



Vibrações em estruturas no Brasil: uma revisão bibliográfica da literatura

I.B.S. Faria^{a†}, F.S.J. Poggiali^a

^a *Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil*

[†] *Autor para correspondência: brenoigor1@hotmail.com*

RESUMO

O presente artigo trata-se de uma revisão da literatura referente às ações dinâmicas em estruturas no Brasil. Esse trabalho objetiva determinar os principais aspectos referentes à vibrações em estruturas, apontar as causas e as consequências dessas ações dinâmicas. Trata-se da caracterização dos fenômenos dinâmicos e das principais fontes geradoras de vibrações. O artigo também apresenta uma breve contextualização das normativas brasileiras e por último aborda as principais consequências desse tipo de carregamento nas estruturas e alguns casos que aconteceram no Brasil, devido aos efeitos dinâmicos do meio. Pelos aspectos analisados, verificou-se a necessidade da realização de estudos na área de ações dinâmicas em estruturas, principalmente se tratando de sismos e a falta de conhecimento da norma que rege projetos sujeitos a ações sísmicas, por parte dos engenheiros. Outro fator de extrema necessidade é a realização de fiscalizações das edificações que são implantadas próximas à meios de grande geração de vibrações decorrentes dos modais de transporte.

1. Introdução

Atualmente no Brasil, tem-se presenciado nas mídias, estruturas de concreto que entraram em colapso, devido na maioria das vezes, pela falta de manutenção. Dessa forma, verifica-se a crescente demanda pela manutenção de obras de artes especiais (OAE) em sua maioria pontes e viadutos. Grande parte dessas obras estão sujeitas a vibrações provenientes de forças de vento e do tráfego de pessoas e automóveis. Além disso, quando se trata de estruturas, Clough e Penzien (1995) ressaltam que qualquer tipo de estrutura pode estar sujeita a carregamentos dinâmicos durante a sua vida útil.

Mas não somente essas obras de artes especiais estão sujeitas a carregamentos dinâmicos. Com a modernidade das propriedades dos materiais, tem-se a possibilidade de elaborar estruturas cada vez mais esbeltas, resultando em uma menor rigidez e menor peso da edificação, o que pode aumentar o risco de excitação. Além disso, essa esbelteza resultante diminui a inércia, fazendo com que menores quantidades de energia sejam necessárias para iniciar uma vibração perceptível. Exemplos dessas estruturas são os edifícios altos, torres, chaminés, construções de antenas e pontes (Mangerig & Zapfe, 2007).

O desenvolvimento deste presente trabalho visa determinar os principais aspectos referentes à vibrações em estruturas, apontar as causas e as consequências dessas ações dinâmicas.

2. Objetivo

O artigo tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica para evidenciar os principais aspectos relacionados às vibrações em estruturas no Brasil, apontar as causas, suas consequências e as principais características desse fenômeno.

3. Levantamento bibliográfico

O levantamento bibliográfico foi elaborado a partir de consultas realizadas em livros, normas técnicas brasileiras e em bases eletrônicas de dados: Google Scholar e Portal de Periódicos CAPES. O levantamento está estruturado em três partes. A primeira trata da origem e das características dos fenômenos dinâmicos. A segunda evidencia uma breve apresentação de normatizações brasileiras que estão relacionadas direta ou indiretamente ao assunto. Por último, algumas consequências e casos reais que ocorreram no país, serão abordadas.

3.1. Origem e fenômenos dinâmicos

O termo dinâmica pode ser definido como uma variação no tempo. Logo uma carga dinâmica é uma carga de magnitude, direção e/ou posição que varia no tempo. Para uma análise da estrutura é conveniente que os carregamentos sejam divididos em periódicos e não periódicos. Esses carregamentos podem gerar movimentos (vibrações) nas estruturas que precisam ser avaliados (Mo, 1994; Clough & Penzien, 1995).

Segundo Küster e Sartorti (2011), a vibração pode ser classificada em dois grupos:

- vibração livre – quando o movimento da estrutura se mantém devido à força da gravidade ou forças elásticas;
- vibração forçada – quando o movimento é causado por uma força externa que é aplicada na estrutura.

Essa última, quando não tomado os devidos cuidados relativos ao amortecimento, pode ocasionar danos estruturais ao sistema. E em ambas as classificações apresentadas anteriormente, as estruturas podem ser amortecidas ou não (Küster & Sartorti, 2011).

Em relação à origem das cargas dinâmicas, elas podem ser provenientes de ações da natureza e de ações humanas (Küster & Sartorti, 2011). As vibrações devido aos terremotos e ao vento podem ser classificadas como ações provenientes da natureza.

Os registros sísmicos no Brasil, mostram um valor geral de magnitude máxima de 5,5 graus na escala Richter (Miranda, Varum & Pouca, 2018). Já a ação do vento, pode gerar um tipo de carregamento, o qual nenhuma edificação está a salvo, principalmente grandes estruturas como edifícios altos, torres, chaminés, mastros, pontes suspensas, pontes estaiadas por cabos e telhados de arquibancadas. As massas de vento possuem uma energia cinética e quando uma estrutura é encontrada no caminho de movimento dessas massas, parte dessa energia é transformada em pressão sobre a superfície da estrutura. Para estruturas mais complexas é necessário análises por meio de testes de túnel de vento, pois as vibrações induzidas, podem afetar a utilização, o comportamento por fadiga e a segurança da estrutura (Bachmann *et al.*, 1995; Brasil & Silva, 2015).

As ações devidas às atividades humanas têm como principais fontes o tráfego rodoviário e ferroviário, equipamentos industriais e atividades relacionadas à construção civil (Athanasopoulos & Pelekis, 2000). Nas atividades da construção civil muitas são as fontes excitadoras, podendo ser pela cravação de estacas, detonação de explosivos, compactação do solo, escavações profundas e demolidores de concreto (British, 2009 cit. por Brito, 2014).

Além disso, as características e parâmetros do solo influenciam a maneira de propagação e diminuição da energia vibratória, do mesmo modo que a distância entre a fonte e o receptor influenciam, pois há um decaimento da energia vibratória com o acréscimo da distância. Solos classificados como argilosos tendem a apresentar maior amortecimento da energia dinâmica, do que os solos arenosos (Brito, 2014; British, 1993 cit. por Brito, 2014).

O comportamento da estrutura em uma vibração ordenada está relacionado ao tipo de solo, elementos de fundação, qualidade e idade da edificação, condição de preservação, frequências naturais e amortecimento da estrutura (British, 2009 cit. por Brito, 2014).

Nos estudos de Küster e Sartorti (2011), os autores verificaram o quão é importante dispor-se de uma estrutura amortecida, pois quanto maior o valor da frequência natural do sistema, menor a chance de a estrutura entrar em ressonância.

Entende-se por frequência natural, a forma de vibração da estrutura em uma vibração livre

(Brasil & Silva, 2015). A frequência natural depende da distribuição da massa e a rigidez da estrutura e é um fator significativo para o projeto de edifícios e a avaliação de seu desempenho sísmico (Hatzigeorgiou & Kanapitsas, 2013). Quando a frequência natural da estrutura se iguala à frequência do carregamento aplicado, há um grande aumento da amplitude com o decorrer do tempo e esse fenômeno, denominado ressonância, pode acarretar problemas sérios para o sistema (Mo, 1994).

3.2. Normatizações brasileiras

Pereira e Neves (2006) ressaltam a importância da criação de uma normativa brasileira que aborde os níveis de vibrações aceitáveis em relação ao conforto humano nas edificações. Na pesquisa desenvolvida, eles puderam verificar que existe um intervalo de incerteza de percepção à vibração. Para essa percepção, a sensibilidade é reduzida em pessoas para a postura em pé, em relação a pessoas sentadas, pois há uma grande redução na transmissão da vibração para diversas partes do corpo humano quando aumenta-se a frequência.

A NBR 6118 (ABNT, 2014), trata que em caso de vibrações excessivas ou por fadiga dos materiais componentes da estrutura, as ações dinâmicas podem originar estados-limites de serviço e estados-limites últimos. A norma ainda recomenda distanciar ao máximo a frequência própria da estrutura da frequência crítica, a fim de manter o comportamento satisfatório do sistema estrutural. E dependendo da destinação, em casos onde não é possível realizar as medidas de frequência, a norma possui uma tabela (Tabela 1) da frequência crítica de algumas edificações sujeitas a vibrações verticais pela ação de pessoas.

Tabela 1 - Frequência crítica para vibrações verticais para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas.

| Caso | Frequência crítica (Hz) |
|---|-------------------------|
| Ginásio de esportes e academias de ginástica | 8,0 |
| Sala de dança ou de concerto sem cadeiras fixas | 7,0 |
| Passarelas | 4,5 |
| Escritórios | 4,0 |
| Salas de concerto com cadeiras fixas | 3,5 |

Fonte: ABNT, 2014.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas também dispõe da NBR 6123 (1988), que trata dos esforços estáticos e dinâmicos do vento para o cálculo em edificações. A norma recomenda que para estruturas de formas, dimensões ou localização não muito comuns, é necessário a simulação dos parâmetros naturais do vento, para a determinação dos esforços atuantes e seus efeitos. Porém Küster e Sartorti (2011) verificaram que é preciso uma revisão da referente norma, pois o mapa de isopletras elaborado a algumas décadas, necessita de uma atualização nos valores das velocidades do vento.

Segundo Santos e Lima (2018), em 2006 foi publicada a norma referente à projetos sujeitos a ações sísmicas, sendo ela a NBR 15421 (ABNT, 2006). Além dos parâmetros das ações sísmicas abordadas na norma, ela também traz a zonificação (5 zonas) sísmica do Brasil. O país possui duas regiões que requerem atenção especial de análises sismológicas, a Amazônia Ocidental e parte da região nordeste, especificamente nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba, onde os efeitos sismológicos são atenuados devido a proximidade da região intraplaca. Os autores, ainda em sua pesquisa, puderam concluir que para a região Sudeste, os parâmetros definidos na NBR 15421 (ABNT, 2006) são conservadores.

Miranda, Varum e Pouca (2018) apresentam que em um questionário aplicado, a maioria dos engenheiros não possuem conhecimento ou possuem conhecimento superficial da norma sísmica brasileira. E em algumas justificativas pela não utilização da norma, estavam citadas:

- não conhecimento da norma;
- esforços causados pelo vento são superiores aos esforços sísmicos;
- não é necessário adotar os procedimentos da norma;
- atuação do profissional em zona sísmica 0;
- desenvolvimento de projetos de pequeno porte;
- informações defasadas sobre dimensionamento e detalhamento da NBR 6118:2014;
- ausência de pesquisas que comprovem a real necessidade de utilização dos parâmetros normativos;
- dificuldade imposta pelos clientes pelo aumento no consumo de materiais;
- os parâmetros adotados pela NBR 6118 (ABNT, 2014), superdimensionam as estruturas.

Quando se tem situações onde a estrutura de concreto é exposta às ações sísmicas, mesmo que a ação do vento seja levada em consideração, é necessário a atenção no detalhamento da estrutura para que ancoragens e traspasses assegurem um parâmetro mínimo de ductilidade exigido (MIRANDA; VARUM; POUCA, 2018).

3.3. Efeitos das ações dinâmicas

Além da possibilidade de danificar a estrutura, as vibrações podem também ocasionar a fadiga dos materiais constituintes do sistema, afetando a utilização da edificação em relação ao conforto dos usuários e ao funcionamento dos equipamentos que dependem da estrutura (Soriano, 2014).

Os movimentos dinâmicos podem afetar não somente a estrutura, como também na cura do concreto, como mostra o estudo apresentado por Fernandes, Bittencourt e Helene (2011), onde as vibrações produzidas pelo tráfego de veículos podem reduzir a resistência a tração e o módulo de elasticidade do material em concretos que foram submetidos à vibrações com frequências semelhantes a valores medidos em uma ponte rodoviária, durante a cura do material.

Estruturas constituídas com pilares e vigas de concreto armado ou aço, tendem em aceitar melhor os efeitos da vibração. Já em estruturas antigas e patrimônios históricos construídos com materiais menos resistentes, por exemplo, prédios constituídos de alvenaria de tijolos de barro, taipa ou madeira, podem apresentar danos estéticos (trincas) e até danos estruturais permanentes quando submetidos à vibrações (Deustches, 1999, cit. por Brito, 2014).

Brito (2013) enfatiza que o tráfego ferroviário e rodoviário é uma significativa fonte de vibração. Danos podem ser causados em edificações próximas a essas regiões de tráfego, já que no Brasil há uma tendência para a ocupação destinada a faixas de domínio de ferrovias e rodovias por habitações precárias (na maioria das vezes), o que aproxima a fonte geradora de vibrações do imóvel. Dessa forma essas habitações acabam sendo expostas a vibrações superiores ao que pode ser classificado como seguro (Brito, 2014).

A Figura 1, apresenta uma residência situada a 10 metros de distância de uma linha férrea. Na parte superior da esquadria da edificação, pode-se verificar a presença de uma trinca, onde uma viga de amarração instalada também está danificada (Brito, Kamimura & Santos, 2015).

Um exemplo de reforço estrutural devido às vibrações excessivas realizado em 1993, foi no Viaduto de Monte Seco (Figura 2), situado no Espírito Santo na BR-101. Em uma inspeção rotineira foi possível verificar o comportamento inadequado da estrutura do viaduto, e a partir de uma série de vistorias foi realizado o reforço da estrutura (Cunha, Lima & Souza, 1996).

Com a construção de imóveis em grandes centros urbanos deve-se ter um cuidado com as edificações vizinhas, principalmente em fase de implementação das fundações. Existem várias ocorrências de prédios e casas que sofreram fissuras e rachaduras devido ao recalque diferencial pela cravação de estacas, além do incômodo dos moradores vizinhos relacionado ao barulho e à percepção das vibrações pelo organismo (Cunha, Lima & Souza, 1996).



Figura 1 - Trinca em uma edificação situada a 10 metros de distância da linha férrea. Fonte: Brito, Kamimura e Santos (2015).



Figura 2 - Viaduto de Monte Seco. Fonte: Cunha, Lima e Souza (1996).

A Figura 3 mostra as rachaduras de um imóvel situado em São Luís no Maranhão, que foram provenientes da operação de um bate-estacas de uma obra próxima (Ribeiro, 2018).



Figura 3 - Rachaduras. Fonte: Ribeiro (2018).

Porém, de acordo com Souza e Ripper (1998), no Brasil, grande parte dos acidentes são devidos à ação do vento, principalmente em galpões. A Figura 4 apresenta uma torre de telecomunicações no Brasil, que desabou sob um carregamento devido a um vento com velocidade superior a 70 km/h (Brasil & Silva, 2015).



Figura 4 - Torre de telecomunicações que entrou em colapso sob a força do vento.

Fonte: Brasil e Silva (2015).

Apesar da elaboração de normas e de pesquisas desenvolvidas na área em âmbito nacional, todo esse conteúdo produzido ainda é escasso, principalmente estudos relativos à sismicidade, quando se toma como referências estudos e normas internacionais. Há uma grande necessidade para estabelecer parâmetros de estabilidade estrutural e de valores limites relativos ao incômodo gerado pelas vibrações (Pereira & Neves, 2006; Brito, 2014; Miranda, Varum & Pouca, 2018).

4. Conclusão

Pela realização do levantamento bibliográfico, foi possível verificar que o Brasil carece de estudos a respeito de ações dinâmicas, principalmente em relação à fenômenos sísmicos. Apesar do país estar situado em uma zona de baixa sismicidade, alguns estados do Nordeste como Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba e a região da Amazônia Ocidental merecem uma atenção especial quando tratados ao assunto, já que essas localidades possuem uma proximidade com a região intra-placa.

É de extrema importância realizar uma análise das ações dinâmicas na estrutura, sobretudo, em edifícios altos e obras de artes especiais, pois essa análise permite aplicar algum aumento de rigidez ou rotulação nos sistemas estruturais, caso seja necessário.

Pode-se constatar também que a maioria dos engenheiros desconhecem a NBR 15421 (ABNT, 2006), que trata sobre projetos submetidos a sismos, e até negligenciam as análises dinâmicas na estrutura.

Outro ponto importante verificado, é a necessidade de uma maior fiscalização da implantação de residências próximas a linhas férreas, pontes e viadutos. Esses locais, sujeitos a ações dinâmicas decorrentes dos modais de transporte, podem abrigar edificações precárias e que geralmente não foram projetadas para tal meio e conseqüentemente nessas edificações surgirão manifestações patológicas desde fissuras, até rachaduras danosas à estrutura, colocando em risco

a vida dos moradores e vizinhos.

Referências

- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 6118: Projeto De Estruturas de Concreto — Procedimento. Rio de Janeiro. 2014.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 6123: Forças Devido ao Vento em Edificações. Rio de Janeiro. 1988.
- Athanasopoulos, G. A.; Pelekis, P. C. Ground Vibration From Sheet Pile Driving in Urban Environment: measurements, analysis and effects on building and occupants. *Soil and Dynamic and Earthquake Engineering* v. 19, p. 371-387. 2000.
- Bachmann, H. et al. *Vibration Problems in Structures: Pratical Guidelines*. Basel, Birkhäuser. 1995.
- Brasil, R. M. L. R. F.; Silva, M. A. *Introdução à Dinâmica das Estruturas*. São Paulo, Blucher. 2015.
- Brito, L. A. Avaliação das Principais Fontes de Vibração no Meio Urbano. *Ambiente Construído* v. 14(4), p. 233-249. 2014.
- Brito, L. A.; Soares, Á. M. S.; Nazari, B. Vibração: Fonte de Incômodo à População e de Danos às Edificações no Meio Urbano. *Ambiente Construído* v. 13(1), p. 129-141. 2013.
- Brito, L. A. Perrone F.; Kamimura, Q.; Santos, A. P. Influência da Vibração Gerada pelo Tráfego Ferroviário no Meio Urbano. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção* v. 5(2), p. 31-39. 2015.
- Clough, R. W.; Penzien, J. *Dynamics of Structures*. Berkeley, Computers & Structures. 1995.
- Cunha, A. J. P.; Lima, N. A.; Souza, V. C. M. *Acidentes Estruturais na Construção Civil*. São Paulo, Pini. 1996.
- Fernandes, J. F.; Bittencourt, T. N.; Helene, P. Concreto Submetido a Vibrações nas Primeiras Idades. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* v. 4(4), p.592-609. 2011.
- Hatzigeorgiou, G. D.; Kanapitsas, G. Evaluation of Fundamental Period of Low-Rise and Mid-Rise Reinforced Concrete Buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* v. 42(11), p.1599-1616. 2013.
- Küster, L. D.; Sartorti, A. L. Análise Dinâmica de Estruturas de Concreto: Avaliação de Três Sistemas Construtivos de Lajes. *Teoria e Prática na Engenharia Civil* n. 18, p.13-22. 2011.
- Mangerig, I.; Zapfe, C. Vibration and Damping of Steel Constructions. In: *The Germanjapanese Bridge Symposium Anais*. Osaka, Osaka City University, Japan. 2007.
- Miranda, P. S. T.; Varum, H. S. A.; Pouca, N. S. V. Risco Sísmico no Brasil: Ameaça, Normalização e Vulnerabilidade. *Concreto & Construções* v. 92, p.78-86. 2018.
- Mo, Y. L. *Dynamic Behavior of Concrete Structures*. Amsterdam, Elsevier Science B. V. 1994.
- Pereira, C. C. G.; Neves, F. A. Conforto Humano e Limites de Percepção para Vibrações Verticais. *Rem: Rev. Esc. Minas* v. 59(3), p. 271-278. 2006.
- Ribeiro, P. C. A. F. Perícia e Avaliação de Impactos Gerados pela Propagação de Vibrações de um Bate-Estaca na Avenida Jackson Lago. *Revista Especialize On-line Ipog* v. 1(16). 2018.
- Santos, S. H. C.; Lima, S. S. Base Sismológica para a Zonificação sísmica da ABNT NBR 15421. *Concreto & Construções* v. 92, p.72-77. 2018.
- Soriano, H. L. *Introdução à Dinâmica das Estruturas*. Rio de Janeiro, Elsevier. 2014.
- Souza, V. C. M.; Ripper, T. *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto*. São Paulo, Pini. 1998.