Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

AVALIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO DA ESTRUTURA DE UM EDIFICIO COMERCIAL EM UMA INSPEÇÃO PREDIAL

A. MEDEIROS
Professor Adjunto I
UTFPR
PR; Brasil
arthurmedeiros@utfpr.edu.br

R.MEDEIROS
Prof. Assistente IV
UFPR
PR; Brasil
rui.med2@gmail.com

V. L. KUDLANVEC JR.
Mestrando em Eng. Civil
UFPR
PR; Brasil
vitorlorival86@gmail.com

RESUMO

A deterioração de estruturas de concreto ao longo dos anos é um tema bastante difundido entre as comunidades técnica e científica, porém usuários ainda não dão a devida importância ao assunto nas edificações que utilizam, trabalham e habitam. Existe no Brasil uma infinidade de edifícios de concreto armado de múltiplos pavimentos que foram construídos há mais de 30 anos que apresentam manifestações patológicas como corrosão das armaduras, desplacamento do concreto, entre outras. Quando estas patologias são aparentes, especialmente em fachadas, os usuários passam a se preocupar e buscar um engenheiro especialista para assegurar de que a edificação não venha a colapsar. É uma prática comum que estes engenheiros especialistas emitam laudos técnicos que certifiquem a estabilidade da estrutura e frequentemente fazem recomendações de procedimentos de recuperação estrutural. Este trabalho apresenta o estudo da frequência de vibração de um edifício comercial, situado em uma avenida de grande tráfego de automóveis e ônibus no centro da cidade de Curitiba/PR, que faz parte de uma vistoria técnica mais ampla. Usuários e proprietários deste edifício reclamavam que sentiam vibrações excessivas dentro dos escritórios e concomitante com a aparição de armaduras corroídas expostas na fachada passaram a se preocupar com a segurança do edifício. A análise dinâmica da estrutura foi realizada através da utilização de acelerômetros sísmicos com faixa de medição de 0,025 Hz a 800 Hz para a obtenção das frequências de vibração e comparadas com as frequências naturais de vibração de edificação. Foi constatado que a estrutura resiste às vibrações impostas, porém a mesma eventualmente causar um pequeno desconforto aos usuários.
Palavras-chave: patologia, concreto, vibração.

ABSTRACT

Concrete structures degradation along the years is a widespread issue in technical and scientific communities, but users do not give the same attention to the buildings they use, work and live. There is a lot of multilevel reinforced concrete buildings in Brazil built more than 30 years ago that present pathologies such as steel corrosion, surface breaking concrete and others. When these pathologies appear in the external facades, the users get worried and look for specialized engineers who could assure that the building will not collapse. Those engineers usually write a technical report that certifies the stability of the structure and recommend procedures for recovering. This work presents a study of the frequency of vibration from a larger technical survey in a commercial building located in a city center avenue with high traffic of buses in Curitiba/PR, Brazil. Users and owners complained that they are used to feel excessive vibration in their offices. Besides, they started to get worried about the building stability because of some corrosion steel surface in the external facades. A dynamic analysis of the structure was performed using seismic accelerometers with range readings from 0,025 Hz to 800 Hz in order to obtain the frequency of vibration and compare to the natural frequencies of the building. It was found that the structure resists to the imposed vibrations, but eventually it may cause some discomfort.
Keywords: pathology, concrete, vibration.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Patologia de estruturas de concreto

Segundo Souza e Ripper (1998) [1], patologia representa a área da engenharia que estuda os sintomas mecânicos, causas e origens dos defeitos das construções. O diagnóstico é a fase do processo de patologia que necessita do especialista a utilização do seu conhecimento técnico, experiência, capacidade de análise, síntese e bom senso. É nessa fase que a ligação causa/efeito deve ser realizada. O conhecimento, a vivência e a experiência do patologista são os fatores mais relevantes para se obter o sucesso de um trabalho de avaliação, reparo ou reforço estrutural.

De acordo com Medeiros (2006) [2], cabe ressaltar que a identificação da origem do problema permite também identificar, para fins judiciais, quem cometeu a falha. Assim, se o problema teve origem na fase de projeto, o projetista falhou; quando a origem está na qualidade do material, o fabricante errou; se está na etapa de execução, trata-se de falha na mão de obra e a fiscalização ou a construtora foram omissos; se na etapa de uso, a falha é da operação e manutenção.

Uma elevada porcentagem das manifestações patológicas tem origem nas etapas de planejamento e projeto, conforme a Figura 1. As falhas de planejamento e projeto são, em geral, mais graves que as falhas de qualidade dos materiais ou de má execução. É sempre preferível investir mais tempo no detalhamento e estudo da estrutura que, por falta de previsão, tomar decisões precipitadas. O Brasil vai na contramão quando se fala em tempo para planejamento e projeto, é dado pouco tempo para estes e leva-se muito tempo para a execução. Esta situação é bem representada pela lei de evolução de custos de Sitter (1984) [3].



Figura 1: Origem dos problemas patológicos com relação às etapas de produção e uso das obras civis
Helene (1992) [4]

1.2 Lei de evolução de custos

Dividindo as etapas construtivas e de uso de uma edificação em quatro períodos correspondentes ao projeto, à execução propriamente dita, à manutenção preventiva efetuada antes dos cinco primeiros anos e à manutenção corretiva após o surgimento dos problemas, a cada uma corresponderá um custo que segue uma progressão geométrica de razão cinco, conforme a Figura 2.

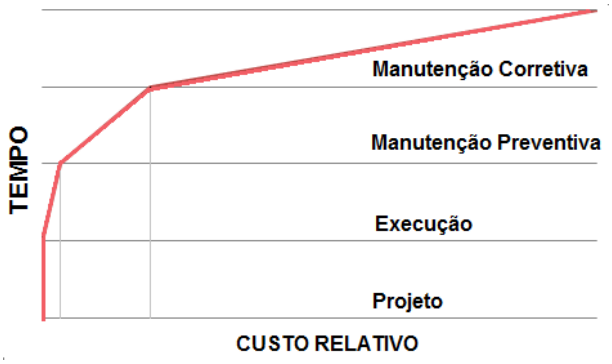

Figura 2 – Lei de evolução de custos de Sitter (1984) [3]

Uma interpretação adequada de cada um destes períodos ou etapas de obra pode ser a seguinte:

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

1.2.1 Projeto

Toda medida tomada na fase do projeto com o objetivo de aumentar a proteção e a durabilidade da estrutura, como: aumentar o cobrimento da armadura, reduzir a relação água/cimento do concreto, especificar tratamentos protetores superficiais, escolher detalhes construtivos adequados, especificar cimentos, aditivos e adições com características especiais e outras, implica um custo que pode ser associado ao número 1 (um) do eixo custo relativo na Figura 2.

1.2.2 Execução

Toda medida extra projeto, tomada durante a execução propriamente dita, incluindo nesse período a obra recém-construída, implica em um custo 5 (cinco) vezes superior ao custo que teria sido acarretado se esta medida tivesse sido tomada no momento do projeto, para obter-se o mesmo "grau" de proteção e durabilidade da estrutura.
Um exemplo típico é a decisão em obra de reduzir relação água/cimento para aumentar a durabilidade e a proteção à armadura. A mesma medida tomada durante o projeto permitiria o redimensionamento da estrutura, considerando um concreto de resistência à compressão maior, maior módulo de deformação, menor fluência e maiores resistências a baixas idades. Essas novas características do concreto acarretariam a redução das dimensões dos componentes estruturais, economia de formas, redução de taxas de armadura, redução de volumes e peso próprio, entre outras. Esta medida tomada em obra, apesar de eficaz e oportuna do ponto de vista de durabilidade, não mais pode proporcionar alteração para melhoria dos componentes estruturais que já foram definidos anteriormente no projeto estrutural e, portanto, pode representar um custo até cinco vezes maior.

1.2.3 Manutenção Preventiva

Toda medida tomada com antecedência e previsão, durante o período de uso e manutenção da estrutura, pode ser associado a um custo 5 (cinco) vezes menor que aquele necessário para a correção dos problemas gerados a partir de uma intervenção não prevista tomada diante de uma manifestação explícita e irreversível de uma patologia qualquer. Ao mesmo tempo estará associada a um custo 25 (vinte e cinco) vezes superior àquele que teria acarretado uma decisão de projeto para obtenção do mesmo "grau" de proteção e durabilidade da estrutura. Como exemplo pode-se citar a remoção de fuligem ácida e a limpeza das fachadas, estucamento e/ou reestucamento das superfícies aparentes, pinturas com vernizes e hidrofugantes, renovação ou construção de rufos, pingadeiras, beirais, brises e outras medidas de proteção.

1.2.4 Manutenção Corretiva

Corresponde aos trabalhos de diagnóstico, prognóstico, reparo e proteção das estruturas que já apresentam manifestações patológicas que necessitem de correção de problemas evidentes. A estas atividades pode-se associar um custo 125 (cento e vinte e cinco) vezes superior ao custo das medidas que poderiam ter sido tomadas no momento do projeto e que implicariam um mesmo "grau" de proteção e durabilidade que se estime da obra a partir da correção. Segundo Sitter (1984) [3], adiar uma intervenção significa aumentar os custos diretos em progressão geométrica de razão 5 (cinco), o que torna ainda mais atual o conhecido ditado popular: "não deixar para amanhã o que você pode fazer hoje".

Uma possível causa de deterioração de uma estrutura ou edificação poderia ser a vibração. Em casos industriais, quando a fonte da vibração é conhecida já na fase de projeto, a estrutura é projetada com rigidez suficiente para absorver e amortecer as vibrações sem danificar a estrutura, como por exemplo a casa de força de uma barragem. Kawecki *et al*. (2011) [5] comentam que se a origem e intensidade da vibração são conhecidas na fase de projeto, é possível com o auxílio do Método dos Elementos Finitos conceber uma estrutura que seja capaz de absorver as oscilações sem sofrer danos e tampouco gerar desconforto para os usuários. Neste contexto, Aalami (2008) [6] relata que o conhecimento da fonte de vibração, sua intensidade e o meio de transmissão da vibração (massa, rigidez e amortecimento) são necessários para determinar as características da vibração em um pavimento de uma edificação e se esta vibração é aceitável.

Hunaidi (2006) [7] comenta que o tráfego pesado de ônibus e caminhões próximos a edificações, de pequeno porte e consequentemente de pequena massa e rigidez, podem ocasionar vibrações que causem desconforto humano. Entretanto a interação entre a origem das vibrações na rodovia e sensação do usuário é complexa, pois depende de uma série de fatores como: a velocidade e o porte dos veículos, o tipo e umidade do solo, a distância da rodovia até a edificação, a existência de bueiros e defeitos na rodovia, os materiais da superestrutura da edificação, entre outros. Além de reportar que a sensação é diferente entre as pessoas por uma infinidade de fatores como peso, idade, sexo, posição corporal, localização dentro da edificação, entre muitos outros. O autor afirma que solos muito moles facilitam a transmissão das vibrações provenientes da rodovia e que no caso de países do norte com inverno muito rigoroso, como o caso do

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Canadá, as vibrações são mais sentidas na primavera e no verão e são atenuadas no inverno porque a água do solo está congelada.

Um conjunto de normas britânicas aborda o assunto de vibração em estruturas e a sensação humana. A norma BS 7385-1 (1990) [8] estabelece parâmetros para avaliar e quantificar vibrações em edificações. A norma BS 6472-1 (2008) [9] fornece uma metodologia para a avaliação da exposição humana à vibração em edificações, vibrações estás que não sejam oriundas de uma explosão. Na Austrália, o *Department of Environment and Conservation* elaborou um guia para a aplicação da BS 6472 com exemplos práticos adaptados à realidade daquele país. Enquanto que a norma BS 6841 (1987) [10] apresenta uma metodologia para avaliar a exposição humana às vibrações de origem mecânica, fornecendo parâmetros para aferir se uma vibração pode gerar desconforto nos usuários.

No estado de São Paulo e Rio de Janeiro, Almeida *et al*. (2011) [11] foram a campo para avaliar danos em pontes decorrentes das vibrações induzidas por veículos, utilizando equipamentos apropriados para medir tais vibrações com servo-acelerômetros e equipamentos auxiliares para armazenar e interpretar os sinais em condições controladas com caminhões teste. Os autores concluíram que as vibrações geradas pelo tráfego produziam frequências de vibração inferiores às frequências naturais das pontes e que portanto as pontes analisadas estavam seguras.

Contudo, a aplicação destas normas e metodologias para edificações no Brasil não é algo cotidiano, pois geralmente os edifícios são robustos o suficiente para amortecer vibrações provenientes do tráfego externo. Além de que o custo para se efetuar estas medições em uma edificação é elevado, pois requer pessoal especializado e geralmente estas metodologias são aplicadas no campo da engenharia mecânica. Porém, como o porte dos ônibus e caminhões cresceu nas últimas décadas e em muitos casos estes circulam próximos às edificações construídas a mais de 40 anos fez surgir a necessidade da aplicação de metodologia semelhante para avaliar a uma edificação comercial no centro da cidade de Curitiba/PR.

No tocante a manutenção de edificações é comum aos usuários, proprietários, administradores e síndicos não darem a devida atenção às manifestações patológicas. Infelizmente faz parte da cultura no Brasil “tapar buracos” para esconder problemas em suas edificações. Decisões equivocadas são tomadas como utilizar um operário da construção civil para fechar uma armadura corroída exposta em um teto de garagem com argamassa convencional e posterior pintura. Mesmo indicativos visíveis mais evidentes como armaduras expostas na fachada de um edifício frequentemente são ignorados pelos usuários das edificações por não terem conhecimento da dimensão dos problemas que estão por vir. Quando estes usuários ou administradores pedem a consultoria de um engenheiro especializado, se assustam com os preços da vistoria e de quanto lhes custaria o reparo de sua edificação. E a única resposta que muitos moradores e usuários de edificações com manifestações patológicas quer é saber se a edificação vai desabar? Ou quanto tempo mais eles podem utilizar a referida edificação sem nenhuma intervenção.

Este artigo apresenta o caso de uma vistoria em um edifício comercial, onde os usuários reclamavam de vibração excessiva nos escritórios e ao notarem armaduras expostas nos pilares da fachada, assim como na estrutura da garagem subterrânea passaram a se preocupar com a segurança da estrutura. O objetivo foi mostrar a existência de uma correlação entre a passagem dos veículos na avenida em frente com excitações impulsivas da estrutura do prédio, além de verificar se estas vibrações tinham alguma relação direta com as armaduras corroídas e com o desplacamento de concreto na fachada e no interior da edificação. Por questões contratuais e éticas o nome e endereço do edifício não serão apresentados neste trabalho.

2. VISTORIA DA EDIFICAÇÃO

A vistoria foi realizada por solicitação do proprietário com a finalidade de informar, aos responsáveis pela edificação em questão, as condições de segurança da estrutura do edifício, através de um laudo técnico mais amplo elaborado com o auxílio de: inspeção visual cuidadosa para a localização e identificação de causa/origem de danos e patologias existentes no edifício; levantamento fotográfico das manifestações patológicas; ensaios não destrutivos de potencial de corrosão, medição da resistividade do concreto e profundidade de carbonatação; medições de vibração da estrutura do edifício, foco deste trabalho; além da realização de um levantamento das cargas acidentais (estantes de papeis, mobiliário e usuários) do edifício para a verificação do real estado de cada um dos elementos estruturais da edificação e para análise do carregamento de cada pavimentos para o entendimento da relação carga/vibração.

2.1. Histórico da edificação

O edifício em questão foi projetado para fins comerciais em estrutura de concreto armado com protensão. O projeto estrutural foi realizado pelo engenheiro Paulo Augusto Wendler, na época professor titular da Disciplina de Resistência

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

dos Materiais da UFPR, no ano de 1975, construído no mesmo ano. Consta de um subsolo, pavimento térreo, primeiro pavimento com anfiteatro e mais nove pavimentos tipo, com lajes de 10 centímetros de espessura e vãos de 1,25 metros apoiadas em vigas protendidas de 15 x 50 centímetros de seção transversal com vão de 16,55 metros e estas vigas estão apoiadas em 8 pilares em forma de "H". A edificação está dividida em dois blocos: um em concreto armado convencional de resistência à compressão de 15 MPa que abriga as escadas, os elevadores, a casa de máquinas e um reservatório de água elevado; um outro bloco frontal com os pavimentos comerciais de concreto armado e protendido com resistência à compressão de 22,5 MPa, onde se localizam os pavimentos que apresentam desconforto aos usuários devido a constante presença de vibração.

2.2. Inspeção visual

Uma vistoria detalhada foi realizada em todos os cômodos do edifício com tomada de fotos de quaisquer defeitos estruturais aparentes. No laudo técnico entregue ao proprietário da edificação estão indicadas e ilustradas com fotos mais de uma centena de manifestações patológicas de armaduras corroídas e expostas. Alguns dos casos mais emblemáticos como armaduras corroídas expostas nos pilares da fachada com o risco de que um desplacamento de concreto possa atingir algum pedestre (Fig. 3a) e a base de um pilar junto à calçada frontal da edificação (Fig. 3b), estão apresentados na Figura 3.



(a) (b)

Figura 3 – Armaduras corroídas e desplacamento de concreto na fachada da edificação

É importante ressaltar que, no verão, quando o uso de ar condicionado nos escritórios é frequente, ocorre o escoamento de água dos aparelhos de ar condicionado na base dos pilares da fachada. Além disso, foi possível observar o odor de urina na fachada do térreo, por ser uma região central da cidade de Curitiba que é pouco movimentada à noite, acaba sendo habitada por moradores de rua que utilizam cantos de edificações mal iluminadas para fazer suas necessidades fisiológicas. Estes líquidos ácidos na base dos pilares da fachada agravam ainda mais o processo corrosivo das armaduras.
Na Figura 4 são apresentadas imagens do interior da edificação com estado avançado de corrosão das armaduras da laje da cisterna (Figura 4a) e também nos estribos de uma das vigas da garagem próximo do apoio no pilar (Figura 4b).

2.3. Ensaios não destrutivos

Foram realizados ensaios para medir o potencial de corrosão e avaliar a eventual presença de células de corrosão em estruturas de concreto armado e protendido utilizando o equipamento suíço Canin-Proceq, segundo a norma americana ASTM C 876 (2009) [12], como mostram as Figuras 5a e 6a. A determinação da resistência elétrica do concreto para análise do estado de condutividade informativo do estado de corrosão em estruturas de concreto armado e protendido foi realizada com o auxílio do equipamento suíço Resipod-Proceq, seguindo a norma americana ASTM G 57 (2012) [13], como mostram as Figuras 5b e 6b. A profundidade de carbonatação foi determinada por meio de indicador de fenolftaleína.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459




(a) (b)

Figura 4 – Armaduras em estado avançado de corrosão no interior da edificação




(a) (b)

Figura 5 – Equipamentos utilizados nos ensaios não destrutivos




(a) (b)

Figura 6 – Medições do potencial de corrosão e resistividade do concreto

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

2.4. Medição das vibrações da estrutura e análise dinâmica

As medições de vibração na edificação, foco deste trabalho, foram realizadas utilizando acelerômetros sísmicos da empresa PCB Piezotronics, modelo 393C, com faixa de medição de 0,025 a 800 Hz, placas de aquisição da empresa National Instruments Compact, modelo DAQ NI 9234 e um programa computacional desenvolvido exclusivamente para a aquisição dos dados de interesse. Foram realizadas três etapas de medições de vibração, todas estas medindo as vibrações no exterior do edifício e comparando com: o subsolo do edifício; o centro do vão de cinco andares (2º, 4º, 6º ,8º e 10º); mapeamento do sexto andar. Os detalhes completos das medidas de vibração constam do Relatório Técnico 2367/2013 [14] do Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento do LACTEC. As informações mais relevantes foram obtidas das comparações das vibrações ao longo dos andares quando ônibus urbanos passavam em frente à edificação e estas são apresentadas na sequência.

Os sinais foram coletados de forma contínua medindo a amplitude de aceleração em m/s^2 ao longo do tempo. A partir do sinal coletado no domínio do tempo, apresentado na Figura 7, é possível calcular as transformadas de Fourier dos sinais, obtendo os resultados no domínio das frequências, em Hertz (Figura 8). Com os resultados é possível fazer uma análise comparativa da propagação de vibrações ao longo do edifício.

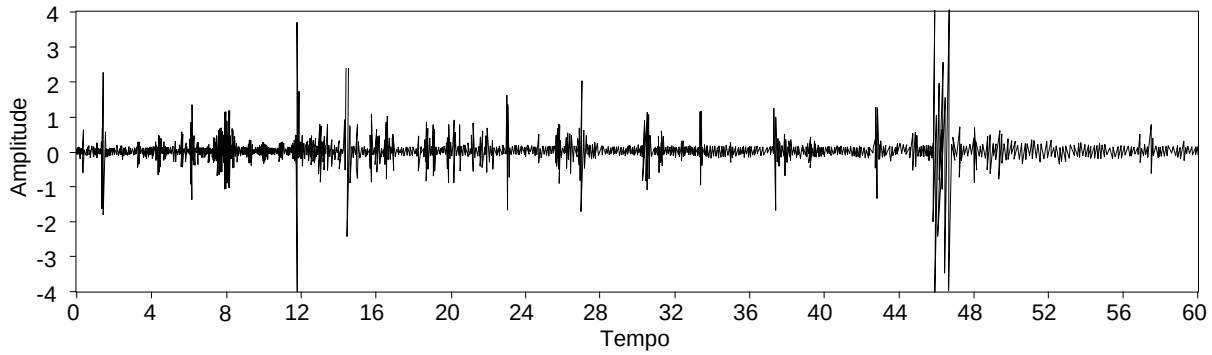

Figura 7 – Exemplo do gráfico de aceleração *versus* tempo

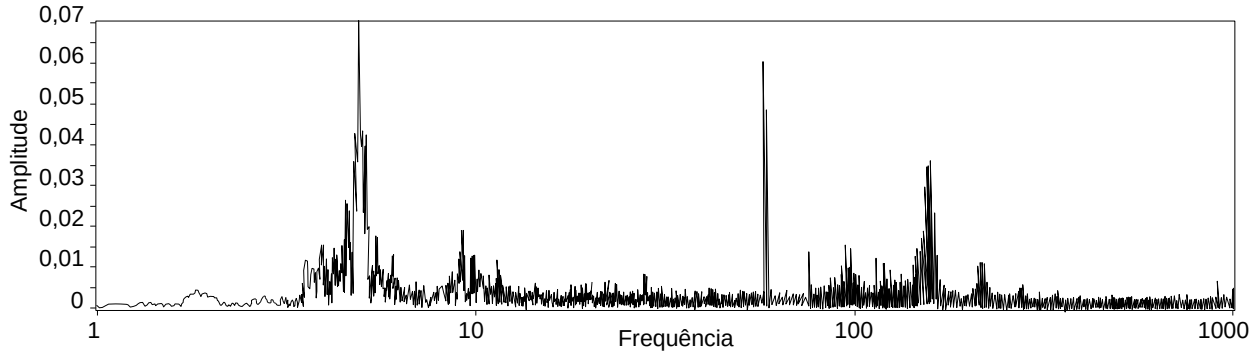

Figura 8 – Exemplo do gráfico de aceleração no domínio da frequência

3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1. Domínio dos tempos e das frequências

A Figura 9 apresenta a amplitude de vibrações ao longo de um minuto obtida no sensor externo, na calçada em frente à edificação. As Figuras 10, 11 e 12 apresentam as medições simultâneas no domínio do tempo para o centro do vão das lajes no 2º, 4º e 6º andares, respectivamente.

Nas Figuras 9 a 12, uma diferença pode ser observada quando comparados diferentes andares em uma mesma análise. Os retângulos coloridos destacam alguns padrões de resposta (vibração), que se deslocam no eixo do tempo, sugerindo que trata-se da resposta à mesma excitação vinda da base. O atraso no tempo pode representar justamente o tempo de transmissão vertical, pela estrutura do prédio, e as alterações no sinal podem retratar o modo como cada estrutura responde, atenuando ou amplificando o sinal original. Como comportamento geral, observa-se a atenuação do sinal conforme sobe-se de andar, a ponto de alguns dos sinais originais já não gerarem resposta a partir do sexto andar.

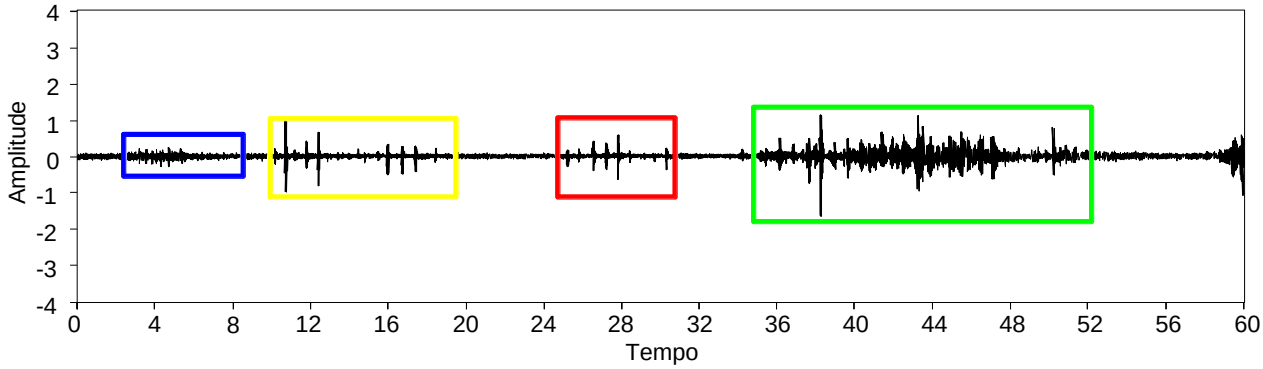

Figura 9 – Sensor externo: aceleração *versus* tempo

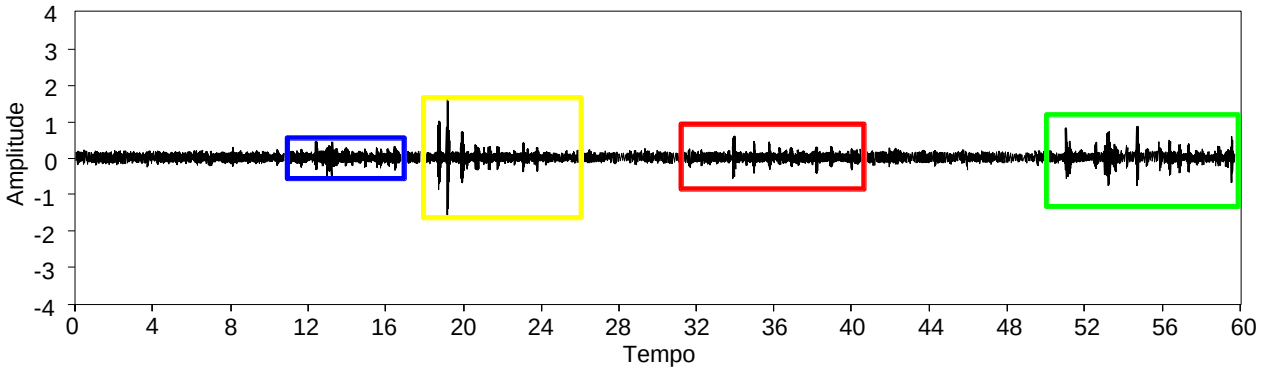

Figura 10 – Sensor no 2º andar: aceleração *versus* tempo

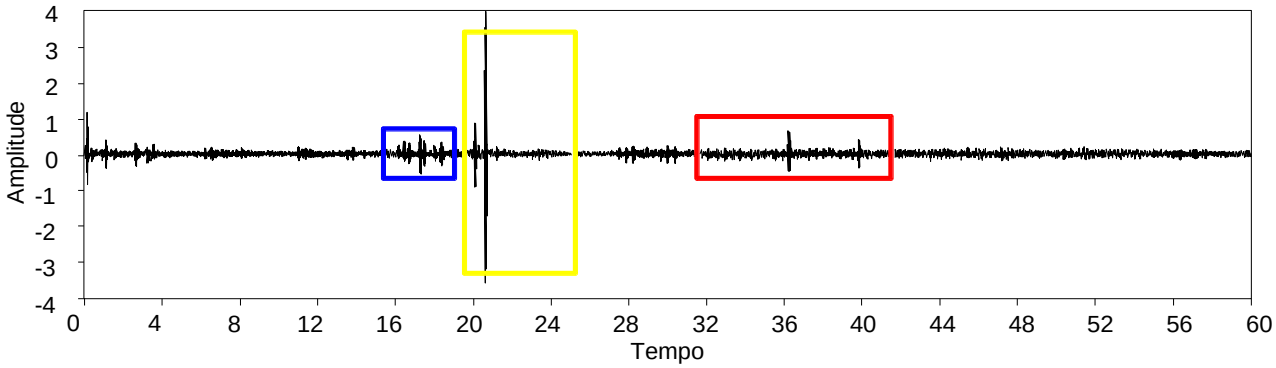

Figura 11 – Sensor no 4º andar: aceleração *versus* tempo

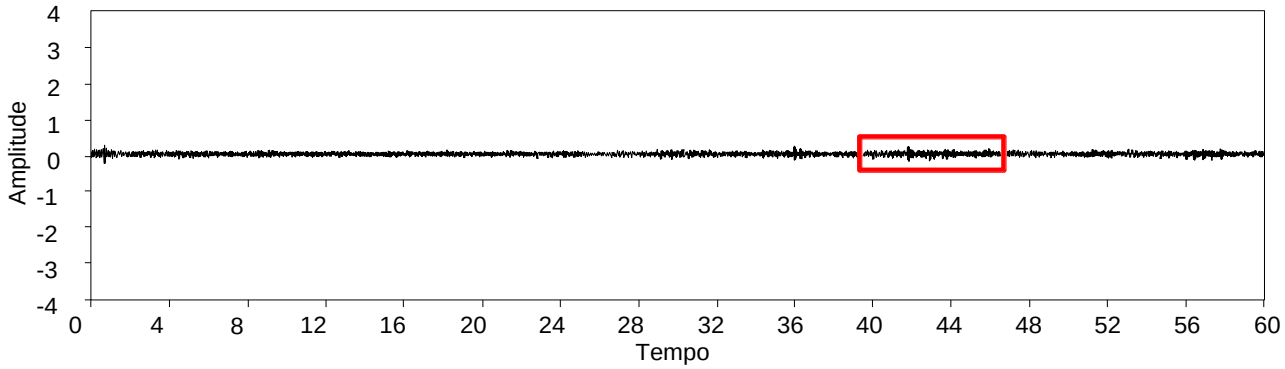

Figura 12 – Sensor no 6º andar: aceleração *versus* tempo

As Figuras 13, 14, 15 e 16 apresentam o espectro de frequências equivalentes às Figuras 9 a 12.

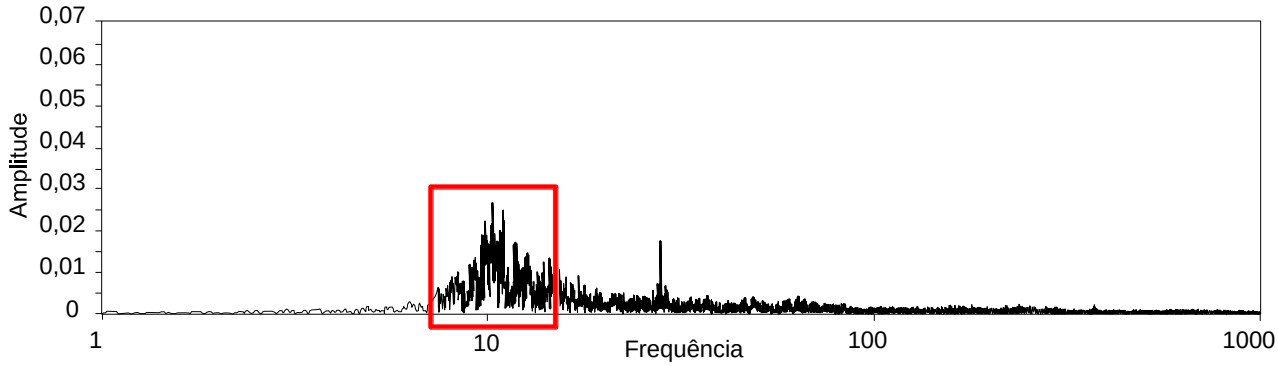

Figura 13 – Espectro de frequências: sensor externo

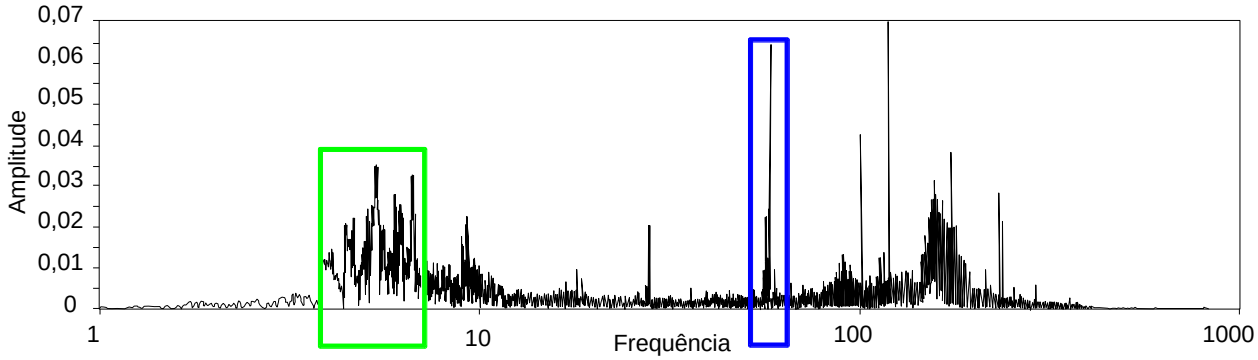

Figura 14 – Espectro de frequências: sensor no 2º andar

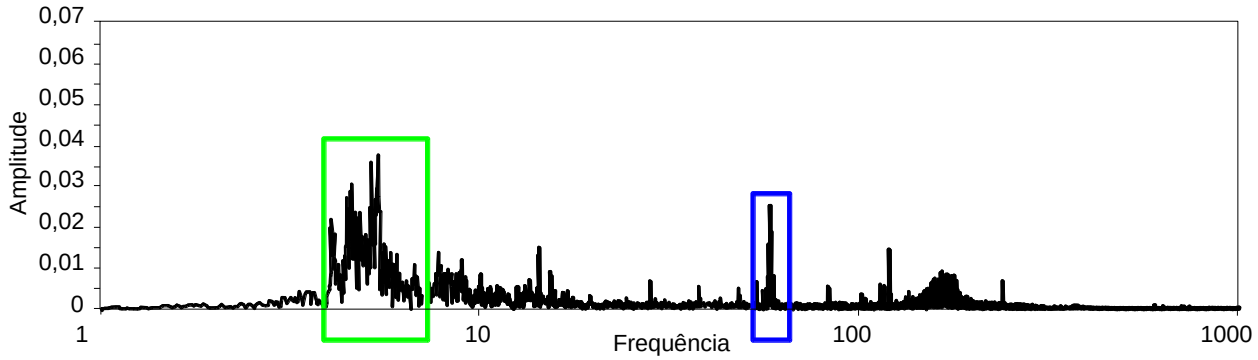

Figura 15 – Espectro de frequências: sensor no 4º andar

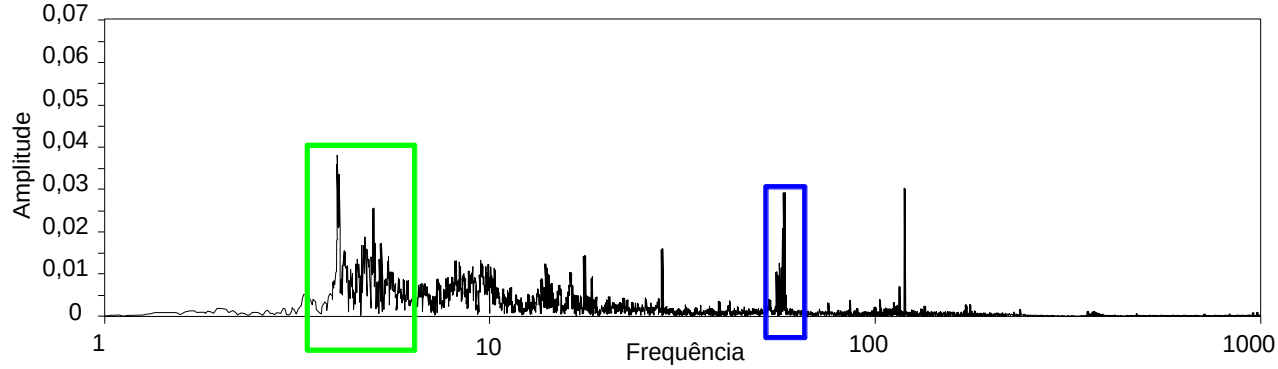

Figura 16 – Espectro de frequências: sensor no 6º andar

A informação de maior relevância extraída das Figuras 13 a 16 é que a excitação gerada na via (sensor externo) é caracterizada por uma vibração com frequência de aproximadamente 10 Hz, conforme destacado no retângulo vermelho

da Figura 13; ao mesmo passo, observa-se que todos os sensores localizados nos andares registram respostas na casa do 5 Hz, conforme destacado nos retângulos verdes das Figuras 14 a 16. Cabe salientar que o pico presente sobre os 60 Hz, destacado pelos retângulos azuis, nos gráficos do 2º ao 6º andar são referentes à interferência causada pela frequência de alimentação da rede elétrica.

3.2. Cálculo do parâmetro de conforto a partir da norma BS 6841 (1987)

Ainda, a partir dos valores de aceleração no domínio do tempo, foi possível calcular a média RMS das acelerações nos intervalos de tempo de medição. O valor RMS (*Root Mean Square*) é tomado como referência na comparação com os valores sugeridos pela norma BS 6841 (1987) [10], para os limites de vibração para o conforto humano. Para um resultado quantitativo, foram realizadas análises em oitavas. Essa análise leva em consideração bandas de frequências e é realizada fazendo-se um filtro de banda no sinal original. Após a aplicação do filtro é então calculado o RMS do sinal. Segundo a norma BS 6841 a análise deve ser realizada em um espectro em frequência de 1 a 80 Hz.

Foram realizados os cálculos para cada sinal em cada sensor e para o julgamento se a vibração é severa é necessário avaliar o RMS em terços de oitavas, além de uma ponderação para cada frequência. Os valores ponderados são então elevados ao quadrado, somados para todas as frequências e por fim é extraída a raiz quadrada desse parâmetro. Esse parâmetro final, segundo a BS 6841, deve ser menor ou igual a 0,0260. O parâmetro foi calculado para 23 cenários diferentes entre sensores no subsolo, ao logo dos andares ou aleatoriamente distribuídos no 6º pavimento. O resumo dos parâmetros calculados para os distintos cenários é apresentado na Figura 17.

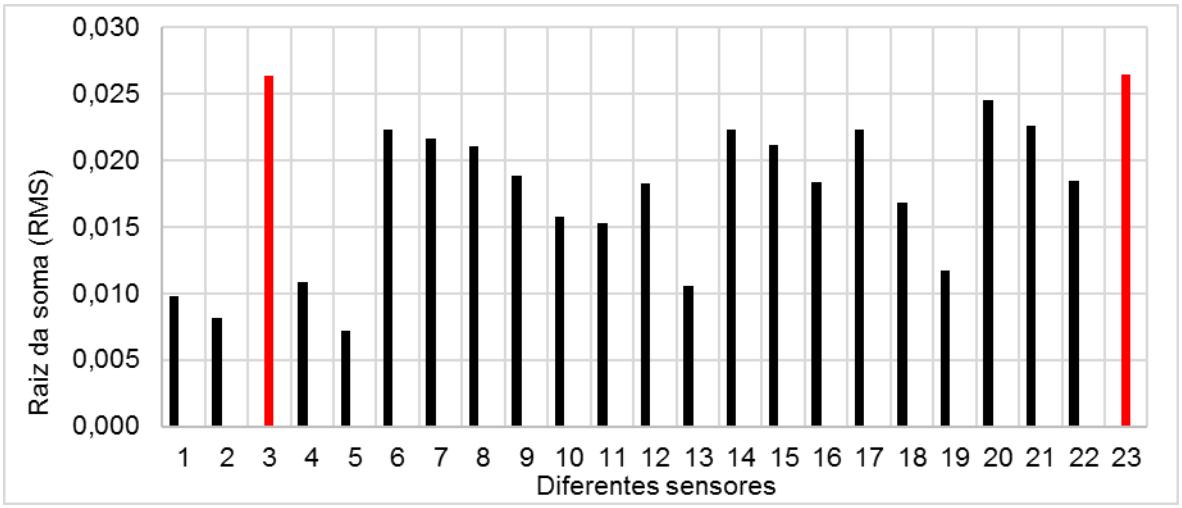

Figura 17 – Parâmetro calculado segundo a BS 6841 (1987) para diferentes configurações

A partir da Figura 17 observa-se que o parâmetro superou o valor recomendado pela norma BS 6841 em dois dos vinte e três cenários, o que aponta para sensação de desconforto em algumas situações eventuais. O sensor 3 corresponde a uma configuração no subsolo e o sensor 23 a um sensor aleatoriamente distribuído no sexto pavimento.

3.3. Frequência natural de vibração da edificação

Um modelo tridimensional da estrutura da edificação foi feito no programa computacional SAP 2000 V15 a fim de obter a frequência natural de vibração da estrutura. A frequência natural obtida foi de 2,832 Hz, uma vez que a frequência de vibração da excitação externa é da ordem de 5,0 Hz a estrutura não entrará em ressonância, de acordo com o item 23.3 da NBR 6118 (2014) [15].

3.4. Desconforto dos usuários

Considerando que a constituição estrutural da edificação é de vigas com pouca rigidez (15 cm x 50 cm x 1655 cm de vão) com ligações em poucos pilares, a estrutura está suscetível a respostas dinâmicas externas cíclicas que a colocam em vibração próxima aos primeiros harmônicos de excitação, podendo gerar eventualmente certo desconforto aos usuários. Estas vibrações são mais sentidas nos andares onde a massa de utilização (carga acidental) é menor, uma vez que o amortecimento das vibrações é proporcional à massa. Estas vibrações são provocadas pela passagem de veículos em frente ao edifício, em particular ônibus urbanos. O mau estado de conservação da pista de rolamento, com brechas e desníveis bem em frente ao edifício (Figura 18), aliado à velocidade dos ônibus gera vibrações. A vibração se propaga

pelo subleito da pista que é constituído por uma argila siltosa muito mole de três metros de profundidade, assentada em uma camada 1,2 metros de argila orgânica fofa. Estas camadas de argila, envolvidas pela água do lençol freático que se encontra 80 centímetros abaixo do nível da rua ou pavimento térreo, criam um harmônico que se propaga pelo meio aquoso. Estas ondas são absorvidas pelas cortinas de contenção do subsolo e pelas fundações do edifício, transmitidas aos pilares, criando uma excitação que se propaga pelos pilares até as vigas onde estão as lajes que recebem as cargas móveis de pessoas, mobiliário e arquivos de papel.



(a)



(b)

Figura 18 – Falhas, fendas e irregularidades no asfalto em frente à edificação

3.5. Verificação da estrutura

Foi realizado um levantamento detalhado do carregamento de cada um dos pavimentos que são ocupados por escritórios que armazenam inúmeros arquivos de papel (Figura 19), considerando todas as combinações de carregamento previstas pela NRB 6120 (2000) [16] como: peso próprio dos elementos estruturais, sobrecarga do contrapiso e da fachada de vidro, o mobiliário, os usuários, entre outras.



Figura 19 – Arquivos de papel sobre as lajes do edifício

Apesar do elevado número de arquivos de papel nas lajes e da estrutura da edificação ser bastante esbelta, todas as lajes, vigas e pilares estão de acordo com os limites estabelecidos pelas normas NBR 6118 (2014) [15] e NBR 6120 (2000) [16].

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da inspeção visual foi observado que existem diversos processos localizados de corrosão que afetam pontualmente pilares e outros elementos secundários que se forem recuperados dentro da técnica recomendada, (sugeridas no laudo técnico) restituiriam a condição de aceitável para a garantia da durabilidade e vida útil estrutural, dentro das premissas do projeto e normas pertinentes. Tal consideração foi corroborada pelos ensaios não destrutivos de potencial de corrosão, resistividade do concreto e medidas de profundidade de carbonatação. Embora as determinações das profundidades de carbonatação tenham resultado pequenas, considerando a idade da edificação, o que mostra bons parâmetros de durabilidade, os cobrimentos disponíveis sobre as armaduras eram muito variáveis, explicando os quadros patológicos localizados de corrosão existentes.

Quanto a análise dinâmica, foi observado que a principal fonte de excitação vem do tráfego de ônibus, especialmente pelas falhas no asfalto em frente à edificação. Esta fonte foi medida na calçada, exatamente ao lado das brechas no asfalto, gerando uma vibração com frequência de 10 Hz. Esta vibração é transmitida para a estrutura que absorve parte desta excitação e transmite aos pavimentos uma vibração com frequência de 5 Hz. De acordo com a NRB 6118 (2014) [15] a frequência crítica para vibrações verticais de estruturas submetidas a vibração pela ação de pessoas para alguns casos especiais como escritórios é de 4 Hz. Devido à natureza complexa da interação entre as diferentes fontes de excitação da estrutura eventualmente poderiam ocorrer episódios isolados de excitação das frequências naturais de estruturas do edifício, podendo gerar ressonância e levar a grandes deslocamentos, o que geraria nos ocupantes a sensação de instabilidade do prédio. Tal situação é confirmada na Figura 17 quando em alguns cenários de medições de vibração o parâmetro calculado de acordo com a norma BS 6841 (1987) [10] fica acima do valor considerado confortável. Foi constatado que quanto menor o carregamento do pavimento mais significativa é a vibração do pavimento e é mais sentida pelos usuários.

A conclusão do estudo feito a pedido do proprietário do edifício foi de que a estrutura é estável, apesar de os ocupantes eventualmente sentirem alguma vibração ocasionada pela passagem de ônibus na avenida danificada em frente ao edifício. Estas vibrações não têm relação direta com os diversos pontos isolados de corrosão das armaduras e não levariam o edifício à ruina. Entretanto, foi fortemente recomendado que as patologias da estrutura fossem reparadas com a máxima urgência e que fosse solicitado à Prefeitura Municipal de Curitiba melhorias no asfalto em frente a edificação. Cabe ressaltar que uma melhoria no asfalto de toda a região central da cidade traria melhorias para outros edifícios comerciais e residenciais próximos ao edifício estudado. O que mais chamou a atenção dos autores deste trabalho é que passados mais de dois anos deste estudo de caso, nenhuma medida de reparo estrutural da edificação foi tomada pelos administradores do edifício em questão, tampouco no que diz respeito ao pavimento rodoviário por parte da Prefeitura.

5. REFERÊNCIAS

[1] Souza, V. C. M.; Ripper, T., *Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto*. Pini, São Paulo, 1998, 255 p.
[2] Medeiros, R., *Notas de aula da disciplina de patologia e recuperação de estruturas*. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006. 46 p.
[3] Sitter, W. R., *Costs for service life optimization. The "law of fives"*. CEB-RILEM, Durability of concrete structures. Proceedings of the International Workshop, Copenhagen, 1984, pp. 18-20.
[4] Helene, P. R. L., *Manuel para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto* armado. Pini, Fosroc, São Paulo, 1992, 216 p.
[5] Kawecki, J.; Kowalska-Koczwara, A.; Stypula, K., *Consideration of criteria of vibration comfort of people in diagnosis and design of buildings*. World Academy of Science, Engineering and Technology 59, November 2011, Venice Italy, pp. 1496-1502.
[6] Aalami, B. O., *Vibration design of concrete floors for serviceability*. Technical Note 290, Adapt Corporation, San Francisco State University, California, 2008, 20 p.
[7] Huinaidi, O., *Traffic vibrations in buildings.* Construction Technology Update No. 39, National Research Council of Canada, June 2000, 6 p.
[8] British Standards Institutions - BS 7385. *Evaluation and measurement for vibration in buildings - Part 1: Guide for measurement of vibration and evaluation of their effect on buildings*. London, 1990, 24 p.
[9] British Standards Institutions - BS 6472. *Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings - Part 1: Vibration sources other than blasting*. London, 2008, 28 p.
[10] British Standards Institutions - BS 6841. *Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock*. London, 1987, 24 p.
[11] Almeida, P. A. O; Rodrigues, J. F. S.; Almeida, R. F., *Avaliação de danos em pontes decorrentes das vibrações induzidas por* veículos. In: VI Workshop Desenvolvimento Tecnológico nas Concessões de Rodovias, Recursos de desenvolvimento tecnológico nas concessões rodoviárias, Soluções Técnicas e Aplicadas, Brasília, 2011, pp. 82-92.
[12] American Society for Testing and Materials - ASTM. *Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforced steel in concrete - C 876*-09. Annual Book of ASTM Standard, 2009. 7 p.
[13] American Society for Testing and Materials - ASTM. *Standard test method for field measurement of soil resistivity using Wenner four-electrode method - G 57*-06. Annual Book of ASTM Standard, 2012. 5 p.
[14] Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC. *Relatório Técnico nº 2367*. Curitiba, 2013, 50 p.
[15] Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 6118. *Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014, 256 p.
[16] Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 6120. *Cargas para o cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro, 2000, 5 p.