0,987
30,15	0,59	1,66	1,909	1,064	0,59	1,66	1,963	1,080
33,15	0,59	1,74	2,139	1,154	0,59	1,74	2,200	1,172
36,15	0,59	1,81	2,373	1,245	0,59	1,81	2,441	1,265
39,15	0,59	1,87	2,611	1,336	0,59	1,87	2,686	1,358

42,15	0,59	1,94	2,853	1,428	0,59	1,94	2,934	1,452
45,15	0,59	2,00	3,099	1,519	0,59	2,00	3,187	1,545
48,15	0,59	2,06	3,348	1,611	0,59	2,06	3,442	1,639
51,15	0,59	2,12	3,599	1,704	0,59	2,12	3,701	1,734
54,15	0,59	2,17	3,854	1,796	0,59	2,17	3,963	1,829
57,15	0,59	2,23	4,112	1,889	0,59	2,23	4,228	1,924
60,15	0,59	2,28	4,372	1,983	0,59	2,28	4,496	2,020
63,15	0,59	2,33	4,635	2,076	0,59	2,33	4,767	2,116
66,15	0,59	2,38	4,901	2,170	0,59	2,38	5,040	2,212
69,15	0,59	2,43	5,168	2,265	0,59	2,43	5,315	2,309
72,15	0,59	2,48	5,439	2,360	0,59	2,48	5,593	2,406
75,15	0,59	2,53	5,711	2,455	0,59	2,53	5,873	2,503
78,15	0,59	2,57	5,986	2,550	0,59	2,57	6,156	2,601

Fonte: Autor (2025)

Tabela 25 - Resultados de F_a e M_{1k} por pavimento - Modelo A – Dinâmico 2023

Modelo A		Vento X (0°)			Vento Y (90°)		
		Ca	1,34		Ca	1,24	
Pav	q (kN/m²)	Ae (m²)	Fa (kN)	M1k (KNm)	Ae (m²)	Fa (kN)	M1k (kNm)
0	0,254	49,50	2,95	0,44	33,00	1,82	0,27
1	0,579	90,00	27,12	85,41	60,00	16,81	52,96
2	0,693	90,00	42,11	258,99	60,00	26,17	160,94
3	0,772	90,00	56,05	512,85	60,00	34,88	319,17
4	0,833	90,00	69,59	845,56	60,00	43,36	526,84
5	0,884	90,00	82,98	1257,10	60,00	51,75	783,98
6	0,929	90,00	96,30	1747,93	60,00	60,10	1090,90
7	0,968	90,00	109,63	2318,71	60,00	68,47	1448,06
8	1,003	90,00	122,99	2970,17	60,00	76,85	1855,92
9	1,035	90,00	136,39	3703,10	60,00	85,27	2315,00
10	1,065	90,00	149,86	4518,27	60,00	93,72	2825,81
11	1,093	90,00	163,39	5416,47	60,00	102,23	3388,83
12	1,118	90,00	177,00	6398,46	60,00	110,78	4004,57
13	1,143	90,00	190,68	7464,97	60,00	119,37	4673,50
14	1,166	90,00	204,43	8616,75	60,00	128,02	5396,08
15	1,188	90,00	218,26	9854,49	60,00	136,72	6172,78
16	1,208	90,00	232,17	11178,89	60,00	145,46	7004,01
17	1,228	90,00	246,15	12590,61	60,00	154,26	7890,23
18	1,247	90,00	260,21	14090,30	60,00	163,10	8831,83
19	1,266	90,00	274,34	15678,60	60,00	171,99	9829,22
20	1,283	45,00	144,27	8678,06	30,00	90,46	5441,40

Fonte: Autor (2025)

Tabela 26 - Resultados de F_a e M_{1k} por pavimento - Modelo B – Dinâmico 2023

Modelo B		Vento X (0°)			Vento Y (90°)		
		Ca		1,37	Ca		1,19
Pav	q (kN/m ²)	Ae (m ²)	Fa (kN)	M1k (kNm)	Ae (m ²)	Fa (kN)	M1k (kNm)
0	0,254	49,50	2,99	0,45	33,00	1,73	0,26
1	0,579	90,00	26,25	82,70	60,00	15,28	48,13
2	0,693	90,00	39,78	244,65	60,00	23,21	142,72
3	0,772	90,00	52,03	476,05	60,00	30,40	278,18
4	0,833	90,00	63,74	774,39	60,00	37,29	453,13
5	0,884	90,00	75,17	1138,84	60,00	44,03	667,11
6	0,929	90,00	86,46	1569,20	60,00	50,69	920,05
7	0,968	90,00	97,66	2065,60	60,00	57,31	1212,04
8	1,003	90,00	108,83	2628,28	60,00	63,90	1543,28
9	1,035	90,00	119,99	3257,63	60,00	70,50	1913,97
10	1,065	90,00	131,15	3954,03	60,00	77,09	2324,39
11	1,093	90,00	142,32	4717,92	60,00	83,70	2774,79
12	1,118	90,00	153,52	5549,76	60,00	90,33	3265,47
13	1,143	90,00	164,75	6449,98	60,00	96,98	3796,68
14	1,166	90,00	176,02	7419,05	60,00	103,65	4368,72
15	1,188	90,00	187,32	8457,41	60,00	110,34	4981,86
16	1,208	90,00	198,66	9565,52	60,00	117,06	5636,36
17	1,228	90,00	210,05	10743,80	60,00	123,80	6332,50
18	1,247	90,00	221,47	11992,70	60,00	130,57	7070,54
19	1,266	90,00	232,94	13312,64	60,00	137,37	7850,74
20	1,283	90,00	244,46	14704,03	60,00	144,20	8673,34
21	1,300	90,00	256,01	16167,29	60,00	151,05	9538,60
22	1,317	90,00	267,62	17702,82	60,00	157,93	10446,77
23	1,332	90,00	279,26	19311,01	60,00	164,83	11398,07
24	1,348	90,00	290,95	20992,25	60,00	171,76	12392,74
25	1,363	90,00	302,69	22746,92	60,00	178,72	13431,02
26	1,377	45,00	157,23	12287,69	30,00	92,85	7256,56

Fonte: Autor (2025)