https://doi.org/10.4322/cobramseg.2022.0055
ISBN: 978-65-89463-30-6

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP

Medição da vibração gerada durante a cravação de estacas utilizando um aplicativo (app) para aparelho celular

Ramon Duque Ferraz Burgos
Mestrando, Poli-UPE, Recife, Brasil, rduque.engenharia@gmail.com

Almir Soares de Oliveira
Graduando, Poli-UPE, Recife, Brasil, aso@ecomp.poli.br

Marcílio André Felix Feitosa
Docente, Poli-UPE, Recife, Brasil, marcilio@poli.br

Alexandre Duarte Gusmão
Docente, Poli-UPE, Recife, Brasil, gusmao.alex@ig.com.br

RESUMO: A cravação de estacas tende a gerar perturbações nas imediações de obras de fundações, onde as vibrações representam maior risco de danos. Limites dos níveis de vibração são definidos em formato de velocidade de pico de partícula (PPV), porém existem dificuldades de medição do PPV devido à falta de equipamentos. Dessa forma, o presente trabalho busca desenvolver um equipamento de medição de vibração especifico para o processo de cravação e execução de estacas. Foram selecionadas 03 obras com diferentes soluções de fundações profundas para realizar a medição da vibração gerada. Ensaios prévios com o celular foram realizados utilizando um App denominado Accelerometer Analyzer, onde as medições foram comparadas com os resultados obtidos na medição feita com um geofone. Na análise dos dados, foi verificada uma compatibilidade entre as velocidades de pico de partícula, o que permitiu o desenvolvimento de um aplicativo especifico para a medição da vibração gerada na cravação e execução de estacas. Novos ensaios serão realizados para analisar os fatores que causem erros nas medições com o celular e desenvolver medidas para mitigar falhas.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações, Vibração, Estacas, Cravação, App

ABSTRACT: On the foundations construction, Pile driving tends to generate disturbances in the neighbohood, where vibrations pose a greater risk of damage. Limits of vibration levels are defined in peak particle speed (PPV) format, however there are difficulties in measuring PPV due to the lack of equipment. Thus, the present work seeks to develop a specific vibration measurement equipment for the driving and pile driving process. 03 works with different deep foundation solutions were selected to measure the generated vibration. Previous tests with the cell phone were performed using an App called Accelerometer Analyzer, where the measurements were compared with the results obtained in the measurement made with a geophone. In the data analysis, a compatibility between the peak particle speeds was verified, which allowed the development of a specific application for the measurement of the vibration generated in the driving and execution of piles. New tests will be carried out to analyze the factors that cause errors in measurements with the cell phone and to develop measures to mitigate failures.

KEYWORDS: Foundations, Vibrations, Piles, Pile Driving, App

1 Introdução

O impacto de uma obra de construção civil dentro de uma área urbana influencia diretamente a qualidade de vida da vizinhança, pois, a geração de ruídos e vibrações tendem a incomodar os residentes. Brito (2014) avaliou impacto gerado pelas principais fontes de vibração no meio urbano, sendo as fontes: o tráfego rodoviário, o ferroviário, o processo de cravação de estacas de concreto e metálica e a o processo de demolição.

ISBN: 978-65-89463-30-6

O limite de incomodidade foi superado em todas as análises com exceção da estaca metálica, e o limite de danos estruturais foi ultrapassado pelo tráfego ferroviário e pela cravação de estacas pré-moldadas de concreto.

A medição da vibração gerada na execução e cravação de estacas é fundamental para garantir a construtora resguardo quanto aos impactos nos arredores da obra, onde associado ao estudo de impacto de vizinhança, irá permitir conhecer as patologias realmente desenvolvidas no processo executivo das fundações profundas de uma edificação. Um impasse para a realização das medições de vibrações na execução e cravação de estacas está relacionado ao equipamento utilizado, o qual é denominado Geofone.

Dentro desse contexto, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um equipamento de medição de vibração especifico para a vibração gerada durante o processo de cravação e execução de estacas, com custos mais acessíveis e que permita a ampla utilização por empresas da construção civil, auxiliando construtores e projetistas nas tomadas de decisão.

2 Cravação e execução de estacas

Deckner (2013) define a vibração como sendo um movimento oscilatório em torno de um estado de equilíbrio e pode ser descrito sob a forma de deslocamento, velocidade ou aceleração. A cravação de estacas é um complicado e intensivo processo de transferência de energia, que ocorre sob a forma de vibrações e que poderá causar danos às estruturas adjacentes à obra.

Estudos investigaram danos a estruturas, desde recalques causados pela cravação de estacas ou outras operações de construção. Como um exemplo, Lacy e Gould (1985) descreveram recalques prejudiciais causados pela cravação de estacas metálicas perto de um edifício, onde, o recalque máximo alcançou 61 mm, enquanto a velocidade de pico de partícula (PPV) no edifício foi de 2,5 mm/s. No Brasil, Albino, Lima e Souza (1996) apresentam um caso de danos em edificações causados pela cravação de estacas. No estudo uma edificação constituída por 12 pavimentos, que apresentava desaprumo, onde a causa das patologias foi uma construção vizinha com solução de fundação na obra foi projetada em blocos sobre estacas metálicas, num total de 62 unidades cravadas.

3 Equipamentos de Medição de vibração

Um Geofone é um tipo de transdutor ativo e sua operação é amplamente semelhante a um sistema de amortecimento massa-mola com um único grau de liberdade de movimento. O sistema consiste em uma massa, um amortecedor, uma mola e uma base vibrante. Quando o solo é submetido a vibrações, as molas transferem a vibração aplicada da base para a massa com amortecimento da vibração aplicada do sistema. Como o geofone usa esse princípio simples, e por causa de sua construção robusta foi considerado o mais adequado transdutor para medir a vibração do solo.

O geofone é amplamente utilizado na engenharis sismíca e de minas, já que um geofone pode ter um ruído instrumental mínimo tão baixo quanto o ruído sísmico mínimo da Terra. Eles devem ser robustos, capazes de suportar 1000 vezes uma queda de um metro em um pedaço de madeira compensada (Barzilai Vanzandt e Kenny, 1998). Na Engenharia Civil, sua utilização é feita na verificação dos impactos de obras de geotecnia, porém o alto custo dos equipamentos dificulta às medições.

O outro equipamento que permite a realizar medições da vibração é o acelerômetro. Ele pode ser composto por cristais piezoelétricos ou do tipo baseado em um sistema Micro-elétro-mecânico (Micro-Electro-Mechanical Systems ou MEMS). o Acelerômetro MEMS representa uma tecnologia que integra elementos mecânicos, sensores e eletrônicos dentro de um chip. O acelerômetro mede as forças de aceleração que podem ser causadas pela gravidade, pelo movimento ou pela ação de inclinação. Tais acelerações são medidas em termos de força g (m/s^2) nos três eixos (x, y, z).

A disseminação de acelerômetros MEMS está associada a utilização dos mesmos em celulares Smartphone, onde a sua principal função é detectar as alterações na orientação do smartphone em relação a um dado e ajustar a orientação para se adequar ao ângulo de visão de um operador. O acelerômetro detecta a mudança de orientação pela medição 3D (eixos X, Y e Z) da aceleração do dispositivo em relação à queda livre (Mi Fixer, 2016).

ISBN: 978-65-89463-30-6

4 Materiais e métodos

Foram realizadas medições utilizando um geofone e um celular com acelerômetro tipo MEMS dispostos na mesma distância. o geofone utilizado foi cedido pela Universidade Federal da Bahia (UFBA) com as seguintes especificações GEOsig Inc., modelo GSR-12PC possui 02 sensores do tipo geofone (Figura 1) pertencente a Universidade Federal da Bahia (UFBA). Os dados colhidos são processados através do software GeoDAS da Geosig e toda manipulação das amostras são processadas através desde software.

Figura 1. Celular no solo ao lado do sensor. Fonte: Autores (2020)

O acelerômetro utilizado foi o incluso no Celular utilizado durante a pesquisa. O aparelho é do fabricante ASUS no modelo ZENFONE LIVE A007 e o acelerômetro presente no celular é do fabricante MIRAMEMS e do modelo MIR3DA Accelerometer, com uma resolução de 0.0095825195 m/sec², um alcance máximo de 19.613297 m/s² e um atraso (delay) de 8333 milissegundos. O acelerômetro do Celular, capta em média, 1 amostra a cada 6-9 milissegundos. O Celular foi disposto em distâncias variadas, alternando também a superfície em que estava colocado, por vez era apoiado diretamente no solo (Figuras 2) ou em cima do sensor do geofone tipo 02.

2.1 Desenvolvimento do aplicativo para celular

O aplicativo foi desenvolvido na plataforma Android Studio 3 para Smartphones com Android 4.3 ou superior. A análise dos níveis de vibração do solo se dá pelo nível da velocidade de deslocamento das partículas, como foi proposto o uso de acelerômetros se faz necessário a transformação da aceleração em velocidade. Esse tipo de conversão é possível devido a relação existente entre as duas grandezas vetoriais. Dentre os métodos numéricos de integração, Santos (2017) afirma que a simplicidade da fórmula do método dos Trapézios é um dos fatores que o tornam atrativo para solução de problemas.

O aplicativo desenvolvido realiza a integração em tempo real, e os dados apresentados no eixo “Y” do gráfico já estão em unidade de mm/s. O aplicativo desenha um gráfico com os valores de velocidade nos 3 eixos e o limite superior e inferior, é ainda mostrado no gráfico a quantidade média de pontos coletados por segundo.

2.2 Estudos de caso

As medições foram realizadas em 3 obras com soluções de fundações profundas distintas. A Tabela 1 apresenta às características de cada obra.

ISBN: 978-65-89463-30-6

Tabela 1. Caracteristicas das obras avaliadas. Fonte: Autores (2020)

Obra	Estaca		Cravação/ Execução	Comp. da estaca (m)	Dist. de medição (m)	Solo predominante no terreno
1	Pré-moldada de concreto	ϕ = 600 mm	Impacto com martelo de 7t	38,5	5	Argila Siltosa
2	Perfil metálico	HP 310x79/92/125	Impacto com martelo de 7t	56,5	3	Argila orgânica
3	Hélice contínua	ϕ = 600 mm	Escavada com trado helicoidal	26,5	3	Areia

Todas as obras ficam na planície da cidade do Recife e compõem a infraestrutura de edificações residenciais.

Nas 3 obras , a medição foi realizada simultaneamente com o celular e o geofone. Na primeira obra, as medições a 5m de distância foi feita nos elementos 2, 3 e 4 da estaca pré-moldada, com início na profundidade -12m até -38,50m, onde o celular colheu 451.126 pontos de vibração ao longo de 3785,8 segundos e o geofone colheu 3.769.249 ao longo de 3.769,249 segundos. Na Obra 02, as medições foram feitas a 5 m de distância dos elementos 1, 2, 3, 4 e 5 com início na profundidade 0 m até -56,50 m, onde foram medidos com o celular 343.917 pontos ao longo de 2886,032 segundos, e com o geofone 1.443.016 pontos ao longo de 2886,032 segundos. Na obra 03 O as medições foram feitas a 3m de distância da estaca, com início na profundidade 0m até -26,50 m, onde com o celular foram medidos 235.691 pontos ao longo de 1977,99 segundos, e com o geofone 989.000 pontos ao longo de 1.978,00 segundos.

4 Resultados

Os resultados da medição na obra 1 está apresentada nos Gráficos 1 e 2, sendo o Gráfico 1 a medição com o celular e o Gráfico 2 a medição com o geofone.

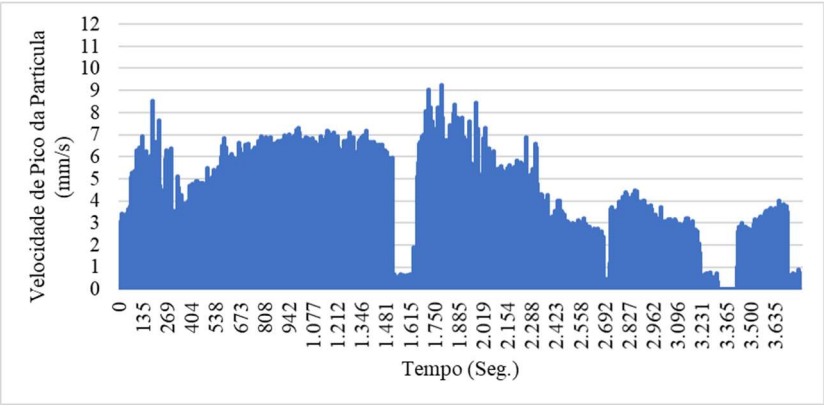

Gráfico 1. Medição do PPV com o celular na obra 1. Fonte: Autores (2020)

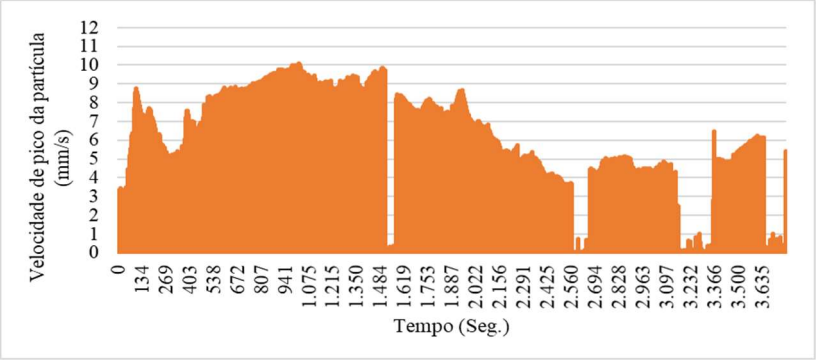

Gráfico 2. Medição do PPV com Geofone na obra 01. Fonte: Autores (2020)

ISBN: 978-65-89463-30-6

Comparando os resultados do geofone e do celular na obra 01, existe uma mesma tendência nos gráficos. Assim, enquanto o celular mede de 1 ponto a cada 5 ou 6 milissegundos, o geofone capta 1 ponto a cada 1 milissegundo. Tal diferença favorece o geofone e reduz a possibilidade de erros. Porém, o PPV máximo medido pelo celular foi 9,21 mm/s no instante 1.787 segundos e o geofone registrou o PPV máximo de 10,01 mm/s aos 985,189 segundos, o que representa uma variação de apenas 8% no resultado de geofone para o resultado medido no celular. Visto que a medição com o Celular foi feita sem uma metodologia bem definida, e utilizando um app que não tinha a função especifica de medir velocidade, uma variação de aproximadamente 8% é tida como excelente.

Para a obra 02, respectivamente, o Gráfico 3 apresenta às edições feitas com o celular o o Gráfico 4 às medições com o geofone.

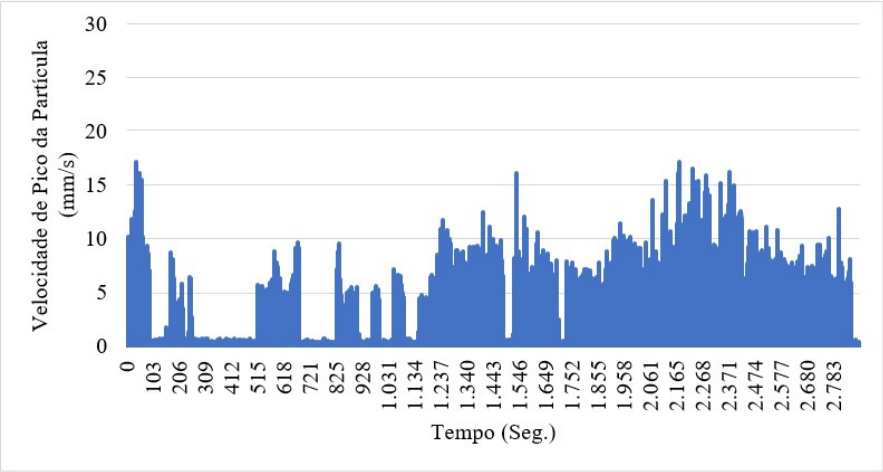

Gráfico 3. Medição do PPV com o celular na obra 2. Fonte: Autores (2020)

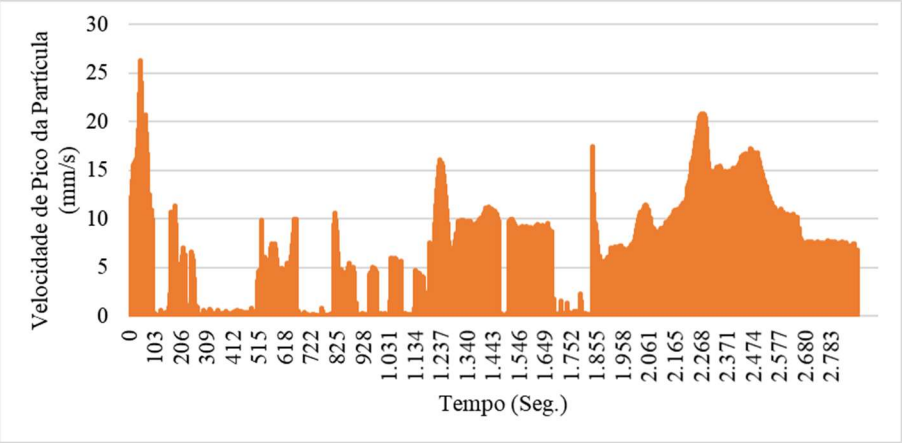

Gráfico 4. Medição do PPV com o geofone na obra 2. Fonte: Autores (2020)

Comparando os resultados do geofone e do celular na obra 02, existe uma mesma tendência nos gráficos. Assim, enquanto o celular mede de 1 ponto a cada 5 ou 6 milissegundos, o geofone capta 1 ponto a cada 2 milissegundos. Tal diferença favorece o geofone e reduz a possibilidade de erros. Porém, o PPV máximo medido pelo celular foi 17,11 mm/s no instante 2178,55 segundos e o geofone registrou o PPV máximo de 26,24 mm/s aos 45,848 segundos, o que representa uma variação de 34,79% no resultado de geofone para o resultado medido no celular. Visto que a medição com o Celular foi feita sem uma metodologia bem definida, e utilizando um app que não tinha a função especifica de medir velocidade, uma variação de aproximadamente 35% é tida como aceitável.

Na obra 03 as medições com o celular e geofone estão apresentadas, respectivamente, nos Gráficos 5 e 6.

ISBN: 978-65-89463-30-6

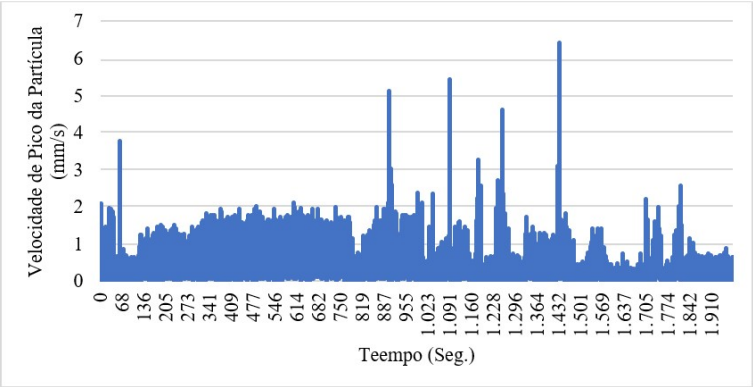

Gráfico 5. Medição do PPV com o celular na obra 3. Fonte: Autores (2020)

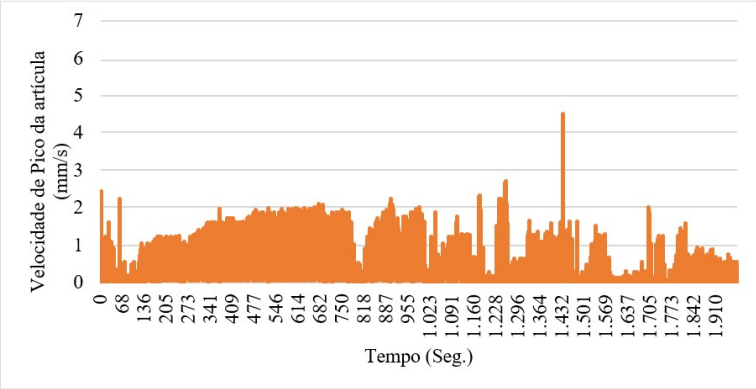

Gráfico 6. Medição do PPV com o geofone na obra 3. Fonte: Autores (2020)

Comparando os resultados do geofone e do celular, existe uma mesma tendência nos gráficos, com uma coleta de dados similar a da obra 02. O PPV máximo medido pelo celular foi 6,40 mm/s no instante 1435,89 segundos e o geofone registrou o PPV máximo de 4,52 mm/s aos 1434,254 segundos, o que representa uma variação de 29,38% no resultado de geofone para o resultado medido no celular. Visto que a medição com o Celular foi feita sem uma metodologia bem definida, e utilizando um app que não tinha a função especifica de medir velocidade, uma variação de aproximadamente 30% é tida como aceitável.

Tabela 2. Resultados da medição com o celular e geofone. Fonte: Autores (2020)

Obra	Estaca	Equipamento	Tempo total de medição (seg.)	Pontos medidos	PPV (mm/s)	Variação (%)	Tempo do PPV Max. (seg.)
2	Pré-moldada de concreto	Celular	3785,80	451126	9,21	8%	1787,00
		Geofone	3769,25	3769249	10,01		985,19
3	Perfil Metálico	Celular	2886,03	343917	17,11	35%	2178,55
		Geofone	2886,03	1443016	26,24		45,85
4	Hélice contínua	Celular	1997,99	235691	6,40	29%	1435,89
		Geofone	1978,00	989000	4,52		1434,25

5 Aplicativo para medir a vibração gerada na cravação e execução de estacas

Como resultado da verificação da medição com o aparelho celular, foi desenvolvido o aplicativo (App) “Analisador de Vibrações”. O download do aplicativo está disponível no link:

https://drive.google.com/open?id=15MuBix0e092rBmJuUBPDdCP5IY1l-ctQ

ISBN: 978-65-89463-30-6

Ou através do QR Code na Figura 2

Figura 2. QR Code para download do app Analisador de Vibrações. Fonte: Autores (2020)

Quando aberto, irá aparecer na tela inicial quatro lacunas a serem preenchidas (Figura a3), sendo elas: Tipo de Solo, Distância, Estruturas e Norma. Para a medição começar a rodar, é preciso preencher às 4 lacunas. O tipo de solo e a distância não irão influenciar no resultado do PPV, porém ficarão registrados no relatório gerado ao fim da medição. Quando se seleciona o tipo de solo, aparecem 3 opções, arenoso, argiloso e siltoso. Na seleção da distância, aparecem 5 opções: 5 m, 10 m, 15 m, 20 m e 25 m. A escolha das distâncias foi feita de acordo com as utilizadas ao longo do trabalho, porém não impedem a medição em outras distâncias definidas pelo operador. Após a escolha da Distância, é preciso selecionar a Norma que será tida como referência. O app oferece duas opções: A norma da AASHTO (1990) e o Eurocode 3 (CEN, 1993). Após a escolha da Distância, é preciso selecionar a Norma que será tida como referência. Não é possível selecionar o tipo de estrutura sem selecionar a norma referência.

Após selecionados todos os parâmetros, é possível iniciar à medição (Figura 3b). Quando se aperta o botão "Iniciar", é dado um atraso de 3 segundos no início da medição, e a exibição de uma mensagem de "Aguarde". Quando se inicia a medição da vibração, a tela do app muda para um gráfico (Figura 3c) onde o Eixo Y é a Velocidade em mm/s e o Eixo X é o tempo em milissegundos, o qual segue mudando à medida que o tempo avança. No gráfico estão dispostas 6 linhas, onde as 2 vermelhas paralelas ao eixo X representam os limites do PPV para a Norma e Estrutura selecionada. As demais linhas representam as medições de vibrações no eixo X (Linha Roxa), Y (Linha Amarela), Z (Linha Azul) e o PPV (Linha Verde). Ao fim da verificação das vibrações, o operador deve apertar o botão "Salvar" para finalizar a medição.

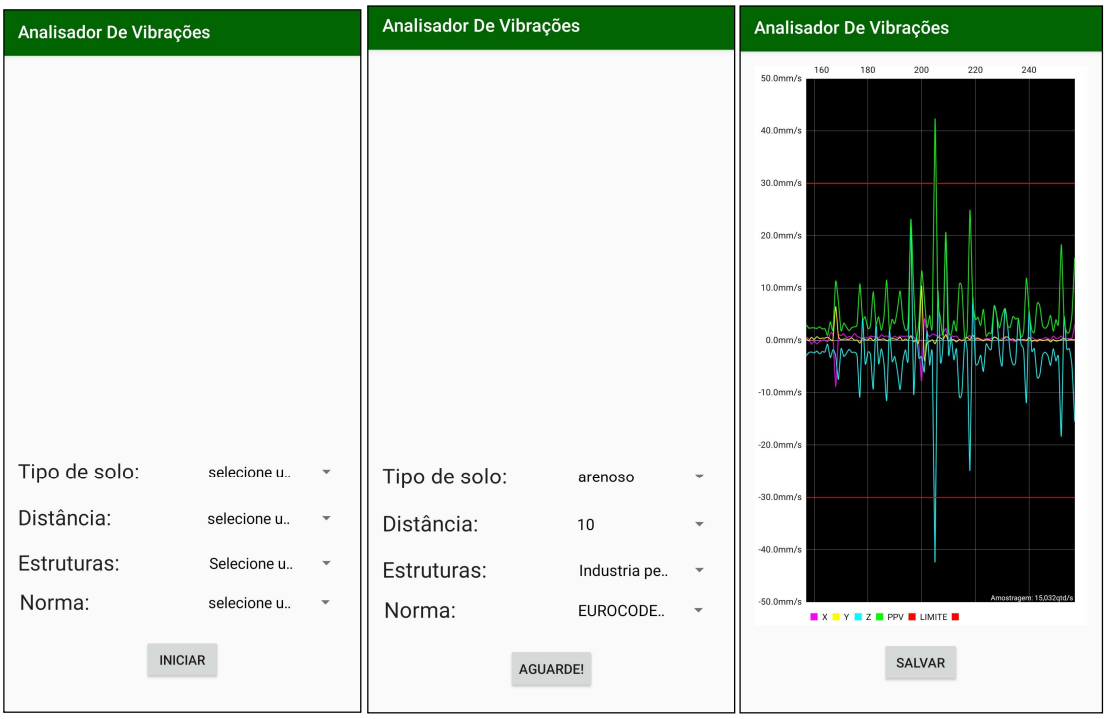

Figura 3. Telas do aplicativo "Analisador de Vibrações". Fonte: Autores (2020)

ISBN: 978-65-89463-30-6

Quando finalizada, aparecerá na tela do aplicativo uma mensagem de onde o arquivo em txt foi salvo. O arquivo é gerado em arquivo de texto (Extensão .txt) com os resultados dos registros nos eixos X, Y, Z em unidades de aceleração e velocidade, assim como o PPV e demais informações acerca da medição.

6 Conclusões

Na comparação entre os resultados obtidos no geofone e no celular, foi verificado uma compatibilidade entre os dados. O comportamento dos dados no gráfico, seguem a mesma tendência, porém existe uma diferença entre os resultados que devem ser melhor estudadas. Com base em uma análise preliminar, tal variação pode ser vista como a não utilização de uma metodologia definida para realizar às medições, podendo gerar movimentações do aparelho durante as medições. A utilização do app deve ser como um equipamento de auxílio na medição da vibração com equipamentos de maior precisão, como o geofone, e resultados obtidos no app não devem ser utilizados como parâmetros de decisão em projetos de geotecnia e cálculo estrutural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albino, J. P. C.; Lima, N. A.; Souza, V. C. M. *Acidentes Estruturais na Construção Civil*. Editora Pini, Volume 1, São Paulo/SP, 1996.

Barzilai, A.; Vanzandt, T.; Kenny, T. Improving the performance of a geophone through capacitive position sensing and feedback. In: *American Society of Mechanical Engineers International Congress*, 1998.

Brito, L.A. Avaliação das Principais Fontes de Vibração no Meio. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 233-249, 2014.

Deckner, F. *Ground vibrations due to pile and sheet pile driving: influencing factors, predictions and measurements*, in Department of Civil and Architectural Engineering. KTH, Royal Institute of Technology: Stockholm. p. 126, 2013.

Lacy, H. S.; Gould, J. P. Settlement from pile driving in sands. Vibration problems in geotechnical engineering: *proceedings of a symposium sponsored by the Geotechnical Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, New York, 152–173, 1985.

Mi Fixer. 2016 “All About Accelerometer Sensor and Troubleshooting”. *Mi Community*. Disponível em: < https://in.c.mi.com/thread-1415082-1-1.html>.Acesso em: 12/01/2020.

Santos, P., R., dos. *Definição intervalar do método de integração dos trapézios*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2017.