

CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DO CONFORTO HUMANO EM EDIFÍCIOS SUBMETIDOS À AÇÃO DINÂMICA DO VENTO¹

Simone Gruhn², Moacir Kripka³, e Mario José Paluch (in memoriam)⁴

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, entre outros. O presente trabalho tem como objetivo apresentar procedimentos para a avaliação do conforto humano em edifícios altos submetidos à ação dinâmica do vento, bem como parâmetros de estabilidade global, buscando verificar a correlação destes com a percepção do ocupante. Como estes objetivos foram efetuadas simulações numéricas em diversas estruturas. Apresenta-se resultados de algumas destas simulações, bem como as conclusões obtidas.

Palavras chave: conforto, estabilidade, vento.

EVALUATION CRITERIA OF HUMAN COMFORT IN BUILDINGS SUBMITTED TO THE DYNAMIC ACTION OF WIND

Abstract: In structural projects, it is usual to analyze structures subject to dynamic loads considering that these actions are of static nature. However, with the adoption of this kind of simplification, actions capable of providing discomfort to users cannot be verified. Especially in tall buildings, aspects related to the human comfort can present great relevance since the vibrations provide, in some situations, lack of concentration, nausea, and uncertainties about the structural safety. The aim of this work is to present procedures to evaluate the degree of comfort of the occupying people in tall buildings subjected to dynamic action of wind, as well as parameters of global stability, seeking to verify the correlation of these with the perception of the occupant. With these objectives five structures were studied. One of them, built in the city of Passo Fundo, presents reports about human discomfort caused by the action of wind.

Keywords: comfort, stability, wind.

INTRODUÇÃO

No campo da engenharia estrutural é usual se deparar com efeitos puramente dinâmicos, ou seja, que apresentam variação com o tempo. Em projetos estruturais, é comum a adoção de diversas hipóteses simplificadoras, devido às dificuldades existentes para a inclusão de cargas variáveis no tempo e posterior verificação das respostas estruturais. 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. Assim, por mais que estejam dimensionadas de modo a atender os requisitos referentes ao estado de ruína, as estruturas de edifícios podem estar suscetíveis 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.

¹ Artículo recibido el 2 de octubre de 2010 y aceptado el 16 de marzo de 2011.

² M.Sc., Engenheira Civil. Universidade de Passo Fundo - 99001-970, Passo Fundo, RS, Brasil.

³ D. Sc., Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade de Passo Fundo - 99001-970, Passo Fundo, RS, Brasil. E-mail: mkripka@upf.br

⁴ D. Sc., Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade de Passo Fundo - 99001-970, Passo Fundo, RS, Brasil.

A amplitude e a frequência de oscilação são responsáveis pelo grau de percepção do movimento por parte do ocupante 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).

É improvável que ocupantes de edifícios estejam expostos a níveis da vibração que causam danos físicos diretamente ao corpo (Parson, 2005). 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.

Observa-se então que avaliar o nível de desconforto dos ocupantes de edifícios altos provocado por vibrações pode ser uma tarefa subjetiva, visto que, além da frequência da oscilação e da aceleração, envolve variáveis como 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 presente trabalho tem como objetivo apresentar e estudar métodos e parâmetros de projeto visando a avaliação do conforto humano em estruturas altas submetidas a vibrações decorrentes da ação do vento. Buscou-se propiciar a verificação do conforto mediante ações de caráter dinâmico em edifícios altos, bem como verificar a correlação entre o atendimento aos parâmetros de estabilidade global de edificações e o nível de conforto do usuário.

Uma abrangente revisão sobre estudos relacionados à percepção humana às vibrações induzidas pelo vento em edifícios altos é apresentada em (Kwok et al., 2009). É destacada a existência de diferenças significativas entre os critérios e metodologias atualmente empregados, bem como importância da determinação de critérios práticos aplicáveis internacionalmente.

CONCEITOS BÁSICOS

Características dinâmicas de uma edificação

Vibrações são movimentos presentes na vida cotidiana das pessoas, seja através de veículos trafegando, impactos de objetos, ação dinâmica do vento, entre outros fatores. 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), fontes repetitivas (como quebradores de pavimentos) ou fontes que operam intermitentemente, mas que se operassem continuamente produziriam vibrações contínuas (como trens ferroviários e tráfego rodoviário). A vibração contínua é aquela que permanece ininterrupta durante o período em consideração (Cunha, 2010).

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. 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).

O comportamento dinâmico de uma edificação que sofre a ação do vento depende de fatores relativos à dimensão, altura e taxas de amortecimento desta edificação. A percepção a oscilações é diretamente proporcional à altura, ou seja, edifícios mais altos apresentam um nível de sensibilidade superior. Uma estimativa da frequência fundamental de um edifício é possível usando a expressão “Hirsch & Bachamann” apud CEB (1991).

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

Onde h é a altura do edifício (m).

Os valores dados pela equação (1), 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 & Bachmann apud CEB, 1991). Uma formulação similar é dada pela equação (2):

$$f(Hz) = \frac{46}{h} \quad (2)$$

De forma alternativa, a estimativa do período (inverso da frequência) é determinada pela norma brasileira de forças devidas ao vento em edificações NBR 6123 (1987). Por exemplo, para uma edificação com estrutura apertada de concreto, sem cortinas:

$$T = 0,05 + 0,015.h \quad (3)$$

Efeitos dinâmicos decorrentes de turbulência atmosférica

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 a oscilações importantes, chamadas de resposta flutuante.

A influência da resposta flutuante na direção do vento médio é importante se o período fundamental da estrutura é superior a um segundo, em especial para as estruturas fracamente amortecidas (NBR 6123, 1987).

De acordo com a norma brasileira NBR 6123 (1987) a velocidade de projeto, \bar{V}_p , correspondente à velocidade média sobre 10 minutos a uma altura do solo de 10 m, em terreno plano e com poucas obstruções (categoria II), é obtida por:

$$\bar{V}_p = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (4)$$

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 probabilísticos, que considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. 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.

Para a determinação das características dinâmicas da estrutura, um modelo contínuo simplificado 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).

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).

A NBR 6118 (2003) apresenta os parâmetros α e γ_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.

CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DO CONFORTO PARA SENSIBILIDADE HUMANA

Os critérios para a avaliação do conforto empregados no presente estudo foram os seguintes:

NBR 6123 (1987)

A amplitude máxima da aceleração pode ser calculada pela expressão:

$$a_j = 4.\pi^2 .f_j^2 .u_j^2 \quad (5)$$

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/s². 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).

ISO 2631/1 (1974) e ISO 2631/2 (1989)

Crítérios baseados em gráficos para os casos de aceleração longitudinal (com a pessoa em posição vertical) e transversal (com a pessoa em posição horizontal), indicando diferentes tempos de exposição. Estes gráficos estão relacionados ao limite de queda de eficiência e fornecem o tempo limite de exposição em função da frequência e da aceleração, considerando vários níveis de desconforto.

Ao contrário da ISO 2631/1 (1974), que leva em conta o tempo de exposição e os limites de desconforto humano, a ISO 2631/2 (1989) retrata única e simplesmente a fronteira da percepção humana, 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 (1989).

CEB (1991), Boletim 209

O nível de tolerância das pessoas a oscilações, induzidas pela ação do vento em edifícios, é dado tanto em termos de valores limites impostos apenas pela aceleração (a exemplo da NBR-6123, 1987) como por um gráfico que relaciona a frequência e a amplitude máximas.

SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Os procedimentos listados no item anterior para a verificação do conforto humano referente a ações de caráter dinâmico em edificações foram aplicados a diversas estruturas. Os softwares utilizados no estudo foram o AltoQi Eberick (2002) (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 SAP2000 (1995)- Structural Analysis Program da Universidade da Califórnia (para os cálculos dos deslocamentos horizontais no topo da edificação e da frequência natural). Por questão de concisão, na seqüência apresentam-se de forma sucinta apenas alguns dos

resultados obtidos, relativos a análises de uma edificação fictícia adaptada de (Wordell, 2003). Um maior detalhamento dos estudos efetuados, incluindo a análise de uma edificação real, é apresentado em (Gruhn, 2007).

A edificação considerada, com dimensões em planta de 18,00m x 12,70m, foi analisada para diferentes números de pavimentos (10, 20, 30 e 40), variando-se as alturas do topo da edificação em 29 metros (exemplo 01), 58 metros (exemplo 02), 87 metros (exemplo 03) e 116 metros (exemplo 04). Como no trabalho original (apenas 20 pavimentos) os parâmetros de estabilidade global não eram atendidos, a estrutura foi redimensionada, a fim de se verificar a existência de correlação entre o atendimento a esses parâmetros e o conforto do usuário. 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. A Figura 1 apresenta a planta de fôrmas do pavimento tipo.

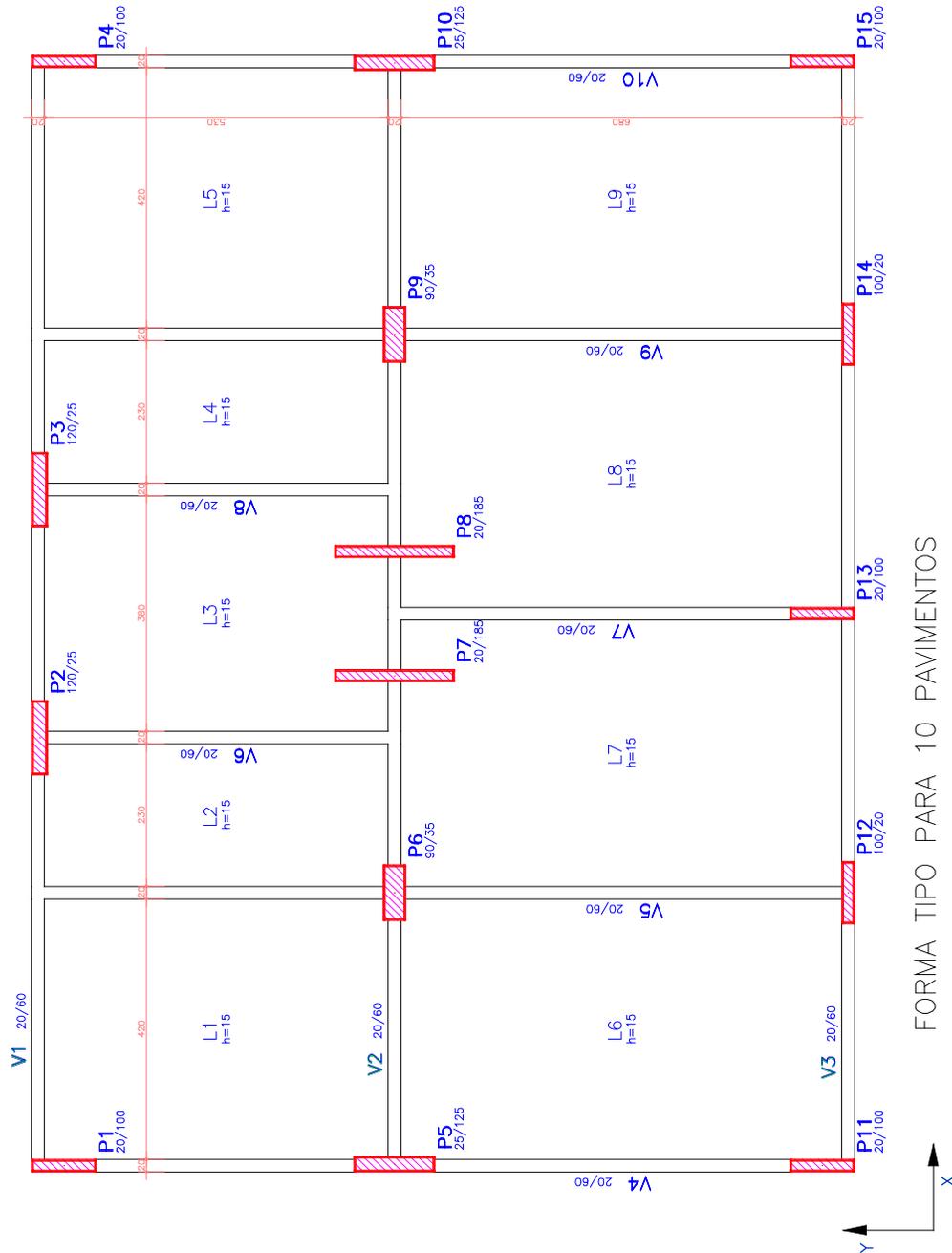


Figura 1: Planta do pavimento tipo do exemplo.

De acordo com a NBR 6123 (1987), o fator estatístico S_3 é um fator que considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. O valor de S_3 igual a 1,00 corresponde a 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, Brasil. As demais características empregadas foram:

Rugosidade do terreno: Categoria IV

Dimensões da edificação: Classe C

Fator topográfico (S_1): 1,0

Amortecimento (ζ): 2% (para estrutura apertada de concreto, sem cortinas)

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. Com base nas pressões calculadas, foram determinados os deslocamentos horizontais no topo da edificação e as correspondentes acelerações. Como o Eberick não fornece a frequência natural, para o cálculo das acelerações deste e dos demais exemplos, empregou-se a frequência dada pela equação (3). Estas foram comparadas com as frequências fornecidas pelo SAP2000.

Com os valores de frequência, aceleração e deslocamento máximo, foi possível avaliar o 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 $0,1 \text{ m/s}^2$. Quando a aceleração, calculada através da equação (5), 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 (1974), a verificação do conforto é estabelecida através de curvas básicas para limites longitudinais e transversais. 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(1974), quando se apresenta a situação “s/ limite” (S/I), 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 na edificação para a aceleração máxima e frequência apresentadas. Por fim, o critério estabelecido pelo CEB (1991) para verificação da percepção humana a vibrações ocasionadas pela ação do vento é baseado em uma tabela com valores de aceleração máxima e em uma figura relacionando frequências e amplitudes de deslocamentos. 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 se adotaram 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. 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. A consideração da resposta flutuante, para a pressão dinâmica, é devido ao fato desta representar a amplitude máxima, ao passo que a resposta total nos fornece a resposta média somada à amplitude máxima da resposta flutuante.

Nas Tabelas 1 e 2 estão resumidos os resultados obtidos para os exemplos

Tabela 1: Panorama geral da verificação do conforto humano (exemplos 1 e 2).

<i>Critérios de avaliação do conforto humano</i>												
		S_3	Exemplo 1				Exemplo 2					
			NBR 6123	ISO 2631-1		CEB		NBR 6123	ISO 2631-1		CEB	
				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
		0,74	A	S/1	S/1	INT	IMP	A	S/1	S/1	MI	IMP
		0,78	A	S/1	S/1	INT	IMP	A	S/1	S/1	MI	IMP
		1,00	A	S/1	15 h	INT	P	Ñ A	S/1	15 h	INT	P
	R. F.	0,68	A	S/1	S/1	MI	IMP	A	S/1	S/1	I	IMP
		0,74	A	S/1	S/1	MI	IMP	A	S/1	S/1	I	IMP
		0,78	A	S/1	S/1	MI	IMP	A	S/1	S/1	MI	IMP
		1,00	A	S/1	S/1	INT	IMP	A	S/1	S/1	MI	IMP
SAP	R. T.	1,00	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

Tabela 2: Panorama geral da verificação do conforto humano (exemplos 3 e 4).

<i>Critérios de avaliação do conforto humano</i>												
		S_3	Exemplo 3				Exemplo 4					
			NBR 6123	ISO 2631-1		CEB		NBR 6123	ISO 2631-1		CEB	
				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
		0,74	A	S/1	S/1	MI	IMP	A	S/1	S/1	MI	IMP
		0,78	A	S/1	S/1	MI	IMP	A	S/1	S/1	MI	IMP
		1,00	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	I	IMP	A	S/1	S/1	I	IMP
		0,74	A	S/1	S/1	I	IMP	A	S/1	S/1	I	IMP
		0,78	A	S/1	S/1	I	IMP	A	S/1	S/1	I	IMP
		1,00	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
	R. F.	0,74	A	S/1	S/1	IMP	IMP	A	S/1	S/1	IMP	IMP

Para os exemplos analisados verificou-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, $S_3 = 0,74$. Com o acréscimo de pavimentos, do exemplo 1 ao exemplo 4, 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 SAP2000 foi bastante significativa, e se manteve 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, observa-se que ela nem sempre cresce com o aumento da altura da edificação. 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 1, 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, qualquer amplitude já caracteriza situações de desconforto. Para o exemplo 2, bem como os exemplos 3 e 4, 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 2 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), correspondentes às equações (1) a (3) do presente trabalho.

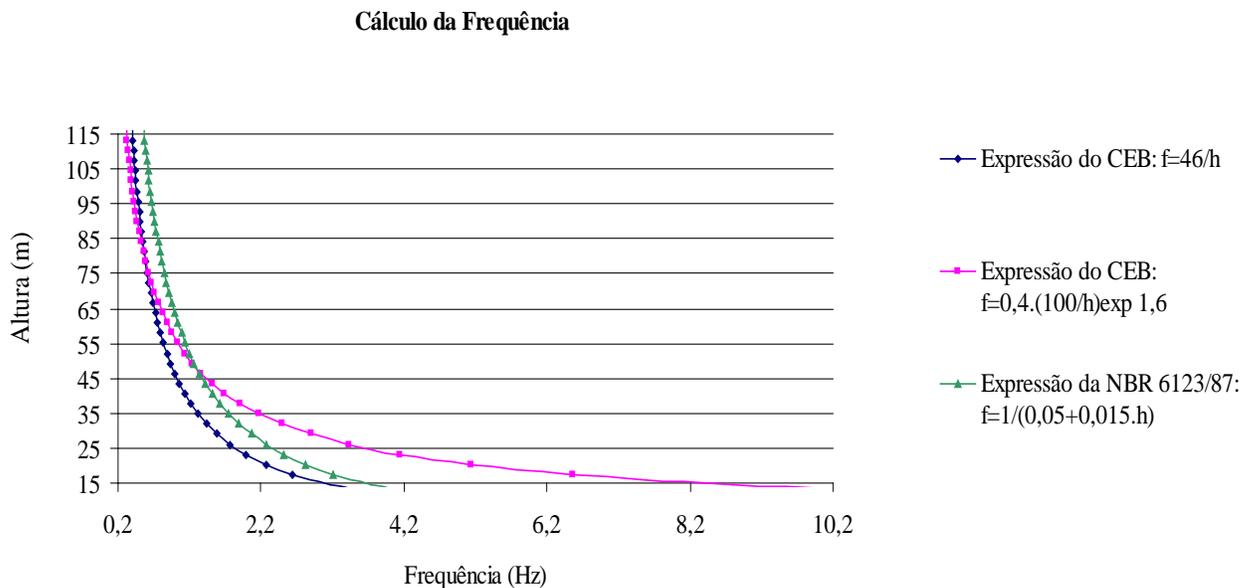


Figura 2: Frequências em função da altura da edificação segundo expressões simplificadas.

Através da Figura 2 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 (1978) são inferiores às dos demais critérios para pequenas alturas, invertendo esta relação para alturas mais elevadas.

A Figura 3 acrescenta, aos valores obtidos pelas expressões simplificadas, os resultados da frequência obtidos pela análise no SAP2000. Observa-se que as frequências do SAP2000 foram sempre inferiores, com uma aparente tendência à redução das diferenças com a altura. Entende-se que as baixas frequências fornecidas pelo SAP2000 podem ser parcialmente atribuídas ao pouco refinamento da análise efetuada. Esta suposição é embasada em estudos de Moreira (2002), 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.

Cálculo da Freqüência

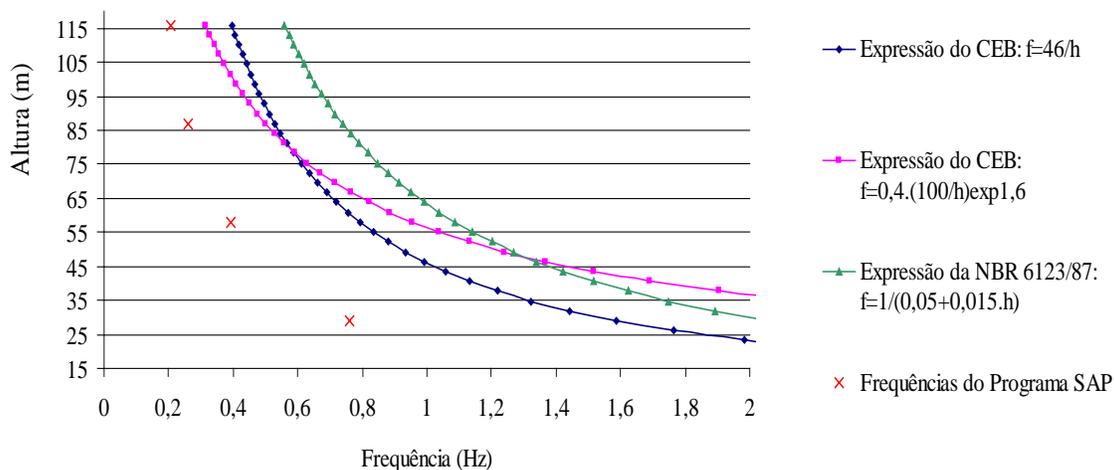


Figura 3: Comparação entre as freqüências das expressões simplificadas e SAP2000.

CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido nesta pesquisa destaca a importância da determinação do comportamento dinâmico de estruturas frente à verificação do conforto humano para edifícios altos tipicamente urbanos. Busca-se despertar a necessidade da elaboração de projetos que contemplem o controle de oscilações causadoras de mal estar, visto que estas podem interferir diretamente 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, pois nem sempre a aceleração aumenta com o acréscimo da altura. Sugere-se portanto que sejam empregados critérios que considerem valores de freqüência e amplitude de forma conjunta.

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 freqüência 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.

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, 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 freqüências apresentadas pelo SAP2000 e manualmente através da expressão proposta pela NBR 6123 (1987) pode ser atribuída basicamente ao fato de, na análise feita pelo SAP2000, não terem sido simulados fatores como o enrijecimento adicional proporcionado pelas alvenarias, ou ainda a contribuição da rigidez das lajes. Destaca-se, ainda, a necessidade da obtenção de expressões simplificadas que permitam uma avaliação mais precisa da freqüência natural das edificações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida ao primeiro autor deste trabalho.

REFERENCIAS

- AltoQi Eberick (2002). Marca registrada de AltoQi Tecnologia em Informática Ltda. Florianópolis, 1996 – 2003, 1 Programa computacional.
- Blessmann, J. (1989). *Ação do vento em edifícios*, 2 ed. Porto Alegre: UFRGS, Brasil.
- CEB (1991). Comitê Europeo de Concreto, Vibration problems in structures: bulletin d'information. No. 209.
- Cunha, P. M. (2010). “Avaliação da exposição humana à vibração visando o conforto da comunidade”, <http://www.ebah.com.br/avaliacao-da-exposicao-humana-a-vibracao-visando-o-conforto-dacomunidade-pdf-a57304.html>.
- El Debs, M. K. (2000). *Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações*, 1 ed. São Carlos: EESC-USP.
- Gruhn, S. (2007). *Avaliação do Conforto Humano em Estruturas Submetidas a Vibrações Resultantes da Ação do Vento*, Dissertação Mestrado em Engenharia, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, Brasil.
- Kwok, K. C., Hitchcock, P. A. e Burton, M. D. (2009). “Perception of vibration and occupant comfort in wind-excited tall buildings”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 97, No. 7-8, pp. 368-380.
- ISO 2631-1 (1974). International Organization for Standardization, Guide for evaluation of human exposure to whole-body vibration, 1 ed.
- ISO 2631-2 (1989). International Organization for Standardization, Evaluation of human exposure to whole body vibration - Part 2: continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz), 1 ed.
- NBR 6118 – NB 1. (2003). Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto de Estruturas de Concreto, Rio de Janeiro, Brasil.
- NBR 6123 – NB 599. (1987). Associação Brasileira de Normas Técnicas. Forças devidas ao vento em edificações, Rio de Janeiro, Brasil.
- Moreira, T. do V. (2002). *Análise da sensibilidade dinâmica de edifícios com estruturas esbeltas*, Tese Doutorado em Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Parson, K. C. (2005). “CIBS”, Technical conference 1985 ergonomics assessment of environments in buildings, <http://www-staff.lboro.ac.uk/~huph/kens.htm>
- SAP2000 NonLinear Versão 7.12. Structural Analysis Program. Computers and Structures, Inc. University Ave. Berkeley, CA, 1995.
- Seto, W. W. (1971). *Vibrações mecânicas*, McGraw-Hill, Rio de Janeiro, Brasil.
- Wordell, F. (2003). *Avaliação da instabilidade global de edifícios altos*, Dissertação Mestrado em Engenharia na modalidade Profissional, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

