UNICESUMAR - CENTRO UNIVERSITÁRIO DE MARINGÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS TECNOLÓGICAS E AGRÁRIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANÁLISE DE AÇÕES DINÂMICAS APLICADAS EM UMA PASSARELA DE ESTRUTURA METÁLICA

PEDRO HENRIQUE DE FARIAS NIZA

MARINGÁ – PR
2019

Pedro Henrique de Farias Niza

ANÁLISE DE AÇÕES DINÂMICAS APLICADAS EM UMA PASSARELA DE ESTRUTURA METÁLICA

Artigo apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da UNICESUMAR – Centro Universitário de Maringá como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob a orientação do Prof. Me. Ronan Yuzo Takeda Violin.

MARINGÁ – PR

2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

PEDRO HENRIQUE DE FARIAS NIZA

ANÁLISE DE AÇÕES DINÂMICAS APLICADAS EM UMA PASSARELA DE ESTRUTURA METÁLICA

Artigo apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da UNICESUMAR – Centro Universitário de Maringá como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob a orientação do Prof. Me. Ronan Yuzo Takeda Violin.

Aprovado em: __ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Me. Ronan Yuzo Takeda Violin, Unicesumar

_____

Nome do professor - (Titulação, nome e Instituição)

_____

Nome do professor - (Titulação, nome e Instituição)

ANÁLISE DE AÇÕES DINÂMICAS APLICADAS EM PASSARELA DE ESTRUTURA METÁLICA

Pedro Henrique de Farias Niza

RESUMO

Parte indispensável no dimensionamento de qualquer estrutura é prever as forças que serão aplicadas à mesma, porém há uma certa dificuldade em prever certas ações que, por assim dizer, são menos palpáveis que outras. Tendo isso em mente, no presente trabalho foi apresentado um método de prova de carga dinâmica baseado na ABNT NBR 15307/06, visando medir as vibrações presentes na estrutura de uma passarela sobre rodovia, que sofre excitações naturais devido, principalmente, a ação do vento, do fluxo de carros que transitam no entorno e do fluxo de pedestres que de fato a utilizam, com intuito de entender como a estrutura se comporta frente a estas vibrações, e o dano que pode ser causado a ela. Tais vibrações foram medidas no horário em que o fluxo de pedestres atinge o seu pico, com acelerômetros posicionados em pontos específicos da estrutura, por um determinado período de tempo. Foram obtidos dados de aceleração, que mais adiante serão tratados através da transformada rápida de Fourier, gerando gráficos com as amplitudes e frequências bem definidas, tornando assim possível encontrar o índice de vibração da estrutura, julgando o nível de dano causado e se a estrutura oferece segurança e conforto para aqueles que a utilizam.

Palavras-chave: Aceleração. Excitações Naturais. Prova de Carga.

ANALYSIS OF DYNAMICAL ACTIONS APPLIED TO METAL STRUCTURE FOOTBRIDGE

ABSTRACT

An indispensable part of the structural sizing of any structure is to predict the forces that will be applied to it, but there is some difficulty in predicting certain actions that, as it were, are less palpable then others. With this in mind, the present work presents a dynamic load test method based on ABNT NBR 15307/06, aiming to measure the vibrations present in the structure of highway footbridge, which suffers natural excitations mainly due the wind action, the car traffic around and the pedestrian traffic that actually use it, in order to understand how structure behaves under these vibrations, and the damage that can be caused to it. Such vibrations were measured at the time of the day when the pedestrian flow reaches its peak, with accelerometers positioned at specific points of the structure for certain period of time. The acceleration data were obtained, which will be further processed by the Fast Fourier Transform, generating graphs with well-defined amplitudes and frequencies, thus making it possible to find the vibration index of the structure, judged the level of damage caused and whether the structure offers safety and comfort to those who use it.

Keywords: Acceleration, Load Test, Natural Excitation.

1 INTRODUÇÃO

Dentro dos estudos relacionados à mecânica básica e dinâmica dos corpos, o estudo das vibrações mecânicas sempre teve o seu lugar de destaque, e causou muito interesse aos que buscaram seu entendimento. Neste contexto, a engenharia civil encaixa-se perfeitamente, visto que este conhecimento é de importância indispensável para todos os que desejam seguir o caminho do dimensionamento e análise estrutural, pois um dos critérios mais importantes do dimensionamento de estruturas é prever ações externas que possam vir a causar danos à estrutura que será concebida. De acordo com Alves (2002), "Problemas de vibração aleatória são problemas em que não se consegue prever a resposta da estrutura à excitação em um determinado instante de tempo". Segundo Kelly (2017) "As vibrações ocorrem em diversos sistemas mecânicos e estruturas. Se não controlada, a vibração pode levar a situações catastróficas[...]. Falhas estruturais podem ocorrer em função de grandes solicitações dinâmicas desenvolvidas durante terremotos ou até mesmo vibrações induzidas pelo vento".

Apesar de ser algo tão importante, encontra-se uma série de dificuldades, como por exemplo, prever uma vibração aleatória e também em medi-la quando ocorrer. De acordo com Savi (2017) "O estudo das vibrações mecânicas está associado aos movimentos oscilatórios. O termo oscilatório não deve estar associado à periodicidade e, portanto, o estudo de vibrações inclui movimentos não periódicos e transientes", sendo assim quando fala-se sobre vibração, principalmente em estruturas, não necessariamente espera-se captar um sinal uniforme, o que dificulta a interpretação dos resultados obtidos.

Segundo Bachmann *et al.* (1995) "Ações dinâmicas são consideradas com base nas seguintes fontes de vibração: movimentação do corpo humano, rotação maquinas de impacto e oscilantes, fluxo de vento, construção civil, tráfego automotivo e de ferrovias". No presente estudo, devido à região onde a estrutura se encontra, a ênfase será dada prioritariamente às ações humanas, e as vibrações que podem ser causadas através delas. Observa-se, também o tráfego de veículos e a ação do vento de forma secundária. O intuito deste trabalho é apresentar um método simplificado, com baixo custo e eficaz para analisar as oscilações aleatórias em uma determinada passarela em estrutura metálica existente, em utilização, com vibrações aleatórias de vertentes naturais.

Espera-se que este trabalho seja um estudo inicial para a evolução do processo de medição e estudo de atividades sísmicas. Pretende-se com este ensaio descobrir a frequência das vibrações causadas, podendo assim julgar o dano que estas podem estar causando à estrutura. Os parâmetros para definir isso serão embasados primordialmente pela ABNT

NBR: 15307/2006 Ensaios não destrutivos - Provas de cargas dinâmicas em grandes estruturas – Procedimento, bem como as fórmulas, métodos e recomendações também serão embasados nesta.

2 DESENVOLVIMENTO

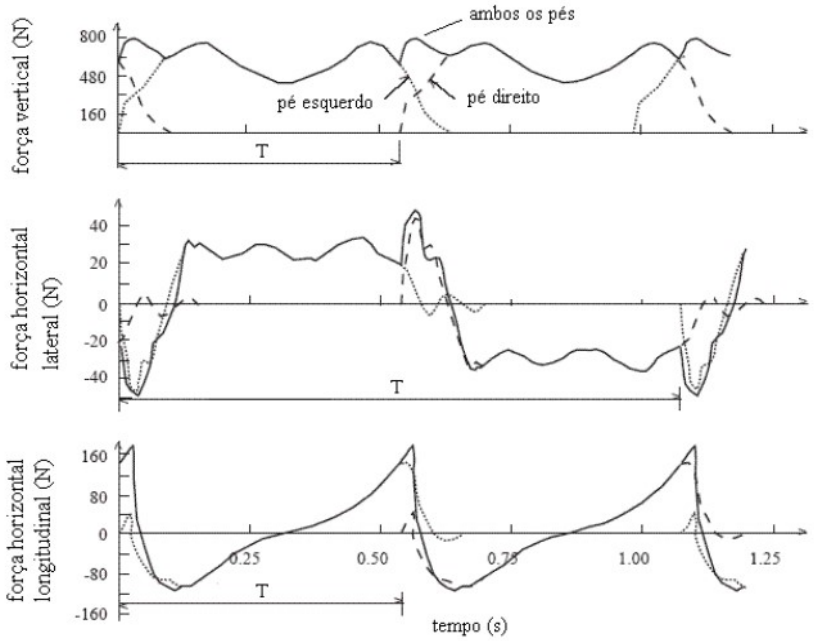
2.1 VIBRAÇÕES CAUSADAS PELA UTILIZAÇÃO HUMANA

O movimento que chamamos de andar, nada mais é que pressionar o solo com o calcanhar de um dos pés enquanto projeta-se a outra perna para a frente a fim de dar o segundo passo e "empurrar o chão para traz". Segundo Bruxel (2010) "Um passo consiste na sequência de eventos entre o primeiro contato de um pé com o solo, e o primeiro contato do pé colateral com o solo [...] A quantidade de passadas executadas num período de tempo define a cadência da marcha", este simples ato cíclico de aplicar uma força ao chão, evidentemente gerará vibração na estrutura. De acordo com Silva (2011) a interação de pessoas com a estrutura devido a locomoção, geralmente são tidas como forças concentradas, cíclicas que se movimentam em velocidade constante, representando apenas os impulsos causados devido ao atrito do seu pé com a superfície ao se mover.

Lima (2007) diz que a força gerada pelo caminhar humano apresenta parcelas em várias direções, em geral considera-se apenas a parcela vertical para pisos com rigidez suficiente desprezando as forças horizontais. Porém no caso de uma passarela, estas forças não podem ser desprezadas, uma vez que esta é bastante flexível na direção de todos os componentes.

Nota-se na figura 01 que, no ponto da caminhada onde ambos os pés se encontram no chão, forma-se um pico de força aplicada no solo, desta forma, compreende-se que o tempo entre uma passada e outra pode ser medido pela distância entre estes picos. Lima (2007) observa que o tempo de contato simultâneo de ambos os pés de uma pessoa caminhando é maior que o período de duração da passada. Também destaca que ao aumentar a velocidade do passo e transformar uma caminhada em corrida, deixa de existir o contato simultâneo entre os dois pés com o solo, fazendo com que o carregamento deixe de ser contínuo.

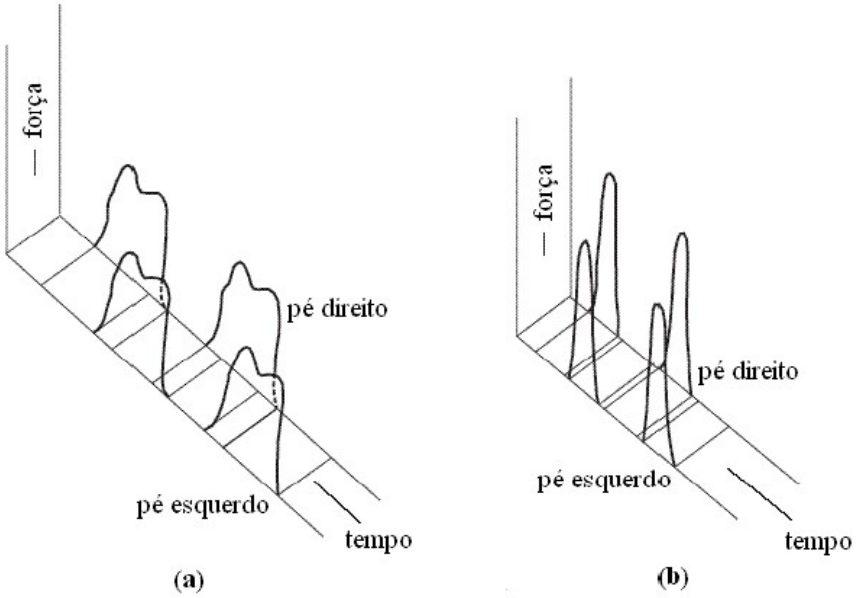
Figura 01 – Força vertical, horizontal lateral e horizontal longitudinal



Fonte: ZIVANOVIC *et al.* (2004) *apud* LIMA, (2007)

Pode-se observar na figura 02, que há momentos onde nenhum dos pés tocam o solo. Conforme explica Zivanovic *et al.* (2004) "O peso do indivíduo e a frequência do seu passo foram identificados como parâmetros importantes que aumentam e levam a maiores picos de amplitudes das forças".

Figura 02 – Força provocada pela atividade humana de (a) caminhar e (b) correr.



Fonte: ZIVANOVIC *et al.* (2004) *apud* LIMA, (2007)

2.2 ABNT NBR: 15307/2006 E A PROVA DE CARGA DINÂMICA

Utilizada como ponta pé inicial para este estudo, a ABNT NBR 15307/2006 estabelece os procedimentos a serem adotados durante a prova de carga para que sua realização seja feita de maneira satisfatória, que os dados obtidos estejam o mais próximo possível da realidade e também que o tratamento e calibração dos resultados sejam feitos da maneira correta. A norma fornece uma série de requisitos para que o ensaio seja realizado, dentre eles destacamos: As características a serem atendidas pelo equipamento utilizado, o carregamento aplicado na estrutura, o tempo e as posições de medição do teste, e por fim, o cálculo do índice de vibração que será tratado mais adiante neste trabalho.

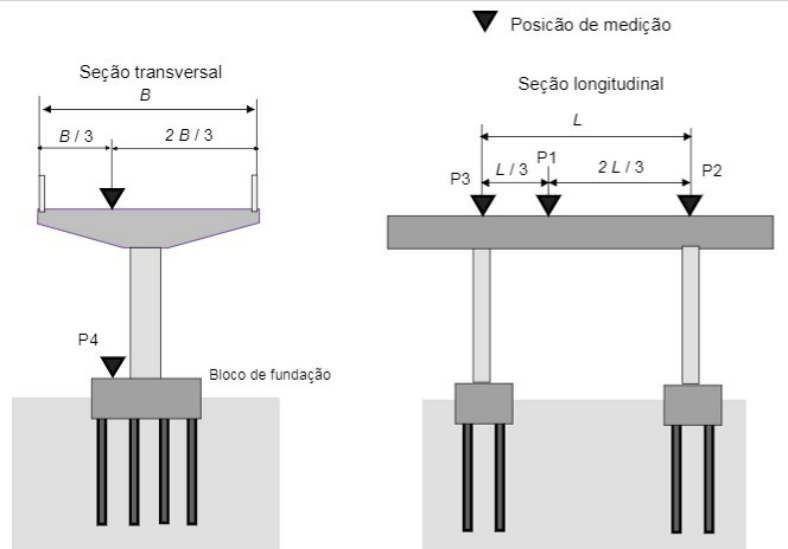
Em relação ao carregamento aplicado, a norma especifica para que seja feito considerando apenas as cargas naturais da estrutura sem forçar, não sendo necessário nenhum carregamento especial (ABNT NBR 15307, 2006), bem como Ortigão (2003) que em seus trabalhos dizem: "Não há necessidade de forçar vibrações, o que tornaria o processo muito trabalhoso e mais caro". Mesmo assim, a utilização de cargas especiais não é um fator proibitivo para que o teste funcione, segundo Oliveira (2006) "Uma outra forma de realização desses ensaios é gerar oscilações de curta duração na estrutura, permitindo determinar o período de vibração sob carga". No caso deste estudo foram utilizadas as cargas da estrutura conforme informação normatizada.

Quanto ao posicionamento dos pontos de medição da estrutura, figura 03, foram utilizados os critérios de posicionamento para pontes, o qual seria o que mais se assemelha ao caso. A norma indica que quatro pontos sejam medidos, estes estão ilustrados na figura 03.

Conforme explica a NBR 15307 (2006), "As medições de vibrações são programadas em locais e nos sentidos que possam ser influenciadas por grande parte da estrutura. A seleção destes pontos depende do tipo e da forma da estrutura, do comportamento dinâmico e do tipo de dano esperado". Portanto para cada tipo de estrutura, seja edifícios, barragens ou coberturas em balanço, existirão pontos específicos para melhor medição da vibração.

No nosso caso, utilizou-se a determinação dos pontos de medição para pontes (figura 03), devido às características geométricas semelhantes. A posição P1 é posicionada no primeiro terço da laje de cada vão e tem por objetivo medir as respostas de cada laje. As posições P2 e P3 são posicionados no topo dos pilares, tem por objetivo medir o comportamento dos mesmos. Por fim a posição P4 permite avaliar o espectro de vibração na fundação, porém só é necessária se as medições de P2 e P3 indicarem a possibilidade de problema (NBR 15307, 2006). Neste estudo foi medido apenas o ponto P1.

Figura 03 – Posicionamento dos pontos de medição na estrutura.

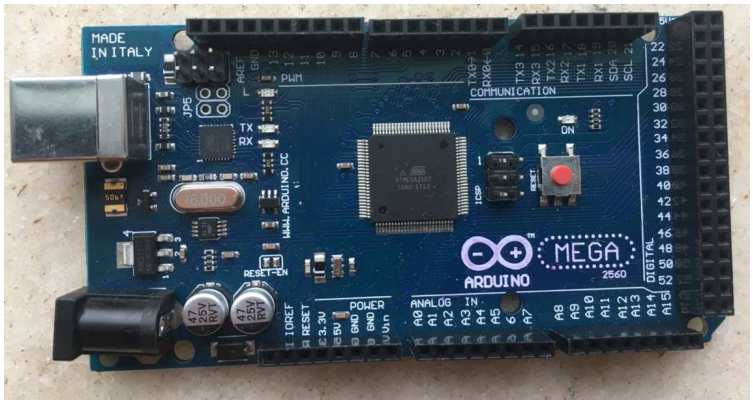


Fonte: ABNT NBR 15307 (2006).

2.2.1 Utilização da Placa Arduino e Acelerômetros

"Ao longo dos anos, o Arduino tem sido o cérebro de milhares de projetos, de objetos do cotidiano a complexos instrumentos científicos [...] são capazes de ler entradas (luz em um sensor, dedo em um botão ou mensagem no Twitter) e transforma-lo em uma saída (ativando um motor, ligando um LED, publicando algo online)" (ARDUINO.CC, 2019). Optou-se pela utilização da placa de Arduino devido ao seu baixo custo, acessibilidade, confiabilidade de desempenho e principalmente a sua agilidade de adaptação da programação para uma leitura de dados específica. Esta facilidade foi de suma importância na leitura dos dados de aceleração, que puderam ser obtidos na quantidade e tempo desejados. Evitando assim o excesso de dados que não seriam necessários no ensaio, com redução de tempo e investimento. Para a este ensaio, foi utilizada uma placa de Arduino Mega 2560, figura 04.

Figura 04 – Placa Arduino Mega 2560.



Fonte: Autor (2019)

O acelerômetro é um sensor capaz de medir e detectar a aceleração, tanto gravitacional como outras causadas por movimentos, e através disso repassar as informações para o programa (GODOY, 2017). Como dispositivo de leitura foi escolhido o acelerômetro MPU-6050, cujas funções estão descritas na tabela 01, devido à sua disponibilidade, custo benefício acessível no mercado e principalmente por ser o leitor que melhor atendia os pré-requisitos da normativas de leitura de dados.

Tabela 01 – Ficha técnica MPU - 6050.

Modelo	GY-521
Chip	MPU-6050
Tensão de Operação	3-5V
Conversor AD	16 bits
Comunicação	I2C
Faixa do Giroscópio	± 250, 500, 1000, 2000°/s
Faixa do Acelerômetro	±2, ±4, ±8, ±16g
Faixa do Sensor de Temperatura	-40 a 85°C
Dimensões (C x L x E)	21 x 17 x 3 mm
Peso	1,2 g
Direção das Medições	Vertical e Horizontal

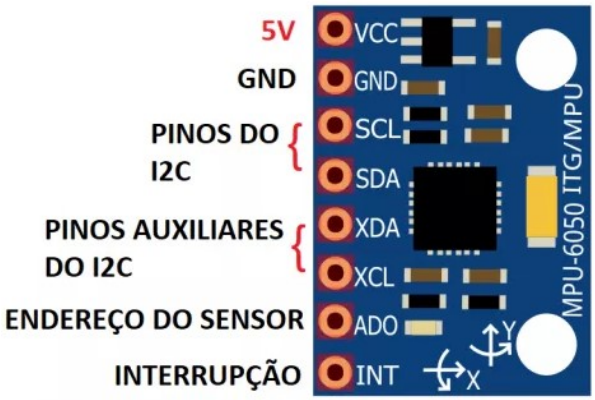
Fonte: INVENSENSE MPU-6050 Datasheet (2011)

Para Rocha (2013) “A aceleração é uma grandeza física cinemática que aponta quão rapidamente a velocidade de um corpo varia ao longo do tempo. O acelerômetro é um sensor eletrônico que visa medir essa grandeza”.

A ligação correta do acelerômetro no Arduino, conforme exemplificada nas figuras 05 e 06, será realizada da seguinte forma: As portas 5V e GND do Arduino deverão ser ligadas

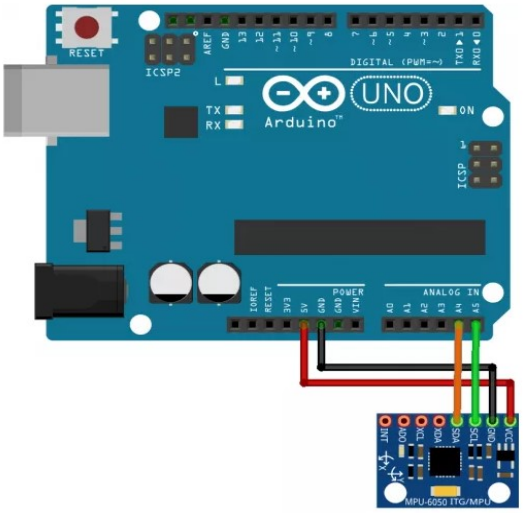
respectivamente em VCC e GND do acelerômetro, o que é o suficiente para ativa-lo. As portas SCL e DAS do acelerômetro, deverão ser ligadas respectivamente nas portas A5 e A4 do Arduino, esta ligação garantirá que os dados sejam captados e transferidos para o Arduino de maneira correta.

Figura 05 – Pinagem acelerômetro e giroscópio modelo MPU-6050



Fonte: autocorerobotica.com.br (2017)

Figura 06 – Ligação entre Arduino e Acelerômetro



Fonte: autocorerobotica.com.br (2017)

2.2.2 Programação Utilizada

O acelerômetro MPU-6050 não apenas é capaz de medir a aceleração em três eixos, como também consta com função giroscópio e leitor de temperatura, porém para este caso só será realizado a leitura da aceleração. Portanto, com intuito de simplificar os dados obtidos, foi programado para que apenas as leituras de aceleração dos eixos X, Y e Z, com medição de um dado a cada 500ms e com intuito de simplificar a obtenção de dados, foi retirada a leitura do giroscópio, e o tempo de medição de dados da programação.

As faixas de leitura de aceleração reconhecidas pelo MPU-6050, como visto em sua ficha técnica, tabela 01, são várias. Neste caso optou-se pela leitura padrão de ± 2 *g* (sendo *g* o valor de uma gravidade ≈ 9,81 m/s^2) como leituras obtidas, sendo ±2 *g* equivale ao valor de ±32767 no momento da leitura. É importante salientar que este valor se trata de um padrão de leitura do próprio acelerômetro. Exemplificando, ao manter o acelerômetro em repouso com sua face para cima, será possível observar que as medições de aceleração do eixo Z

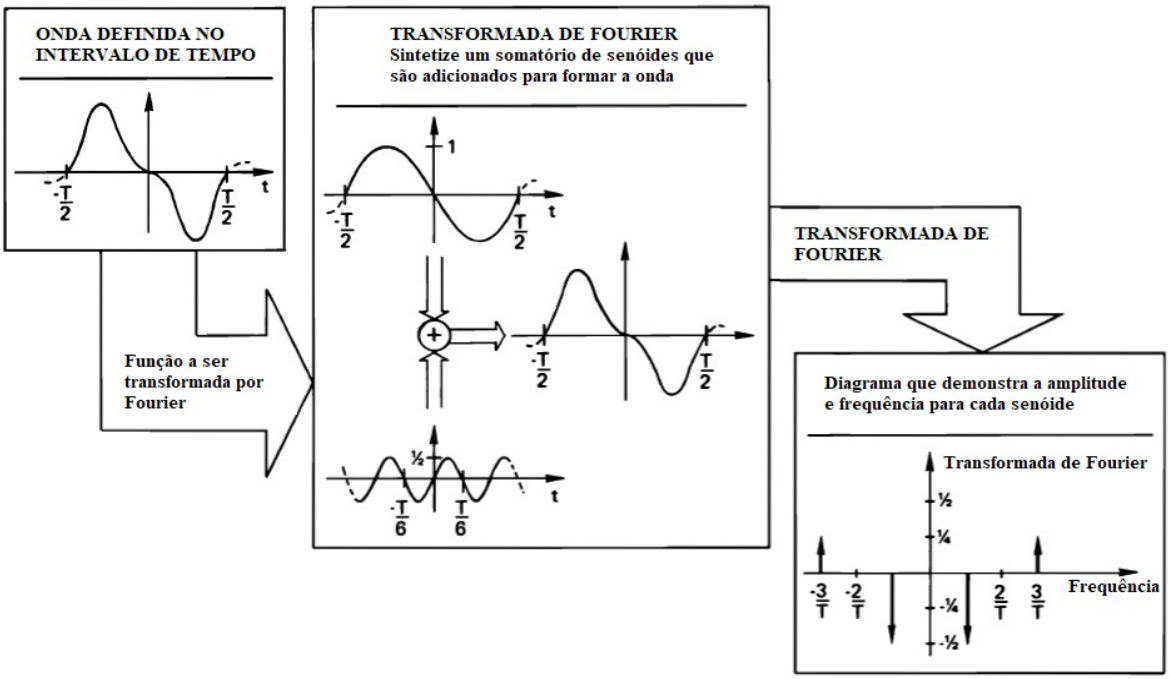
demonstrará um valor variando próximo a 16000, pois este representa o valor da aproximado de uma gravidade da terra.

2.3 A TRANSFORMADA DE FOURIER E A TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

A transformada de Fourier (TF), diferentemente da Série de Fourier, é capaz de interpretar dados de funções não periódicas em função do tempo e apresenta-las em função de sua frequência. Como cita Souza (2004) "A TF faz parte dos modelos não-paramétricos [...] e é uma representação do domínio da frequência de uma função do tempo, mantendo exatamente as mesmas informações que a função tempo, mudando apenas a maneira de apresentar a s informações" (*apud* MICHELIN, 1998). A TF diz que um sinal periódico, ou seja, aquele em que é possível observar um padrão na repetição de suas ondas, pode ser representado pela soma dos seus senóides e cossenoides, e posteriormente ter sua frequência observada. Segundo Brigham (1988), "[...] a essência da transformada de Fourier de uma forma de onda é decompor ou separar a forma de onda em uma soma de senóides de diferentes frequências [...]. A representação pictórica da transformada de Fourier é um diagrama que demonstra a amplitude e frequência de cada um dos senóides determinados".

Isso auxilia no estudo de vibrações que se apresentam de maneira não periódica, pois como se trata de um sinal randômico, mesmo que siga um padrão, é pouco provável que na leitura encontre sinais sistêmicos com amplitudes bem definidas. Segundo Brigham (1988) "A transformada de Fourier identifica ou distingue as diferentes frequências senóides (e suas respectivas amplitudes) que se combinam para formar uma forma de onda arbitrária", portanto, a TF nos possibilita simplificar esses dados separando cada um dos senóides e cossenóides que formam o sinal obtido, conforme demonstrado no diagrama da figura 08.

Figura 07 – Interpretação da Transformada de Fourier.



Fonte: BRIGHON (1988).

3 METODOLOGIA

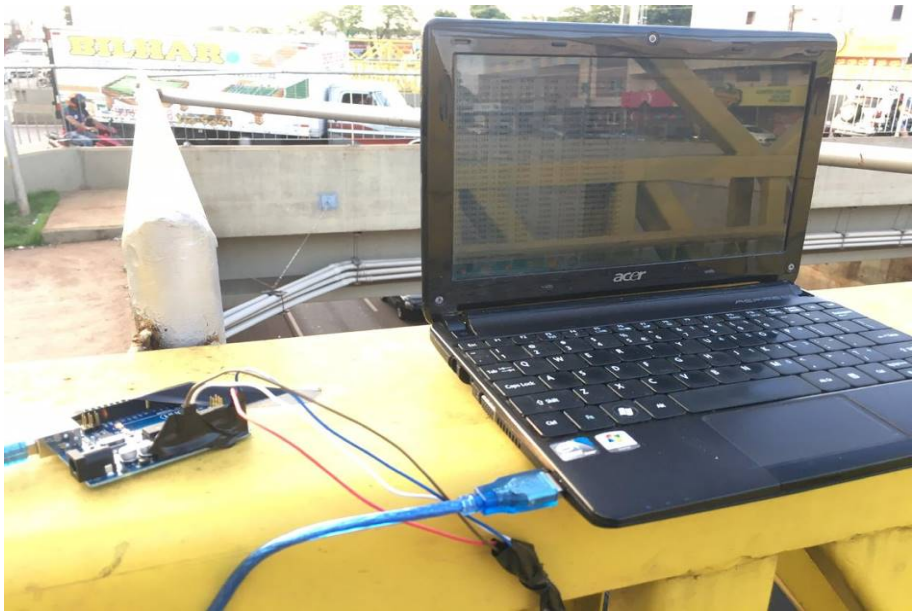
No dia 01/11/2019 por volta das 17:40 iniciou a prova de carga dinâmica na estrutura da passarela que liga a Rua Antônio Volpato com a Avenida Ademar Bornia, conforme ilustra figura 08. A prova de carga teve duração aproximada de 1 hora, sendo encerrada, portanto, às 18:40. O tempo estava limpo, sem sinais de chuva, com vento moderado e temperatura ambiente aproximada de 36°C. Posicionou-se o acelerômetro no primeiro terço do vão da laje da passarela, sua aquisição de dados estava programada conforme descrito no item 2.2. Participaram do teste um total de 199 pessoas, sendo que 101 pessoas atravessaram no sentido Rua-Avenida, e o restante no sentido Avenida-Rua.

Figura 08 – Passarela em estudo

Fonte: Autor (2019)

Foram captados pelo acelerômetro cerca de 7200 dados de aceleração em cada um dos seus eixos (X, Y e Z), conforme figura 09. Estes dados foram depositados posteriormente no *software* Excel para que se observasse a vibração causada em função da aceleração.

Figura 09 – Leitura de dados com através do software Arduino IDE



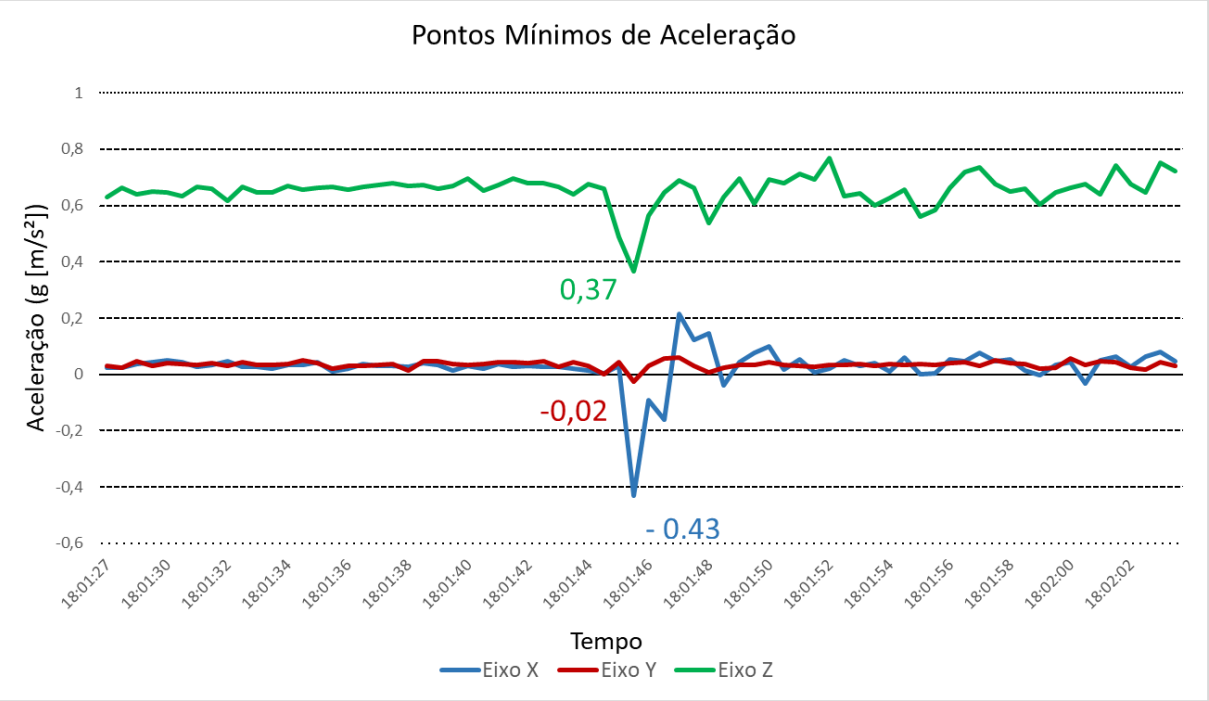
Fonte: Autor (2019)

Após a regularização dos dados obtidos, optou-se por plotar gráficos de três pontos que são: menor aceleração (Gráfico 01), aceleração média (Gráfico 02) e maior aceleração para cada um dos eixos (Gráfico 01), sempre tomando o eixo Z como base quando necessário.

Observa-se que nos gráficos 01, 02 e 03 os valores de aceleração nos eixos X e Y são, no geral semelhantes, e os valores para Z são naturalmente maiores. Isto indica que há uma aceleração maior no sentido vertical à estrutura, e que a mesma ocorre pouco nos sentidos transversal e longitudinal.

No gráfico 01 os valores mais notáveis foram: vales de -0,43 m/s² para o eixo X, -0,02 m/s² para o eixo Y e um pico 0,37m/s² para o eixo Z.

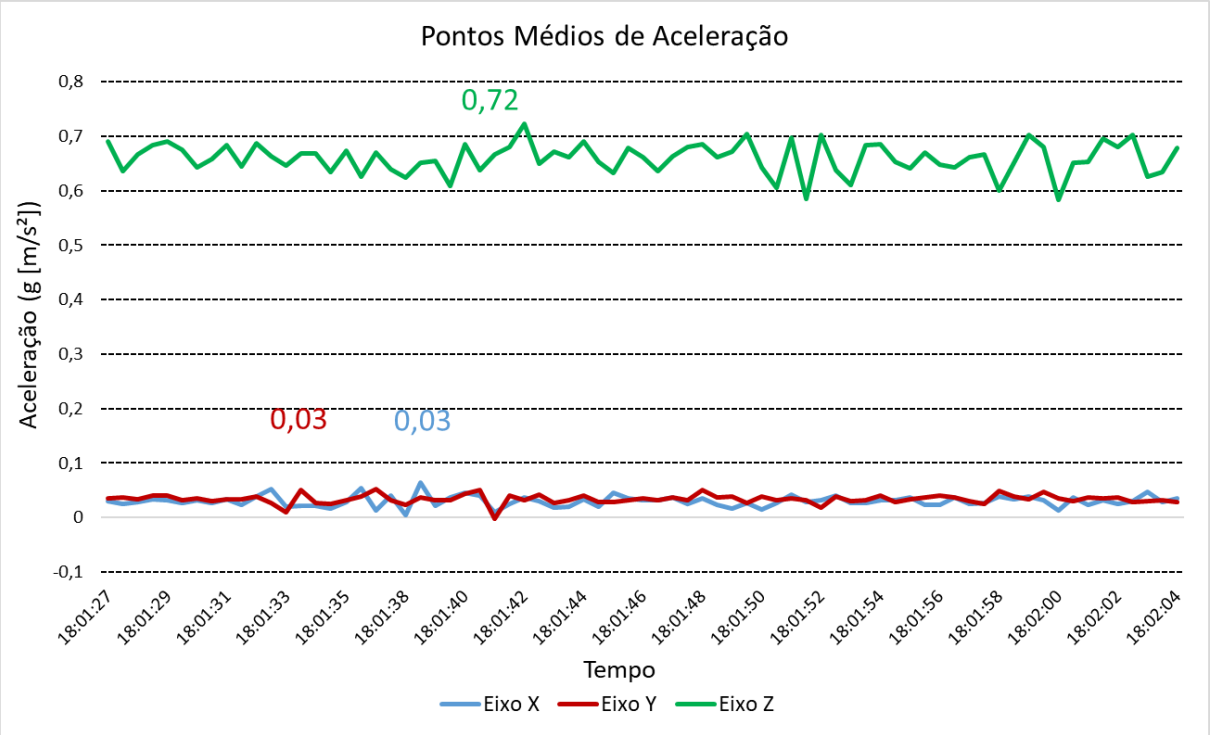
Gráfico 01 - Valores mínimos de aceleração obtidos pelo acelerômetro



Fonte: Autor (2019)

No gráfico 02 os valores mais notáveis foram: picos de 0,03m/s² para o eixo X, 0,03m/s² para o eixo Y e 0,72m/s² para o eixo Z.

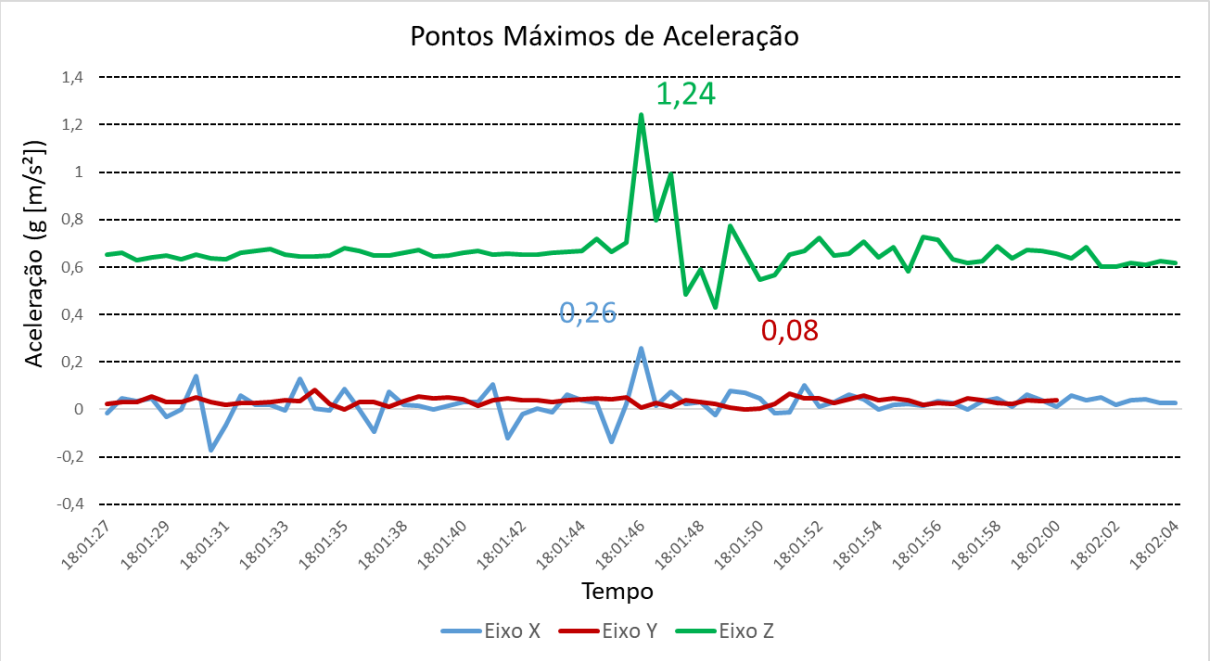
Gráfico 02 - Valores médios de aceleração obtidos pelo acelerômetro



Fonte: Autor (2019)

No gráfico 03 os valores mais notáveis foram: picos de 0,26m/s² para o eixo X, 0,08m/s² para o eixo Y e 1,24m/s² para o eixo Z.

Gráfico 03 - Valores máximos de aceleração obtidos pelo acelerômetro



Fonte: Autor (2019)

Os valores de aceleração nos três eixos foram convertidos pelo plug in “Análise de Fourier” do Excel, resultando em valores de amplitude em função da frequência. A Análise de Fourier apenas é possível quando se utiliza um número de dados que seja uma potência de 2. Sendo assim, foram usandos 4096 dados para a primeira transformada. Os valores obtidos foram colocados em módulo, e os valores de frequência foram dados pela equação 01.

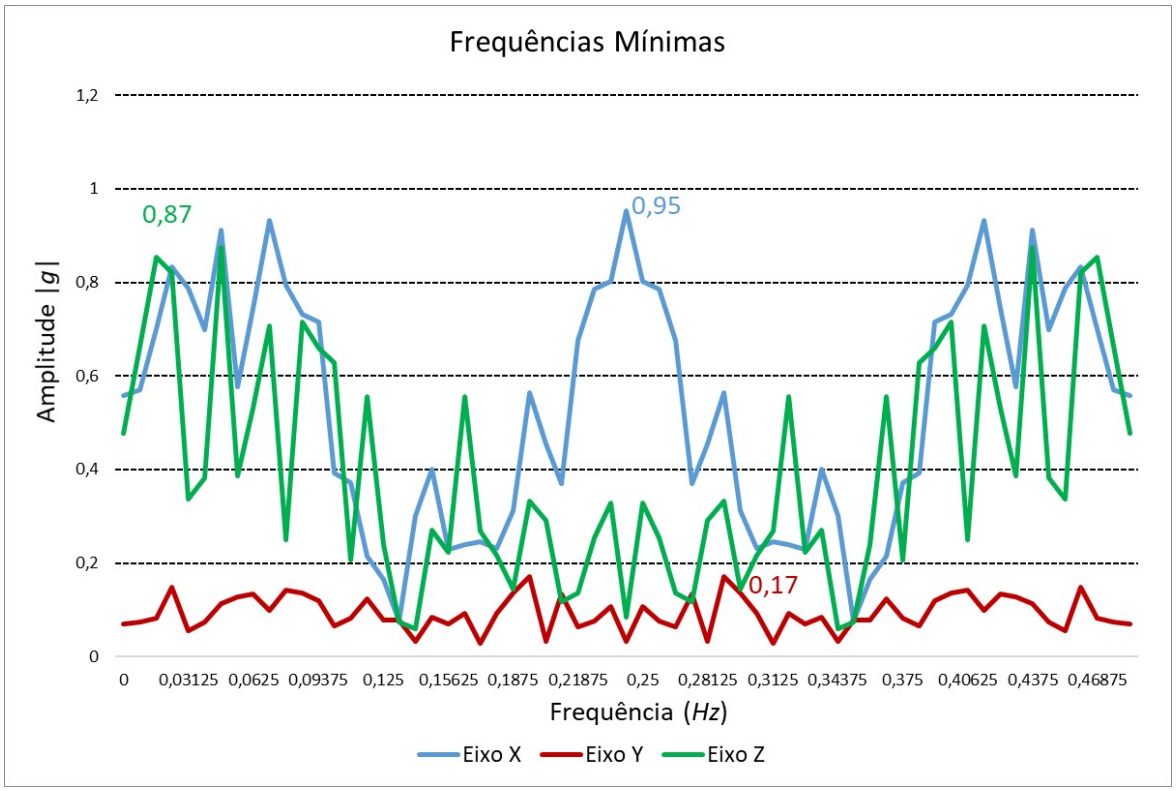
$$f = f_0 + (1/N*\Delta t) \quad \text{(Eq. 01)}$$

Em que f a frequência, f_0 a frequência inicial, N o número de dados trabalhados, e Δt a variação do tempo entre cada medição de amplitude.

Foram selecionados novamente os menores, médios e maiores valores do módulo da amplitude. Desta forma, foram encontrados gráficos semelhantes aos de aceleração, porém desta vez, mostram resultados de amplitude e frequência.

No gráfico 04 obtivemos o valor de amplitude máximo de do eixo X igual a 0,95 *g* numa frequência aproximada de 0,25 *Hz*, o valor de amplitude máximo de do eixo Y igual a 0,17 *g* numa frequência aproximada de 0,29 *Hz*, o valor de amplitude máximo de do eixo Z igual a 0,87 *g* numa frequência aproximada de 0,03 *Hz*.

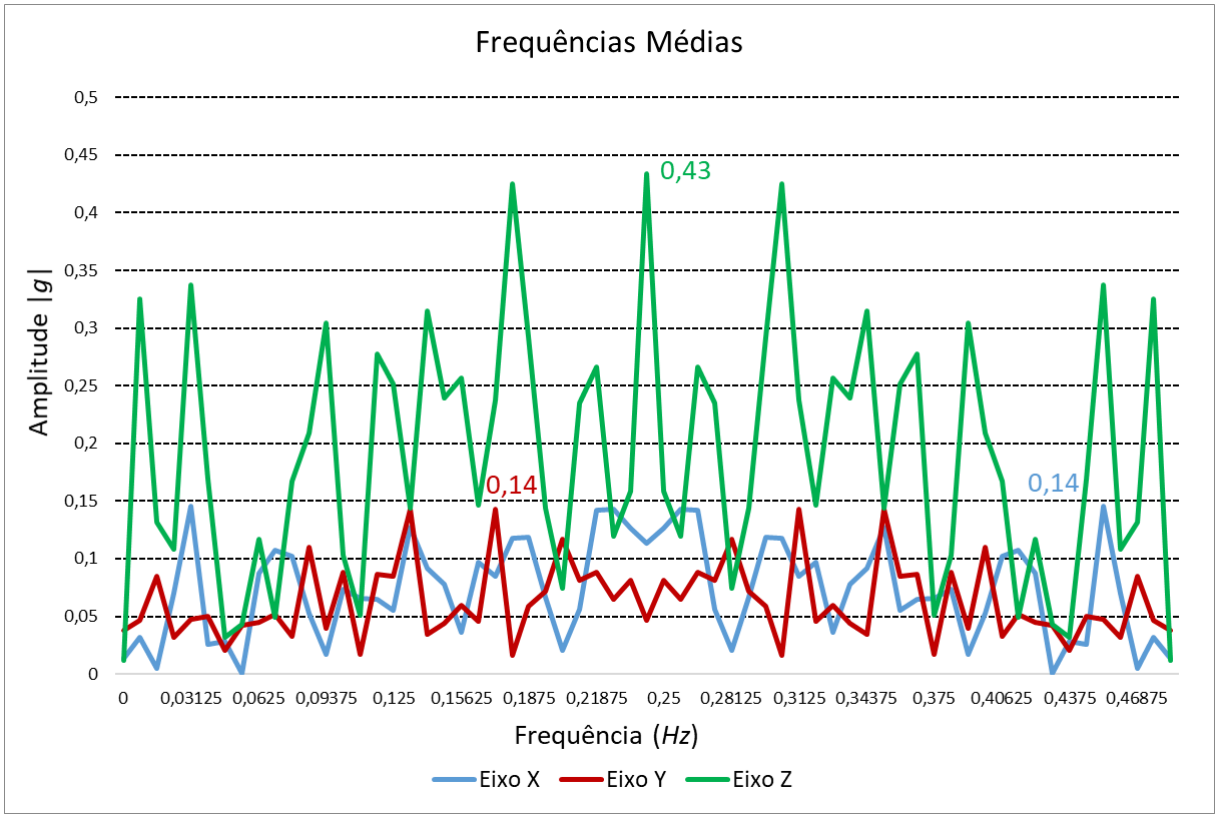
Gráfico 04 - Valores mínimos de frequência obtidos pela TRF



Fonte: Autor (2019)

No gráfico 05 obtivemos o valor de amplitude máximo de do eixo X igual a 0,14 *g* numa frequência aproximada de 0,45 *Hz*, o valor de amplitude máximo de do eixo Y igual a 0,14 *g* numa frequência aproximada de 0,17 *Hz*, o valor de amplitude máximo de do eixo Z igual a 0,43 *g* numa frequência aproximada de 0,25 *Hz*.

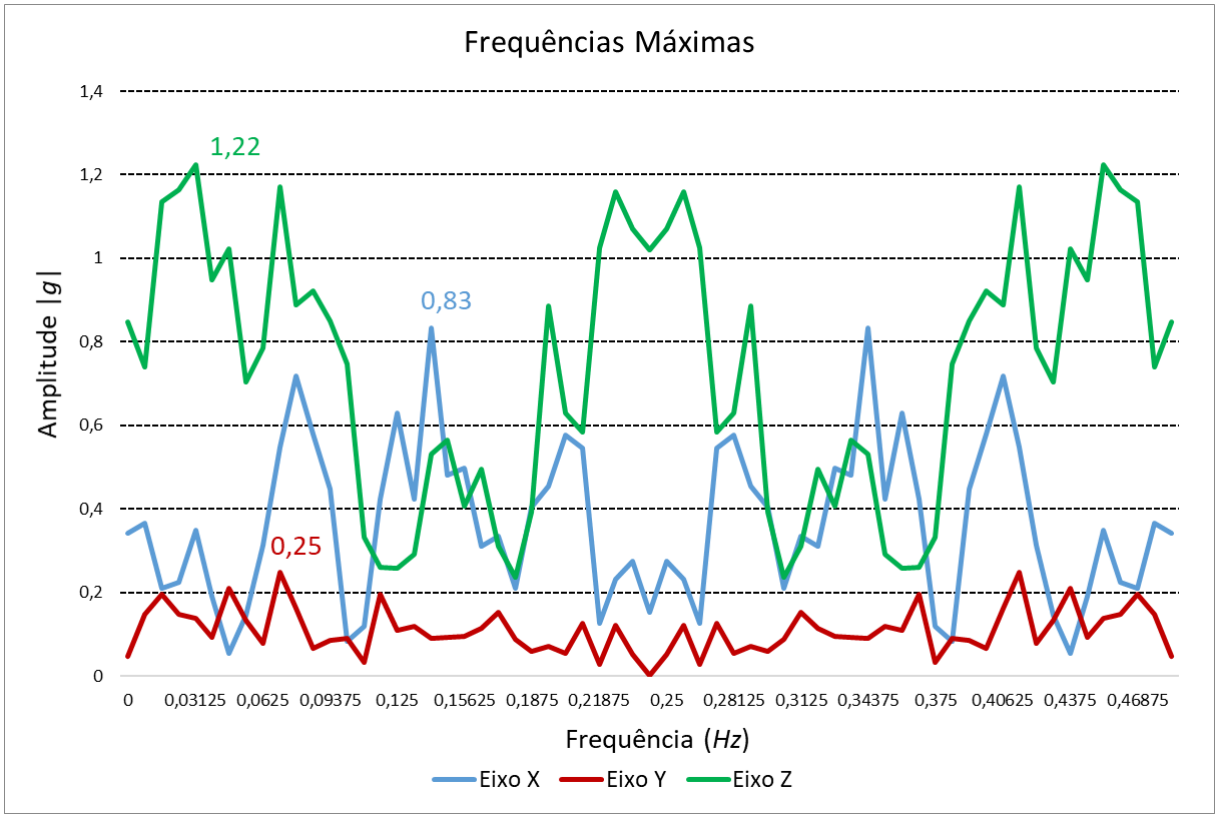
Gráfico 05 - Valores médios de frequência obtidos pela TRF



Fonte: Autor (2019)

No gráfico 06 obtivemos o valor de amplitude máximo de do eixo X igual a 0,83 *g* numa frequência aproximada de 0,13 *Hz*, o valor de amplitude máximo de do eixo Y igual a 0,25 *g* numa frequência aproximada de 0,07 *Hz*, o valor de amplitude máximo de do eixo Z igual a 1,22 *g* numa frequência aproximada de 0,3 *Hz*.

Gráfico 06 - Valores máximos de frequência obtidos pela TRF.



Fonte: Autor (2019)

2.4 CALCULO DO ÍNDICE DE VIBRAÇÃO

Koch (1953) desenvolveu um método de julgar as vibrações em construções, como possível do nível indicador de dano, o que o permitiu desenvolver um parâmetro de medição empírico da intensidade das vibrações (Bakker *et al.*, 2016). Segundo Moughty (2017) este parâmetro empírico é disposto na equação 02, em que V é o índice de vibração, *I* é a intensidade de vibração e pode ser obtido pela equação 03, *IS* é um valor padrão igual a 10 mm^2/s^3, *f* é a frequência e *a0* é a aceleração.

Segundo a ANBT NBR 15307 (2006) "O índice de vibração é um parâmetro empírico muito empregado para analisar o nível de danos estruturais". A norma brasileira usa um método de cálculo diferente que se dispõe na equação 04, embora seja baseada na metodologia de Koch. *V* continua sendo o índice de vibração, *A* é o valor da amplitude em centímetros e *f* é a frequência em Hertz.

$$V = 10\log10(I/IS) \quad \text{(Eq. 02)}$$

$$I = (a0)^2/f \quad \text{(Eq. 03)}$$

$$V = 10\log(160*[\pi^4]*[A^2]*[f^2]) \quad \text{(Eq. 04)}$$

Neste trabalho será utilizado a equação 02 para determinar o índice de vibração e este será utilizado para mensurar se a vibração encontrada está ou não causando algum dano à estrutura de acordo com o valor *V* encontrado, que será comparado na Tabela 02. O índice de vibração foi calculado para os maiores valores de vibração em cada eixo medido, os resultados estão dispostos a seguir:

Tabela 02 – Valores obtidos pelo cálculo do índice de vibração pelo método de Koch (1953)

	Frequência (Hz)	Aceleração (m/s²)	Índice de Vibração
Menor valor em X	0,484375	9,32	12,53
Valor médio em X		1,37	-4,09
Maior valor em X		8,14	11,36
Menor valor em Y		1,67	-2,41
Valor médio em Y		1,37	-4,09
Maior valor em Y		2,45	0,94
Menor valor em Z		8,53	11,77
Valor médio em Z		4,21	5,65
Maior valor em Z		11,97	14,71

Fonte: Autor (2019)

Os resultados podem ser comparados com a tabela 03:

Tabela 03 – Critério de intensidade de vibração para dano em construções

Efeito de intensidade da banda (Vibrações)	
< 20	Sem dano
20 – 30	Possível dano
30 – 40	Baixo dano
40 – 50	Rachaduras nas paredes de suporte de carga
> 50	Edifício sujeito a colapso

Fonte: BAKKER (2016) *apud*. KOCH (1953)

De acordo com os resultados obtidos, através da interpretação de dados empíricos, podemos observar que o maior valor de índice de vibração para todos os casos está no maior valor de frequência no eixo Z, ou seja, 14,71. Comparando este dado com a tabela 03, é possível afirmar que, normativamente a vibração causada na estrutura em cada um dos eixos não está causando nenhum dano à estrutura em estudo.

4 CONCLUSÃO

Após a realização deste trabalho, conclui-se que, a utilização do acelerômetro MPU-6050 e a placa Arduino, é um método eficaz e com bom custo benefício para que se produza um equipamento de medição de vibrações. Com a programação correta, é possível que a medição da vibração seja feita em tempo real, e notifique caso estas vibrações ultrapassem um limite aceitável para a estrutura, o que pode ser útil em questões de segurança, para regiões que sofrem com abalos sísmicos ou outras excitações naturais.

Concluiu-se também que a transformada rápida de Fourier é um método eficiente quando se é necessário achar a frequência de algo no domínio do tempo, pois a transformada pôde ser realizada por *softwares* acessíveis e é de fácil entendimento quanto ao seu princípio teórico. Porém nota-se que quanto mais aleatória a vibração, menos uniforme será o gráfico de frequência gerado, tendo isto em mente, a transformada é mais eficiente em achar a frequência em vibrações mais uniformes, como as de máquinas sobre lajes por exemplo.

No projeto realizado, por motivos financeiros, foram obtidos dados de apenas um ponto da estrutura e em apenas uma data. Recomenda-se que ao realizar o ensaio, utilizar todos os pontos solicitados pela NBR 15307 (2006) e em mais de uma data, para que se obtenha uma quantidade de dados estatísticos mais sólidos.

Recomenda-se que, para que se de continuidade a este trabalho, seja realizado um estudo mais aprofundado sobre vibrações aleatórias de fontes diferentes às do caminhar humano, tais como: ação do vento, fluxo de veículos, perfuratrizes ao realizar a escavação de uma estaca, entre outros fatores externos que possam vir a causar danos estruturais. Isto será útil não apenas para o entendimento de vibrações que podem ser causadas numa estrutura existente, mas também será útil para prevenir que uma construção cause danos à sua vizinhança.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Élcio Cassimiro. **Análise de sensibilidade e otimização de estruturas submetidas a vibrações aleatórias**. Orientador: Drs. Mário Kataoka Filho e Luiz Eloy Vaz. 2002. 215 p. Tese (Doutorado) - INPE-9844-TDI/867, São José dos Campos, 2002.

ARDUINO.CC. *In*: **O que é o Arduino?**. [*S. l.*], 2019. Disponível em: https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction. Acesso em: 22 nov. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15307. **Ensaios não destrutivos - Provas de cargas dinâmicas em grandes estruturas - Procedimento**, Rio de Janeiro - RJ, 30 jan. 2006.

AUTOCORE Robótica: Aprenda a utilizar o MPU6050. *In*: **Autocore Robótica**: Aprenda a utilizar o MPU6050. [*S. l.*], 4 nov. 2017. Disponível em: https://autocorerobotica.blog.br/aprenda-a-utilizar-o-acelerometro-mpu6050/. Acesso em: 22 nov. 2019.

BACHMANN, Hugo *et al.* **VIBRATION PROBLEMS IN STRUCTURES**: PRACTICAL GUIDELINES. BASEL, BOSTON, BERLIN, BIRKHÄUSER: [*s. n.*], 1995. 247 p. ISBN 13: 978-3-0348-9231-5.

BAKKER, Jaap; FRANGOPOL, Dan M.; BREUGEL, Klaas van. **Life-Cycle of Engineering Systems: Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure**: Proceedings of the Fifth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering. [*S. l.*: *s. n.*], 2016. 438 p. ISBN 9781498777018.

BRIGHAM, E. Oran. **The fast Fourier transform and its applications**. Rio de Janeiro - RJ: Prentice-Hall do Brasil, 1988. 463 p. ISBN 0-13-307505-2.

BRUXEL, Yuri. **Sistema para análise de impacto na marcha humana**. Orientador: Prof. Dr. Alexandre Balbinot. 2010. 86 p. Projeto de diplomação (Graduação em engenharia elétrica) - Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

GODOY, Italo Rodrigues; HASHINAGA, Rafael Garcia. **Interface eletrônica homem-máquina**. Orientador: Prof. Helosman Valente Figueiredo. 2017. 54 p. Relatório técnico final (Graduação em engenharia elétrica/eletrônica) - Engenharia Elétrica na Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos - SP, 2017.

INVENSENSE INC. (org.). MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.1. [*S. l.*: *s. n.*], 2011. 57 p.

KELLY, S. G. **Vibrações mecânicas: teorias e aplicações**. [s. l.], 2018. Disponível em: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsmib&AN=edsmib.000012380&lang=pt-br&site=eds-live>. Acesso em: 5 nov. 2019.

LIMA, Daniel Valença Fiuza. **CONTROLE DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS EM UMA LAJE DE ACADEMIA DE GINÁSTICA COM A UTILIZAÇÃO DE**

AMORTECEDORES DE MASSA SINTONIZADOS. Orientador: Graciela Nora Doz de Carvalho, Suzana Moreira Avila. 2007. 170 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia, Brasília - DF, 2007.

MICROSOFT. **Microsoft Office Excel**. [*S. l.*]: Microsoft Corporation, 2018. Disponível em: https://www.microsoft.com/pt-br/p/excel. Acesso em: 25 mar. 2019.

MOUGHTY, John James; CASAS, Joan Ramon. Performance Assessment of Vibration Parameters as Damage Indicators for Bridge Structures Under Ambient Excitation. **X International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2017**, Catalunha, Espanha, p. 1-6, 2017.

OLIVEIRA, Clayton Reis de. **Prova de carga em estruturas de concreto**. Orientador: Dr. Armando Lopes Moreno Junior. 2006. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil na área de concentração de Estruturas.) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2006.

ORTIGÃO, A. & JEARY, A. **Prova de carga dinâmicas em estruturas**, Simp. IBC, São Paulo, 2003

ROCHA, Fábio Saraiva da; MARANGHELLO, Guilherme Frederico; LUCCHESE, Márcia Maria. Acelerômetro eletrônico e a placa Arduino para ensino de física em tempo real. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 31, n. 1, p. 98-123, nov. 2013. ISSN 2175-7941. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2014v31n1p98>. Acesso em: 05 nov. 2019. doi:https://doi.org/10.5007/2175-7941.2014v31n1p98.

SAVI, M. A. **Vibrações mecânicas**. [s. l.], 2017. Disponível em: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsmib&AN=edsmib.000011354&lang=pt-br&site=eds-live>. Acesso em: 5 nov. 2019.

SILVA, Felipe Tavares da. **Vibrações de Passarelas de Pedestres na Direção Vertical Considerando Modelos Biodinâmicos de Pessoas Caminhando**. Orientador: Roberto Leal Pimentel. 2011. 163 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa - PB, 2011.

SOUZA, Silvio Aparecido de. **Utilização da Transformada de Fourier Janelada para Caracterização de Distúrbios na Qualidade da Energia Elétrica**. Orientador: Prof. Tit. Denis Vinicius Coury. 2004. 127 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, São Carlos - SP, 2004.

ŽIVANOVIĆ, S. *et al.* Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: A literature review. **Journal of Sound and Vibration - Elsevier**, [*S. l.*], 5 out. 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.01.019, p. 1-74.