



**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO  
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**

**Simone Gruhn**

**AVALIAÇÃO DO CONFORTO HUMANO EM SISTEMAS  
ESTRUTURAIS SUBMETIDOS A VIBRAÇÕES RESULTANTES DA  
AÇÃO DO VENTO**

**Dissertação apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade de Passo Fundo, para obtenção do título de Mestre em Engenharia.**

**Passo Fundo**

**2007**

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**

**Simone Gruhn**

**ORIENTADOR: Professor Moacir Kripka, Dr.**

**CO-ORIENTADOR: Professor Mario José Paluch, Dr.**

**AVALIAÇÃO DO CONFORTO HUMANO EM SISTEMAS  
ESTRUTURAIS SUBMETIDOS A VIBRAÇÕES RESULTANTES DA  
AÇÃO DO VENTO**

**Dissertação apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade de Passo Fundo, para obtenção do título de Mestre em Engenharia.**

**Passo Fundo**

**2007**

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação:**

**“Avaliação do conforto humano em sistemas estruturais submetidos a vibrações  
resultantes da ação do vento.”**

**Elaborada por:**

**Simone Gruhn**

**Como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia**

**Aprovado em: 18/06/2007**  
**Pela Comissão Examinadora**

**Dr. Moacir Kripka**  
**Presidente da Comissão Examinadora**  
**Orientador**

**Dr. Lutgardes de Oliveira Neto**  
**UNESP – Universidade Estadual Paulista Júlio**  
**de Mesquita Filho**

**Dra. Rosa Maria Locatelli Kalil**  
**UPF – Prog. Pós-Graduação em**  
**Engenharia**

**Dr. Mario José Paluch**  
**Coord. Prog. Pós-Graduação em Engenharia**  
**Co-orientador**

**Dr. Acir Mércio Loredo-Souza**  
**UFRGS – Universidade Federal do Rio**  
**Grande do Sul**

**Passo Fundo**  
**2007**

Dedico este trabalho aos meus pais Adalberto Gruhn e Mara Lúcia Gruhn, a minha irmã Mônica Gruhn Germann, aos meus avós paternos Alberto Gruhn (*in memorium*) e Elvira Gruhn (*in memorium*) e aos meus avós maternos, José Prune Cassal (*in memorium*) e Elizabeth Cassal (*in memorium*).

Agradeço...

À Deus, por ter iluminado meu caminho, se fazendo presente em todos os momentos, firmes ou trêmulos.

Aos meus queridos pais, pelo apoio, compreensão e incentivo que sempre me deram.

Ao meu orientador, prof. Moacir Kripka, não apenas por compartilhar seus conhecimentos e sabedoria, pela dedicação durante todo o período de jornada, mas principalmente por partilhar seu caráter e simplicidade.

Ao prof. Mário José Paluch, pela colaboração para o enriquecimento de meu trabalho, através de suas co-orientações.

Ao prof. Acir Mércio Loredo-Souza, pelas dicas fornecidas.

À engenheira e amiga, Juliana Ana Chiarello, por não medir esforços em prestar ajuda.

Aos colegas, amigos e funcionários, que de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

À CAPES, por ser grande incentivadora financeira, me contemplando com bolsa de estudos no início do curso.

Ao engenheiro Fernando Wordell, por fornecer o projeto para estudo.

Enfim, a todos que contribuíram para a viabilização de mais uma etapa importante de minha vida acadêmica e pessoal.

Muito obrigada!

## RESUMO

Em projetos estruturais, é procedimento usual para a análise de estruturas submetidas a ações de caráter dinâmico a consideração de simplificações, assumindo estas ações como de natureza estática. No entanto, com a adoção desse tipo de simplificação, ações capazes de proporcionar desconforto aos usuários não podem ser verificadas. Especialmente em edificações altas e esbeltas, questões relacionadas ao conforto humano podem apresentar grande relevância pelo fato das vibrações proporcionarem, em algumas situações, a falta de concentração no desempenho de atividades, enjôo, além de incertezas relativas à segurança estrutural. O presente trabalho tem como objetivo apresentar procedimentos para a avaliação do conforto humano que sirvam aos profissionais da área para verificação do grau de comodidade das pessoas ocupantes de edifícios altos e esbeltos, bem como os parâmetros de estabilidade global, buscando verificar a correlação destes com a percepção do ocupante. Como estes objetivos foram efetuadas simulações numéricas com cinco estruturas, sendo que uma em particular, executada na cidade de Passo Fundo, no estado do Rio Grande do Sul, apresentando indícios de problemas relativos a desconforto humano causado pela ação do vento. Através de critérios de avaliação do conforto humano da NBR 6123/1987, do Comitê Europeu de Concreto e da ISO 2631-1, foram efetuadas verificações da comodidade para usuários das edificações em estudo, com o auxílio dos programas SAP2000 (Structural Analysis Program) e Eberick. Por meio dos resultados obtidos evidenciou-se que o atendimento aos parâmetros de estabilidade global não dispensa a verificação das condições de conforto humano. Por fim, os estudos realizados destacam a relevância da verificação do conforto aos ocupantes de edifícios altos frente a ações estáticas e dinâmicas.

Palavras-chave: ações dinâmicas, edificações altas e esbeltas, avaliação do conforto humano, estabilidade global.

## ABSTRACT

In structural projects, the action of dynamic character is usual procedure for the analysis of submitted structures the consideration of simplification, assuming these actions as of static nature. However, with the adoption of this type of simplification, actions capable to provide discomfort to the users cannot be verified. Especially in tall and thin buildings, questions related to the human comfort can present great relevance for the fact of the vibrations to provide, in some situations, the lack of concentration in the performance of activities, nausea, beyond relative uncertainties to the structural security. The present work has as objective to present procedures for the evaluation of the human comfort that serve to the professionals of the area for verification of the degree of comfort of the occupying people of tall and thin buildings, as well as parameters of global stability, searching to verify the correlation of these with the perception of the occupant. As these objectives had been effected numerical simulations with five structures, being that one in particular, executed in the city of Passo Fundo, in the state of the Rio Grande do Sul, presenting indications of relative problems the human discomfort caused by the action of the wind. Through criteria of evaluation of the human comfort of NBR 6123/1987, of the European Committee of Concrete and ISO 2631-1, verifications of the comfort for users of the constructions in study had been effected, with I assist it of the programs SAP2000 (Structural Analysis Program) and Eberick. By means of the gotten results it was proven that the attendance to the parameters of global stability does not excuse the verification of the conditions of human comfort. Finally, the carried through studies detach the relevance of the verification of the comfort to the occupants of high buildings front the static and dynamic action.

Keywords: dynamic actions, tall and thin buildings, evaluation of the human comfort, global stability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Componentes básicos de um sistema com um grau de liberdade .....	18
Figura 2: Forças de equilíbrio de um sistema com somente um grau de liberdade.....	18
Figura 3: Movimento harmônico com amplitude constante.....	21
Figura 4: Variação do fator de amplificação .....	22
Figura 5: Freqüência fundamental para edifícios altos.....	24
Figura 6: Esquema para modelo dinâmico discreto.....	28
Figura 7: Linha de demarcação entre estruturas flexíveis e rígidas .....	32
Figura 8: Direções do baricentro dos sistemas de coordenadas para vibrações que influenciam na percepção das pessoas.....	40
Figura 9: Limite de tempos de exposição para aceleração az.....	43
Figura 10: Limite de tempos de exposição para aceleração na direção x e y.....	44
Figura 11: Curva de aceleração az da percepção do ser humano .....	45
Figura 12: Curva de aceleração, na direção x e y, da percepção do ser humano .....	46
Figura 13: Percepção humana a vibrações em edifícios devido à ação do vento.....	47
Figura 14: Planta do pavimento tipo do exemplo 01 .....	51
Figura 15: Corte esquemático da edificação com 10 pavimentos .....	52
Figura 16: Planta do pavimento tipo do exemplo 02.....	57
Figura 17: Planta do pavimento tipo do exemplo 03.....	60
Figura 18: Planta do pavimento tipo do exemplo 04.....	64
Figura 19: Freqüências segundo expressões simplificadas .....	70
Figura 20: Comparação entre freqüências das expressões simplificadas e SAP/2000....	71
Figura 21: Planta do pavimento tipo do exemplo 05.....	73
Figura 22: Vista 3D do exemplo 05 .....	74



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fator estatístico $S_3$ .....	26
Tabela 2 - Expoente p e parâmetro b.....	29
Tabela 3 - Percepção humana para vibrações em edifícios em relação ao vento.....	47
Tabela 4 - Variação da pressão dinâmica com a altura para o exemplo 01.....	53
Tabela 5 - Verificação do conforto humano para edificação com 29 metros de altura...54	
Tabela 6 - Variação da pressão dinâmica com a altura, para o exemplo 02.....	58
Tabela 7 - Verificação do conforto humano para edificação com 58 metros de altura...59	
Tabela 8 - Variação da pressão dinâmica com a altura, para o exemplo 03.....	61
Tabela 9 - Verificação do conforto humano para edificação com 87 metros de altura...62	
Tabela 10 - Variação da pressão dinâmica com a altura, para o exemplo 04.....	66
Tabela 11 - Verificação do conforto humano para edificação com 116 m de altura.....	67
Tabela 12 - Panorama geral dos deslocamentos horizontais para todos os exemplos.....	68
Tabela 13 - Panorama geral da verificação do conforto humano para todas as alturas...68	
Tabela 14 - Variação da pressão dinâmica com a altura, para o exemplo 05.....	76
Tabela 15 - Verificação do conforto humano para edificação com 55,75 m de altura....	76

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras romanas maiúscula

$A_i$	área de influência correspondente à coordenada $i$
$A_0$	área de referência
$C_{ai}$	coeficiente de arrasto correspondente à coordenada $i$
$D$	fator de amplificação dinâmica
$E_{cs} I_c$	representa a somatória dos valores de rigidez de todos os pilares na direção considerada
$F_H$	força atuante na direção horizontal
$H_{tot}$	é a altura total da estrutura, medida a partir do topo da fundação ou de um nível pouco deslocável do subsolo
$M_{I,tot,d}$	momento de tombamento
$N_K$	é o somatório de todas as cargas verticais atuantes na estrutura (a partir do nível considerado para cálculo de $H_{tot}$ ), com seu valor característico
$S_1$	fator topográfico
$S_2$	fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação ou parte da edificação em estudo e de sua altura sobre o terreno (adotado o valor de 0,69)
$S_3$	fator baseado em conceitos probabilístico
$T$	período fundamental
$\bar{V}$	velocidade média do vento com a altura $z$
$V_0$	velocidade básica do vento – velocidade de uma rajada de 3 segundos, a 10 metros acima de terreno de categoria II, com um período médio de recorrência de 50 anos
$\bar{V}_p$	velocidade de projeto
$X$	primeiro modo de vibração
$X_i$	força total devido ao vento na direção da coordenada $i$

$\bar{X}_i$	força média devido ao vento na direção da coordenada $i$
$\hat{X}_i$	componente flutuante devido ao vento na direção da coordenada $i$

### Letras romanas minúsculas

$a$	aceleração máxima
$b$	parâmetro que depende da categoria de rugosidade
$c$	é a constante de amortecimento correspondente ao amortecedor
$f$	freqüência cíclica ou natural
$f_D$	força de amortecimento
$f_I$	força de inércia
$f_S$	força elástica da mola
$h$	altura da edificação acima do terreno
$k$	é a rigidez e corresponde à mola
$m$	é a massa do sistema estrutural submetido a cargas dinâmicas
$m_i$	massa discreta correspondente à coordenada $i$
$m_0$	massa discreta de referência
$n$	é o número de níveis de barras horizontais (andares) acima da fundação ou de um nível pouco deslocável do subsolo
$n$	número de grau de liberdade ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
$p$	expoente dependente da categoria de rugosidade
$p(t)$	carga aplicada em função do tempo
$q$	pressão dinâmica do vento
$\bar{q}_0$	pressão dinâmica inicial do vento
$u$	deslocamento no topo da estrutura
$v$	é o deslocamento da equação do movimento
$\dot{v}$	é a velocidade da equação do movimento
$\ddot{v}$	é a aceleração da equação do movimento

$\omega$	freqüência natural circular
$\bar{\omega}$	freqüência angular de excitação
$x_i$	deslocamento correspondente à coordenada $i$
$z$	cota acima do terreno
$z_i$	altura do elemento $i$ sobre o nível do terreno
$z_r$	altura de referência: $z_r = 10\text{m}$

### Letras gregas

$\alpha$	parâmetro de instabilidade
$\beta$	coeficiente de freqüência
$\gamma$	parâmetro para determinação do efeito dinâmico
$\gamma_z$	coeficiente de avaliação da importância dos esforços de segunda ordem global
$\theta$	ângulo de fase
$\xi$	coeficiente de amplificação dinâmica
$\rho$	amplitude de vibração permanente
$\psi_i$	relação de massa
$\Delta M_{tot,d}$	soma dos produtos de todas as forças verticais atuantes na estrutura, com seus valores de cálculo, pelos deslocamentos horizontais de seus respectivos pontos de aplicação, obtidos da análise de 1ª ordem

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 Considerações iniciais .....	13
1.2 Objetivos.....	14
1.2.1 Objetivo Geral .....	14
1.2.2 Objetivos Específicos .....	15
1.3 Estrutura do trabalho .....	15
<b>2 CONCEITOS BÁSICOS.....</b>	<b>16</b>
2.1 Vibrações.....	16
2.1.1 Generalidades .....	16
2.1.2 Formulação da equação do movimento .....	17
2.1.3 Freqüência natural .....	20
2.1.4 Determinação da freqüência natural de edificações .....	23
2.1.5 Efeitos dinâmicos decorrentes de turbulência atmosférica.....	25
2.1.5.1 Considerações relevantes.....	25
2.1.5.2 Determinação da resposta dinâmica na direção do vento.....	25
2.1.6 Efeitos dinâmicos em edificações esbeltas e flexíveis .....	32
2.2 Parâmetros de instabilidade .....	33
2.2.1 Parâmetro $\alpha$ .....	33
2.2.2 Coeficiente $\gamma z$ .....	34
<b>3 SENSIBILIDADE HUMANA A VIBRAÇÕES.....</b>	<b>36</b>
3.1 Considerações iniciais .....	36
3.2 Fatores que influenciam na percepção da vibração .....	38
3.3 Critérios de avaliação do conforto para sensibilidade humana .....	42
3.3.1 Critério de avaliação da NBR 6123/1987.....	42
3.3.2 Critério de avaliação da ISO 2631/1 e ISO 2631/2 .....	42
3.3.3 Critérios de avaliação do CEB – Boletim 209 /1991.....	47
<b>4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....</b>	<b>48</b>
4.1 Descrição das estruturas do exemplo 01 a 04.....	48
4.1.1 Exemplo 01.....	50
4.1.2 Exemplo 02.....	56
4.1.3 Exemplo 03.....	59
4.1.4 Exemplo 04.....	63
4.2 Exemplo 05 – Edifício Eli .....	71
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>78</b>
5.1 Sugestões .....	79
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>80</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

As décadas de 60 e 70 tiveram forte marco em áreas de pesquisas voltadas ao conforto humano, devido ao surgimento de edifícios altos. Pesquisadores de renome como Chang (1967), em suas publicações, correlacionam a sensibilidade de edifícios altos com a ação do vento. Fazendo uso de normas de projeto (definem faixas de valores que delimitam as diferentes reações humanas relacionadas à sensibilidade ao tempo de exposição às vibrações presentes) e de recomendações técnicas (The Boeing Co.,1961), Chang (1967) avalia níveis de perturbação a que as pessoas ocupantes de edifícios altos estariam submetidas. (CHANG apud MOREIRA, 2002, p. 3).

Desde então, transcorrem diversos trabalhos nessa linha de pesquisa, podendo citar-se novamente Chang (1973), abordando problemas apontados por Field (1971) no World Trade Center, relativos ao desconforto de ocupantes sob vibrações induzidas pelo vento. Outros estudos foram surgindo, motivados por outras áreas de aplicação, sejam automobilística, aeronáutica, naval, entre outras, dando origem ao nascimento das recomendações internacionais propostas pela ISO 2631-1 (1985) e, a posteriori, pela ISO 2631-2 (1989). (CHANG apud MOREIRA, 2002, p. 3-4).

O progresso científico e tecnológico que proporcionou construções verticais cada vez mais altas e flexíveis, em ascensão desde a época de Chang, trouxe consigo o surgimento de problemas causados por cargas dinâmicas, por produzirem na estrutura um comportamento não-linear e, ao contrário do que se verifica nas estruturas convencionais, maior sensibilidade a vibrações.

O cenário existente na construção civil de edifícios comerciais e/ou residenciais na cidade de Passo Fundo, no estado do Rio Grande do Sul, foi estimulado pelo Plano Diretor de 1984, através do aproveitamento máximo de cotas, com a crescente verticalização de edificações.

Com isso, o vento passou a ser um fator importante a ser considerado na análise estrutural, por ocasionar oscilações indesejáveis a segurança da edificação e ao conforto humano.

No campo da engenharia é usual se deparar com efeitos puramente dinâmicos, ou seja, que apresentam variação com o tempo. Em projetos estruturais, é comum se admitirem diversas hipóteses simplificadoras (devido às dificuldades existentes para a inclusão de cargas variáveis no tempo e posterior verificação das respostas estruturais), garantindo que estruturas altas sejam projetadas de modo que estejam dentro de um limite aceitável de vibrações para que não comprometam o perfeito funcionamento e a segurança estrutural. No entanto, a consideração de simplificações nem sempre é uma boa alternativa, pois ações dinâmicas capazes de proporcionar desconforto aos usuários não podem ser verificadas. Por mais que estejam dimensionadas de modo correto, atendendo aos requisitos referentes ao estado de ruína, as estruturas de edifícios podem, ainda assim, estar susceptíveis a vibrações que proporcionem desconforto humano, causando problemas de saúde, desempenho insatisfatório de atividades pela falta de concentração, enjôo, além de fatores relativos à insegurança quanto à estabilidade da estrutura.

Avaliar o nível de desconforto dos ocupantes de edifícios altos, provocado por vibrações, pode ser uma tarefa subjetiva, haja vista que envolve variáveis como a frequência da oscilação, a aceleração, o tipo de atividade que a pessoa esteja realizando, a direção que atinge o corpo humano, a quantidade de vezes que o evento ocorre por dia, o tempo de exposição à vibração e a expectativa de percepção de cada pessoa.

O domínio de efeitos aerodinâmicos sobre edificações altas não apresenta um patamar totalmente satisfatório, e os profissionais do ramo não dispõem e fazem uso de métodos simples e eficazes para verificação do conforto humano. Neste sentido, buscam-se estudos que conduzam o engenheiro a desenvolver projetos que verifiquem, de modo geral, problemas de vibração dos pavimentos impróprios ao bem estar do usuário.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O presente trabalho tem como objetivo geral apresentar e analisar métodos e parâmetros de projeto visando a avaliação do conforto humano em estruturas altas submetidas a vibrações decorrentes da ação do vento.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Apresentar os parâmetros  $\alpha$  e  $\gamma_z$  para a verificação da estabilidade de estruturas;
- apresentar os principais critérios encontrados na literatura para a determinação do grau de conforto do usuário devido a vibrações decorrentes da ação do vento;
- propor um procedimento para, de maneira simples, propiciar a verificação do conforto mediante ações de caráter dinâmico em edifícios altos;
- verificar a correlação entre o atendimento aos parâmetros de estabilidade global de edificações e o nível de conforto do usuário.

### 1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho se encontra dividido em 5 capítulos.

No primeiro é apresentado o assunto que motivou o estudo, bem como os objetivos do trabalho.

No capítulo 2 estão expostos conceitos básicos relativos a dinâmica estrutural e aos parâmetros de estabilidade global, e que servem como embasamento para o capítulo subsequente.

O terceiro capítulo trata de conceitos relacionados à sensibilidade humana a vibrações estruturais e apresenta os métodos utilizados para avaliação do conforto aos ocupantes.

No quarto capítulo são feitas as apresentações e análises dos exemplos estudados, aplicando os métodos apresentados no capítulo 3.

Por fim, no último capítulo, são apresentadas as conclusões relativas aos resultados obtidos na aplicação dos métodos e determinação dos parâmetros de estabilidade global.



## 2 CONCEITOS BÁSICOS

### 2.1 Vibrações

#### 2.1.1 Generalidades

Vibrações são movimentos presentes na vida cotidiana das pessoas, seja através de veículos trafegando, impactos de objetos, ação dinâmica do vento, entre outros fatores. A conceituação de vibração pode ser entendida como o equivalente a um corpo que descreve um movimento oscilatório em volta de um ponto fixo. Uma maneira fácil de se entender o movimento vibratório é através de um pêndulo, corda de instrumento musical, corpo em movimento e até mesmo do átomo. O modelo vibratório é caracterizado pelo deslocamento ao longo do tempo, com a troca de energia potencial por cinética e vice-versa, resultando em movimento oscilatório. (VENDRAME, 2005, p.1)

A vibração pode assumir dois padrões, quais sejam, determinística ou aleatória. Se ela é determinística, o valor da vibração, para qualquer tempo futuro designado, é completamente previsível da história passada. Se a vibração é aleatória, o seu valor futuro é imprevisível, com exceção de probabilidades.

Em edifícios a vibração estrutural pode ser definida em função de seu comportamento ao longo do tempo: transitória ou impulsiva, intermitente ou contínua. Vibração transitória ou impulsiva se caracteriza por rápida formação de um pico com posterior decaimento, envolvendo ou não vários ciclos de vibração, dependendo da frequência e do amortecimento. Já a intermitente ocorre quando existe uma seqüência de vibrações incidentes, cada qual de curta duração, afastadas por intervalos de vibrações de níveis muito menores. Vibrações intermitentes podem ser estimuladas por fontes de impulsos (como bate-estacas ou prensas de forja) ou fontes repetitivas (como quebradores de pavimentos) ou fontes que operam intermitentemente, mas que se operassem continuamente produziriam vibrações contínuas

(como máquinas intermitentes, aparelhos de elevação, trens ferroviários e tráfego rodoviário). A vibração contínua é aquela que permanece ininterrupta durante o período em consideração. (CUNHA, 2001, p. 4)

Vibração forçada existe quando forças externas estão atuando no sistema durante o seu movimento de vibração. Na vibração forçada, o sistema irá seguir a frequência da força de excitação e tenderá a vibrar com uma frequência natural própria. A parte do movimento que não é sustentada pela força de excitação senoidal gradualmente desaparecerá devido à presença de atrito diminuindo o movimento e causando eventual parada da oscilação (amortecimento). (1971, p.3).

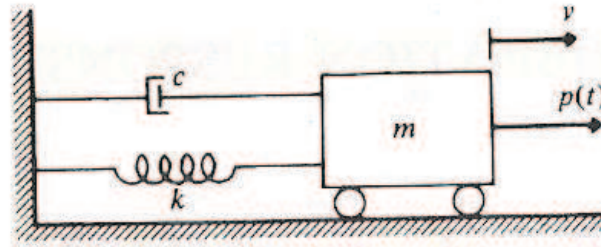
Em resposta a isso, o sistema vibrará na frequência da força de excitação sem se considerarem as condições iniciais ou a frequência natural do sistema. A parcela de vibração persistente é chamada de vibração permanente ou resposta estacionária do sistema. (SETO, 1971, p.2)

Os acréscimos de altura em edifícios são acompanhados pelo aumento da flexibilidade e pela falta de amortecimento satisfatório, aumentando sua susceptibilidade às ações do vento. Quando as principais inovações em sistemas estruturais permitiram aumento das cargas laterais, a natureza dinâmica do vento acabou sendo um fator que causou desconforto aos ocupantes de edifício e possibilitou problemas estruturais. Houve medidas mitigadoras, para edifícios altos, de tais deslocamentos induzidos pelo vento, através das modificações de projetos globais à aerodinâmica estrutural do sistema e a incorporação de amortecedor auxiliar no sistema, assim como técnicas para reduzir a intensidade dos ventos em estruturas, particularmente aqueles que afetam o conforto do ocupante. As estratégias que são consideradas no estudo de Kareem et al (2005, p. 1) incluem fator aerodinâmico e uma discussão de sistema de amortecimento auxiliar. Técnicas mitigadoras de deslocamentos induzidos pela ação do vento possuem aplicação na Austrália, Canadá, China, Japão e Estados Unidos, entre outros. Os dispositivos auxiliares de amortecimento ganharam também muito reconhecimento por seu desempenho em regiões sísmicas.

### **2.1.2 Formulação da equação do movimento**

As propriedades físicas essenciais de todo o sistema estrutural linear elástico submetido às cargas dinâmicas incluem sua massa, suas propriedades elásticas (flexibilidade ou rigidez), seu mecanismo de perda de energia, ou amortecimento, e a fonte externa da excitação ou carregamento (CLOUGH & PENZIEN, 1986, p. 17-18). Em um modelo mais simples de um

sistema de um único grau de liberdade, cada uma destas propriedades é admitida para ser concentrada em um único elemento físico. Um esboço de tal sistema é mostrado na Figura 1.

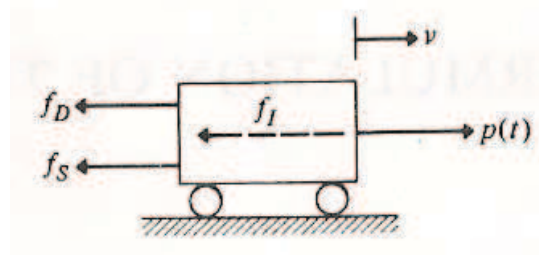


Fonte: Clough, R. W.; Penzien, J., 1986, p. 18.

Figura 1 – Componentes básicos de um sistema com um grau de liberdade.

Toda a massa  $m$  deste sistema é representada pelo bloco rígido. Os rolos confinam este bloco de modo que possa se mover somente na translação simples. Assim, a única coordenada  $v$  de deslocamento define completamente sua posição. A resistência elástica ao deslocamento está fornecida pela mola de rigidez  $k$ , quando o mecanismo de perda de energia for representado pela constante de amortecimento  $c$ . O mecanismo do carregamento externo que produz a resposta dinâmica deste sistema é a carga  $p(t)$  variando com o tempo.

A equação do movimento para o sistema da Figura 1 pode ser formulada expressando o equilíbrio de todas as forças que agem na massa. A Figura 2 ilustra as forças que agem no sentido do deslocamento, incluindo a carga aplicada  $p(t)$  e três forças resultando de movimento, inércia  $f_I$ , amortecimento  $f_D$ , e a força elástica da mola  $f_S$ .



Fonte: Clough, R. W.; Penzien, J., 1986, p. 18.

Figura 2 – Forças de equilíbrio de um sistema com somente um grau de liberdade.

A equação do movimento é assim expressa:

$$f_I + f_D + f_S = p(t) \quad (1)$$

Cada uma das forças representadas no lado esquerdo desta equação é uma função do deslocamento  $v$  ou de suas derivadas. O sentido positivo destas forças foi escolhido deliberadamente para corresponder com o sentido negativo do deslocamento; assim opõem as cargas aplicadas positivas.

Deve-se considerar primeiramente a força elástica dada pelo produto da rigidez da mola e do deslocamento:

$$f_S = kv \quad (2)$$

Similarmente, pelo Princípio de Alembert, a força de inércia é o produto da massa e a aceleração  $\ddot{v}$ :

$$f_I = m\ddot{v} \quad (3)$$

Finalmente, se um mecanismo viscoso de amortecimento é assumido, a força de amortecimento é o produto da constante de amortecimento  $c$  e a velocidade  $\dot{v}$ :

$$f_D = c\dot{v} \quad (4)$$

Quando as equações (2) a (4) são introduzidas na equação (1), a equação do movimento de um sistema de um grau de liberdade é formada:

$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) = p(t) \quad (5)$$

A solução da equação (5) pode ser obtida considerando primeiramente a equação homogênea com o termo a direita igual a zero:

$$m \ddot{v}(t) + c \dot{v}(t) + kv(t) = 0 \quad (6)$$

Com a condição inicial da força aplicada igual a zero, o sistema passa a apresentar um movimento livre amortecido. Caso  $p(t) = 0$  e  $c = 0$ , o sistema apresentaria uma vibração livre não amortecida, expresso por

$$m \ddot{v}(t) + kv(t) = 0 \quad (7)$$

### 2.1.3 Freqüência natural

Conceitualmente, pode-se definir freqüência como o número de ciclos por unidade de tempo, e período como o tempo necessário para um movimento periódico tornar a repetir-se.

A freqüência que apresenta uma vibração livre sem a presença de atrito é denominada freqüência natural. Já a freqüência que possui uma vibração livre, porém com atrito, é denominada freqüência natural amortecida.

A freqüência natural circular ou a velocidade angular do movimento  $\omega$  é expressa em radianos por unidade de tempo, usualmente radianos por segundo (rad/s). É obtida a partir da solução da equação (7):

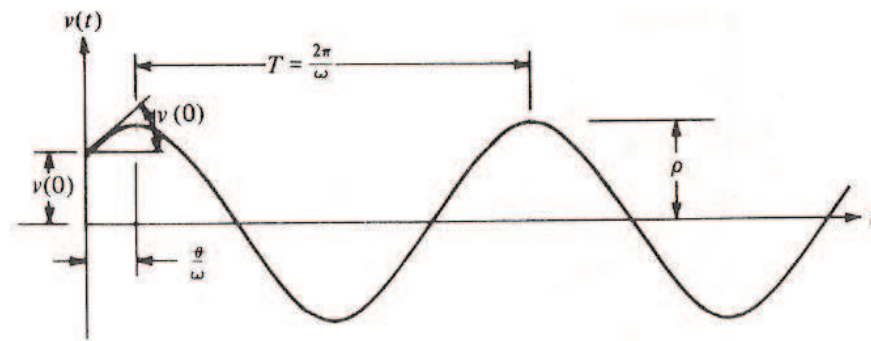
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (8)$$

A freqüência cíclica  $f$ , que usualmente se refere com a freqüência do movimento, é expressa em Hertz (Hz), e é dada por

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (9)$$

O período é definido por:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f} \quad (10)$$



Fonte: Clough, R. W.; Penzien, J., 1986, p. 43.

Figura 3 – Movimento harmônico com amplitude constante

O movimento harmônico (Figura 3) pode ser representado pela seguinte equação:

$$v(t) = \rho \cos(\omega t - \theta) \quad (11)$$

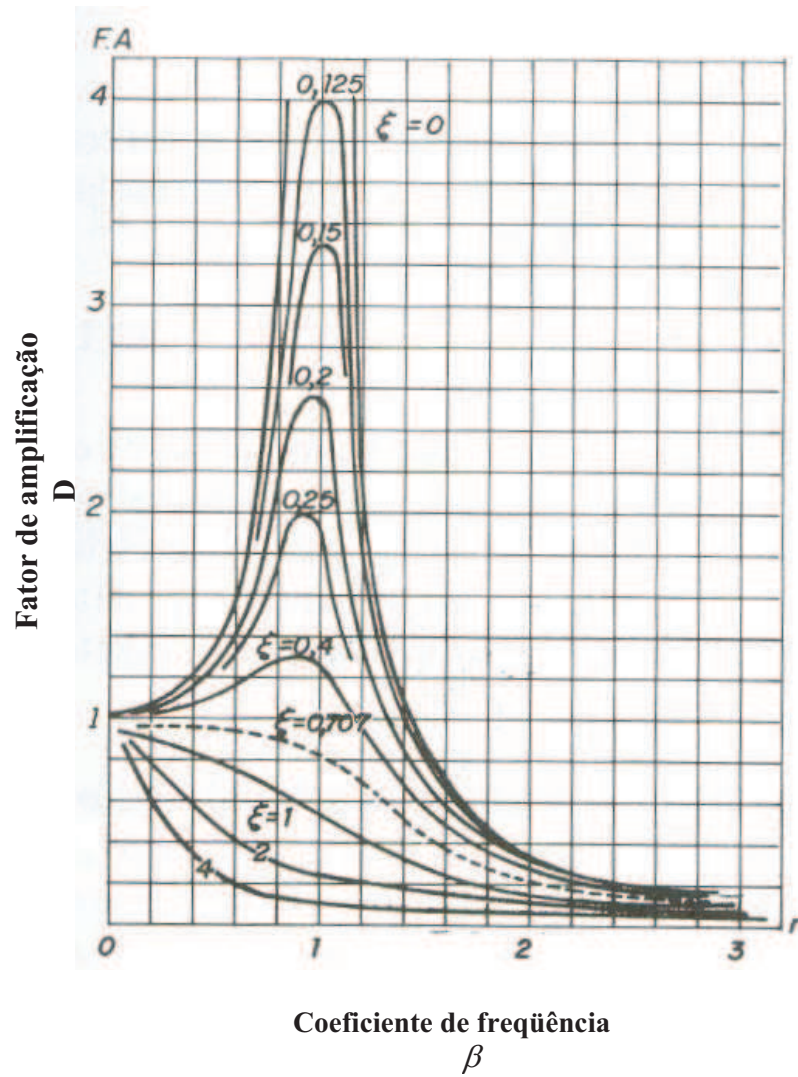
sendo:

$\rho$  : amplitude;

$\theta$  : ângulo de fase.

Quando o amortecimento estiver muito baixo e a amplitude da vibração aumentar sem limites é porque a frequência de excitação está igualada a frequência natural, e diz-se que o sistema apresenta ressonância. Portanto é de extrema importância o conhecimento da frequência natural do sistema para segurança da estrutura contra desastres resultantes de grandes amplitudes.

A Figura 4 representa o fator de amplificação dinâmico  $D$  variando com a frequência  $\beta$  e amortecimento  $\xi$ .



Fonte: Alvarez, R. A., 1981, p. XXI.27

Figura 4 – Variação do fator de amplificação.

Tem-se:

$$D = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\beta\xi)^2}} \quad (12)$$

$$\beta = \frac{\bar{\omega}}{\omega} \quad (13)$$

onde:

$\bar{\omega}$  : frequência angular da excitação;

$\omega$  : frequência angular.

No caso de ressonância ( $\beta = 1$ ), o fator de amplificação é inversamente proporcional ao coeficiente de amortecimento para excitação harmônica ( $D=1/2\xi$ ). Para  $\xi > 0,707$  todos os valores de fator de amplificação resultam inferiores à unidade. (ALVAREZ, 1981, p. XXI.27).

Segundo Alvarez (1981, p. XXI.27), na equação do fator de amplificação o primeiro termo tende a aumentar o deslocamento dinâmico em relação ao estático ( $\beta\sqrt{2}$ ), e o segundo termo tende a diminuir.

#### 2.1.4 Determinação da frequência natural de edificações

A frequência fundamental de um edifício depende sobretudo de sua altura. Uma estimativa da frequência fundamental é possível usando a expressão (HIRSCH & BACHAMANN apud CEB, 1991, p. 80)

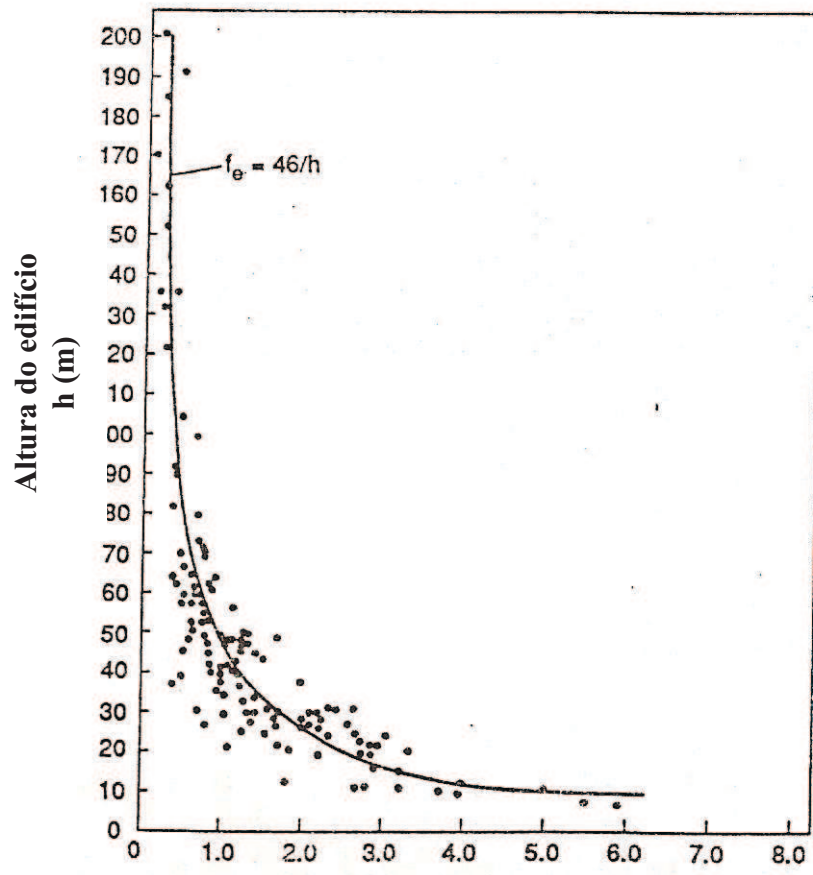
$$f(Hz) = 0,4 \cdot \left( \frac{100}{h} \right)^{1,6} \quad (14)$$

onde:

$h$ : altura do edifício (m).

A Figura 5 mostra que os valores dados pela equação (15), para resultados de frequência fundamental, nivelam com medições experimentais ou estimativas teóricas por meio de programas computacionais para análise de vibrações livres de edifícios altos. (HIRSCH & BACHAMANN apud CEB, 1991, p. 82).





### Frequência de translação fundamental $f$ (Hz)

Fonte: Hirsch, G.; Bachmann, H. apud CEB, 1991, p. 81.

Figura 5 – Frequência fundamental para edifícios altos.

Já é claro que, o comportamento dinâmico de uma edificação que sofre a ação do vento depende de fatores referentes à dimensão, altura e ainda taxas de amortecimento desta edificação. Portanto, a percepção a oscilações é diretamente proporcional a altura, ou seja, edifícios mais altos apresentam um nível de sensibilidade superior. A equação (14) foi obtida unicamente com a informação da altura do edifício. Para combater o desconforto dos usuários é fundamental aumentar a rigidez lateral desse tipo de estrutura. A formulação (15) é similar a dada na equação (14).

$$f(\text{Hz}) = \frac{46}{h} \quad (15)$$

Como visto, a frequência natural é função inversa do período. Assim, de forma alternativa, a estimativa do período é determinada pela norma de forças devidas ao vento em edificações (NBR 6123/1987). Por exemplo, para uma edificação com estrutura apertada de concreto, sem cortinas:

$$T = 0,05 + 0,015.h \quad (16)$$

## 2.1.5 Efeitos dinâmicos decorrentes de turbulência atmosférica

### 2.1.5.1 Considerações relevantes

As rajadas são designadas pelo vento natural onde o módulo e a orientação da velocidade instantânea do ar possuem flutuações em torno da velocidade média  $\bar{V}$ . Considera-se a velocidade média constante durante um intervalo de tempo de dez minutos ou mais, produzindo nas estruturas efeitos puramente estáticos denominados como resposta média. As flutuações da velocidade podem levar edificações mais flexíveis, especialmente se as mesmas forem altas e esbeltas, a oscilações importantes da velocidade média, chamadas de resposta flutuante.

A influência da resposta flutuante é pequena nos casos em que o período fundamental  $T_1$  é igual ou inferior a um segundo, já sendo considerados os efeitos na determinação do intervalo de tempo para o fator  $S_2$  (fator que leva em consideração a rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno). Porém, essa resposta flutuante na direção do vento médio é importante se o período fundamental é superior a um segundo, em especial as estruturas fracamente amortecidas. (NBR 6123, 1987, p. 48).

### 2.1.5.2 Determinação da resposta dinâmica na direção do vento

#### Velocidade de projeto

A velocidade de projeto,  $\bar{V}_P$ , correspondente à velocidade média sobre 10 minutos a uma altura do solo de 10 m, em terreno de categoria II, é obtida por (NBR 6123, 1987, p. 48-49):

$$\bar{V}_p = .V_0.S_1.S_2.S_3 \quad (17)$$

onde:

$V_0$ : velocidade básica do vento – velocidade de uma rajada de 3 segundos, a 10 metros acima de terreno de categoria II, com um período médio de recorrência de 50 anos;

$S_1$ : Fator topográfico;

$S_2$ : Fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação ou parte da edificação em estudo e de sua altura sobre o terreno (adotado o valor de 0,69);

$S_3$ : Fator baseado em conceitos probabilístico (Tabela 1). O fator usual para velocidade de projeto estrutural é igual a 1,0, considerando a probabilidade de 63% da velocidade básica do vento ser igualada ou excedida em um período de recorrência de 50 anos.

Tabela 1 – Fator estatístico  $S_3$

m	Probabilidade $P_m$ (%)					
	10	20	50	63	75	90
2	0,86	0,76	0,64	0,60	0,57	0,53
10	1,10	0,98	0,82	0,78	0,74	0,68
25	1,27	1,13	0,95	0,90	0,85	0,79
50	1,42	1,26	1,06	1,00	0,95	0,88
100	1,58	1,41	1,18	1,11	1,06	0,98
200	1,77	1,57	1,31	1,24	1,18	1,09

Fonte: NBR 6123, 1987, p. 62.

## Características dinâmicas da estrutura

### **Modelo contínuo simplificado:**

Este modelo pode ser adotado quando a edificação apresentar uma distribuição aproximadamente uniforme de sua massa e seção constante. No método contínuo simplificado é considerada apenas a contribuição do modo fundamental na resposta dinâmica, e é aplicável a estruturas com altura inferior a 150 metros e apoiadas unicamente na base. Em geral a retenção só do primeiro modo na solução conduz a erros inferiores a 10%. (NBR 6123, 1987, p. 49).

A equação (18) expressa o primeiro modo de vibração:

$$X = (z / h)^\gamma \quad (18)$$

onde:

$z$ : cota acima do terreno;

$h$ : altura da edificação acima do terreno.

$\gamma$ : parâmetro para determinação do efeito dinâmico.

### **Modelo discreto:**

No caso de uma estrutura com propriedades variáveis com a altura, esta deve ser representada por meio de um modelo discreto, conforme a Figura 6, no qual:

$x_i$ : deslocamento correspondente à coordenada  $i$ ;

$A_i$ : área de influência correspondente à coordenada  $i$ ;

$m_i$ : massa discreta correspondente à coordenada  $i$ ;

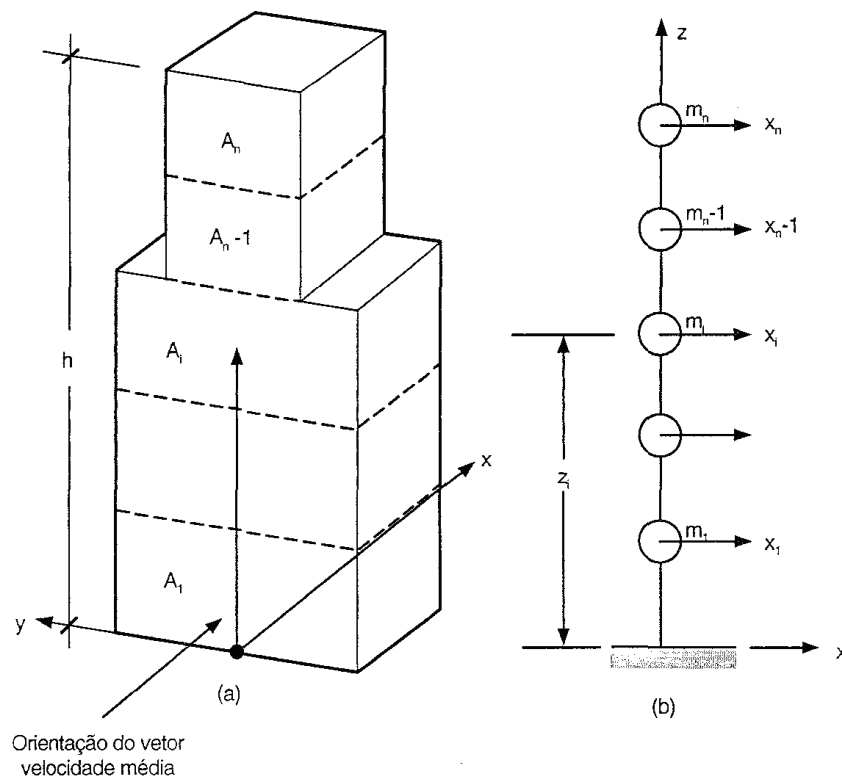
$C_{ai}$ : coeficiente de arrasto correspondente à coordenada  $i$ ;

$z_i$ : altura do elemento  $i$  sobre o nível do terreno;

$z_r$ : altura de referência:  $z_r = 10$  m;

$n$ : número de grau de liberdade ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

No caso de estruturas verticais com um plano de simetria,  $n$  é também igual ao número de elementos em que for dividida a mesma (ver Figura 6).



Fonte: Blessmann; J., 2005, p.103.

Figura 6 – Esquema para modelo dinâmico discreto

Segundo a NBR 6123, edificações que apresentem variações importantes em suas características devem apresentar um número maior de elementos. Mas, em geral, para se obter a precisão adequada nos resultados, um modelo com  $n = 10$  é suficiente.

Estabelecido o modelo da estrutura, devem ser determinados, empregando métodos da teoria de vibrações de estruturas, a frequência natural  $f_j$  (Hz) e a forma modal  $\vec{x}_j$  correspondentes ao modo  $j$ , para  $j = 1, 2, \dots, r$ , sendo  $r < n$  o número de modos que serão

retidos na solução. A retenção de um único modo ( $r = 1$ ) é normalmente suficiente, com exceção de edificações muito esbeltas e/ou com rigidez fortemente variável, como foi indicado anteriormente. Nestes casos devem ser consideradas sucessivamente as contribuições dos modos 1, 2, etc, até o momento em que as forças equivalentes associadas ao último modo calculado ( $j = r$ ) sejam desprezáveis. (NBR 6123, 1987, p. 49-50).

### **Cálculo da resposta dinâmica na direção do vento**

#### **Método contínuo simplificado**

A determinação da variação da pressão dinâmica com a altura é obtida através da equação (19):

$$q(z) = \bar{q}_0 b^2 \left[ \left( \frac{z}{z_r} \right)^{2p} + \left( \frac{h}{z_r} \right)^p \cdot \left( \frac{z}{h} \right)^\gamma \cdot \frac{1 + 2\gamma}{1 + \gamma + p} \cdot \xi \right] \quad (19)$$

onde:

$\bar{q}_0$ : pressão dinâmica inicial do vento;

$b$ : parâmetro que depende da categoria de rugosidade (Tabela 2);

$p$ : expoente dependente da categoria de rugosidade (Tabela 2);

$\xi$ : coeficiente de amplificação dinâmica.

Tabela 2 – Expoente p e parâmetro b

<b>Categoria de rugosidade</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>
<b>p</b>	0,095	0,15	0,185	0,23	0,31
<b>b</b>	1,23	1,00	0,86	0,71	0,50

Fonte: NBR 6123, 1987, p. 51.

Na equação (19) o primeiro e o segundo termos dentro dos colchetes correspondem respectivamente à resposta média (pressão estática) e à amplitude máxima da resposta flutuante (pressão flutuante), onde:

$$\overline{q_0} = 0,613.\overline{V_p}^2 \quad (20)$$

sendo  $\overline{q_0}$  expresso em N/m<sup>2</sup> e  $\overline{V_p}$  em m/s.

Por meio da categoria de rugosidade do terreno é obtido o coeficiente b e o expoente p. O coeficiente de amplificação dinâmica  $\xi$  é apresentado no gráfico das Figuras 14 a 18 da NBR 6123 (1987, p. 51), para as cinco categorias de rugosidade de terreno, e é função das dimensões da estrutura, da razão de amortecimento crítico  $\zeta$  e da frequência  $f$ . Seu valor pode ser determinado através da relação:

$$\frac{\overline{V_p}}{f.L} \quad (21)$$

sendo:

$L$ : dimensão característica utilizada na determinação na determinação do coeficiente de amplificação dinâmica ( $L = 1800$  m).

### Modelo discreto

Para a determinação das contribuições modais, a força total  $X_i$  devida ao vento na direção da coordenada i, com componentes  $(X_i)_j = X_i$  para cada modo de vibração j, é dada por:

$$X_i = \overline{X}_i + \hat{X}_i \quad (22)$$

onde a força média é expressa por:

$$\bar{X}_i = q_0 \cdot b^2 \cdot C_{ai} \cdot A_i \cdot \left( \frac{z_i}{z_r} \right)^{2p} \quad (23)$$

onde:

$A_i$ : área de influência correspondente à coordenada  $i$ .

A componente flutuante  $\hat{X}_i$  é dada por:

$$\hat{x}_i = F_H \cdot \psi_i \cdot x_i \quad (24)$$

onde:

$F_H$ : força atuante na direção horizontal;

$\psi_i$ : relação de massa.

sendo:

$$\psi_i = \frac{m_i}{m_0} \quad (25)$$

onde:

$m_i$ : massa discreta correspondente à coordenada  $i$ ;

$m_0$ : massa discreta de referência.

$$F_H = \bar{q}_0 \cdot b^2 \cdot A_0 \frac{\sum_{i=1}^N \beta_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^N \psi_i \cdot x_i^2} \xi \quad (26)$$

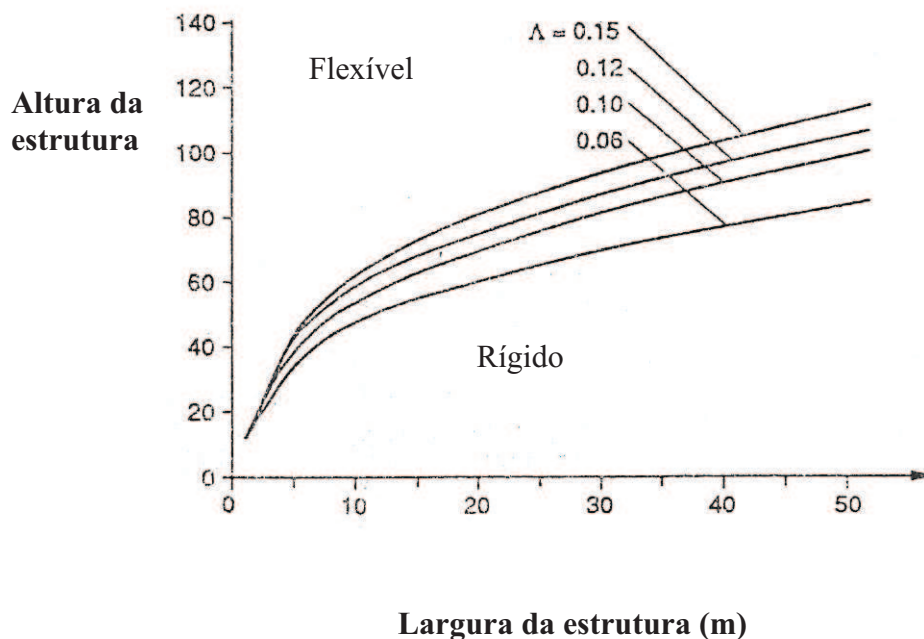


$$\beta_i = C_{ai} \frac{A_i}{A_0} \left( \frac{z_i}{z_r} \right)^p \quad (27)$$

Nas equações anteriores,  $m_0$  e  $A_0$  assumem respectivamente uma massa e uma área arbitrárias de referência. O coeficiente de amplificação dinâmica ( $\xi$ ) pode ser determinado por meio de gráficos, através de interpolação ou extrapolação. (NBR 6123, 1987, p.51).

### 2.1.6 Efeitos dinâmicos em edificações esbeltas e flexíveis

Algumas edificações quando submetidas à ação do vento apresentam comportamento puramente dinâmico, por serem esbeltas e flexíveis. As dimensões da estrutura, o amortecimento presente, a rigidez e também o tipo de material empregado são fatores que influenciam na resposta dinâmica da edificação à excitação do vento. Para melhorar o conforto do usuário é importante a análise da estabilidade da edificação, através de estudos aprofundados no âmbito experimental ou matemático.



Fonte: Hirsch, G.; Bachmann, H., CEB, 1991, p. 80.

Figura 7 – Linha de demarcação entre estruturas flexíveis e rígidas. ( $\Lambda$  = decremento logarítmico).

De forma geral, edifícios de altura  $h$  maior que aproximadamente 50 metros podem ser considerados como flexíveis. (HIRSCH & BACHMANN apud CEB, 1991, p. 80).

## 2.2 Parâmetros de instabilidade

A estabilidade global de uma estrutura é associada à capacidade de transmitir com segurança, incluindo os efeitos de segunda ordem, as ações laterais, para a fundação e apresentar rigidez suficiente para limitar o movimento devido a estas ações. (EL DEBS, 2000, p. 98).

Para estruturas de concreto armado, a NBR 6118 (2003, p. 75) apresenta os parâmetros  $\alpha$  e  $\gamma_z$ , que verificam a estabilidade e, de modo indireto, a condição de que os efeitos de 2ª ordem não ultrapassem em mais de 10% aqueles calculados pela análise estática linear de 1ª ordem. Assim, é possível considerar a estrutura suficientemente rígida e com nós indeslocáveis. Caso contrário, a análise de 2ª ordem é indispensável.

### 2.2.1 Parâmetro $\alpha$

Segundo a NBR 6118/2003 a condição para que uma estrutura reticulada simétrica possa ser considerada como sendo de nós fixos é se seu parâmetro de instabilidade  $\alpha$  for menor que o valor  $\alpha_1$ , conforme a expressão

$$\alpha = H_{tot} \sqrt{\frac{N_K}{(E_{CS} \cdot I_C)}} \quad (28)$$

onde:

$$\alpha_1 = 0,2 + 0,1n \quad \text{se: } n \leq 3$$

$$\alpha_1 = 0,6 \quad \text{se: } n \geq 4$$

sendo:

$n$  é o número de níveis de barras horizontais (andares) acima da fundação ou de um nível pouco deslocável do subsolo;

$H_{tot}$  é a altura total da estrutura, medida a partir do topo da fundação ou de um nível pouco deslocável do subsolo;

$N_K$  é o somatório de todas as cargas verticais atuantes na estrutura (a partir do nível considerado para cálculo de  $H_{tot}$ ), com seu valor característico;

$E_{cs} I_c$  representa a somatória dos valores de rigidez de todos os pilares na direção considerada. No caso de estruturas de pórticos, de treliças ou mistas, ou com pilares de rigidez variável ao longo da altura, pode ser considerado o valor da expressão  $E_{cs} I_c$  de um pilar equivalente de seção constante.

O valor de  $I_c$  deve ser calculado levando em conta as dimensões brutas dos pilares.

A determinação da rigidez do pilar equivalente é feita da seguinte forma:

- determinar através de cálculo o deslocamento do topo da estrutura de contraventamento, sob a ação do carregamento horizontal;
- calcular a rigidez de um pilar equivalente de seção constante, engastado na base e livre no topo, de mesma altura  $H_{tot}$ , tal que, sob a ação do mesmo carregamento, sofra o mesmo deslocamento no topo.

O valor limite  $\alpha_l = 0,6$  para  $n \geq 4$ , de maneira geral, é adotado às estruturas usuais de edifícios. Para associações de pilares-parede e pórticos associados a pilares-parede também pode ser aplicável. Utiliza-se o valor de  $\alpha_l = 0,7$  no caso de contraventamento constituído unicamente por pilares-parede e  $\alpha_l = 0,5$  quando só houver pórticos. (NBR 6118, 2003, p. 75).

### 2.2.2 Coeficiente $\gamma_z$

O coeficiente  $\gamma_z$  (de avaliação da importância dos esforços de 2ª ordem global) é válido para estruturas reticuladas de no mínimo quatro pavimentos. Ele pode ser determinado pelos

resultados de uma análise linear de 1ª ordem, adotando-se os valores de rigidez, para cada caso de carregamento.

Para cada combinação de carregamento, o valor de  $\gamma_z$  é expresso por:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (29)$$

onde:

$M_{1,tot,d}$ : momento de tombamento, ou seja, a soma dos momentos de todas as forças horizontais, com seus valores de cálculo, em relação à base da estrutura;

$\Delta M_{tot,d}$ : soma dos produtos de todas as forças verticais atuantes na estrutura, com seus valores de cálculo, pelos deslocamentos horizontais de seus respectivos pontos de aplicação, obtidos da análise de 1ª ordem.

Se for obedecida a condição  $\gamma_z \leq 1,1$ , a estrutura é considerada de nós fixos. (NBR 6118, 2003, p. 75).

## 3 SENSIBILIDADE HUMANA AS VIBRAÇÕES

### 3.1 Considerações iniciais

Em dias de muita ventania, alguns edifícios muito esbeltos e altos provocam mal estar em pessoas. Portanto, para que o projeto seja considerado adequado, é importante que as oscilações dos edifícios não sejam percebidas pelos usuários.

A amplitude e a frequência de oscilação são responsáveis pelo grau de perceptibilidade, sendo proporcionais à aceleração do movimento do edifício. O enrijecimento da estrutura para diminuição da amplitude nem sempre é uma boa solução, podendo, ainda assim, continuar apresentando a mesma sensação de mal-estar ou enjôo. Em estruturas muito esbeltas, e em casos de ventos de violência excepcional, é comum admitir uma leve percepção. (BLESSMANN, 1989, p. 49).

De acordo com Chávez et al. (2006, p. 244) edifícios muito esbeltos com pouca rigidez apresentam frequências muito baixas – inferiores a 1 Hz – e pouco amortecimento estrutural, tendo que se analisar o comportamento dinâmico estrutural exigido pela NBR 6123/1987. Vibrações de baixíssima frequência acabam por proporcionar às pessoas desconforto, problemas de saúde, diminuição da capacidade de concentração e eficiência no trabalho ou náusea. A ISO 2631-1 orienta que, para que não haja desconforto nem problemas de saúde, frequências na faixa de 0,5 a 80 Hz devem ser evitadas por se enquadrarem no limite de percepção e frequências na faixa de 0,1 a 0,5 Hz de enjôo.

Segundo Parsons (1985), é totalmente improvável que ocupantes de edifícios estejam expostos a níveis da vibração que causam danos físicos diretamente ao corpo. A vibração de um edifício pode afetar a saúde de forma indireta, causando, por exemplo, uma diminuição da concentração nas pessoas ou simplesmente um estresse ambiental adicional que possa afetar a

saúde mental, o estado emocional etc. Na prática é difícil fornecer um modelo ou método apropriado de investigação que prediga estes efeitos.

O termo desconforto causado por vibração é usado nos estudos da resposta humana à vibração. Na prática o projetista de edifícios deseja saber em que nível de vibração os ocupantes serão perturbados e, assim, irão queixar-se. Se os usuários reclamam de estresse provocado pelo ambiente, isto está relacionado a fatores baseados no medo de colapso ou danos estruturais, na fonte perceptora da vibração, etc. A perturbação nos edifícios pode estar relacionada aos pontos iniciais absolutos da percepção à vibração.

O projeto de estruturas requer um sistema de engenharia que garanta eficiente e eficazmente o desempenho estrutural, prevendo as cargas antecipadamente. Neste sentido, uma estrutura pode ser projetada para atender finalidade funcional sem a consideração do elemento humano; entretanto, as pessoas constituem componente crítico em construções com elevada altura. Quanto maior a altura, maior a flexibilidade e menor o amortecimento, tornando as estruturas ainda mais suscetíveis à ação do vento. Edificações podem sofrer níveis de deslocamento que causam desconforto significativo a seus ocupantes. Assim, muitas modificações de projeto são feitas, seja para atender a critérios aerodinâmicos ou estruturais, para melhorar o desempenho das estruturas e atender a critérios de segurança ou da percepção humana. Deslocamentos podem ser completamente angustiantes aos ocupantes da estrutura e podem provocar respostas análogas àquelas associadas com doenças causadas pela movimentação. Embora a resposta não seja igual para cada pessoa, os sintomas podem variar de inquietação, ansiedade, medo e vertigem a respostas extremas como dor de cabeça e náusea. Estudos numéricos foram realizados para determinarem os pontos iniciais que marcam o início destas sensações, que variam para cada indivíduo. Os limites da percepção foram determinados tradicionalmente baseados na resposta dos indivíduos aos testes usando simuladores de deslocamento (Chen & Robertson 1973, Irwin 1981, 1983 Goto, Shioya e outros. 1992). Na maioria de casos, tais experiências se atêm em excitações senoidais; entretanto, parecem existir algumas discrepâncias entre estes ambientes testados e aqueles de estruturas reais (Isyumov 1993). (KAREEM; KIJEWski; TAMURA, 2005, p. 2-3).

A partir de estudos dos pontos iniciais de percepção humana, são definidos critérios de limites que podem ser excedidos em um período do retorno particular. Na América do Norte é usado um período de retorno de 10 anos; entretanto, nas regiões com tufões e furacões freqüentes, um período do retorno mais curto, como por exemplo 1 ano, pode ser necessário. (KAREEM; KIJEWski; TAMURA, 2005, p. 2-3).

Estudos da resposta humana à vibração em edifícios altos são relatados pela Norma ISO 6897 (1984)<sup>14</sup> (apud PARSONS, 1985). Esta norma está relacionada às respostas típicas das pessoas ao deslocamento horizontal (de edifícios) na escala de frequência baixa de 0,063 a 1,0 hertz. Duas circunstâncias são consideradas: aquelas vibrações que freqüentemente ocorrem e vibrações que não ocorrem com tanta freqüência, tais como picos de tempestade que tenha um período de retorno de cinco anos. Curvas limites são fornecidas em função da raiz quadrada da aceleração e da freqüência de vibração. Estas se aplicam aos edifícios usados para diversas finalidades, embora sejam fornecidas em termos de pontos iniciais absolutos de percepção, para edifício aparentemente estacionário. É importante notar, entretanto, que este método exclui a percepção de ruído associado com o deslocamento ou percepções visuais.

A norma Britânica BS 6472 (1984)<sup>15</sup> (apud PARSONS, 1985) fornece orientações gerais para exposição humana à vibração de edifícios na escala de frequência 1 a 80 hertz. Os valores limites são fornecidos em termos do tipo de edificação (hospitais, residências, escritórios, oficinas, etc), tempo (dia ou noite) e em termos de fatores múltiplos acima dos níveis do ponto inicial da percepção (curva base). Por exemplo, os limites para a vibração contínua em escritórios durante o dia são aproximadamente quatro vezes o valor da curva base. Se os níveis limites de vibração em um edifício não extrapolarem, com respeito à resposta humana (incômodo, queixas), eles estão em níveis aceitáveis.

Os métodos citados fornecem avaliações aproximadas de vibração em ambientes de edifício e muitas variáveis possivelmente importantes não são incluídas. Pesquisa sobre pontos iniciais absolutos de percepção a vibração tem fornecido resultados mais extensivos. (PARSONS, 1985)

### **3.2 Fatores que influenciam na percepção da vibração**

Segundo Blessmann (1989), a forma pela qual a vibração estrutural dos prédios influencia o conforto dos ocupantes depende da frequência, da direção que atinge o corpo humano e de seu comportamento ao longo do tempo (se contínua, intermitente ou transitória). Outros fatores importantes que influenciam na percepção e na tolerância à vibração são o local, o tipo de atividade, o horário e a expectativa de conforto e privacidade das pessoas.

Já segundo Gierke e Brammer (2002), os sentimentos de desconforto e de apreensão podem ser associados com a exposição à vibração, uma vez que o estímulo foi percebido. A extensão do desconforto depende da magnitude, da frequência, da direção e da duração da

exposição, e da postura e da orientação do corpo, bem como o ponto do contato com o estímulo. A resposta é influenciada também pelo ambiente onde ocorre o movimento.

Em geral, respostas subjetivas à vibração podem ser subdivididas em três grandes categorias: o ponto inicial da percepção, o início das sensações desagradáveis, e o limite da tolerância. (GIERKE; BRAMMER, 2002, p. 22). Somente com o conhecimento desses fatores é que se pode fazer uma avaliação precisa da aceitabilidade das vibrações e o estabelecimento de limites quanto ao conforto ambiental.

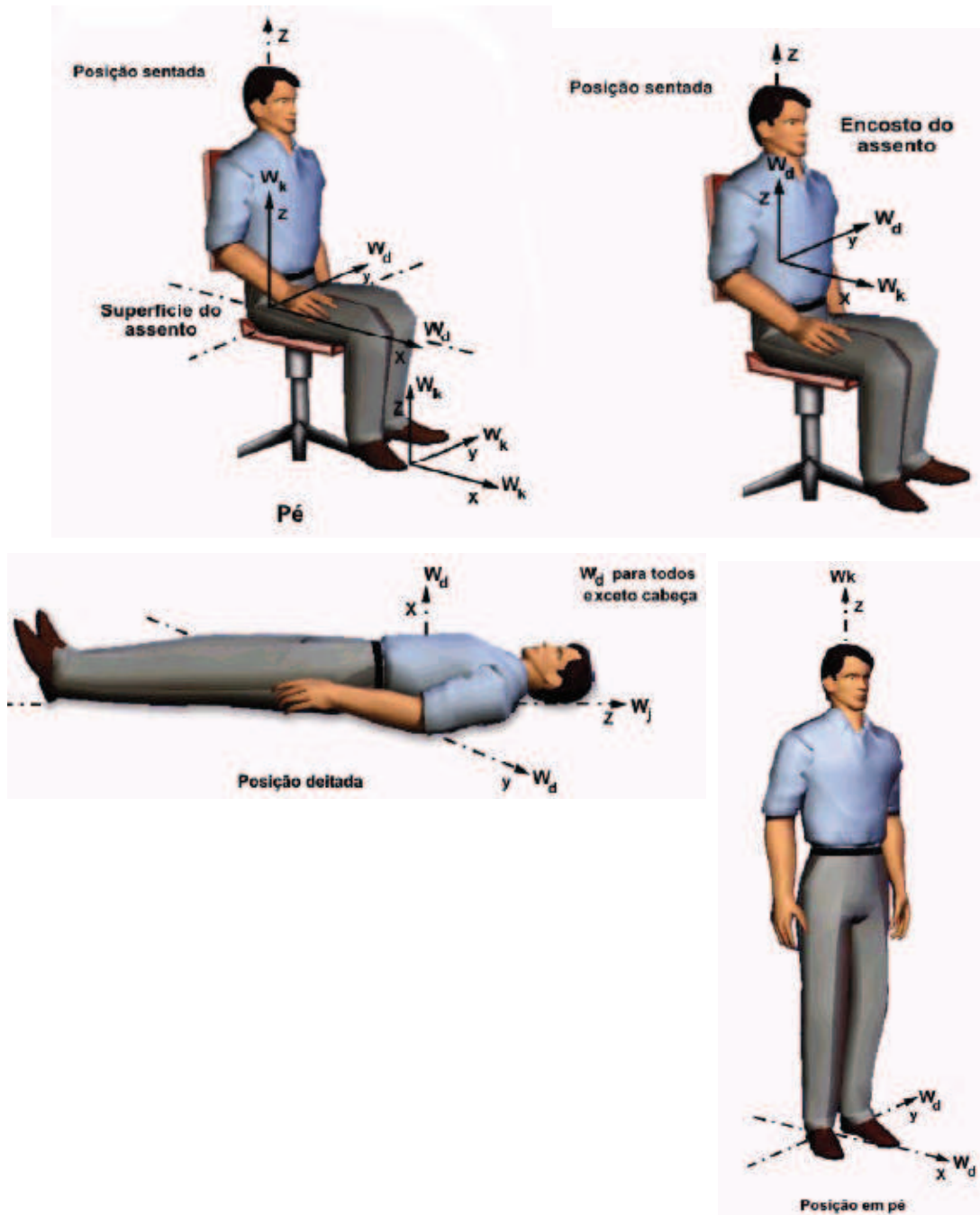
Por outro lado, não há evidência conclusiva que garanta uma relação universal de dependência entre o nível de conforto e o tempo de exposição à vibração. (CUNHA, 2001, p. 1)

Conforme Naeim (1991, p. 1-3), os fatores que influenciam o nível da percepção e o grau de sensibilidade das pessoas às vibrações são:

- (a) Posição do corpo humano: considerando o sistema da coordenada do corpo humano definido na Figura 8, a faixa de frequência para a sensibilidade dos seres humanos está entre 4 a 8 hertz para a vibração ao longo do eixo central z e de 0 a 2 hertz para a vibração ao longo dos eixos x ou y. A vibração do eixo central z é a mais importante em projetos para escritórios e outros locais de trabalho. Já em projeto de residências e de hotéis, onde o conforto para o repouso deve ser considerado, os três eixos se tornam importantes.

Abaixo de aproximadamente 2 Hz o corpo age como uma unidade de massa. Para um homem sentado a primeira ressonância está entre 4 e 6 Hz. Para um homem em pé, picos de ressonância ocorrem, aproximadamente entre 6 e 12 Hz. (GIERKE; BRAMMER, 2002, p. 8)





Fonte: Vendrame, A. C., p.8.

Figura 8 – Direções do baricentro dos sistemas de coordenadas para vibrações que influenciam na percepção das pessoas.

- (b) Características da origem da excitação como a amplitude, a frequência e a sua duração.
- (c) Tempo de exposição. Como mostrado nas Figuras 9 e 10, a tolerância das pessoas à vibração, de uma maneira geral, diminui com tempo crescente de exposição.

- (d) Características do sistema do pavimento tais como a frequência natural (rigidez; massa) e amortecimento.
- (e) Nível de expectativa. Quanto maior a expectativa das vibrações e conhecimento sobre sua origem, menos surpreendente ela se torna. As pessoas esperam mais vibração em locais como oficinas do que em saguões de hotéis, podendo suportar mais nos primeiros do que nos últimos. A ansiedade e o desconforto podem ser reduzidos se os usuários estiverem cientes da natureza das vibrações e assegurados que ela não é uma ameaça a sua segurança e ao bem estar.
- (f) Envolvimento com o tipo de atividade. O nível da percepção varia com a natureza da atividade na qual se está envolvido, tal como trabalhando no escritório, jantando, andando ou dançando.

Parsons também expõe sua visão referente à vibração da edificação e ao desempenho dos ocupantes. A vibração pode ter grandes efeitos no desempenho humano em tarefas simples (como, por exemplo, leitura, escrita, beber, etc.). As vibrações de baixa frequência criam grandes deslocamentos em edifícios altos e podem causar a perda de orientação e da concentração nas pessoas em alguns casos.

Segundo a ISO 2631/1 três níveis diferentes de desconforto humano são distinguidos:

- o “limite do conforto reduzido” se aplica quando atividades tais como comer, ler ou escrever são perturbadas por vibrações relacionadas ao nível de aceleração.
- o “limite de queda de eficiência” se aplica ao nível em que as vibrações recorrentes causam uma significativa ameaça de queda de eficiência nas atividades relacionadas ao trabalho, em especial a fadiga, com exposição demasiadamente prolongada. Este limite de queda de eficiência é três vezes maior que o limite do conforto reduzido.
- o “limite de tolerância” define o valor máximo de aceleração tolerável em relação à saúde e à segurança, para qualquer faixa de frequência, duração e direção da vibração e é estimado em seis vezes superior ao limite do conforto reduzido.

### 3.3 Critérios de avaliação do conforto para sensibilidade humana

#### 3.3.1 Critério de avaliação da NBR 6123/1987

As oscilações provocadas pelas forças flutuantes podem causar desconforto aos ocupantes de edificações. A amplitude máxima da aceleração pode ser calculada pela expressão:

$$a_j = 4.\pi^2 . f_j^2 . u_j^2 \quad (30)$$

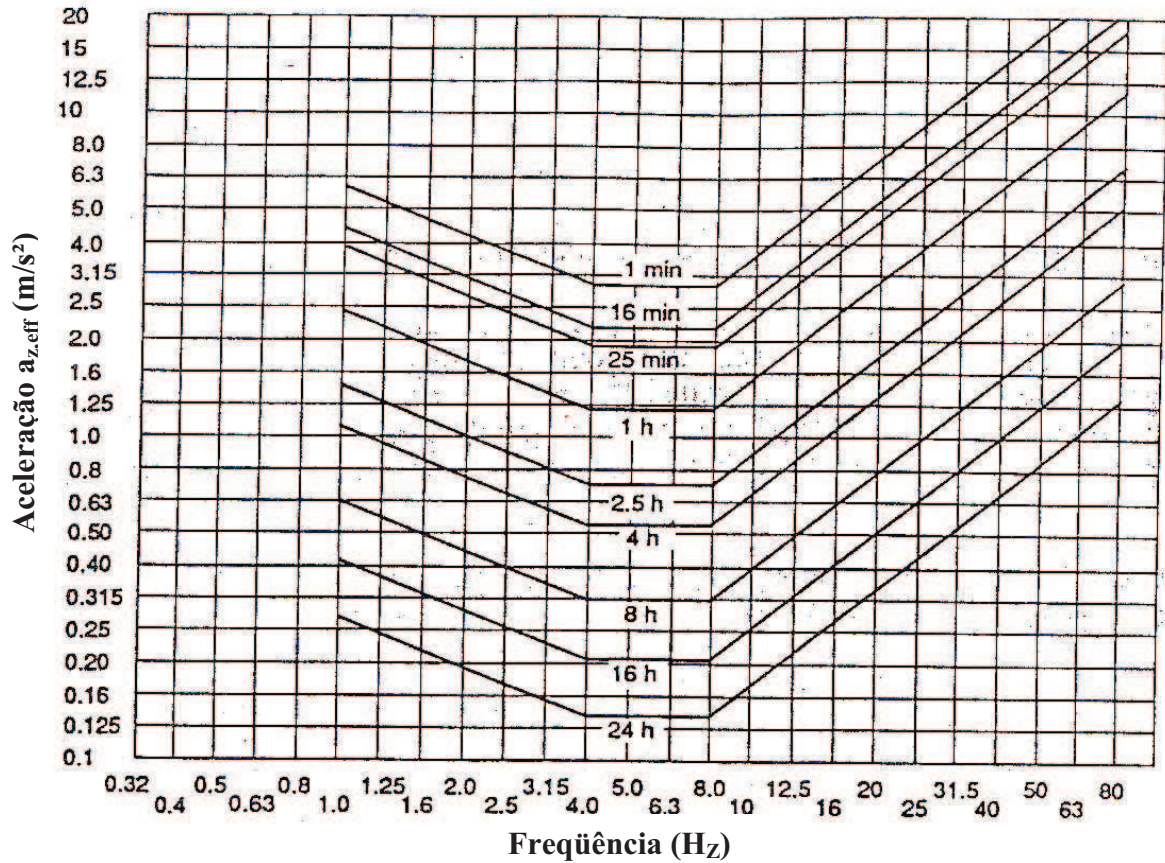
sendo:

$u_j$  : deslocamento no nível  $z$  devido à resposta flutuante no modo  $j$ .

De modo geral, a amplitude máxima não deve ultrapassar 0,1 m/s<sup>2</sup>. A verificação do conforto do usuário deve ser efetuada para velocidades do vento com maior probabilidade de ocorrência que a velocidade do projeto estrutural. Considera-se admissível que a amplitude máxima de aceleração seja excedida, em média, uma vez a cada dez anos. (NBR 6123, 1987, p. 58).

#### 3.3.2 Critério de avaliação da ISO 2631/1 e ISO 2631/2

Critérios básicos são dados em curvas tanto para aceleração longitudinal  $z$  (com a pessoa em posição vertical) quanto para aceleração transversal  $x$  e  $y$  (com a pessoa em posição horizontal), de acordo com as direções definidas na Figura 8. A Figura 9 ilustra um critério gráfico para o caso de aceleração longitudinal, indicando diferentes tempos de exposição. Já a Figura 10 mostra o correspondente critério para acelerações transversais. Estas figuras estão relacionadas ao limite de queda de eficiência para acelerações  $a_z$  e fornecem o tempo limite de exposição em função da frequência e da aceleração, considerando vários níveis de desconforto.

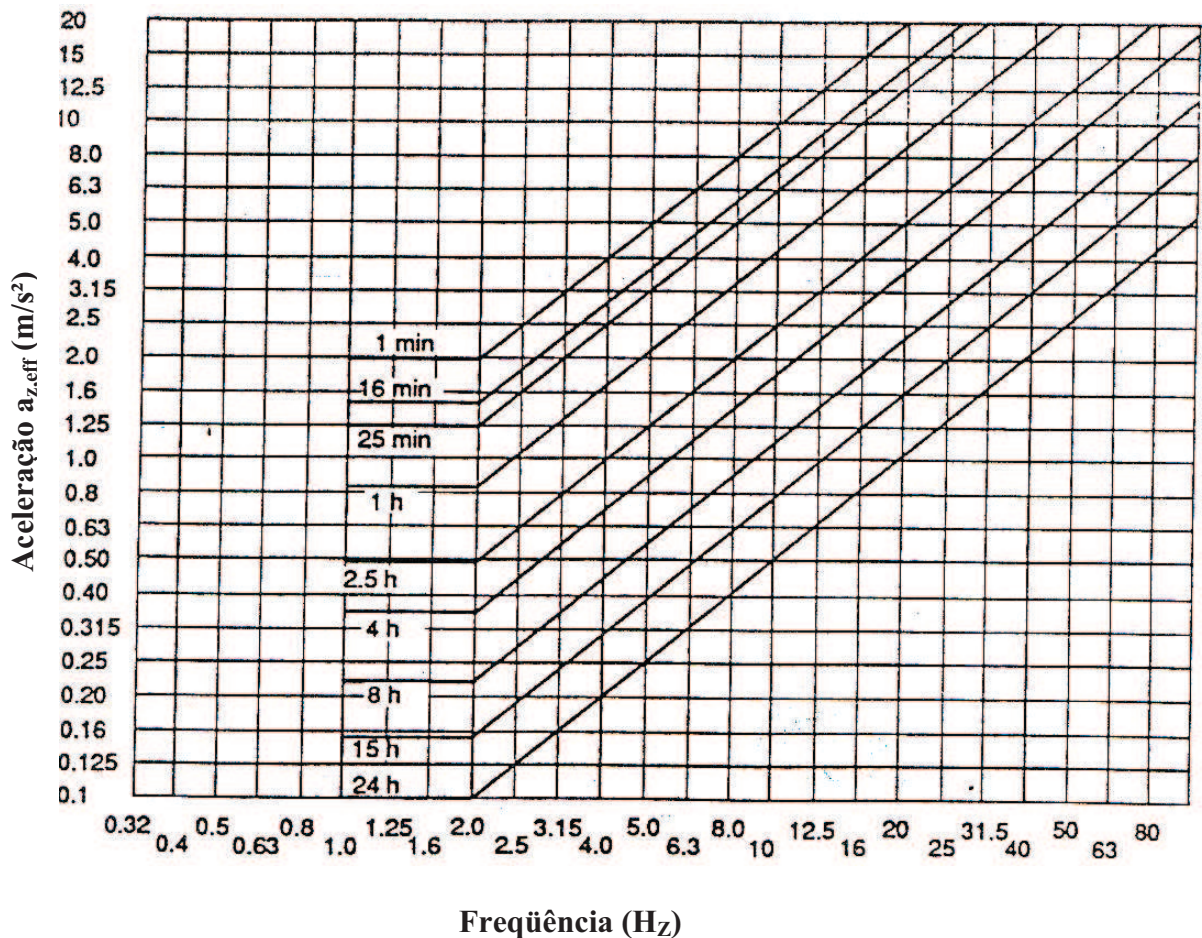


Fonte: ISO 2631/1 apud CEB, 1991, p.233.

Figura 9 – Limite de tempos de exposição (queda de eficiência) para aceleração  $a_{z,}$ .

O limite de tolerância é obtido multiplicando a aceleração por 2, já o limite de conforto reduzido dividindo a aceleração por 3,15, obtendo-se assim aceleração pico para cada limite.





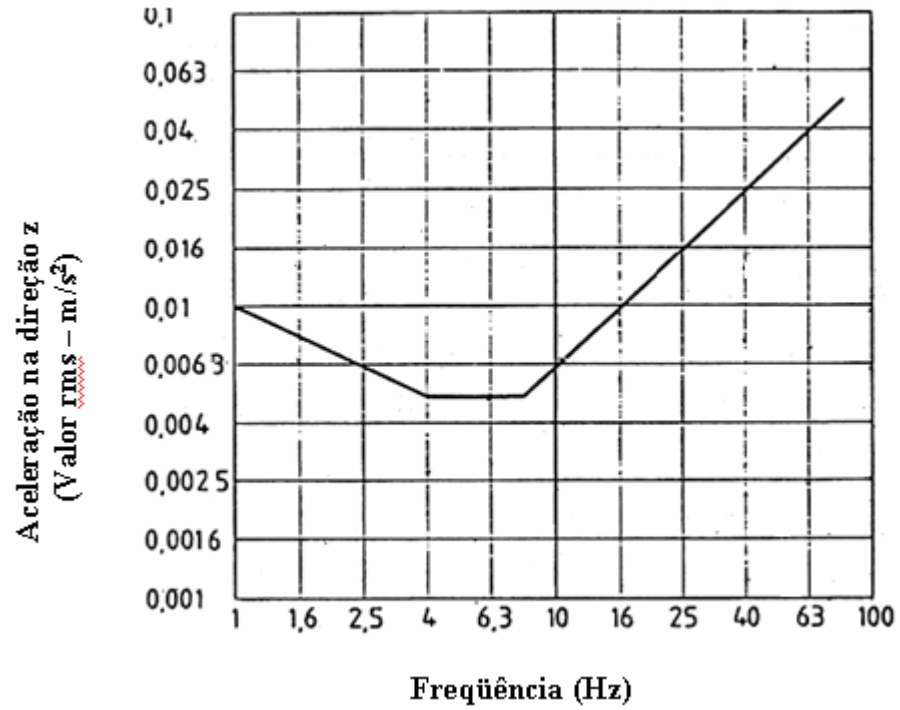
Fonte: ISO 2631/1 apud CEB, 1991, p.233.

Figura 10 – Limite de tempos de exposição (queda de eficiência) para aceleração na direção x e y.

Para Parsons (1985), o efeito de vibração para ocupantes de edifícios depende das características dessa vibração e da forma como as pessoas a “percebem”. A vibração é definida normalmente em termos de sua aceleração e da frequência, além da exposição do corpo em diversas direções (transversais, eixo x e y e longitudinais, eixo z), as quais são definidas com relação à posição do corpo humano. A vibração pode ocorrer simultaneamente nestes três eixos, em inúmeros pontos do corpo e pode ser de duração variada.

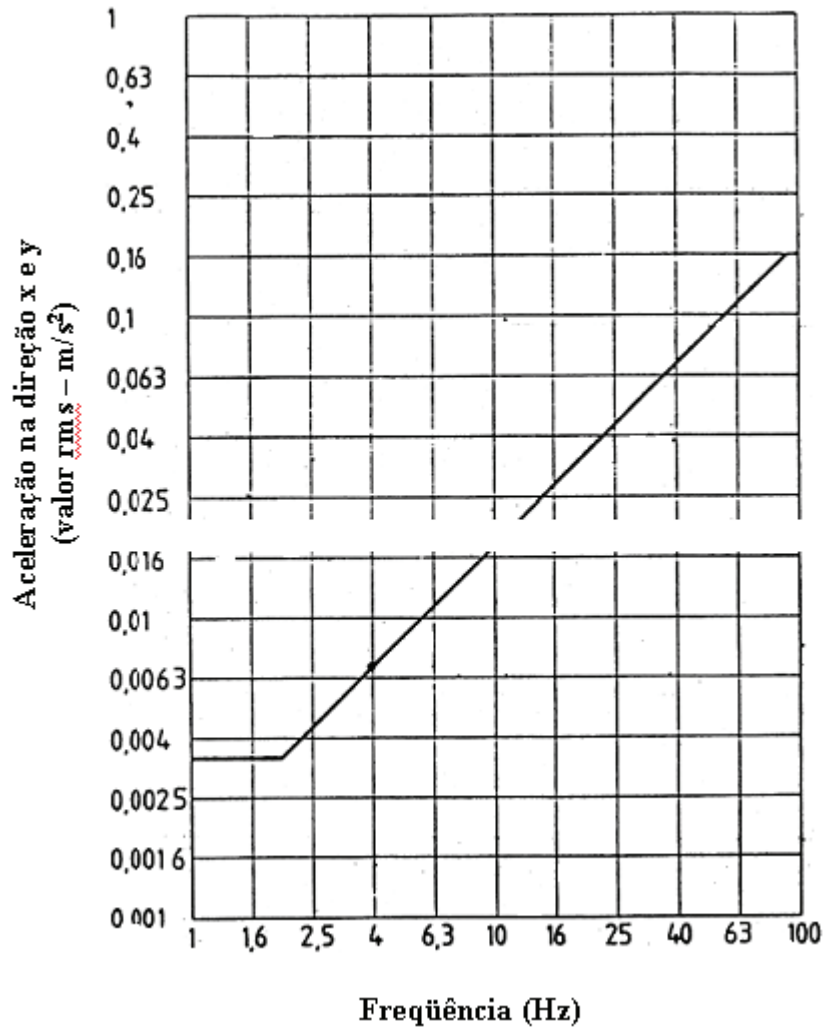
Ao contrário da ISO 2631/1, que leva em conta o tempo de exposição e os limites de desconforto humano, a ISO 2631/2 retrata única e simplesmente a fronteira da percepção humana (ver Figuras 11 e 12), por considerar que esses limites são satisfatórios para detectar problemas referentes a desconforto humano quando ultrapassados. Portanto, a última apresenta critérios de análise menos apurados que a primeira. É perceptível que valores para

picos de aceleração, tomados no limite de conforto reduzido, são majorados quando comparados com os obtidos pela curva básica na ISO 2631/2. (MOREIRA, 2002, p. 225).



Fonte: ISO 2631/2 apud Moreira, T. do V., p. 230

Figura 11 – Curva de aceleração  $a_z$  da percepção do ser humano.



Fonte: ISO 2631/2 apud Moreira, T. do V., p. 230

Figura 12 – Curva de aceleração, na direção x e y, da percepção do ser humano.

Remetendo-se aos gráficos anteriores, podem-se efetuar comparações quanto aos limites longitudinais e transversais de acelerações, tanto para queda de eficiência (Figuras 9 e 10) quanto para percepção do ser humano (Figuras 11 e 12). Para acelerações na direção longitudinal é possível buscar-se resultados nas curvas das Figuras 9 e 11, já para curvas de aceleração nas direções x e y nas Figuras 10 e 12.

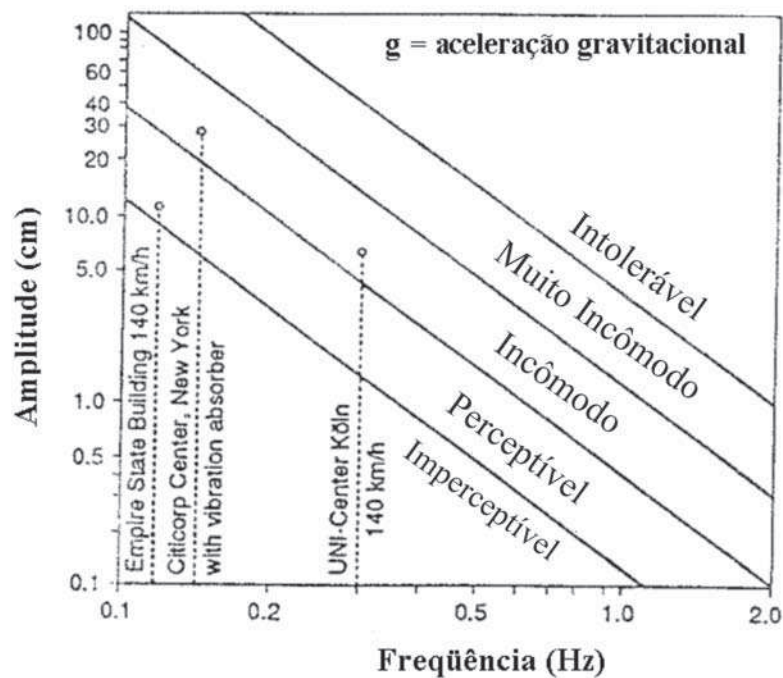
### 3.3.3 Critérios de avaliação do CEB – Boletim 209 /1991

O nível de tolerância das pessoas a oscilações, induzidas pela ação do vento em edifícios, é dado em termos de valores limites impostos pela aceleração (Tabela 3) e pela frequência e amplitude máxima (Figura 13).

Tabela 3 – Percepção humana para vibrações em edifícios em relação ao vento

Percepção humana	Valores limites de aceleração
<b>Imperceptível (IMP)</b>	$a < 0,005 \text{ g}$
<b>Perceptível (P)</b>	$0,005 \text{ g} < a < 0,015 \text{ g}$
<b>Incômodo (I)</b>	$0,015 \text{ g} < a < 0,05 \text{ g}$
<b>Muito incômodo (MI)</b>	$0,05 \text{ g} < a < 0,15 \text{ g}$
<b>Intolerável (INT)</b>	$a > 0,15 \text{ g}$

Fonte: Hirsch, G.; Bachmann, H. apud CEB, 1991, p. 83.



Fonte: Hirsch, G.; Bachmann, H. apud CEB, 1991, p. 83.

Figura 13 – Percepção humana a vibrações em edifícios devido à ação do vento



## 4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Buscou-se, no capítulo precedente, descrever procedimentos que conduzam o engenheiro à realização de um projeto mais amplo, que englobe não apenas a verificação da segurança estrutural mas também o conforto humano referente a ações de caráter dinâmico em edificações. No presente capítulo são apresentadas aplicações práticas destes procedimentos, analisando-se dois modelos de edificação. Os softwares utilizados no estudo foram o Eberick2002 (para o dimensionamento das edificações em concreto armado, obtenção de resultados referentes aos parâmetros de estabilidade global e deslocamentos horizontais no topo da edificação) e o SAP/2000 - Structural Analysis Program da Universidade da Califórnia (para os cálculos dos deslocamentos horizontais no topo da edificação e da frequência natural).

Cada edificação utilizada no estudo apresenta sua peculiaridade. A estrutura dos exemplos 01 a 04 foi obtida da dissertação de Martins & Antunes (2000), efetuando-se no entanto a variação no número de pavimentos e, em consequência, nas seções dos elementos. A proposta consistiu em se verificar o comportamento de uma mesma edificação para alturas variáveis, dimensionada de forma a atender aos parâmetros de estabilidade global. Já o exemplo 05 apresenta uma estrutura real construída na cidade de Passo Fundo, no estado do Rio Grande do Sul, para a qual mantiveram-se os dados do projeto estrutural original.

### 4.1 Descrição das estruturas do exemplo 01 a 04

#### Dados gerais

As estruturas utilizadas nesses exemplos tiveram origem no trabalho de Martins & Antunes (2000). A edificação, com dimensões em planta de 18,00m x 12,70m, foi analisada

considerando-se diferentes números de pavimentos (10, 20, 30 e 40), variando-se as alturas do topo da edificação respectivamente em 29 metros (exemplo 01), 58 metros (exemplo 02), 87 metros (exemplo 03) e 116 metros (exemplo 04). Como no trabalho original os parâmetros de estabilidade global não eram atendidos, a estrutura foi redimensionada, a fim de se verificar se existe correlação entre o atendimento a esses parâmetros e o conforto dos usuários. Em cada uma destas edificações, as seções dos elementos foram mantidas constantes em todos os andares. Como características comuns a estes exemplos tem-se ainda a resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ) igual a 30 MPa.

### **Dados para a análise seguindo a NBR 6123/1987**

De acordo com a NBR 6123/1987, o fator estatístico  $S_3$  é um fator utilizado para assegurar à vida útil da edificação. O valor de  $S_3$  igual a 1,00 é para uma velocidade básica do vento ( $V_o$ ) que apresente um período de recorrência de 50 anos, com probabilidade de ser igualada ou superada de 63%. Como a consideração exposta acima é utilizada para garantir a segurança da estrutura, utilizou-se também um período de recorrência de 10 anos com probabilidades de ( $V_o$ ) ser igualada ou excedida de 63%, 75% e 90% , para favorecer condições mais propícias para a verificação do conforto humano. Os valores do fator estatísticos referentes a essas probabilidades foram obtidos da Tabela 23 da NBR 6123/1987.

A velocidade básica do vento ( $V_o$ ) adotada, igual a 45 m/s, corresponde à região de Passo Fundo, no estado do Rio Grande do Sul. As demais características empregadas foram:

Rugosidade do terreno: Categoria IV

Dimensões da edificação: Classe C

Fator topográfico ( $S_1$ ): 1,0

Amortecimento ( $\zeta$ ): 2% (para estrutura apertada de concreto, sem cortinas)

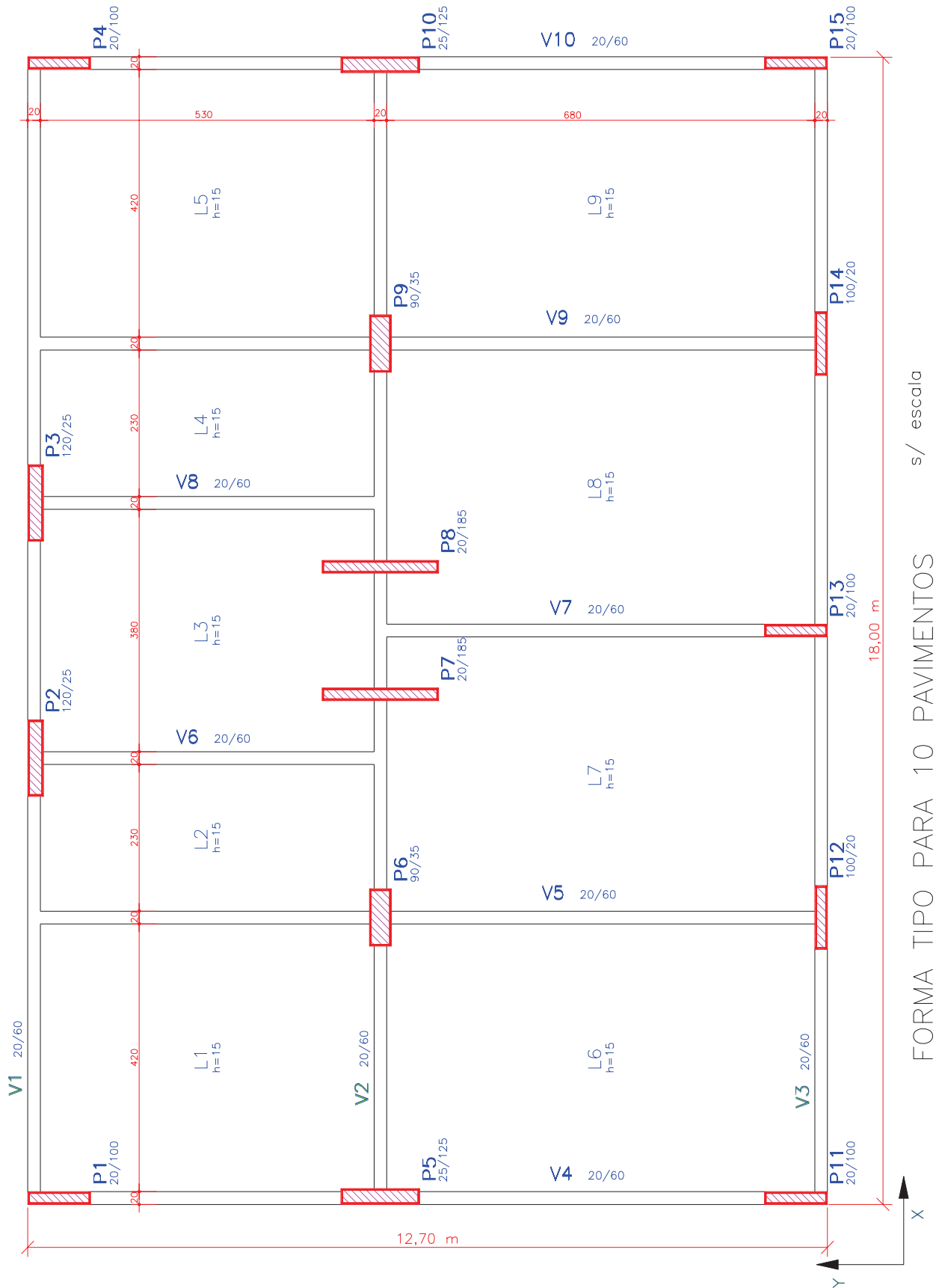
Frequência natural segundo NBR 6123/1987 (para estrutura apertada de concreto, sem cortinas):

$$f = \frac{1}{0,05 + 0,015.h} \quad (31)$$

#### **4.1.1 Exemplo 01**

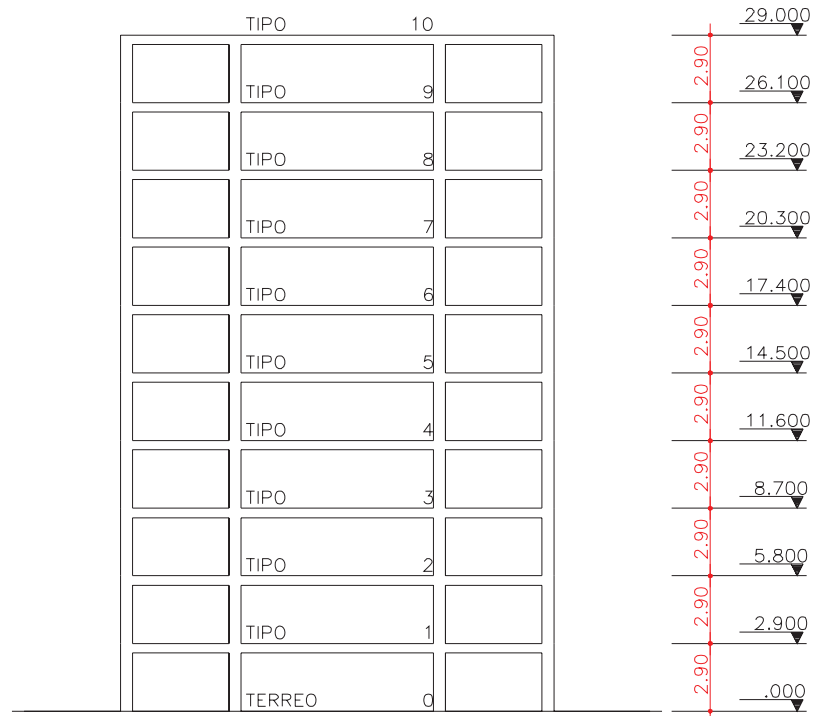
A estrutura do exemplo 01 possui 10 pavimentos e altura de 29 metros, considerado o nível do terreno até o topo. Para esta altura, a frequência natural, obtida segundo a NBR 6123/1987, dada na equação (31), é de 2,06 Hz.

As Figuras 14 e 15 apresentam, respectivamente, a planta de fôrmas (pavimento tipo) e um corte vertical da estrutura do exemplo.



Fonte: Martins, C. H.; Antunes, H. M. C. apud Wordell, F. , 2003, p. 54.

Figura 14 – Planta do pavimento tipo do exemplo 01



Fonte: Martins, C. H.; Antunes, H. M. C. apud Wordell, F. , 2003, p. 54.

Figura 15 – Corte esquemático da edificação com 10 pavimentos

Os resultados obtidos para os parâmetros de estabilidade global com o emprego do Eberick, para as dimensões apresentadas na Figura 14, foram:

Na direção x:  $\gamma_z = 1,08$  e  $\alpha = 0,45$

Na direção y:  $\gamma_z = 1,10$  e  $\alpha = 0,52$

Como os resultados não superaram os limites indicados na NBR 6118/2003 ( $\gamma_z \leq 1,10$  e  $\alpha \leq 0,60$ ), a estrutura em questão é considerada de nós indeslocáveis.

De acordo com os dados para a resposta dinâmica na direção do vento, pelo modelo contínuo simplificado, foram feitos os cálculos da pressão dinâmica total e parcela flutuante, variando ao longo da altura. Os valores obtidos para o exemplo podem ser observados na Tabela 4. Nessa tabela, o fator estatístico  $S_3$  igual a 1 corresponde a probabilidade de 63% e período de recorrência de 50 anos, enquanto os fatores estatísticos de 0,78, 0,74, 0,68 correspondem, respectivamente, às probabilidades de 63%, 75% e 90%, todos para um período de 10 anos.

Tabela 4 – Variação da pressão dinâmica com a altura, nas direções x e y, para resposta total e parcela flutuante para o exemplo 01

S3	Resposta Dinâmica Total				Parcela Flutuante			
	1	0,78	0,74	0,68	1	0,78	0,74	0,68
z (m)	q(z) (N/m <sup>2</sup> )	q(z) (N/m <sup>2</sup> )	q(z) (N/m <sup>2</sup> )	q(z) (N/m <sup>2</sup> )	q(z) (N/m <sup>2</sup> )	q(z) (N/m <sup>2</sup> )	q(z) (N/m <sup>2</sup> )	q(z) (N/m <sup>2</sup> )
2,9	210,58	128,13	115,34	97,33	42,00	25,55	23,00	19,41
5,8	328,37	199,80	179,86	151,78	96,49	58,71	52,85	44,60
8,7	436,39	265,52	239,03	201,71	156,96	95,50	85,97	72,55
11,6	540,64	328,95	296,13	249,90	221,67	134,87	121,42	102,46
14,5	643,18	391,34	352,30	297,29	289,73	176,29	158,70	133,92
17,4	744,96	453,27	408,05	344,34	360,59	219,40	197,51	166,67
20,3	846,47	515,04	463,65	391,26	433,86	263,98	237,64	200,54
23,2	948,01	576,82	519,27	438,20	509,26	309,86	278,94	235,39
26,1	1049,75	638,73	574,99	485,22	586,57	356,90	321,29	271,13
29	1151,81	700,82	630,89	532,39	665,63	405,00	364,59	307,67

De acordo com os valores listados na Tabela 4 observa-se que, independentemente do período de recorrência considerado, aproximadamente 58% da resposta da pressão dinâmica total corresponde à parcela flutuante, para valores obtidos no topo da edificação.

Com base nas pressões calculadas, foram determinados os deslocamentos horizontais no topo da edificação e as correspondentes acelerações. A Tabela 5 apresenta os valores obtidos com os softwares Eberick e SAP/2000. Como o Eberick não fornece a frequência natural, para o cálculo das acelerações deste e dos demais exemplos, contidas na tabela, empregou-se o equacionamento (31) da NBR 6123/1987, e no SAP/2000 estas são fornecidas pelo próprio programa.

Tabela 5 – Verificação do conforto humano para edificação com 29 metros de altura

		Exemplo 01 - 10 Pavimentos											
		S <sub>3</sub>	V <sub>o</sub> Comp. (m/s)	Desl. H. (cm)		f (Hz)	a máx. (m/s <sup>2</sup> )		Critérios de avaliação do conforto humano				
				x	y		x	y	NBR 6123/87	ISO 2631-1		CEB/1991	
										Long.	Trans.	Fig. 13	Tab. 3
Eberick	Resp. Total	0,68	30,59	0,54	1,05	2,06	0,0049	0,0185	Atende	S/ limite	S/ limite	MI	IMP
		0,74	33,30	0,64	1,24		0,0069	0,0258	Atende	S/ limite	S/ limite	INT	IMP
		0,78	35,10	0,71	1,38		0,0085	0,0320	Atende	S/ limite	S/ limite	INT	IMP
		1,00	45,00	1,17	2,27		0,0230	0,0865	Atende	S/ limite	S/ limite	INT	P
	Resp. Flut.	0,68	26,61	0,41	0,79		0,0028	0,0105	Atende	S/ limite	S/ limite	MI	IMP
		0,74	28,97	0,49	0,94		0,0040	0,0148	Atende	S/ limite	S/ limite	MI	IMP
		0,78	30,53	0,54	1,04		0,0049	0,0182	Atende	S/ limite	S/ limite	MI	IMP
		1,00	36,39	0,77	1,48		0,0100	0,0368	Atende	S/ limite	S/ limite	INT	IMP
SAP	Resp. T.	1,00	45,00	0,69	1,35	0,76	0,0011	0,0042	Atende	S/ limite	S/ limite	I	IMP
	Resp. F.	0,74	45,00	0,20	0,45		0,0001	0,0005	Atende	S/ limite	S/ limite	P	IMP

No Eberick, a resposta flutuante conduz a maior deslocamento que a resposta média, absorvendo um percentual aproximado de 76% do deslocamento obtido pela resposta total, levando em consideração um período de recorrência de 10 anos. Já para um período de recorrência de 50 anos, o percentual de deslocamento apesar de permanecer superior na resposta flutuante, diminui em relação ao período de 10 anos, ficando em torno de 66%. O software SAP/2000 apresentou um deslocamento aproximadamente 41% inferior ao obtido pelo Eberick.

Além dos valores de frequência, aceleração e deslocamento máximo, a Tabela 5 apresenta também uma visão do comportamento da estrutura em termos de conforto humano, conforme o objetivo do trabalho. A verificação do conforto seguindo orientações da NBR 6123/1987 é feita através da aceleração máxima permitida de 0,1 m/s<sup>2</sup>. Quando a aceleração, calculada através do equacionamento (30), não ultrapassar esse valor, a tabela indica “atende” e, em caso contrário, “não atende”. É importante esclarecer que a norma brasileira apresenta este critério como uma forma geral de verificação do conforto humano. Para a ISO 2631-1, a verificação do conforto é estabelecida através de curvas básicas para limites longitudinais e transversais, apresentadas, respectivamente, nas Figuras 9 e 10. De posse da aceleração máxima e da frequência natural é possível verificar o limite de tempo de exposição que garanta ao usuário da edificação um período de exposição que não cause perda de eficiência. Assim, para o critério da ISO 2631-1, quando se apresenta a situação “s/ limite”, denota que não há limite de exposição que cause perda de eficiência ao usuário e quando existe indicação de horas, estas correspondem ao tempo que o usuário pode permanecer exposto na edificação

para a aceleração máxima e frequência apresentada. Por fim, o critério estabelecido pelo CEB/1991, para verificação da percepção humana a vibrações ocasionadas pela ação do vento é baseado na Tabela 3 e na Figura 13. Para verificação através da Tabela 3 é necessário como dado apenas a aceleração, e para a Figura 13 são necessários a aceleração e o deslocamento. As siglas apresentadas para os dois métodos de verificação são: imperceptível (IMP), perceptível (P), incômodo (I), muito incômodo (MI) e intolerável (INT).

É de grande relevância citar que adotaram-se unicamente o fator estatístico de 0,74 e parcela flutuante da resposta total da pressão dinâmica para a verificação do conforto humano para todos os exemplos analisados, fundamentalmente por duas razões. A primeira é a orientação constante na NBR 6123/1987 de que o conforto seja verificado para velocidades do vento com probabilidade de ocorrência superior a velocidade de projeto estrutural (superior a 63%) e com vida útil de 10 anos (ver Tabela 1). A segunda razão consiste no fato de que, como a primeira consideração delimita apenas os valores de 0,74 e 0,68 como fatores estatísticos cabíveis para a análise, verificou-se que com o fator estatístico de 0,74 a estrutura apresenta maior deslocamento que com o fator estatístico de 0,68 (ver Tabela 12). A consideração da resposta flutuante, para a pressão dinâmica, é devido ao fato dela representar a amplitude máxima, ao passo que a resposta total nos fornece a resposta média somada a amplitude máxima da resposta flutuante.

Com base nas considerações efetuadas, levando em conta a resposta flutuante e fator estatístico de 0,74 do Eberick, para as acelerações da Tabela 5, verifica-se que estes valores são inferiores a  $0,1 \text{ m/s}^2$ , atendendo, de forma geral, às condições de conforto humano para a amplitude máxima da aceleração.

Verificando o conforto pelas curvas da ISO 2631-1, tanto para limites transversais como longitudinais, observa-se que não há limite de exposição que cause perda de eficiência e conseqüentemente desconforto às pessoas ocupantes da edificação em análise.

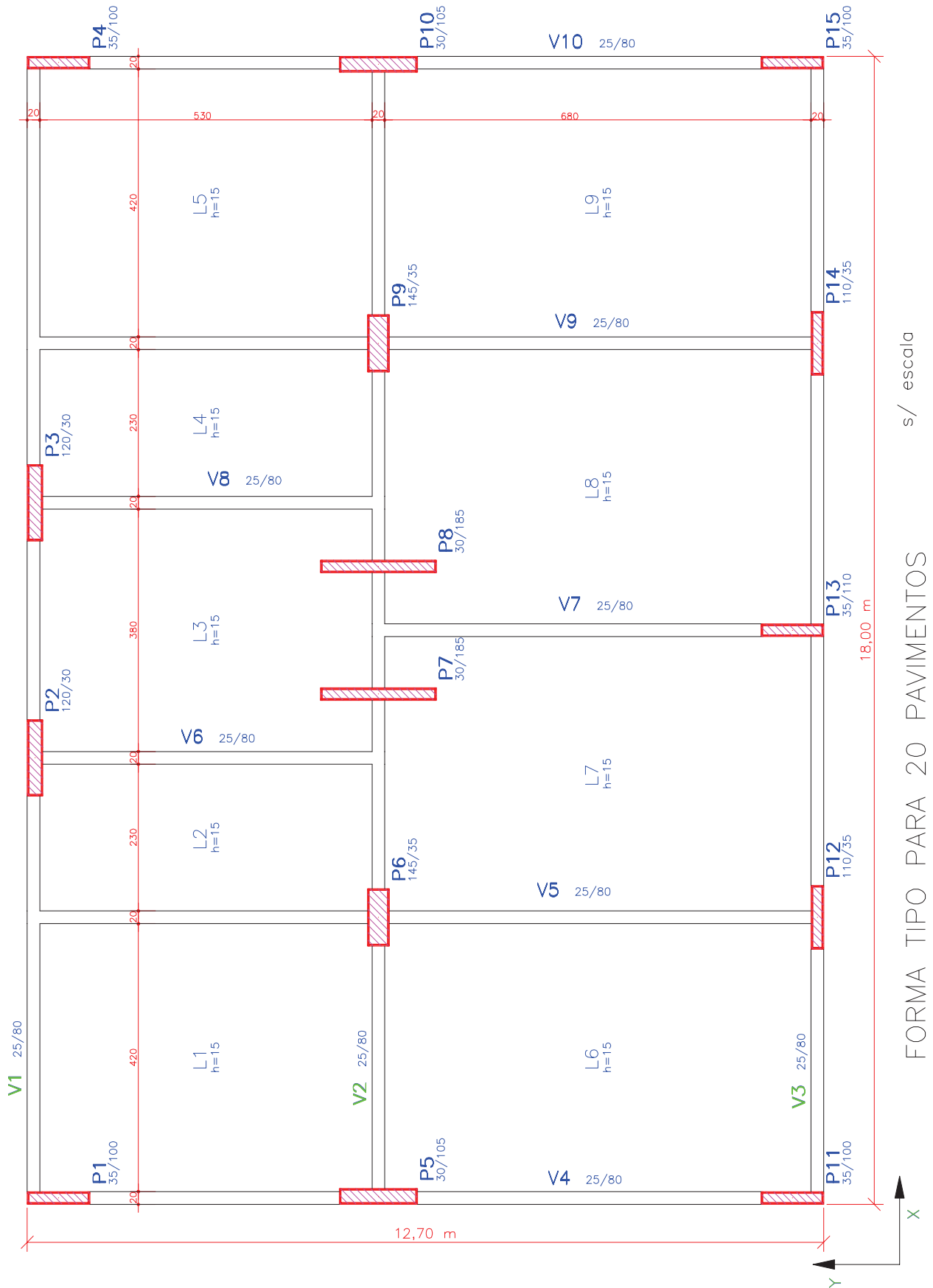
Para as expressões da Tabela 3 do CEB/1991, da mesma forma, a aceleração calculada não compromete o conforto por ser imperceptível à sensibilidade das pessoas. Analisando pela Figura 13 do CEB/1991, no entanto, percebem-se condições de percepção que normalmente não se aplicam a uma edificação com 29 metros de altura e que contrariam as demais avaliações descritas. Isto ocorre porque as curvas da Figura 13 não consideram a aceleração para a verificação do conforto, mas sim a frequência e a amplitude da edificação, que por sua vez são determinantes a aceleração. Assim, frequências acima de 2,0 Hz e amplitudes maiores que 0,1 cm já caracterizam condições de desconforto. Este resultado sugere que as relações



empregadas na verificação do conforto não se apliquem a edificações baixas (e portanto muito rígidas).

#### **4.1.2 Exemplo 02**

Na Figura 16 é apresentada a planta de fôrmas (pavimento tipo) da estrutura do exemplo 02, a qual possui 20 pavimentos e altura total de 58 metros.



Fonte: Martins, C. H.; Antunes, H. M. C. apud Wordell, F. , 2003, p. 54.

Figura 16 – Planta do pavimento tipo do exemplo 02

Os resultados de estabilidade global, obtidos do Eberick, foram:

Na direção x:  $\gamma_z = 1,06$  e  $\alpha = 0,41$

Na direção y:  $\gamma_z = 1,10$  e  $\alpha = 0,53$

Em conformidade com os dados da resposta dinâmica na direção do vento, pelo modelo contínuo simplificado, foram calculadas a pressão dinâmica total e parcela flutuante, variáveis com a altura. As pressões obtidas foram:

Tabela 6 – Variação da pressão dinâmica com a altura, nas direções x e y, para resposta total e parcela flutuante para o exemplo 02

S3	Resposta Dinâmica Total				Parcela Flutuante			
	1	0,78	0,74	0,68	1	0,78	0,74	0,68
z (m)	q(z) (N/m <sup>2</sup> )	q(z) (N/m <sup>2</sup> )	q(z) (N/m <sup>2</sup> )	q(z) (N/m <sup>2</sup> )	q(z) (N/m <sup>2</sup> )	q(z) (N/m <sup>2</sup> )	q(z) (N/m <sup>2</sup> )	q(z) (N/m <sup>2</sup> )
2,9	190,02	115,62	104,08	87,83	21,44	13,05	11,74	9,91
5,8	281,14	171,06	153,99	129,95	49,26	29,97	26,98	22,77
8,7	359,56	218,77	196,95	166,20	80,13	48,75	43,89	37,04
11,6	432,13	262,93	236,70	199,74	113,16	68,85	61,98	52,31
14,5	501,36	305,05	274,61	231,74	147,91	90,00	81,02	68,37
17,4	568,45	345,88	311,37	262,75	184,08	112,01	100,83	85,09
20,3	634,10	385,82	347,32	293,10	221,49	134,76	121,32	102,38
23,2	698,73	425,15	382,73	322,97	259,98	158,19	142,40	120,17
26,1	762,63	464,03	417,72	352,51	299,45	182,20	164,02	138,41
29	825,99	502,58	452,43	381,79	339,81	206,76	186,13	157,07
31,9	888,95	540,89	486,92	410,90	380,98	231,81	208,68	176,10
34,8	951,63	579,02	521,25	439,87	422,91	257,32	231,65	195,48
37,7	1014,09	617,03	555,46	468,74	465,55	283,26	255,00	215,19
40,6	1076,41	654,95	589,60	497,54	508,85	309,61	278,72	235,20
43,5	1138,64	692,81	623,68	526,31	552,77	336,33	302,77	255,50
46,4	1200,80	730,63	657,73	555,04	597,28	363,42	327,15	276,08
49,3	1262,94	768,44	691,77	583,76	642,35	390,84	351,84	296,91
52,2	1325,08	806,25	725,80	612,48	687,95	418,59	376,82	317,99
55,1	1387,24	844,07	759,85	641,22	734,07	446,65	402,08	339,30
58	1449,44	881,91	793,92	669,96	780,67	475,00	427,61	360,85

Para o período de recorrência de 10 anos e 50 anos, aproximadamente 54% da resposta da pressão dinâmica total se mantêm na parcela flutuante, levando-se em conta o topo da estrutura.

Analogamente ao que foi apresentado para o exemplo 01, na Tabela 7 são listados os resultados obtidos para o presente exemplo com relação à verificação do conforto humano.

Tabela 7 – Verificação do conforto humano para edificação com 58 metros de altura

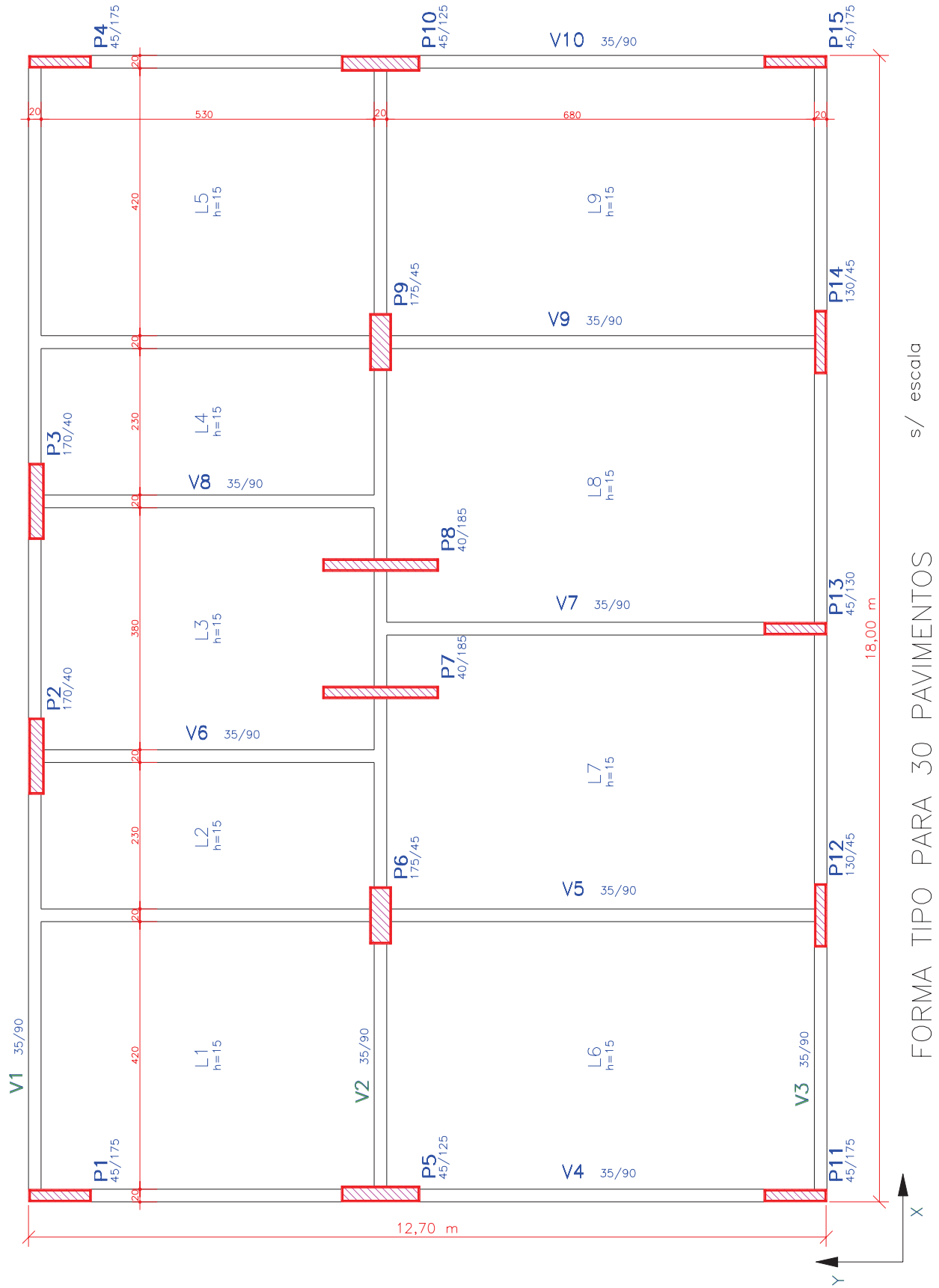
		Exemplo 02 - 20 Pavimentos											
		S <sub>3</sub>	V <sub>o</sub> Comp. (m/s)	Desl. H. (cm)		f (Hz)	a máx. (m/s <sup>2</sup> )		Critérios de avaliação do conforto humano				
				x	y		x	y	NBR 6123/87	ISO 2631-1		CEB/1991	
										Long.	Trans.	Fig. 13	Tab. 3
Eberick	Resp. Total	0,68	30,59	0,94	2,23	1,09	0,0041	0,0232	Atende	S/ limite	S/ limite	MI	IMP
		0,74	33,30	1,11	2,64		0,0057	0,0325	Atende	S/ limite	S/ limite	MI	IMP
		0,78	35,10	1,24	2,93		0,0072	0,0400	Atende	S/ limite	S/ limite	MI	IMP
		1,00	45,00	2,03	4,82		0,0192	0,1084	Não atende	S/ limite	15 h	INT	P
	Resp. Flut.	0,68	21,59	0,47	1,11		0,0010	0,0057	Atende	S/ limite	S/ limite	I	IMP
		0,74	23,50	0,55	1,31		0,0014	0,0080	Atende	S/ limite	S/ limite	I	IMP
		0,78	24,77	0,62	1,46		0,0018	0,0099	Atende	S/ limite	S/ limite	MI	IMP
		1,00	31,75	1,01	2,40		0,0048	0,0269	Atende	S/ limite	S/ limite	MI	IMP
SAP	Resp. T.	1,00	45,00	1,78	4,34	0,39	0,0019	0,0114	Atende	S/ limite	S/ limite	I	IMP
	Resp. F.	0,74	45	0,45	1,62		0,0001	0,0016	Atende	S/ limite	S/ limite	P	IMP

Os deslocamentos obtidos pelo Eberick apresentaram semelhantes proporções para a resposta flutuante e para a resposta média, ou seja, um percentual de 50% para cada parcela, considerando-se tanto um período de recorrência de 10 anos como de 50 anos. O software SAP/2000 apresentou um deslocamento aproximadamente 12% inferior ao obtido pelo Eberick. Observa-se ainda a grande discrepância entre os valores de frequência natural obtidos pela expressão simplificada da NBR 6123/1987 e pelo SAP/2000.

Novamente, apenas para o critério da Figura 13 do CEB/1991 a ação do vento, considerando o fator estatístico de 0,74 da resposta flutuante do Eberick, é sentida pelos usuários de forma incômoda. Segundo os demais critérios, as acelerações máximas se enquadram na faixa imperceptível ao usuário.

#### 4.1.3 Exemplo 03

A estrutura em questão, com 30 pavimentos e 87 metros de altura, tem seu pavimento tipo ilustrado na Figura 17.



Fonte: Martins, C. H.; Antunes, H. M. C. apud Wordell, F. , 2003, p. 54.

Figura 17 – Planta do pavimento tipo do exemplo 03

Para o dimensionamento apresentado na Figura 17, os resultados de estabilidade global fornecidos pelo Eberick são:

Na direção x:  $\gamma_z = 1,06$  e  $\alpha = 0,44$

Na direção y:  $\gamma_z = 1,10$  e  $\alpha = 0,57$

Os resultados de pressão dinâmica, ao longo da altura, estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Variação da pressão dinâmica com a altura, nas direções x e y, para resposta total e parcela flutuante para o exemplo 03

S3	Resposta Dinâmica Total				Parcela Flutuante			
	1	0,78	0,74	0,68	1	0,78	0,74	0,68
z (m)	q(z) (N/m <sup>2</sup> )	q(z) (N/m <sup>2</sup> )	q(z) (N/m <sup>2</sup> )	q(z) (N/m <sup>2</sup> )	q(z) (N/m <sup>2</sup> )	q(z) (N/m <sup>2</sup> )	q(z) (N/m <sup>2</sup> )	q(z) (N/m <sup>2</sup> )
2,9	183,05	111,38	100,26	84,61	14,47	8,80	7,93	6,69
5,8	265,13	161,32	145,22	122,55	33,24	20,22	18,21	15,36
8,7	333,50	202,92	182,67	154,15	54,07	32,90	29,62	24,99
11,6	395,33	240,54	216,54	182,73	76,37	46,46	41,83	35,30
14,5	453,26	275,79	248,27	209,51	99,81	60,73	54,67	46,14
17,4	508,59	309,46	278,58	235,08	124,22	75,58	68,04	57,42
20,3	562,08	342,00	307,88	259,81	149,47	90,94	81,87	69,09
23,2	614,20	373,71	336,42	283,90	175,44	106,75	96,10	81,09
26,1	665,26	404,78	364,39	307,50	202,08	122,95	110,69	93,40
29	715,49	435,34	391,91	330,72	229,31	139,52	125,60	105,99
31,9	765,07	465,51	419,06	353,63	257,10	156,43	140,82	118,84
34,8	814,11	495,35	445,92	376,30	285,39	173,65	156,32	131,91
37,7	862,71	524,92	472,54	398,77	314,16	191,15	172,08	145,21
40,6	910,95	554,27	498,97	421,06	343,38	208,93	188,08	158,72
43,5	958,89	583,44	525,23	443,22	373,02	226,97	204,32	172,42
46,4	1006,58	612,46	551,35	465,27	403,06	245,24	220,77	186,30
49,3	1054,07	641,35	577,36	487,21	433,47	263,75	237,43	200,36
52,2	1101,37	670,14	603,27	509,08	464,25	282,47	254,29	214,59
55,1	1148,54	698,83	629,10	530,88	495,37	301,41	271,33	228,97
58	1195,58	727,46	654,87	552,63	526,82	320,54	288,56	243,51
60,9	1242,53	756,02	680,58	574,33	558,58	339,87	305,96	258,19
63,8	1289,39	784,53	706,25	595,99	590,65	359,38	323,52	273,01
66,7	1336,19	813,01	731,88	617,62	623,01	379,07	341,25	287,97
69,6	1382,93	841,45	757,49	639,22	655,66	398,94	359,13	303,06
72,5	1429,63	869,87	783,07	660,81	688,58	418,97	377,16	318,28
75,4	1476,31	898,26	808,64	682,39	721,76	439,16	395,34	333,61
78,3	1522,96	926,65	834,19	703,95	755,20	459,50	413,65	349,07
81,2	1569,60	955,03	859,74	725,51	788,88	480,00	432,10	364,64
84,1	1616,23	983,40	885,28	747,06	822,81	500,64	450,69	380,32
87	1662,87	1011,78	910,82	768,62	856,98	521,43	469,40	396,12

Observa-se que aproximadamente 52% da resposta da pressão dinâmica total corresponde à parcela flutuante, tanto para o período de recorrência de 10 anos e 50 anos. O software SAP/2000 apresentou um deslocamento aproximadamente 12% inferior ao obtido com o emprego do Eberick.

Tabela 9 – Verificação do conforto humano para edificação com 87 metros de altura

		Exemplo 03 - 30 Pavimentos											
		S <sub>3</sub>	V <sub>0</sub> Comp. (m/s)	Desl. H. (cm)		f (Hz)	a máx. (m/s <sup>2</sup> )		Critérios de avaliação do conforto humano				
				x	y		x	y	NBR 6123/87	ISO 2631-1		CEB/1991	
										Long.	Trans.	Fig. 13	Tab. 3
Eberick	Resp. Total	0,68	30,59	1,44	3,48	0,74	0,0045	0,0260	Atende	S/ limite	S/ limite	MI	IMP
		0,74	33,30	1,71	4,13		0,0063	0,0367	Atende	S/ limite	S/ limite	MI	IMP
		0,78	35,10	1,90	4,59		0,0078	0,0453	Atende	S/ limite	S/ limite	MI	IMP
		1,00	45,00	3,12	7,54		0,0209	0,1222	Não atende	S/ limite	15 h	MI	P
	Resp. Flut.	0,68	19,97	0,61	1,49		0,0008	0,0048	Atende	S/ limite	S/ limite	I	IMP
		0,74	21,74	0,73	1,76		0,0011	0,0067	Atende	S/ limite	S/ limite	I	IMP
		0,78	22,91	0,81	1,95		0,0014	0,0082	Atende	S/ limite	S/ limite	I	IMP
		1,00	29,37	1,33	3,21		0,0038	0,0222	Atende	S/ limite	S/ limite	MI	IMP
SAP	Resp. T.	1,00	45,00	2,74	6,84	0,26	0,0020	0,0127	Atende	S/ limite	S/ limite	I	IMP
	Resp. F.	0,74	45,00	0,69	2,29		0,0001	0,0014	Atende	S/ limite	S/ limite	IMP	IMP

Os deslocamentos, obtidos pelo programa Eberick, são maiores levando-se em conta a parcela média do que a parcela flutuante, com um percentual aproximadamente igual a 58% da parcela média, para um período de recorrência de 10 e 50 anos.

Na Tabela 9, considerando o fator estatístico igual a 0,74, período de recorrência de 10 anos e para a resposta flutuante da pressão dinâmica do Eberick, verifica-se que as acelerações não superaram o limite de 0,1 m/s<sup>2</sup> (NBR 6123/1987).

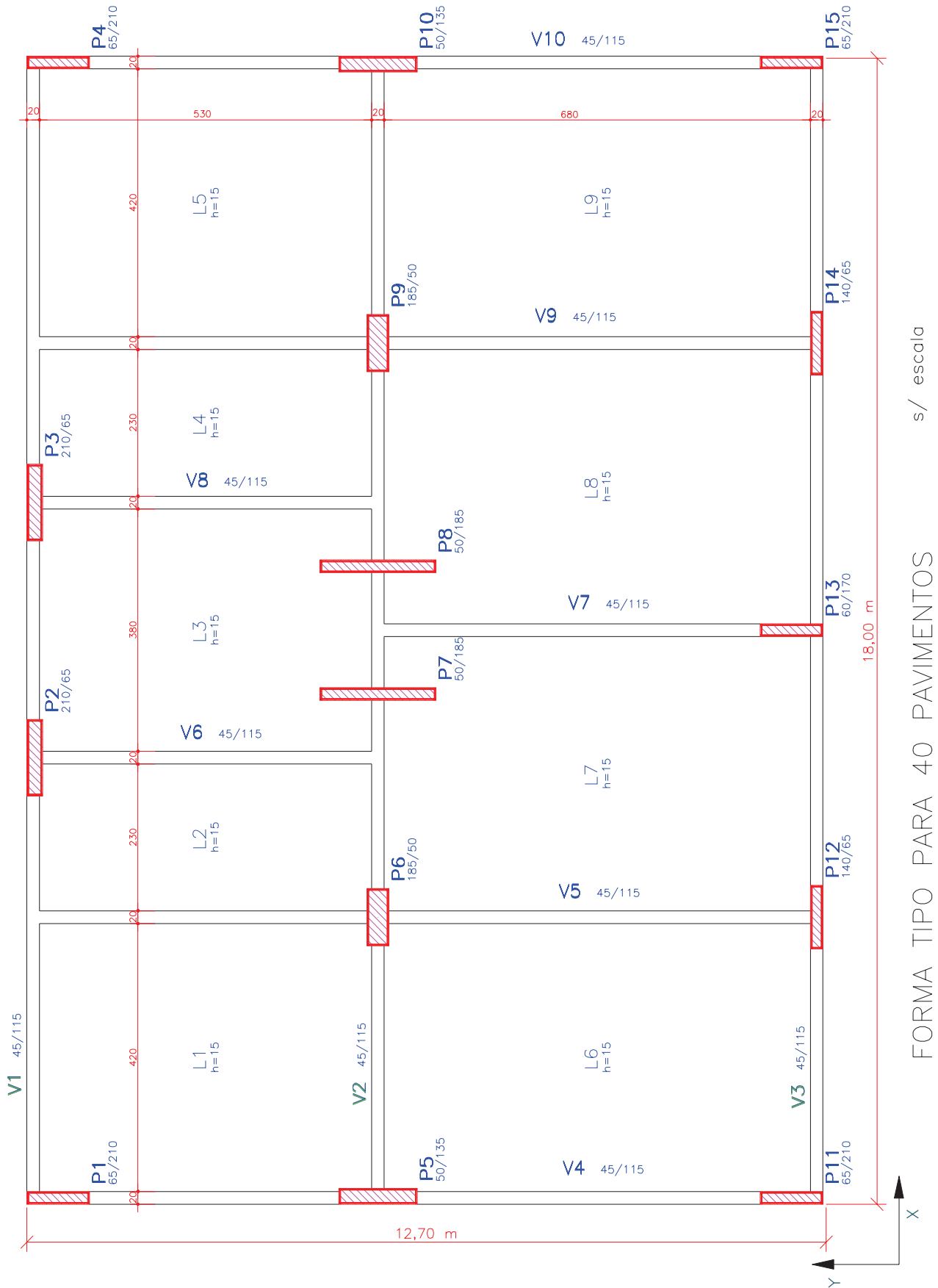
Na verificação através das Figuras 9 e 10 (ISO 2631-1), todos os casos expostos na Tabela 9 não limitam os usuários ao tempo exposição, segundo o eixo longitudinal e transversal.

De acordo com Figura 13 (CEB/1991), a percepção humana é avaliada como incômoda para a resposta flutuante da pressão dinâmica do fator estatístico igual a 0,74 do Eberick. Não existe percepção humana às oscilações ocasionadas pelo vento segundo a Tabela 3, para os resultados apresentados de acelerações.

#### **4.1.4 Exemplo 04**

A planta de fôrmas do pavimento tipo é apresentada na Figura 18, para o exemplo 04 (40 pavimentos e 116 metros de altura).





Fonte: Martins, C. H.; Antunes, H. M. C. apud Wordell, F. , 2003, p. 54.

Figura 18 – Planta do pavimento tipo do exemplo 04

Para a edificação analisada no Eberick, com o dimensionamento apresentado na Figura 18, os valores de  $\gamma_z$  e  $\alpha$  ficaram abaixo do limite exposto pela NBR 6118/2002, a exemplo das estruturas anteriores (portanto a estrutura também é considerada de nós indeslocáveis).

Na direção x:  $\gamma_z = 1,06$  e  $\alpha = 0,49$

Na direção y:  $\gamma_z = 1,10$  e  $\alpha = 0,60$

A seguir, na Tabela 10, são apresentadas as pressões dinâmicas totais e flutuantes, e na Tabela 11 os resultados relativos ao conforto. A pressão dinâmica total, levando-se em conta o topo da edificação, para o período de recorrência de 10 anos e 50 anos, apresenta igual contribuição da resposta média em relação a amplitude máxima da parcela flutuante, ou seja, aproximadamente 50%.

Os deslocamentos, obtidos pelo Eberick, são maiores levando-se em conta a parcela média do que a flutuante, correspondendo à parcela flutuante cerca de 38% do deslocamento obtido da soma das parcelas média e flutuante, para um período de recorrência de 10 anos. Para um período de recorrência de 50 anos, a parcela flutuante corresponde aproximadamente o mesmo percentual que o período de recorrência de 10 anos. No programa SAP/2000 o deslocamento obtido é aproximadamente 9% inferior ao do Eberick.

Tabela 10 – Variação da pressão dinâmica com a altura, nas direções x e y, para resposta total e parcela flutuante para o exemplo 04

S3	Resposta Dinâmica Total				Parcela Flutuante			
	1	0,78	0,74	0,68	1	0,78	0,74	0,68
z (m)	Q(z) (N/m <sup>2</sup> )	Q(z) (N/m <sup>2</sup> )	Q(z) (N/m <sup>2</sup> )	Q(z) (N/m <sup>2</sup> )	Q(z) (N/m <sup>2</sup> )	Q(z) (N/m <sup>2</sup> )	Q(z) (N/m <sup>2</sup> )	Q(z) (N/m <sup>2</sup> )
2,9	179,52	109,23	98,33	82,98	10,95	6,66	6,00	5,06
5,8	257,03	156,39	140,79	118,81	25,15	15,30	13,77	11,62
8,7	320,34	194,91	175,46	148,07	40,91	24,89	22,41	18,91
11,6	376,74	229,23	206,36	174,14	57,77	35,15	31,64	26,70
14,5	428,96	261,00	234,96	198,27	75,51	45,94	41,36	34,90
17,4	478,35	291,05	262,01	221,10	93,98	57,18	51,47	43,44
20,3	525,69	319,86	287,94	242,98	113,07	68,80	61,93	52,26
23,2	571,48	347,72	313,02	264,15	132,72	80,75	72,70	61,35
26,1	616,05	374,84	337,44	284,75	152,87	93,01	83,73	70,66
29	659,66	401,37	361,32	304,91	173,47	105,55	95,02	80,18
31,9	702,47	427,42	384,77	324,70	194,49	118,34	106,53	89,90
34,8	744,62	453,06	407,86	344,18	215,90	131,36	118,26	99,79
37,7	786,21	478,37	430,64	363,41	237,66	144,61	130,18	109,85
40,6	827,34	503,40	453,17	382,42	259,77	158,06	142,29	120,07
43,5	868,06	528,18	475,47	401,24	282,19	171,70	154,57	130,44
46,4	908,44	552,74	497,59	419,90	304,91	185,53	167,01	140,94
49,3	948,52	577,13	519,54	438,43	327,92	199,53	179,62	151,57
52,2	988,33	601,35	541,35	456,83	351,20	213,69	192,37	162,34
55,1	1027,92	625,44	563,03	475,13	374,75	228,02	205,26	173,22
58	1067,30	649,40	584,61	493,33	398,54	242,49	218,30	184,21
60,9	1106,51	673,26	606,08	511,46	422,57	257,11	231,46	195,32
63,8	1145,57	697,02	627,47	529,51	446,83	271,87	244,75	206,53
66,7	1184,48	720,70	648,79	547,50	471,31	286,77	258,16	217,85
69,6	1223,28	744,31	670,04	565,43	496,01	301,80	271,68	229,27
72,5	1261,97	767,85	691,23	583,31	520,91	316,95	285,32	240,78
75,4	1300,56	791,33	712,37	601,15	546,01	332,22	299,07	252,38
78,3	1339,07	814,76	733,46	618,95	571,31	347,61	312,93	264,07
81,2	1377,51	838,15	754,52	636,72	596,79	363,12	326,89	275,85
84,1	1415,88	861,50	775,54	654,45	622,46	378,74	340,95	287,72
87	1454,19	884,81	796,52	672,16	648,30	394,46	355,10	299,66
89,9	1492,46	908,09	817,48	689,85	674,32	410,29	369,35	311,69
92,8	1530,68	931,35	838,42	707,52	700,51	426,23	383,70	323,79
95,7	1568,87	954,58	859,33	725,17	726,86	442,26	398,13	335,97
98,6	1607,02	977,80	880,23	742,80	753,37	458,39	412,65	348,23
101,5	1645,15	1000,99	901,12	760,43	780,04	474,62	427,26	360,55
104,4	1683,25	1024,18	921,99	778,04	806,86	490,93	441,95	372,95
107,3	1721,33	1047,35	942,85	795,64	833,82	507,34	456,72	385,41

Tabela 10 – Variação da pressão dinâmica com a altura, nas direções x e y, para resposta total e parcela flutuante para o exemplo 04 (continuação)

$S_3$	Resposta Dinâmica Total				Resposta Flutuante			
	1	0,78	0,74	0,68	1	0,78	0,74	0,68
<b>z (m)</b>	<b>q(z) (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>q(z) (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>q(z) (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>q(z) (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>q(z) (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>q(z) (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>q(z) (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>q(z) (N/m<sup>2</sup>)</b>
<b>110,2</b>	1759,40	1070,52	963,70	813,24	860,94	523,84	471,57	397,95
<b>113,1</b>	1797,46	1093,67	984,55	830,83	888,20	540,43	486,50	410,55
<b>116</b>	1835,51	1116,82	1005,39	848,42	915,60	557,10	501,51	423,21

Tabela 11 – Verificação do conforto humano para edificação com 116 metros de altura

Exemplo 04 - 40 Pavimentos													
		$S_3$	$V_0$ Comp. (m/s)	Desl. H. (cm)		$f$ (Hz)	$a_{\text{máx.}}$ (m/s <sup>2</sup> )		Critérios de avaliação do conforto humano				
				x	y		x	y	NBR 6123/87	ISO 2631-1		CEB/1991	
										Long.	Trans.	Fig. 13	Tab. 3
Eberick	Resp. Total	0,68	30,59	1,99	4,37	0,56	0,0049	0,0235	Atende	S/ limite	S/ limite	MI	IMP
		0,74	33,30	2,36	5,18		0,0069	0,0331	Atende	S/ limite	S/ limite	MI	IMP
		0,78	35,10	2,62	5,75		0,0085	0,0407	Atende	S/ limite	S/ limite	MI	IMP
		1,00	45,00	4,31	9,46		0,0229	0,1103	Não atende	S/ limite	15 h	MI	P
	Resp. Flut.	0,68	18,95	0,76	1,68		0,0007	0,0035	Atende	S/ limite	S/ limite	I	IMP
		0,74	20,63	0,91	1,99		0,0010	0,0049	Atende	S/ limite	S/ limite	I	IMP
		0,78	21,75	1,01	2,21		0,0013	0,0060	Atende	S/ limite	S/ limite	I	IMP
		1,00	27,88	1,65	3,63		0,0034	0,0162	Atende	S/ limite	S/ limite	I	IMP
SAP	R. T.	1,00	45,00	3,98	8,64	0,21	0,0027	0,0126	Atende	S/ limite	S/ limite	I	IMP
	R. F.	0,74	45,00	0,97	2,30		0,0002	0,0009	Atende	S/ limite	S/ limite	IMP	IMP

As acelerações máxima, nas direções x e y, obtida a partir dos deslocamentos do topo da edificação e da frequência natural da estrutura (Tabela 11), não excederam o valor limite expresso na norma brasileira, para a condição da parcela flutuante da pressão dinâmica total, com fator estatístico de 0,74 e período de recorrência de 10 anos (Eberick), garantindo, de maneira geral, a condição de conforto.

Para os casos de acelerações e frequência expostos, perante a condição do fator estatístico de 0,74, resposta flutuante, vida útil de 10 anos para análises do Eberick, na Tabela 11, o tempo de exposição na edificação com 40 pavimentos é de 24 horas considerando os limites transversais e longitudinais dos gráficos da ISO 2631-1, apresentados pelas Figuras 9 e 10.

Com os deslocamentos e frequência da Tabela 11 foi verificada a percepção humana a vibrações causadas pelo vento pela Figura 13 do CEB/1991. Para a parcela flutuante da

pressão dinâmica, a ação do vento é incômoda para o fator estatístico de 0,74 da análise do programa Eberick.

Verificando o nível de percepção humana pela Tabela 3 (CEB/1991), pode-se observar que a ação do vento é imperceptível às pessoas residentes na edificação em estudo, para as acelerações consideradas.

Nas Tabelas 12 e 13 estão resumidos os resultados obtidos para os exemplos 01 a 04.

Tabela 12 – Panorama geral dos deslocamentos horizontais, no topo, para todos os exemplos

	S <sub>3</sub>	Exemplo 01				Exemplo 02				Exemplo 03				Exemplo 04			
		Vo Comp. (m/s)	Desl. H. (cm)		Vo Comp. (m/s)	Desl. H. (cm)		Vo Comp. (m/s)	Desl. H. (cm)		Vo Comp. (m/s)	Desl. H. (cm)		Vo Comp. (m/s)	Desl. H. (cm)		
			x	y		x	y		x	y		x	y				
Eberick	Resp. Total	0,68	30,59	0,54	1,05	30,59	0,94	2,23	30,59	1,44	3,48	30,59	1,99	4,37			
		0,74	33,30	0,64	1,24	33,30	1,11	2,64	33,30	1,71	4,13	33,30	2,36	5,18			
		0,78	35,10	0,71	1,38	35,10	1,24	2,93	35,10	1,90	4,59	35,10	2,62	5,75			
		1,00	45,00	1,17	2,27	45,00	2,03	4,82	45,00	3,12	7,54	45,00	4,31	9,46			
	Resp. Flut.	0,68	26,61	0,41	0,79	21,59	0,47	1,11	19,97	0,61	1,49	18,95	0,76	1,68			
		0,74	28,97	0,49	0,94	23,50	0,55	1,31	21,74	0,73	1,76	20,63	0,91	1,99			
		0,78	30,53	0,54	1,04	24,77	0,62	1,46	22,91	0,81	1,95	21,75	1,01	2,21			
		1,00	36,39	0,77	1,48	31,75	1,01	2,40	29,37	1,33	3,21	27,88	1,65	3,63			
SAP	R. T.	1,00	45,00	0,69	1,35	45,00	1,78	4,34	45,00	2,74	6,84	45,00	3,98	8,64			
	R. F.	0,74	45,00	0,20	0,45	45,00	0,45	1,62	45,00	0,69	2,29	45,00	0,97	2,30			

Tabela 13 – Panorama geral da verificação do conforto humano para todas as alturas

		Critérios de avaliação do conforto humano																				
	S <sub>3</sub>	Exemplo 01				Exemplo 02				Exemplo 03				Exemplo 04								
		N B R 61 23	ISO 2631-1		CEB/1991		N B R 61	ISO 2631-1		CEB/1991		N B R 61 23	ISO 2631-1		CEB/1991		N B R 61 23	ISO 2631-1		CEB/1991		
			L.	T.	Fig	Tab.		L.	T.	Fig	Tab.		L.	T.	Fig	Tab.		L.	T.	Fig	Tab.	
Eberick	R. T.	0,68	A	S/1	S/1	MI	IMP	A	S/1	S/1	MI	IMP	A	S/1	S/1	MI	IMP	A	S/1	S/1	MI	IMP
		0,74	A	S/1	S/1	INT	IMP	A	S/1	S/1	MI	IMP	A	S/1	S/1	MI	IMP	A	S/1	S/1	MI	IMP
		0,78	A	S/1	S/1	INT	IMP	A	S/1	S/1	MI	IMP	A	S/1	S/1	MI	IMP	A	S/1	S/1	MI	IMP
		1,00	A	S/1	S/1	INT	P	Ñ A	S/1	15 h	INT	P	Ñ A	S/1	15 h	MI	P	Ñ A	S/1	15 h	MI	P
	R. F.	0,68	A	S/1	S/1	MI	IMP	A	S/1	S/1	I	IMP	A	S/1	S/1	I	IMP	A	S/1	S/1	I	IMP
		0,74	A	S/1	S/1	MI	IMP	A	S/1	S/1	I	IMP	A	S/1	S/1	I	IMP	A	S/1	S/1	I	IMP
		0,78	A	S/1	S/1	MI	IMP	A	S/1	S/1	MI	IMP	A	S/1	S/1	I	IMP	A	S/1	S/1	I	IMP
		1,00	A	S/1	S/1	INT	IMP	A	S/1	S/1	MI	IMP	A	S/1	S/1	MI	IMP	A	S/1	S/1	I	IMP
SAP	R. T.	1,00	A	S/1	S/1	I	IMP	A	S/1	S/1	I	IMP	A	S/1	S/1	I	IMP	A	S/1	S/1	I	IMP
	R. F.	0,74	A	S/1	S/1	P	IMP	A	S/1	S/1	P	IMP	A	S/1	S/1	IMP	IMP	A	S/1	S/1	IMP	IMP

Como já destacado, a NBR 6123/1987 orienta que, para verificação do conforto, a probabilidade de ocorrência a ser utilizada para o cálculo da pressão dinâmica deve superar 63%, levando em conta que a amplitude máxima de aceleração seja excedida, em média, uma vez a cada 10 anos. Nestas circunstâncias apenas as probabilidades de 75% e 90% podem indicar as condições de conforto as estruturas estudadas. Observando a Tabela 12, verifica-se que os deslocamentos, no topo da edificação, decrescem com o aumento da probabilidade de que a velocidade básica do vento seja excedida, para um período de recorrência de 10 anos. Por este motivo se destaca a probabilidade de 75%, ou seja,  $S_3=0,74$ .

Pode-se notar que, com o acréscimo de pavimentos, do exemplo 01 ao exemplo 04, a amplitude máxima, do topo da edificação, da resposta flutuante, diminui sua parcela de contribuição à amplitude máxima da pressão dinâmica total, tanto para um período de recorrência de 10 anos como de 50 anos. Já a diferença de frequência existente entre a expressão da NBR 6123/1987 e o programa SAP/2000 foi bastante significativa, e se mantém constante para todos os exemplos.

A diferença de deslocamento horizontal existente entre os programas utilizados diminui com o aumento da altura da estrutura.

Em todos os casos, a condição de percepção humana a oscilações é imposta pela direção de maior flexibilidade da estrutura.

A NBR 6123/1987 sugere como parâmetro para a verificação do conforto apenas a aceleração. Como a aceleração máxima, por sua vez, é função do deslocamento e da frequência natural, ela nem sempre cresce com o aumento da altura da edificação (ver Tabelas 5,7, 9 e 11). Portanto, parece sensato que a verificação do conforto se dê através da avaliação da frequência natural juntamente com a amplitude do topo da edificação.

Em função das considerações anteriores, de forma sucinta, acredita-se que, para o exemplo 01, mesmo um dos critérios do CEB/1991 indicando condição de muito incômodo, dificilmente edificações com as características da analisada venham a apresentar desconforto aos ocupantes, pois para frequências acima de 2,0 Hz, pela Figura 13, qualquer amplitude já caracteriza situações de desconforto. Para o exemplo 02, bem como os exemplos 03 e 04, a estrutura passa a se enquadrar na faixa incômoda de percepção humana, segundo o mesmo critério.

Adicionalmente, e embora os resultados obtidos não ratifiquem tal afirmação, é de se supor que o atendimento aos parâmetros de estabilidade não garantam o conforto dos usuários.

Com relação à frequência natural da estrutura, cabe destacar que este é um parâmetro fundamental para a verificação do conforto, independente do critério adotado. Assim, é importante que a determinação da frequência seja efetuada de forma criteriosa.

A Figura 19 apresenta as curvas para as frequências naturais em função da altura da edificação, obtidas mediante expressões simplificadas da NBR 6123/1987 e do CEB/1991.

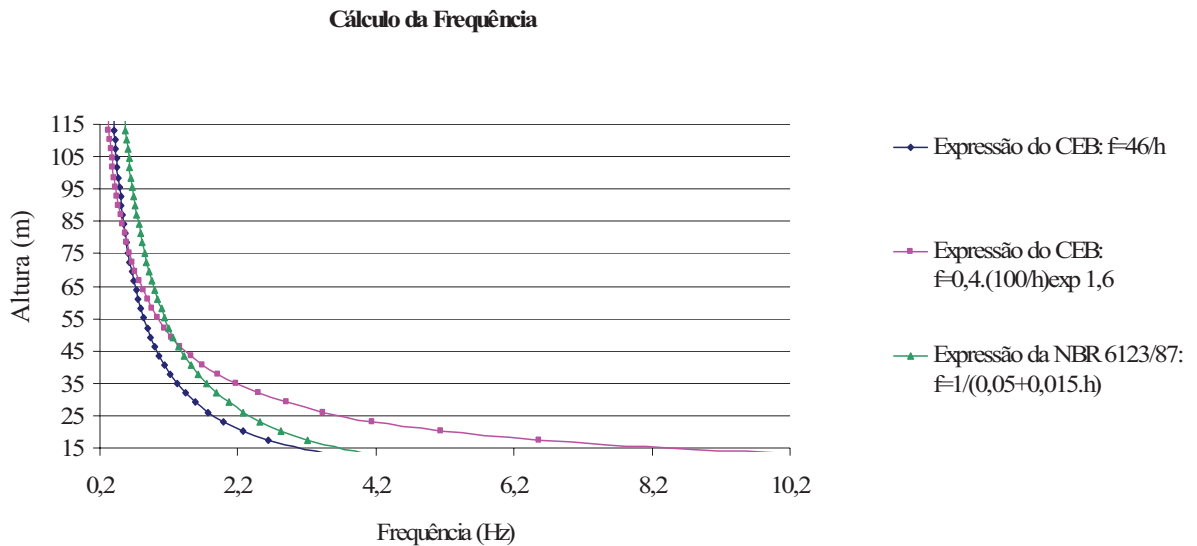


Figura 19 – Frequências em função da altura da edificação segundo expressões simplificadas

Através da Figura 19 pode-se observar que, para pequenas alturas, ocorre grande discrepância entre os valores de frequência fornecidos pelos diferentes critérios. Nota-se ainda que as frequências obtidas pela NBR 6123/1987 são inferiores às dos demais critérios para pequenas alturas, invertendo esta relação para alturas mais elevadas.

### Cálculo da Frequência

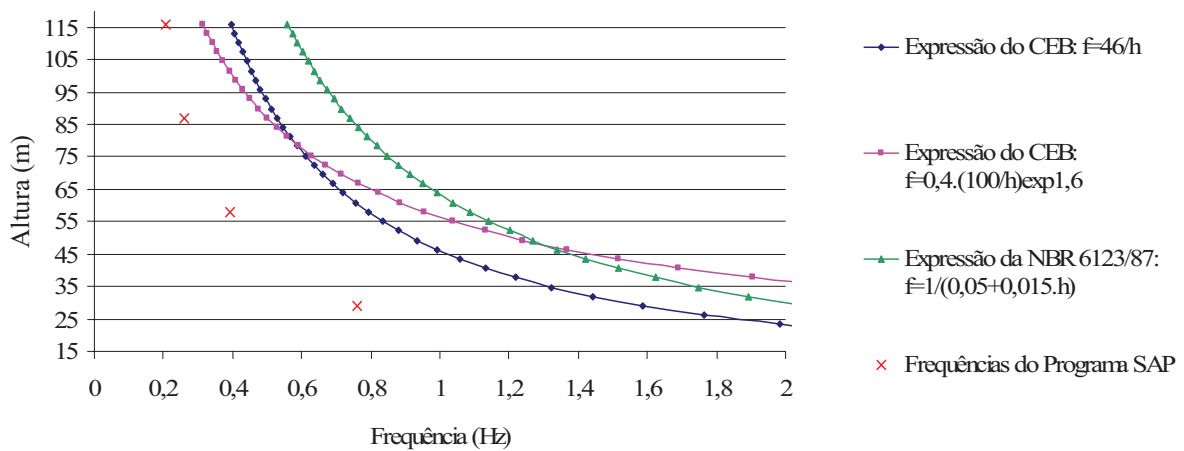


Figura 20 – Comparação entre as frequências das expressões simplificadas e SAP/2000

A Figura 20 acrescenta, aos valores obtidos pelas expressões simplificadas, os resultados da frequência obtidos pela análise no SAP/2000. Observa-se que as frequências do SAP/2000 foram sempre inferiores, com uma aparente tendência à redução das diferenças com a altura. Entende-se que as baixas frequências fornecidas pelo SAP/2000 podem ser parcialmente atribuídas ao refinamento da análise efetuada. Esta suposição é embasada pelos estudos de Moreira (2002, p. 84-86), segundo os quais a consideração de lajes discretizadas em elementos de casca e a simulação de painéis (paredes de alvenaria) confinados entre vigas e pilares, dentre outros, pode conduzir a um acréscimo significativo nos valores da frequência, através da análise no SAP/2000.

## 4.2 Exemplo 05 – Edifício Eli

### Dados gerais

O exemplo 05, retirado de Zandoná (1999), apresenta o estudo de um edifício real executado na cidade de Passo Fundo, no estado do Rio Grande do Sul, com tipologia residencial urbana, e para o qual são conhecidos relatos de eventual desconforto. As análises foram realizadas apenas com o programa Eberick, por ser um software de ampla utilização por calculistas da região. Do programa computacional Eberick foram extraídos os deslocamentos no topo da edificação e os parâmetros de estabilidade global. A frequência



natural não é fornecida pelo Eberick, sendo calculada através da equação (31), retirada da NBR 6123/1987.

Ao contrário dos outros exemplos, este foi analisado mantendo-se as seções dos elementos estruturais tal qual no projeto estrutural da edificação, buscando a reprodução fiel de seu comportamento. Assim, também os critérios para dimensionamento foram aqueles da época do projeto, adotando-se para tal a NBR 6118/1978.

As características gerais empregadas foram:

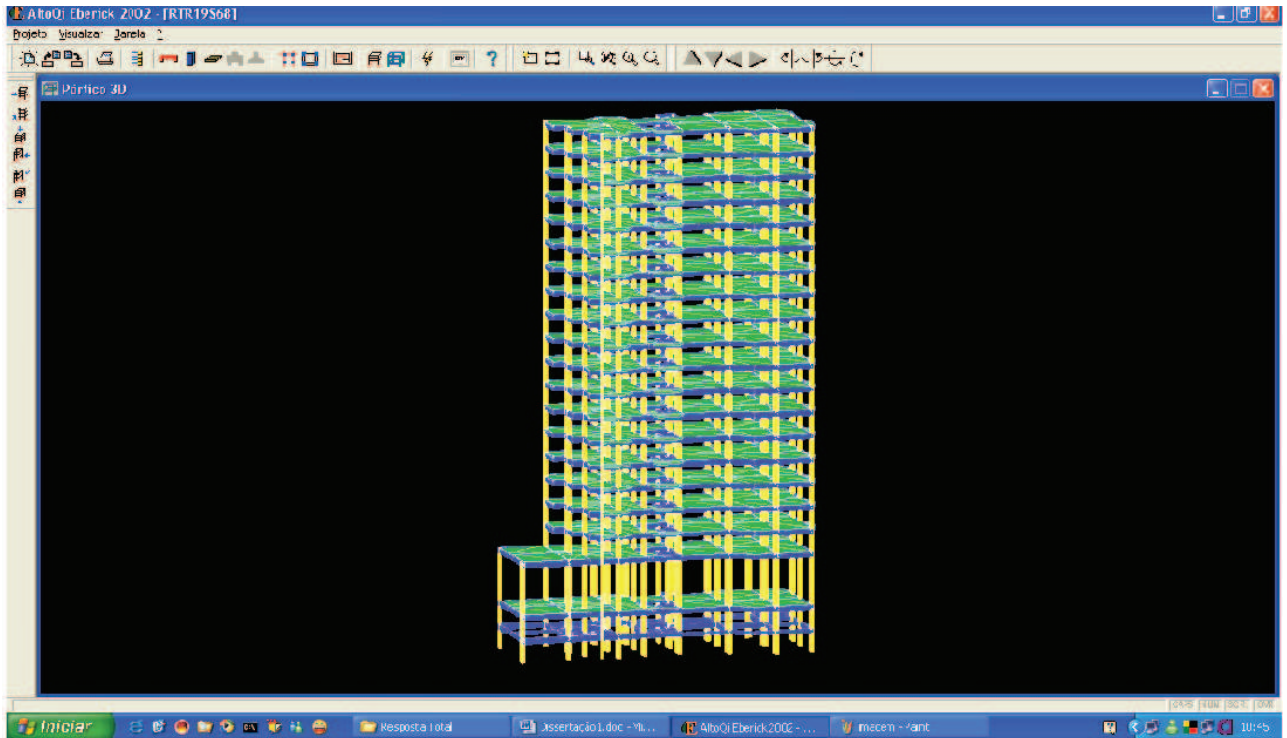
Pé-direito: 2,75 metros

Altura da edificação considerada do nível do terreno até o topo: 55,75 metros

Resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ): 18 MPa

O dimensionamento e disposição dos elementos estruturais podem ser verificados na planta de fôrmas do pavimento tipo do exemplo 05, designada por Figura 21. Já a Figura 22 apresenta uma vista tridimensional da edificação obtida com o Eberick.





Fonte: Eberick, 2002.

Figura 22 – Vista 3D do exemplo 05

### Dados para análise seguindo a NBR 6123/1987

Velocidade básica do vento ( $V_0$ ): 45 m/s

Rugosidade do terreno: Categoria IV

Dimensões da edificação: Classe C

Fator topográfico ( $S_1$ ): 1,0

Fatores estatísticos ( $S_3$ ): 1,0; 0,78; 0,74 e 0,68

Para os fatores considerados, têm-se os respectivos valores para a Velocidade de projeto ( $\bar{V}_p$ ):

31,05 m/s; 24,22 m/s; 22,98 m/s e 21,11 m/s

Amortecimento ( $\zeta$ ): 2%

Frequência natural: 1,13 Hz (obtida da equação (31))

Pressão dinâmica inicial do vento para cada fator estatístico:  $\bar{q}_0 = 0,59 \text{ KN/m}^2$  ;  $0,36 \text{ KN/m}^2$  ;  $0,32 \text{ KN/m}^2$  ;  $0,27 \text{ KN/m}^2$

Parâmetro b: 0,71

Parâmetro p: 0,23

Parâmetro  $\gamma$  : 1,2

Coefficiente de amplificação dinâmica.:  $\xi = 1,25$

Em função do dimensionamento, apresentado na Figura 21, o Eberick forneceu como resultado os seguintes parâmetros de estabilidade global:

Na direção x:  $\gamma_z = 1,65$  e  $\alpha = 1,02$

Na direção y:  $\gamma_z = 1,17$  e  $\alpha = 0,65$

Os valores apresentados pelo programa, apontam a condição de instabilidade da estrutura por apresentar os nós deslocáveis, pois os resultados obtidos excederam os limites segundo ambos os critérios.

A resposta dinâmica total que o vento exerce sobre a edificação, em cada pavimento, é listada na Tabela 14:

Tabela 14 – Variação da pressão dinâmica com a altura, nas direções x e y, para resposta total e parcela flutuante para o exemplo 05

S3	Resposta Dinâmica Total				Parcela Flutuante			
	1	0,78	0,74	0,68	1	0,78	0,74	0,68
<b>z (m)</b>	<b>q(z) (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>q(z) (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>q(z) (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>q(z) (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>q(z) (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>q(z) (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>q(z) (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>q(z) (N/m<sup>2</sup>)</b>
6,25	295,98	180,09	162,12	136,81	55,99	34,06	30,67	25,88
9	370,54	225,46	202,96	171,27	86,72	52,76	47,50	40,08
11,75	440,28	267,89	241,16	203,51	119,42	72,66	65,41	55,20
14,5	507,14	308,57	277,78	234,41	153,70	93,52	84,19	71,04
17,25	572,15	348,13	313,39	264,46	189,31	115,19	103,69	87,50
20	635,88	386,90	348,30	293,92	226,08	137,56	123,83	104,50
22,75	698,69	425,12	382,70	322,95	263,88	160,56	144,54	121,97
25,5	760,85	462,94	416,75	351,69	302,60	184,12	165,75	139,87
28,25	822,53	500,47	450,53	380,19	342,17	208,20	187,42	158,16
31	883,85	537,78	484,12	408,54	382,52	232,75	209,52	176,81
33,75	944,91	574,94	517,57	436,76	423,59	257,74	232,02	195,80
36,5	1005,79	611,98	550,91	464,90	465,34	283,14	254,89	215,09
39,25	1066,53	648,94	584,19	492,98	507,73	308,93	278,10	234,68
42	1127,20	685,85	617,41	521,02	550,71	335,08	301,65	254,55
44,75	1187,81	722,73	650,61	549,04	594,26	361,58	325,50	274,68
47,5	1248,41	759,60	683,81	577,04	638,34	388,40	349,65	295,06
50,25	1309,01	796,47	717,00	605,06	682,94	415,54	374,08	315,67
53	1369,64	833,36	750,21	633,08	728,04	442,98	398,78	336,52
55,75	1430,30	870,27	783,44	661,12	773,60	470,70	423,73	357,58

Considerando-se o topo da edificação, aproximadamente 54% da pressão dinâmica total se retêm na parcela flutuante, tanto para o período de recorrência de 10 anos como de 50 anos.

A Tabela 15 apresenta os resultados relativos à verificação do conforto para a edificação do exemplo 05.

Tabela 15 – Verificação do conforto humano para edificação com 55,75 metros de altura

		Exemplo 05 - 19 Pavimentos												
	S <sub>3</sub>	V <sub>0 Comp.</sub> (m/s)	Desl. H. (cm)		f (Hz)	a máx. (m/s <sup>2</sup> )		Critérios de avaliação do conforto humano						
			x	y		x	y	NBR 6123/87	ISO 2631-1		CEB/1991			
									Long.	Trans.	Fig. 13	Tab. 3		
Eberick	Resp. Tot.	0,68	30,59	5,84	5,29	1,13	0,1714	0,1407	Não atende	S/ limite	8 h	INT	I	
		0,74	33,30	6,93	6,27		0,2414	0,1976	Não atende	S/ limite	4 h	INT	I	
		0,78	35,10	7,70	6,96		0,2980	0,2435	Não atende	S/ limite	4 h	INT	I	
		1,00	45,00	12,65	11,45		0,8043	0,6590	Não atende	4h	1 h	INT	MI	
	Resp. Flut.	0,68	22,08	3,05	2,76		0,0468	0,0383	Atende	S/ limite	S/ limite		MI	IMP
		0,74	24,03	3,61	3,26		0,0655	0,0534	Atende	S/ limite	S/ limite		MI	P
		0,78	25,33	4,01	3,63		0,0808	0,0662	Atende	S/ limite	S/ limite		MI	P
		1,00	32,47	6,59	5,96		0,2183	0,1785	Não atende	S/ limite	8 h	INT	INT	I

O primeiro fato a se observar, na Tabela 15, é que, assim como para os exemplos anteriores, o deslocamento é inversamente proporcional a probabilidade adotado, para um período de recorrência de 10 anos.

A parcela flutuante absorve aproximadamente 52% dos deslocamentos obtidos pelo programa Eberick, para um período de recorrência de 10 anos como de 50 anos.

Na determinação do conforto dos ocupantes, através do cálculo da aceleração máxima, verificou-se que o exemplo 05 garante, de maneira geral, o conforto para os casos onde se considerou a parcela flutuante, com o fator estatístico de 0,74, não ultrapassando o limite de  $0,1 \text{ m/s}^2$ .

Considerando as curvas dos limites longitudinais (ISO 2631-1), o tempo de exposição estabelecido para que não haja perda de eficiência é confirmado pela resposta flutuante da pressão dinâmica total para o fator estatístico de 0,74 e período de recorrência de 10 anos. Portanto, a frequência de 1,13 Hz e a aceleração de  $0,0655 \text{ m/s}^2$  não indicam tempo máximo de permanência na edificação. Considerando os limites transversais, a situação é a mesma que a obtida para o limite longitudinal.

Para os deslocamentos e frequência obtidos para o exemplo 05, as vibrações são percebidas, segundo a Figura 13, de forma muito incômoda, para o fator estatístico de 0,74, considerando a parcela flutuante da pressão dinâmica total e período de recorrência de 10 anos. A verificação apurada pela tabela do CEB/1991 apresenta a situação de percepção considerando a resposta flutuante e fator estatístico de 0,74.

Em todos os critérios analisados para este exemplo, a direção x apresentou maior flexibilidade e definiu os resultados avaliados, bem como o fator estatístico de 0,74, período de recorrência de 10 anos, parcela flutuante da pressão dinâmica total. Segundo o critério da Figura 13 do CEB/1991, a edificação não apresenta condições de conforto que garantam a comodidade dos ocupantes perante a ação do vento.

## 5 CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido nesta pesquisa destaca a importância da determinação do comportamento estático e dinâmico de estruturas frente à verificação do conforto humano para edifícios altos tipicamente urbanos.

Além da contribuição científica, buscou-se despertar nos profissionais da área a necessidade da elaboração de projetos que visem o controle de oscilações causadoras de mal estar, pois estas interferem no desempenho das atividades desenvolvidas pelos usuários das edificações.

Os resultados obtidos com os métodos que utilizam unicamente a aceleração não permitem fazer uma avaliação precisa da percepção humana, porque nem sempre a aceleração aumenta com o acréscimo da altura. Sugere-se portanto que sejam empregados critérios que considerem valores de frequência e amplitude separadamente.

As estruturas do exemplo 02, 03 e 04, apresentam comportamento satisfatório com relação aos parâmetros de estabilidade global, mas não atendem integralmente aos critérios relativos ao conforto humano. Para o exemplo 01, pelo fato da frequência superar 2,0 Hz, segundo a expressão simplificada adotada, mesmo obtendo-se baixos deslocamentos, a situação imposta pelo CEB/1991 é caracterizada como muito incômoda, fato que dificilmente ocorreria para estruturas de baixa altura como a do exemplo adotado.

Considerando a análise do exemplo 05, observou-se que o projeto estrutural estabelece condições de instabilidade da estrutura, e que as condições de conforto dos ocupantes não é assegurada.

Com relação aos parâmetros de estabilidade global, os estudos realizados evidenciam que o atendimento a estes parâmetros não dispensa a verificação das condições de conforto humano.

A definição do conforto, ou falta dele aos usuários, foi estabelecida pela direção de maior flexibilidade das edificações (para os quatro primeiros exemplos, imposto pela direção y e

para o exemplo 05 pela direção x), bem como pelo fator estatístico de 0,74, período de recorrência de 10 anos e parcela flutuante da pressão dinâmica total.

A evidente discrepância entre as frequências apresentadas pelo SAP/2000 e manualmente através da expressão proposta pela NBR 6123/1987 pode ter ocorrido devido ao fato de, na análise feita pelo SAP/2000, não ter sido simulados fatores como o enrijecimento adicional proporcionado pelas alvenarias, ou a contribuição da rigidez das lajes ou, ainda, a expressão da NBR 6123/1987 ser muito genérica.

Em função dos resultados obtidos, as conclusões tomadas reforçam a importância da verificação do conforto aos ocupantes, devido a ações estáticas e principalmente dinâmicas.

### **5.1 Sugestões:**

Sugere-se para prosseguimento deste trabalho:

- Estudar outras edificações existentes com problemas de desconforto humano, utilizando os critérios estudados neste trabalho;
- estudar alternativas para solucionar problemas de comodidade existente em projetos estruturais;
- buscar alternativa de enrijecimento de estruturas já construídas.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AltoQi Eberick 2002. Marca registrada de AltoQi Tecnologia em Informática Ltda. Florianópolis, 1996 – 2003. 1 Programa computacional.

ALVAREZ, R. A. *Calculo de estructuras*. 1ed. Espanha, 1981, v. 2.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 (NB 1): *Projeto de Estruturas de Concreto*. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. NBR 6123 (NB 599): *Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro, 1987.

BLESSMANN, J. *Ação do vento em edifícios*. 2 ed. Porto Alegre: UFRGS, 1989.

\_\_\_\_\_. *Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento*. 2 ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005.

CHÁVEZ, E. S.; PAULA, F. A. de. *Análise das acelerações induzidas pelo vento em edifício alto*. In: XXXII JORNADAS SULAMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 312, 2006, Campinas. Anais... Campinas: Ed. da Unicamp, 2006. 1 CD-ROM.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. *Dynamics of structures*. 7 ed. São Paulo: McGraw-Hill International Editions, 1986.

COMITÊ EUROPEU DE CONCRETO (CEB). *Vibration problems in structures: bulletin d'information*. Nº 209. 1991.

CUNHA, P. M. da. *Avaliação da exposição humana à vibração visando o conforto da comunidade*. Disponível em:

<[http://www.cetesb.sp.gov.br/Ambiente/camaras/texto\\_ca/documentos/minuta\\_norma\\_vibracao.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/Ambiente/camaras/texto_ca/documentos/minuta_norma_vibracao.pdf)> Acesso em: 17 abr. 2005.

EL DEBS, M. K. *Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações*. 1 ed. São Carlos: EESC-USP, 2000.

GIERKE, H. E.; BRAMMER, A. J. *Effects of shock and vibration on humans*. Disponível em: < <http://www.knovel.com/Knovel2/Toc.jsp?BookID=625> >. Acesso em: 17 abr. 2005.

HARRIS, C. M. *Introduction to the handbook*. Disponível em: <<http://periodicos.capes.gov.br>> Acesso em: 17 abr. 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2631-1. *Guide for evaluation of human exposure to whole-body vibration*. 1 ed. 1974.

KAREEM, A; KIJEWski, T; TAMURA, Y. *Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications*. Disponível em: < [http://www.nd.edu/~nathaz/journals/\(1999\)Mitigation\\_of\\_Motion\\_of\\_Tall\\_Buildings\\_with\\_Recent\\_Applications.pdf](http://www.nd.edu/~nathaz/journals/(1999)Mitigation_of_Motion_of_Tall_Buildings_with_Recent_Applications.pdf) >. Acesso em: 23 out. 2005.

MARTINS, C. H; ANTUNES, H. M. C. *Influência da rigidez transversal à flexão das lajes e os parâmetros  $\alpha$  e  $\gamma_z$* . São Carlos. Departamento de Engenharia de Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.

MOREIRA, T. do V. *Análise da sensibilidade dinâmica de edifícios com estruturas esbeltas*. 2002. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

NAEIM, F. *Design practice to prevent floor vibrations*. Structural steel educational council: technical information & product service, 1991.

PARSONS, K. C. *CIBS technical conference 1985 ergonomics assessment of environments in buildings*. Disponível em: < <http://www-staff.lboro.ac.uk/~huph/kens.htm> >. Acesso em: 15 ago. 2005.

RAUBER, J. J. et al. *Apresentação de trabalhos científicos: Normas e orientações práticas*. 3 ed. Passo Fundo: UPF, 2003.

SANTOS, E. F. dos. *Atenuadores visco-elásticos para redução de oscilações aeroelásticas de edifícios altos*. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

SAP 2000 NonLinear Versão 7.12. Structural Analysis Program. Computers and Structures, Inc. University Ave. Berkeley, CA, 1995. 1 Programa computacional.

SETO, W. W. *Vibrações mecânicas*. Rio de Janeiro: McGraw-Hill do Brasil, 1971.

SPENCER, B. F. JR.; SAIN, M. K. Controlling buildings: A new frontier in Feedback. *Special issue of the IEEE control systems magazine on emerging technology*. v. 17, n. 6, p. 19-35, dez. 1997.

TREIN, C. A. *Modelagem dinâmica equivalente de edifícios altos submetidos à ação do vento*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

VENDRAME, A. C. *Vibrações ocupacionais*. Disponível em: <[http://www.higieneocupacional.com.br/download/vibracoes\\_vendrame.pdf](http://www.higieneocupacional.com.br/download/vibracoes_vendrame.pdf)>. Acesso em: 28 maio 2005.

WORDELL, F. *Avaliação da instabilidade global de edifícios altos*. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia na modalidade Profissional) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ZANDONÁ, M. *Influência da alvenaria na estabilidade global das estruturas de concreto armado*. 1999. Monografia. (Trabalho de Conclusão de Curso) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 1999.