



A: XXXIX-0000

ANÁLISE MODAL DE LAJES DE CONCRETO ARMADO PARA USO DE EQUIPAMENTOS ROTATIVOS DA INDÚSTRIA TÊXTIL

MODAL ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE SLABS FOR USE IN ROTATING EQUIPMENT IN THE TEXTILE INDUSTRY

Iálysson da S. Medeiros (1) (A); Douglas M. de Lima (2); Henrique T. Lima (1); Luis E. de M. Alas (1); Pablo A. López-Yáñez (3)

(1) Eng. Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Caruaru, Brasil.

(2) Dr. Prof., Universidade Federal de Pernambuco, Núcleo de Tecnologia, Caruaru, Brasil.

(3) Dr. Prof., Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Recife, Brasil.

Endereço para correspondência: ialysson.medeiros@ufpe.br; (A) Apresentador

Área temática: Métodos Experimentais.

Resumo

Devido ao grande desenvolvimento e crescimento da Indústria têxtil do Arranjo Produtivo Local (APL) de confecções do Agreste pernambucano, é necessário que se faça uma análise do comportamento dinâmico, envolvendo a utilização das máquinas nas edificações. Nesta pesquisa, analisou-se um prédio utilizado como centro de bordar de uma empresa. Foram desenvolvidas análises experimentais utilizando metodologias de ensaios de impacto de calcanhares, numéricas utilizando o software SCIA Engineer 21.1 e analíticas via teoria de placas ortotrópicas de Mindlin, a fim de obter os parâmetros de frequência da edificação. As lajes L2 e L4 apresentaram resultados experimentais de 15,64% e 14,63% para razão de amortecimento e 19,25 Hz e 14,90 Hz de média da frequência experimental, respectivamente. No modelo analítico encontrou-se valores de frequências para L2 de 16,98 Hz e L4 de 14,64 Hz. Na análise numérica, L2 e L4 tiveram valores de frequência de 17,98 Hz e 14,00 Hz, respectivamente. Dessa forma, observa-se que os valores de frequências naturais da fase experimental apresentados são estatisticamente próximos aos do modelo numérico e analítico. Portanto, pode-se concluir que a máquina de bordar que opera com uma frequência de 8,33 Hz atende as recomendações normativas, sendo seguro o seu uso. Por fim, conclui-se que as metodologias utilizadas apresentam respostas válidas e confiáveis.

Palavras-chave: Análise modal, análise estrutural, razão de amortecimento, indústria têxtil.

Abstract

Due to the development of the textile industry of the Local Productive Arrangement (LPA) in the Agreste region of Pernambuco, it's necessary to carry out a dynamic analysis involving the use of machines in edifices. In this research, a place used as an embroidery center was analyzed. Experimental analyzes were carried out using methodologies of heel impact tests, numerical using the Scia Engineer 21.1 software and analytical using Mindlin's orthotropic plate theory, to obtain the frequency parameters of the building. Slabs L2 and L4 showed experimental results of 15.64% and 14.63% for damping ratio, and 19.25 Hz and 14.90 Hz on the experimental frequency, respectively. In the analytical model, frequencies were found for L2 of 16.98 Hz and L4 of 14.64 Hz. In the numerical analysis, L2 and L4 had frequencies of 17.98 Hz and 14.00 Hz, respectively. Thus, it is observed that the values of natural frequencies of the experimental phase are statistically close to those of the numerical and analytical model. Therefore, it can be concluded that the embroidery machine that operates with a frequency of 8.33 Hz meets the normative recommendations and is safe to use. Finally, it is concluded that the methodologies used present valid and reliable answers.

Keywords: Modal analysis; structural analysis; damping ratio; textile industry.



1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos estão sendo discutidos temas relacionados com as vibrações no intuito de expandir o conhecimento na área, buscando evitar problemas causados por este fenômeno e garantindo o desempenho adequado das edificações. Tratando especificamente das estruturas que são utilizadas para suportar máquinas rotativas de bordado, diversas são as solicitações que estão envolvidas diretamente no problema em questão pois estas apresentam naturezas distintas, desde as cargas estáticas até as ações de característica dinâmica causadas pelos movimentos vibratórios.

Os fenômenos físicos atuantes nas estruturas de concreto armado podem ser investigados com certa precisão, desde que sejam analisados adequadamente de forma a representar o comportamento de todos os fatores. Neste aspecto, devido à grande complexidade das estruturas, a solução de forma analítica fica dificultada. No entanto, no geral, são utilizadas metodologias numéricas amplamente aplicadas na mecânica estrutural, destacando-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) para realização da análise modal e elaboração de modelos matemáticos calibrados.

Adicionalmente, as investigações podem ser realizadas por meio de mecanismos de instrumentação experimental para o monitoramento de estruturas, sendo capaz de realizar a inspeção através dos indicadores modais dinâmicos que determina as características dinâmicas na forma de frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibração.

Os modelos mais atuais de telefonia móvel são equipados com acelerômetro interno que tem capacidade de verificar a frequência natural de vibração de forma tridimensional, e com taxas de aquisição de 50 a 200 Hz, dependendo do modelo e com excelente precisão (PRAVIA, 2015). Os acelerômetros de sinais utilizando micro-electro-mechanical systems (MEMS) em telefonia móvel tem sido objeto de análise desenvolvida por diversos autores, podendo destacar os estudos de Pravia e Braido (2015), Feldbusch (2017), Muliterno, Muliterno Jr e Praiva (2019), Manikandan et al. (2021) e Braido e Praiva (2022).

Compreende-se que há uma grande necessidade da aplicação das análises dinâmicas nas estruturas que abrigam máquinas de bordado, atendendo com clareza as vantagens desta aplicação que está diretamente relacionada com o fornecimento de informações integradas e globais da estrutura. Atrelado a isso, pode-se considerar a grande possibilidade de utilizar a análise modal na verificação da integridade da estrutura podendo qualificar, monitorar, adaptar e desenvolver técnicas para o controle de vibração.

Nessa perspectiva, o objetivo desse artigo consiste na análise modal de lajes de concreto armado que abrigam máquinas de bordado da indústria têxtil comparando os resultados das análises numérico-computacional e analítica com os resultados experimentais obtidos por meio de sinais micro-electro-mechanical systems (MEMS) accelerometers, com um aplicativo de celular sistema Android. Depois de comparados os resultados, serão apontadas relações pertinentes entre os resultados obtidos, além de verificar se a estrutura analisada atende aos limites de conforto humano estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

2. METODOLOGIA

Neste estudo, foi realizado o ensaio experimental de vibração em placas de laje utilizando um aparelho smartphone para análise das vibrações in loco, um software comercial para modelagem numérico-computacional e formulações para placas ortotrópicas para avaliação analítica. A edificação analisada possui três pavimentos (superior, térreo e semienterrado) e funciona como uma confecção têxtil, possuindo máquinas de costura e bordado que compõem o



modelo de trabalho da empresa. O estudo tem como foco, analisar as vibrações nas lajes do pavimento superior, onde funciona a seção de bordados, de acordo com a Figura 1.

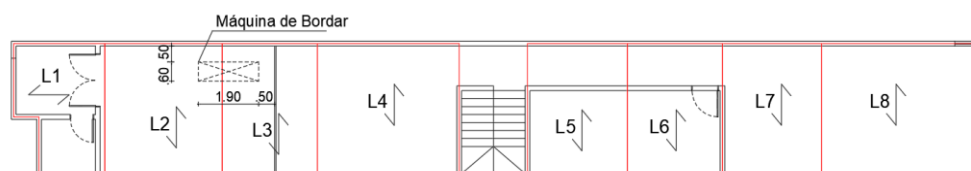


Figura 1. Croqui do pavimento superior da edificação.

2.1. Características do sistema de piso

O pavimento superior da edificação é composto por lajes pré-moldadas unidirecionais, apoiadas nas vigas de borda. No sistema de laje pré-moldada unidirecional, as lajes são executadas com treliças de concreto armado pré-fabricadas, blocos cerâmicos ou de poliestireno expandido, que servem como fôrmas, e camada de compressão em concreto com armadura.

Para o sistema de lajes sob flexão, foi necessário utilizar a Teoria da Placa Ortotrópica Equivalente ou Analogia de Placa, que consiste em converter a laje nervurada em uma laje maciça com espessura constante e comportamento equivalente ao da laje original. Para isso, a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) permite este cálculo por meio das exigências de projeto, no que diz respeito às dimensões geométricas, espaçamento entre os eixos e espessura da mesa das nervuras.

2.2. Procedimento de elaboração do estudo

O estudo visa a obtenção das frequências naturais das placas de laje do pavimento superior da edificação analisada, sendo realizado o levantamento das características geométricas e dos materiais da edificação, medição in loco das vibrações, montagem de modelo numérico-computacional para simulação dos modos de vibrações e análise analítica para determinação das frequências naturais. O procedimento metodológico mais detalhado pode ser visto no fluxograma da Figura 2.

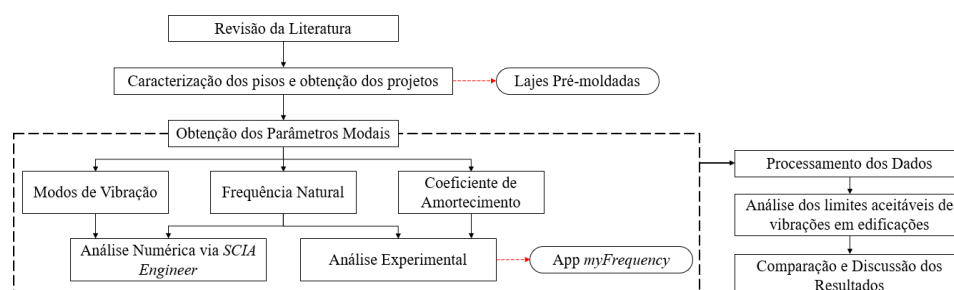


Figura 2. Fluxograma de estudo.

2.3. Análise experimental das frequências naturais in situ (Ensaio de Impacto de Calcanhares)

Foi realizado o ensaio de impacto de calcanhares a fim de obter as frequências naturais e razão de amortecimento das lajes. O ensaio foi realizado por uma pessoa de 1,78 m de altura e



68 kg de massa, no qual, aplicou-se o impacto próximo ao centro e em um dos cantos de cada placa de laje. Com o aparelho de medição vibracional centralizado nas áreas estudadas, uma segunda pessoa sentada de 1,65 m de altura e 82 kg de massa aferia os sinais obtidos no smartphone, assim como indicado na Figura 3.

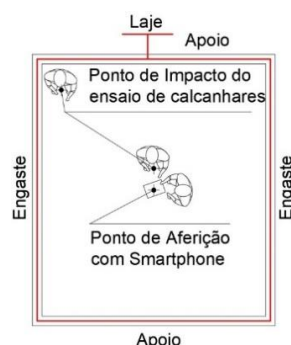


Figura 3. Esquematização do método de Ensaio de impacto de Calcanhares.

As medições das frequências foram obtidas através da utilização do aplicativo myFrequency, utilizando um smartphone Samsung Galaxy A71, que permitiu utilizar o acelerômetro do próprio aparelho, com sensibilidade de 500 Hz para realizar as medições de vibrações das máquinas e das lajes, assim como a razão de amortecimento (damping) da estrutura das lajes.

Dada a natureza de utilização da edificação, há a utilização de máquinas apropriadas para realização de tais trabalhos. Esse estudo teve como foco a investigação da máquina de bordar apoiada por roldanas em quatro pontos de apoio, com características de massa de 350 kg e faixa de trabalho entre 500 e 1000 rpm, localizada no pavimento superior da edificação.

As aferições do ensaio de impacto de calcanhares passaram por um controle estatístico de acordo com os intervalos de precisão descritos por Gomes (2009), no qual são apresentados valores de precisão de acordo com o coeficiente de variação (C.V.) presente na Tabela 1.

Tabela 1. Coeficientes de Variação de dados (Gomes, 2009).

C.V.	Avaliação	Precisão	C.V.	Avaliação	Precisão
< 10%	Baixo	Alto	20% a 30%	Alto	Baixo
10% a 20%	Médio	Médio	>30%	Muito Alto	Muito Baixo

2.4. Análise analítica do modelo

A análise analítica do modelo desenvolveu-se através da obtenção das frequências naturais para placas ortotrópicas de acordo com a equação apresentada por Blevins (2015), descrita na Equação 1, tendo o valor de frequência resultante com uma taxa de variação de 5% para mais ou para menos, a depender do material isotrópico equivalente empregado.

$$f_{ij} = \frac{\pi}{2\gamma^{\frac{1}{2}}} \left[\frac{G_i^4 D_x}{a^4} + \frac{G_j^4 D_y}{b^4} + \frac{2 \left[H_i H_j D_{xy} + 2D_k (J_i J_j - H_i H_j) \right]}{a^2 b^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad 1$$



em que: as variáveis G , H e J são definidas de acordo com as condições de apoio da placa de laje e os índices i e j ; as incógnitas a e b representam as dimensões planas da placa de laje analisada; e γ é dado pela massa da placa de laje presente por metro quadrado.

2.5. Análise numérica do modelo

O modelo numérico foi empregado por meio de técnicas usuais de discretização via Método dos Elementos Finitos, utilizando o software estrutural SCIA Engineer v.21.1 e elementos estruturais convencionais: pilares, vigas e lajes, dividindo o modelo numérico em malhas. A malha foi gerada manualmente, sendo o tamanho médio da malha de elementos 2D igual à 0,25 m, conectando elementos e nós automaticamente. Os painéis foram estabelecidos com 1,00 m e malha elástica, com um refinamento automático com erro de alvo de 10%, produzindo resultados mais precisos.

O software permite a simulação da estrutura tridimensional (3D) e a avaliação do comportamento estrutural frente às ações dinâmicas. Além disso, o software apresenta as frequências naturais e formas modais de acordo com as propriedades dos elementos atribuídos à estrutura, em que será realizada a comparação e identificação dos modos de vibração mais próximos da excitação, provocada devido às ações dinâmicas desenvolvidas pelo comportamento do funcionamento da máquina rotativa da indústria têxtil. Essas ações dinâmicas são estimuladas a partir do desbalanceamento dos rotores durante o funcionamento da máquina, ou seja, acontece devido a concentração de massa fora do eixo de rotação dos rotores, causando efeitos de vibração.

Na modelagem foi considerado concreto armado com massa específica de 2.500 kg/m³ e 30 MPa de resistência característica à compressão, módulo de elasticidade secante calculado pelas formulações da norma NBR 6118 (ABNT, 2014) para os sistemas de lajes e coeficiente de Poisson 0,2. Além do peso próprio da estrutura foram considerados alguns casos de cargas, buscando se aproximar ao máximo da situação de carregamento presente na estrutura real no dia das medições experimentais realizadas.

Logo após a obtenção do modelo completo, deu-se prosseguimento com a análise modal da estrutura. Mediante a resolução do problema de autovalor, a análise modal vai determinar as características dinâmicas da estrutura, como as frequências naturais de vibração e as formas modais, permitindo a comparação com as frequências obtidas experimentalmente e analiticamente, considerando os valores dos parâmetros modais finais obtidos em todas as metodologias de análises previamente apresentadas.

3. ANÁLISE DE RESULTADOS

3.1 Fase experimental

3.1.1 Razão de amortecimento das lajes L2 e L4

Na placa de laje L2 obteve-se uma taxa de amortecimento com valor médio de 15,64%. Já na laje L4 obteve-se uma taxa de amortecimento com média de 14,63%. Os valores foram obtidos por meio da técnica do decaimento aleatório, que permite obter um sinal proporcional ao decaimento livre do sistema a partir de uma excitação aleatória, diretamente pela interface do aplicativo myFrequency.



Os resultados obtidos na laje L4 tiveram um coeficiente de variação com taxa percentual de 7,03%, qualificando-o com uma alta precisão. Já o coeficiente de variação de amortecimento encontrado na laje L2 apresenta um nível de variação igual a 21,54%, o que representa um baixo nível de precisão de acordo com os dados da Tabela 1.

Existe uma grande dificuldade na aferição do coeficiente de amortecimento, o que pode resultar em um coeficiente de variação muito alto, pois existem parâmetros que influenciam diretamente no amortecimento, como: a existência de forros, as propriedades do contrapiso (resistência, espessura, etc.), o tipo de revestimento da laje, a disposição do mobiliário e das máquinas e até a posição (em pé, sentada, agachada) da pessoa que fez as medições.

3.1.2 Sinais em domínio de frequência das lajes L2 e L4

Quando observadas as amostras 1, 2, 3, 4, 5, e 6, estas resultaram em valores com picos de frequência que variaram de 17,40 Hz à 21,30 Hz para a laje L2, e 13,50 Hz à 17,10 Hz para a laje L4. Estes resultados são obtidos por meio do processamento de sinais obtidos em campo aplicando a Transformada Rápida de Fourier (FFT), em todas as amostras experimentais, com o auxílio de um algoritmo em Matlab. O algoritmo analisa todo o sinal, obtendo a amplitude da aceleração e o Spectro da Frequência.

Sendo assim, as frequências naturais encontradas nas amostras das lajes L2 e L4, apresentaram nível de precisão satisfatório, pois as taxas percentuais das lajes encontram-se com coeficiente de variação abaixo dos 10%, indicando alta precisão, de acordo com a Tabela 1.

3.2 Fase analítica

Levando em consideração as propriedades dos materiais, as características geométricas e as vinculações adequadas mais próximas do projeto real, foram obtidas as frequências naturais para o primeiro modo de vibração das placas das Lajes L2 e L4 por meio das formulações para placas ortotrópicas. O resultado referente ao cálculo da frequência natural analítica correspondente ao primeiro harmônico para a laje L2 foi de 16,98 Hz e para L4 de 14,64 Hz.

Pode-se observar que em ambos os casos a utilização das formulações para lajes ortotrópicas resulta em frequências naturais próximas das aferidas experimentalmente.

3.3 Fase numérica computacional

3.3.1 Frequências naturais das Lajes L2 e L4

Com a modelagem das lajes e definidos todos os carregamentos ortogonais às placas, inclusive da máquina, deve-se combiná-los para iniciar a análise dinâmica modal no software SCIA Engineer v.21.1. Para isso, foram escolhidos os trinta primeiros modos de vibração para serem obtidas as frequências naturais correspondentes buscando encontrar relações próximas com as frequências naturais obtidas no modelo experimental e analítico.

Foi necessário verificar para cada placa de laje o modo de vibração correspondente e seu valor de frequência, de modo que fossem encontrados modos de vibração referentes aos modos de flexão da placa.

Na Figura 4 apresentam-se as formas modais de flexão, bem como os valores das frequências naturais das lajes L2 e L4, resultantes da análise efetuada. Vale ressaltar que as únicas



formas modais de flexão presentes nos trinta primeiros modos determinados, são os modos 11 e 20, das lajes L4 e L2, respectivamente.

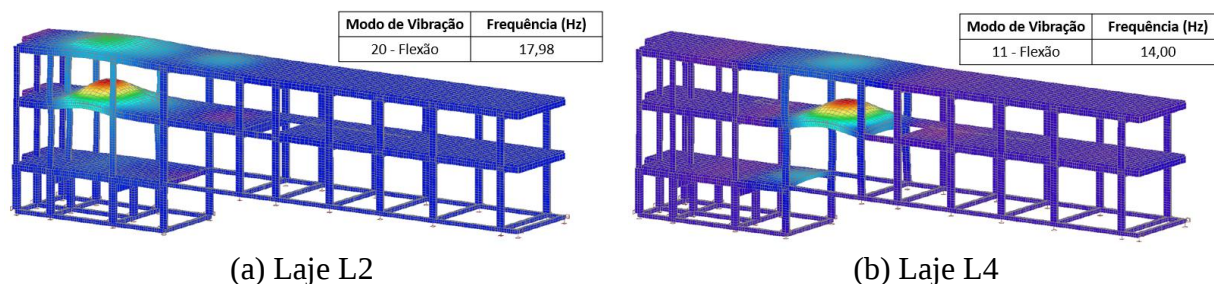


Figura 4. Formas modais de flexão das lajes.

O comportamento verificado na análise dos demais modos apresentaram formas de torção, flexo-torção, deslocamento transversal e longitudinal, sendo desconsiderados na análise, já que na fase experimental e analítica a verificação é realizada em modos de flexão, além do fato dos modos de flexão terem maior probabilidade de excitação, quando comparados aos demais modos.

3.4. Comparação

Na Tabela 2 são comparados os resultados experimentais, analíticos e numérico-computacionais para as lajes L2 e L4, e são apresentadas algumas relações pertinentes entre os resultados das metodologias empregadas.

Tabela 2. Frequências naturais experimentais, analíticas e numéricas para L2 e L4.

Laje	Frequências (Hz)		
	Fase experimental	Fase analítica	Fase numérico computacional
L2	19,25	16,98	17,98
L4	14,90	14,64	14,00

Observa-se que as lajes L2 e L4 apresentam frequências experimentais acima das frequências calculadas de forma analítica e numérico-computacional. Para as lajes L2 e L4, os valores de frequências obtidos por meio das formulações analíticas para lajes ortotrópicas foram significativamente próximos dos valores obtidos na análise experimental, assim como na modelagem numérico-computacional.

Sabendo que a máquina de bordado trabalha normalmente com uma frequência na faixa de 8,33 Hz (500 rpm), nota-se que a frequência que mais se aproxima do primeiro modo da laje L2 (local onde a máquina está apoiada) apresenta valor médio de 19,25 Hz na fase experimental, 17,98 Hz na análise numérico-computacional e 16,98 Hz no modelo analítico. Dessa forma, conclui-se que esses valores de frequência são 2,31, 2,16 e 2,04 maiores respectivamente que a frequência de excitação imposta pela máquina.

Para o caso de funcionamento da máquina de bordado operando com sua frequência máxima de 16,67 Hz (1000 rpm), possibilita-se um caso de amplificação dinâmica pois os valores de frequências obtidos nas análises experimental, numérico-computacional e analítico são apenas 1,15, 1,08 e 1,02 maiores respectivamente que a frequência de excitação imposta pela máquina.



Dessa forma, de acordo com as recomendações normativas estabelecidas pela NBR 6118 (ABNT, 2014), se a máquina operar na faixa de 8,33 Hz (500 rpm) os valores de frequências atendem as recomendações. Entretanto, no caso de operação na frequência máxima de 16,67 Hz (1000 rpm), os valores apresentados não atendem as recomendações estabelecidas pela norma.

4. CONCLUSÕES

Observando a metodologia desenvolvida, é possível considerar que a utilização do myfrequency em um aparelho de celular smartphone é eficaz para registrar respostas relacionados aos parâmetros de frequências para análise das propriedades de vibrações em uma laje.

Os parâmetros de frequências foram obtidos nas lajes L2 e L4, pois foram as lajes que apresentaram modos de flexão locais bem determinados na análise numérico-computacional. Tanto a laje L2 quanto a laje L4 apresentaram respostas de frequências experimentais muito próximas do que foi medido numericamente e analiticamente. Dessa forma, pode-se afirmar que os dados experimentais, o modelo numérico-computacional e os resultados das formulações analíticas apresentam uma boa correlação na determinação da frequência natural, podendo ser utilizado em possíveis simulações e monitoramentos do desempenho estrutural.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, juntamente com o apoio da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) e UFPE - Caruaru.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 6118: 2014, Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, Rio de Janeiro, 2014.
- Blevins, R. D. (2015). Formulas for dynamics, acoustics and vibrations, 1st Edition, John Wiley & Sons.
- Braido, J. D., Pravia, Z. M. C., (2022). Application of MEMS accelerometer of smartphones to define natural frequencies and damping ratios obtained from concrete viaducts and footbridge. Revista IBRACON Estruturas e Materiais, v. 15, n. 2, p. e15206.
- Feldbusch, A., Sadegh-Azar, H., Agne, P., (2017). Vibration analysis using mobile devices (smartphones or tablets). Procedia Eng., v. 199, p. 2790–2795.
- Gomes, F. P. (2009). Curso de estatística Experimental, 15nd Edition, FEALQ.
- Manikandan, K. G., Pannirselvam, K., Kenned, J. J., Kumar, C. S., (2021). Investigations on suitability of MEMS based accelerometer for vibration measurements. Materials Today: Proceedings, v. 45, p. 6183–6192.
- Muliterno, B. K., Muliterno Jr, F., Pravia, Z.M. C., (2019). Avaliação da irregularidade longitudinal do pavimento sobre pontes usando acelerações medidas por smartphones. Transportes, v. 27, n. 2, p. 182–193.
- Pravia, Z. M. C., Braido, J. D., (2015). Medição de características de vibração de pontes de concreto usando telefonia móvel. Revista IBRACON Estruturas e Materiais, v. 8, n. 5, p. 721-743.