



2024

Avaliação do módulo de elasticidade de estacas de concreto utilizando a técnica de vibração transversal por meio de Smartphones

Luiz Felipe Lazzare ^a; Andrés Batista Cheung ^b

^a Aluno de Graduação em Engenharia Civil, l Luiz.lazzare@ufms.br

^b Professor Orientador, Doutor, andres.cheung@ufms.br

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Av. Costa e Silva, s/nº | Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande, MS, Brasil.

RESUMO

A utilização de elementos estruturais pré-fabricados em concreto tem se tornado um aspecto importante no avanço dos métodos construtivos, visando a redução do tempo e do consumo de materiais na construção civil. Esses elementos eliminam a necessidade de armazenamento e produção de materiais no canteiro de obras. No entanto, para uma concepção adequada do projeto, é essencial entender as propriedades mecânicas dos materiais, sendo o módulo de elasticidade uma característica crucial para compreender as deformações dos elementos estruturais. No contexto das estacas pré-fabricadas, a determinação do módulo de elasticidade é crucial para controlar o comportamento durante o processo de cravação. Nesse sentido, o uso de smartphones se destaca como uma opção viável e não destrutiva para análise de vibrações dos elementos estruturais, especialmente por meio do acelerômetro, capaz de medir a frequência de vibração natural do elemento. Portanto, o objetivo deste estudo é apresentar uma abordagem inovadora para a obtenção do módulo de elasticidade de estacas de concreto protendidas utilizando a técnica de vibração transversal com o auxílio de smartphones. Os resultados mostram que os valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico, por meio dessa técnica, são 8% superiores aos adquiridos por meio dos ensaios de flexão estática. Por fim foi estabelecida uma relação entre os dois valores por meio de regressão linear com fator de determinação $R^2 = 0,80$.

Palavras-chave: concreto pré-fabricado, estacas protendidas, módulo de elasticidade estático, módulo de elasticidade dinâmico, propriedades mecânicas, acelerômetro, smartphone, ensaios não destrutivos.

ABSTRACT

The use of prefabricated concrete structural elements has become an important aspect in the advancement of construction methods, aiming to reduce time and material consumption in civil construction. These elements eliminate the need for storage and production of materials on the construction site. However, for an adequate design of the project, it is essential to understand the mechanical properties of materials, with the modulus of elasticity being a crucial characteristic to understand the deformations of structural elements. In the context of prefabricated piles, determining the modulus of elasticity is essential to control behavior during the crimping process. In this sense, the use of smartphones stands out as a viable and non-destructive option for analyzing the vibrations of structural elements, especially using the accelerometer, capable of measuring the natural vibration frequency of the element. Therefore, the objective of this study is to present an innovative approach for obtaining the elastic modulus of pre-tensioned concrete piles using the transverse vibration technique with the aid of smartphones. The results show that the values obtained for the dynamic modulus of elasticity, using this technique, are 8% higher than those acquired through static bending tests. Finally, a relationship was established between the two values using linear regression with a determination factor $R^2 = 0.80$.

Keywords: prefabricated concrete, pre-tensioned piles, static modulus of elasticity, dynamic modulus of elasticity, mechanical properties, accelerometer, smartphone, non-destructive testing.

1. INTRODUÇÃO

Para um bom projeto é necessário o conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais, dentre elas o módulo de elasticidade é fundamental para o conhecimento das deformações dos elementos estruturais (PACHECO et al., 2014).

O módulo de elasticidade pode ser definido como sendo a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea abaixo de um limite proporcional adotado. Nos concretos o comportamento tensão-deformação não é linear, e desta forma, o módulo de elasticidade é função do nível de tensão aplicada no elemento (BARBOZA et al., 2022; METHA E MONTEIRO, 2014).

Quando se trata de estacas pré-moldadas, a determinação do módulo de elasticidade do componente é crucial para antecipar e controlar o comportamento durante o processo de cravação, que é governado pela equação da onda. É sabido que, para a aplicação de métodos de previsão de carga baseados em ensaios de carga dinâmica, o conhecimento do módulo de elasticidade do concreto é essencial (ARAÚJO JUNIOR, et al. 2018).

Com os smartphones evoluindo constantemente, eles se tornam uma opção mais econômica e acessível para a análise de vibrações em estruturas. Os modelos mais recentes de dispositivos móveis incluem recursos como câmera, microfone, giroscópio e GPS, entre outros. No contexto de monitoramento e análise de materiais, destaca-se o acelerômetro como o sensor mais atrativo, capaz de medir variações na aceleração do aparelho, sendo, portanto, útil para determinar as frequências de vibração às quais o celular está exposto (TAKAZONO e CHEUNG, 2018).

Desta forma, este trabalho tem como objetivo a proposta de uma metodologia inovadora para a determinação do módulo de elasticidade de estacas de concreto pretendido utilizando a técnica de vibração transversal, obtendo sua frequência de vibração natural com o uso do acelerômetro do smartphone.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Revisão de literatura

2.1.1. Contextualização do tema

De acordo com Hola e Schabowicz (2010), os métodos experimentais mais utilizados na identificação de danos podem ser divididos em três categorias: testes destrutivos, testes semi-destrutivos e não destrutivos. Os métodos destrutivos são pouco

utilizados para prever danos em estruturas em uso, pois o próprio ensaio gera danificação da estrutura. Já os métodos semi-destrutivos exigem somente uma pequena prospecção intrusiva do material, ocasionando apenas a perda das propriedades do local da intrusão que será posteriormente reconstituído. No caso dos métodos não destrutivos, além de não gerar danos durante sua execução, possibilitam a repetição dos ensaios ao longo da vida útil da estrutura para acompanhar a evolução da integridade estrutural.

2.2 O módulo de elasticidade do concreto

Segundo Pacheco et al (2014), o comportamento do concreto revela não-linearidade ao enfrentar tensões de compressão ou tração, devido à sua natureza viscoelástica semissólida.

É bem conhecido que o módulo de elasticidade do concreto depende de uma variedade de fatores. Estes incluem as propriedades do aglomerante, as propriedades e proporções dos agregados graúdos, o tamanho e forma dos corpos de prova, a umidade ou umidade no momento do ensaio, a taxa de aplicação da carga e o método de obtenção das deformações.

Para o controle do valor do módulo especificado pelo projetista, obtido através das expressões apresentadas, diversos métodos de ensaio podem ser utilizados no Brasil. Apresentam-se a seguir a diferenciação módulos de elasticidades estáticos e dinâmicos e suas referidas NBR 8522-1 (ABNT, 2021) e NBR 8522-2 (ABNT, 2021) de acordo com a normalização brasileira.

2.3 Tipos de Módulos de elasticidade

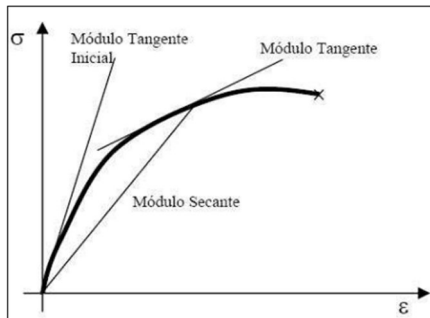
O módulo de elasticidade do concreto (E_c) estabelece uma ligação entre a tensão e a correspondente deformação ou entre a força e as deformações correspondentes e representa uma das propriedades mecânicas mais importantes do concreto. Ao estabelecer o módulo de elasticidade, Mehta e Monteiro (2008) categorizaram três tipos distintos de módulos de elasticidade, são eles: o módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}), o módulo de elasticidade estático (E_{ce}), que se subdivide em módulo tangente inicial (E_{ci}), módulo secante e módulo cordal (E_{cs}) e o módulo de deformação à flexão (E_{cf}).

De acordo com Santos, Gambale e Andrade (2006), o uso do termo "módulo de elasticidade" foi estendido por conveniência, mesmo quando se tratava de diagramas curvos e situações com diferentes diagramas durante carregamento e descarregamento. Dessa forma, foram introduzidos os conceitos de "módulo de elasticidade secante", no qual o diagrama real é substituído por uma linha fictícia linear da

origem até o ponto de carregamento previsto; e de "módulo de elasticidade tangente", em que o diagrama real é substituído por uma linha paralela à tangente do diagrama verdadeiro.

A Figura 1 mostra o diagrama dos módulos de elasticidade.

Figura 1 – Diagrama dos módulos de elasticidade



Fonte: Santos; Gambale e Andrade (2006)

Embora a norma ABNT NBR 8522:1 forneça diretrizes para determinar os módulos tangente inicial e secante para uma tensão específica, a norma ABNT NBR 6118:2023 estipula que apenas o módulo tangente inicial deve ser especificado no projeto e controlado por meio de ensaios, conforme ressaltado por Shehata (2005).

Existem diferentes denominações de módulo, no entanto, para Shehata (2005), todas levam à determinação do módulo de elasticidade tangente inicial.

O módulo de elasticidade estático também pode ser determinado por meio de ensaio em uma viga carregada no meio do vão, simplesmente apoiada nas extremidades. Apesar da realização de um procedimento experimental completamente diferente, o módulo na tração (ensaio à flexão) possui aproximadamente o mesmo valor do módulo obtido no ensaio à compressão de amostras cilíndricas (NEVILLE, 1982). No entanto, o diagrama tensão-deformação do ensaio de tração direta começa a apresentar não-linearidade com valores de tensão relativa menores do que o ensaio de compressão. O módulo de elasticidade à flexão ($E_{c,f}$), no caso de ensaios em três pontos, é obtido pela eq. (1).

$$E_{c,f} = \frac{\Delta F \cdot L^3}{48 \cdot I \cdot \Delta_f} \quad (1)$$

Onde:

Δ_f é a variação do deslocamento para uma variação de força aplicada;

L é o comprimento do vão;

I é o momento de inércia;

2.3.2 Módulo de elasticidade dinâmico.

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que, ao analisar tensões em estruturas sujeitas a cargas de impacto ou terremotos, é mais apropriado empregar o módulo de elasticidade dinâmico, devido à sua maior precisão.

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico é realizada por meio de métodos não destrutivos. Shehata (2005) resalta dois métodos: um que correlaciona o módulo com a frequência natural de vibração e outro que relaciona o módulo com a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no corpo de prova.

A Parte 2 da norma ABNT NBR 8522-1 e ABNT NBR 8522-1 (ABNT, 2021) estabelece o método de ensaio para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico de corpos de prova de concreto pelas frequências naturais de vibração. A informação da frequência, juntamente com a massa e as dimensões, permite o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}).

Segundo a NBR 8522-2: 2021, caso a excitação do corpo de prova seja por impacto, esta variação é denominada por Técnica de Excitação por Impulso (TEI), sendo a adoção da TEI popularizado no desenvolvimento e no controle tecnológico do concreto para a estimativa do módulo de deformação tangente inicial.

2.4 Relação entre os módulos de elasticidade estático e o dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico está quase inteiramente ligado ao comportamento elástico do concreto, uma vez que durante a vibração são exercidas tensões extremamente baixas, (NEVILLE, 1982) demonstrando deformações instantâneas muito reduzidas.

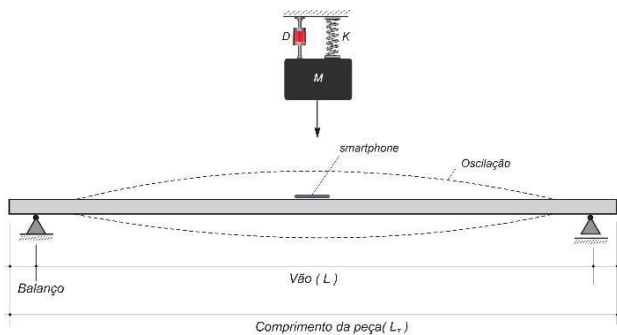
Assim na visão de Almeida (2005), o E_{cd} possui valor próximo ao módulo tangente inicial estático (E_{ci}) e portanto, é maior do que o módulo secante estático (E_{cs}). Segundo Mehta e Monteiro (2008), o E_{cd} "é geralmente 20, 30 e 40 por cento maior do que o módulo estático para concretos de alta, média e baixa

resistências, respectivamente”. Essa diferença também depende dos cuidados tomados durante a realização dos ensaios e do emprego de fatores de correção nas equações para o cálculo do módulo dinâmico.

2.5 Ensaio de Vibração Transversal

Técnicas de vibração transversal (VT) têm recebido considerável atenção para aplicações de avaliação não destrutiva (ROSS, 2015). A Figura 3 ilustra uma configuração típica de teste de vibração transversal livre. Note que o espécime é simplesmente apoiado em ambas as extremidades.

Figura 2 - Configuração típica do ensaio de vibração transversal livre.



Fonte: Autor

Um deslocamento prescrito é introduzido no meio do vão do elemento e então permitida a oscilar livremente na direção vertical (transversal). A frequência de oscilação junto com o peso e dimensões do espécime é usada para calcular o módulo de elasticidade (E_{cd}). Essa medição do E_{cd} é referida como $E_{cd,VT}$ transversal ($E_{cd,VT}$) e às vezes é chamada de E_{cd} dinâmico para diferenciá-la do E_c estático. $E_{cd,VT}$ é calculado pela eq. (2). A dedução pode ser encontrada no trabalho de Takazono e Cheung (2018).

$$E_{cd,VT} = \frac{f^2 \cdot W \cdot L^3}{2,4674 \cdot I \cdot g} \quad (2)$$

onde f é a frequência ressonante (Hz), W é o peso do elemento (N), L é o vão (m), I é o momento de inércia (m^4), e g é a aceleração devido à gravidade ($9,81 m/s^2$).

2.5.1 Tecnologia dos aplicativos de celular para ensaios não destrutivos

O acelerômetro é um sensor que permite detectar mudanças na aceleração do dispositivo em que está embutido. Ele é amplamente utilizado em dispositivos móveis para diversas finalidades, dentre elas registrar a força variável no tempo a partir de um impulso rápido (SASAKI E JESUS, 2016). Dessa forma é possível obter a frequência natural de um objeto vibrando livremente.

De acordo com Vieira e Aguiar (2013), o acelerômetro presente em um tablet ou smartphone é capaz de medir acelerações no intervalo de $\pm 2g$, onde "g" representa a aceleração da gravidade, em relação a um referencial inercial.

A tecnologia dos aplicativos de celular tem evoluído significativamente, permitindo a utilização de sensores de alta precisão para a medição de deformações e deflexões em vigas. Esses aplicativos oferecem uma interface amigável e acessível para a realização de ensaios não destrutivos.

Além das vantagens mencionadas anteriormente, é importante destacar que o acelerômetro do smartphone utilizado na técnica de vibração transversal apresenta precisão na obtenção de estimativas do módulo de elasticidade, o que permite sua aplicação na classificação de materiais, como a madeira (TAKAZONO E CHEUNG, 2018). Essa constatação reforça a versatilidade e eficiência do uso de aplicativos de celular para a medição de propriedades mecânicas do concreto e outros materiais estruturais.

A mobilidade dos smartphones e a praticidade das técnicas não destrutivas contribuem para a aplicabilidade da proposta em diferentes contextos da construção civil.

Comparativamente a métodos convencionais, a utilização de aplicativos de celular para medição de propriedades mecânicas do concreto oferece vantagens como a não destrutivo, agilidade na coleta de dados e a possibilidade de medições em tempo real. Esses benefícios tornam o processo de avaliação estrutural mais eficiente e econômico.

O uso de aplicativos de celular como ferramenta para medição de propriedades mecânicas do concreto estimula o avanço das técnicas de avaliação estrutural, incentivando a adoção de tecnologias inovadoras na área. Essa abordagem pode impulsionar o desenvolvimento de novos aplicativos e aprimorar as técnicas de medição para análise de estruturas de concreto.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a validação da técnica proposta foi realizado ensaios de vibração transversal em estacas pré-fabricadas de concreto protendido. Os testes foram realizados na sede da SOTEF Engenharia, situada em Campo Grande no estado de Mato Grosso do Sul. A empresa é fabricante de estacas pré-fabricadas de concreto protendido ou armado, hexagonais e quadradas, maciças e vazadas.

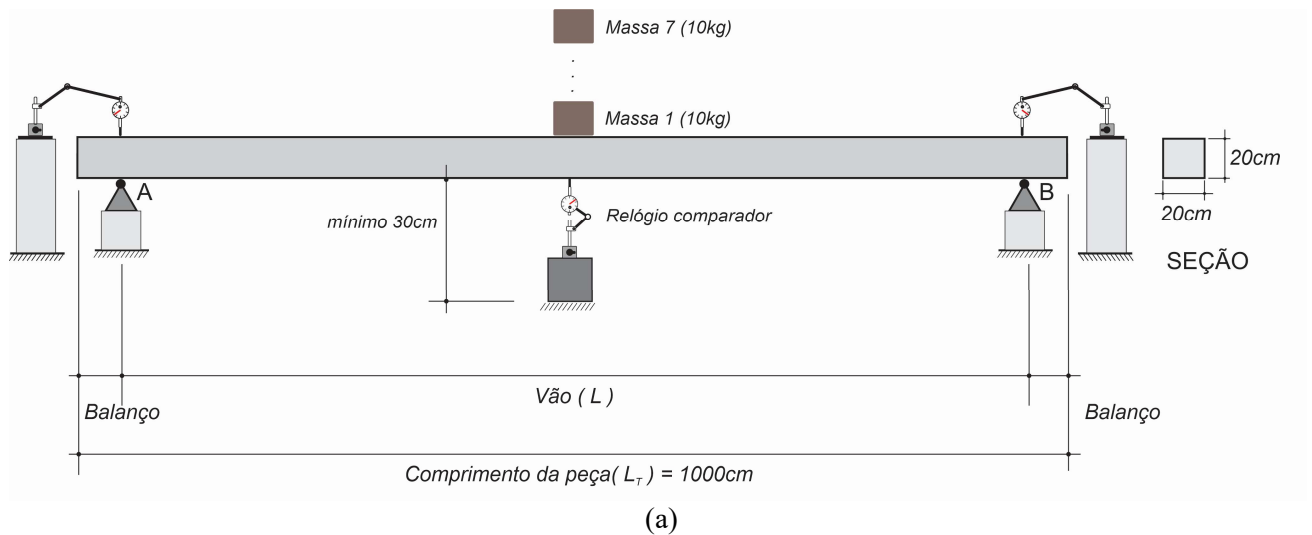
3.1 Estacas de Concreto Protendido

Foram utilizadas 6 estacas quadradas de medidas nominais: 20 x 20 x 1000 cm, que foram submetidas aos ensaios de flexão estática e vibração transversal (Figura 3b). As estacas possuíam uma resistência do concreto à compressão de $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$. Para obtenção das dimensões reais dos elementos foi utilizada uma trena.

3.2 Teste de Flexão Estática

O teste de flexão estática de três pontos foi o método escolhido para a obtenção do módulo de elasticidade estático das peças de concreto, conforme a Figura 3a.

Figura 3 – (a) Esquema de ensaio de flexão estática. (b) Progressão de carga no ensaio de flexão estática. (c) Esquema de aplicação da carga. (d) Determinação da massa da estaca.



(b)



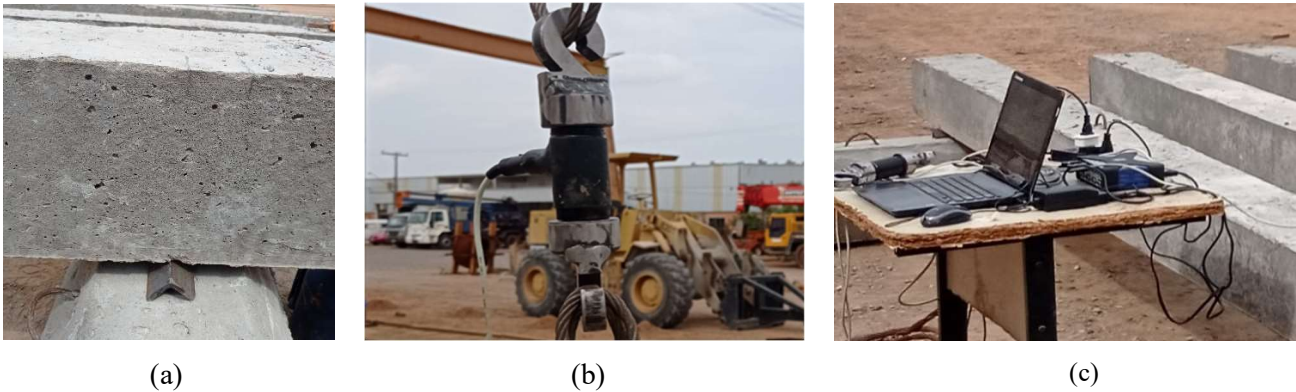
(c)



(d)

Fonte: Próprio autor.

Figura 4 – (a) Representação dos apoios. (b) Detalhe da célula de carga. (c) Equipamento de coleta de dados dos pesos das estacas.



Fonte: Próprio autor.

Para a determinação do módulo de elasticidade foi realizada a análise para incrementos de cargas 0,1 kN com anilhas, mostrado na Figura 3b. Para a determinação do deslocamento no ponto central foi utilizado relógio comparador com precisão de centésimos de milímetro, conforme descrito na Figura 3c. Para a determinação do peso de cada estaca foi utilizada uma célula de carga de 50kN, Figura 4b, acoplada a um sistema de aquisição de dados, mostrado na Figura 4c. O dispositivo do apoio utilizado foi uma cantoneira e está mostrado pela Figura 4ª. O sistema estrutural utilizado para os ensaios apresenta balanços em ambas as extremidades e estão apresentados na Tabela 1. As denominações dos balanços A e B seguem o diagrama da Figura 3 (a).

0,002g em relação a um referencial inercial. O sensor mede a variação da aceleração de um corpo nos três eixos cartesianos e através de aplicativos a converte em frequência.

Utilizando-se da mesma configuração do teste de flexão estática (viga bi-apoiada) e com as peças devidamente mensuradas e pesadas, foi posicionado o smartphone exatamente no meio do vão, conforme Figura 5, e a peça de concreto foi induzida a uma vibração livre com a imposição de um deslocamento prescrito utilizando as próprias mãos. Foram feitas 3 tomadas de valores de frequência para cada peça para obtenção de uma média.

Figura 5 – Posicionamento do smartphone.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 1 – Medidas das estacas em relação aos apoios.

| Estaca | Comprimento do vão (m) | Balanço A (m) | Balanço B (m) |
|--------|------------------------|---------------|---------------|
| 1 | 8,82 | 0,50 | 0,65 |
| 2 | 8,83 | 0,50 | 0,65 |
| 3 | 8,78 | 0,60 | 0,60 |
| 4 | 8,88 | 0,60 | 0,50 |
| 5 | 8,88 | 0,60 | 0,50 |
| 6 | 8,83 | 0,65 | 0,50 |

Fonte: Próprio autor.

3.3 Teste de vibração transversal

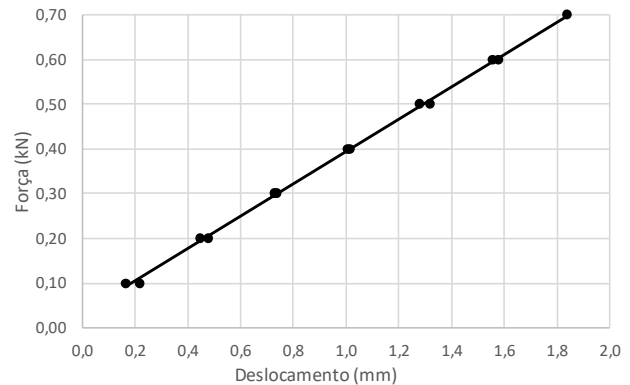
Para medir a frequência de vibração da peça foi utilizado o acelerômetro do smartphone, que de acordo com Vieira e Aguiar (2013), é capaz de medir intervalos de aceleração de $\pm 2g$ com precisão de

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 6 mostra o comportamento do ensaio de flexão estática para os incrementos de carga utilizados. Dela se observa que o comportamento segue o regime elástico linear, obedecendo à lei de Hooke, para o carregamento e descarregamento realizado, mostrando que tal incremento de carga pode ser utilizado para obter o valor do módulo de elasticidade estático.

A Tabela 2 mostra os resultados obtidos dos módulos de elasticidade por ambos os métodos, tanto de vibração transversal quanto de flexão estática.

Figura 6 – Diagrama carga versus deslocamento para o ensaio de flexão estática da viga 1.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 2 – Resultados obtidos dos módulos de elasticidade.

| Estaca | Massa da Viga (kg) | Comprimento do vão livre (m) | Frequência (Hz) | Momento Inercia (cm ⁴) | $E_{cd,VT}$ (GPa) Vibração Transversal | E_{cf} (GPa) Flexão Estática | $E_{cd,VT} / E_{cf}$ |
|---------------------|--------------------|------------------------------|-----------------|------------------------------------|--|--------------------------------|----------------------|
| 1 | 1120 | 8,82 | 4,20 | 14198 | 39,44 | 36,28 | 1,09 |
| 2 | 1160 | 8,83 | 4,33 | 14268 | 43,42 | 42,33 | 1,03 |
| 3 | 1120 | 8,78 | 4,71 | 14837 | 46,83 | 43,20 | 1,08 |
| 4 | 1190 | 8,88 | 4,24 | 14828 | 41,74 | 38,96 | 1,07 |
| 5 | 1110 | 8,88 | 4,36 | 14010 | 43,57 | 39,29 | 1,11 |
| 6 | 1110 | 8,83 | 4,47 | 14036 | 44,88 | 40,88 | 1,10 |
| Média (GPa) | | | | | 43,31 | 40,16 | 1,08 |
| Desvio (GPa) | | | | | 2,54 | 2,52 | 0,03 |
| COV (%) | | | | | 5,9 | 6,3 | 2,7 |

Fonte: Próprio autor.

4.1 Correlação entre o $E_{cd,VT}$ Vibração Transversal e o E_{cf} Flexão Estática

Para fazer a correlação entre os dois valores obtidos para o módulo de elasticidade do material foi utilizada a regressão linear simples, tomando como variável independente (x) os valores do módulo de elasticidade do ensaio de flexão estática e como variável dependente (y) os valores oriundos do módulo de elasticidade obtido do ensaio de vibração transversal, Figura 7.

Os resultados mostram forte correlação entre o $E_{cd,VT}$ e E_{cf} com um coeficiente de determinação R^2 em torno de 0,8. Corroborando com as afirmações de Mehta e Monteiro (2008) ficou evidente que os

valores obtidos para o módulo de elasticidade por meio da técnica de vibração transversal foram superiores aos valores obtidos no ensaio de flexão estática em torno de 8%. Mesmo com as estacas produzidas com o mesmo traço de concreto, o método foi capaz de obter diferenças de valores entre estacas, conforme pode ser observado na Tabela 2. Fica evidente, pelos dois métodos utilizados, diferenças entre os módulos de elasticidade.

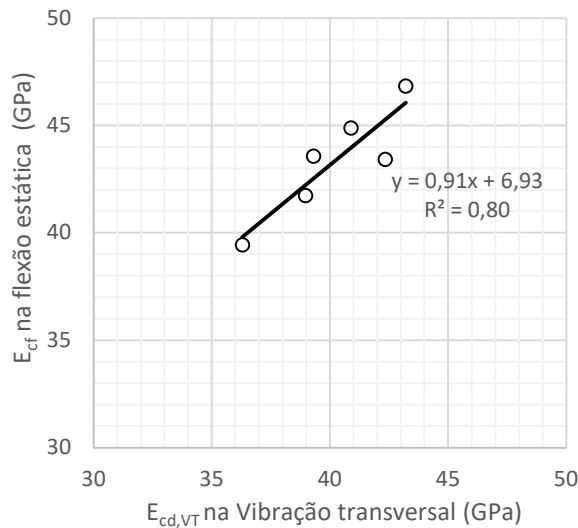
As variabilidades encontradas para o método da vibração transversal e flexão estática foi de 5,9% e 6,3%, respectivamente, foram semelhantes. Cabe ressaltar que o número de amostras utilizadas no trabalho não é capaz de verificar, estatisticamente, se existe diferença entre as médias.

Ademais, de acordo com o gráfico de regressão linear, a relação $E_{cf} = 0,9061 E_{cd,VT} + 6,926$; com fator de

determinação $R^2 = 0,8049$ é satisfatória para estimar o valor do módulo de elasticidade estático à flexão pelo método da vibração transversal.

Fica evidente que a variabilidade encontrada no método de vibração transversal foi menor que a obtida no ensaio de flexão nas estacas de concreto protendido.

Figura 7 - Diagrama de dispersão e reta de regressão.



Fonte: Próprio autor.

5. CONCLUSÕES

Os resultados mostraram, preliminarmente, por meio da análise de regressão linear, que é possível estimar o valor do módulo de elasticidade estático de uma peça de concreto protendido pré-fabricado por meio do método de vibração transversal. Os valores são 8% maiores, em média, que os valores encontrados no método de flexão estática em elementos estruturais.

Ficou evidente que o método é simples e possível de ser implementado em obras que utilizam estacas pré-fabricadas de concreto protendido para fundações.

Foi possível obter a variabilidade dos módulos de elasticidade das peças, por meio do acelerômetro do Smartphone.

Para trabalhos futuros, sugere-se aumentar o número de amostras, verificar numericamente a influência dos balanços, ensaiar peças com diferentes módulos de elasticidades e realizar ensaios em corpos de prova cilíndricos.

Da mesma forma, a pouca disponibilidade de amostras não permitiu realizar a análise de variância ANOVA que poderá ser feita em trabalhos futuros.

Por fim, os resultados se mostraram conclusivos para a proposição inicial em estabelecer uma correlação entre os módulos de elasticidade dinâmicos e estáticos para uma estaca protendida pré-fabricada de concreto, sendo que a relação $E_{cf} = 0,9061 E_{cd,VT} + 6,926$ se mostrou válida para tal proposta com fator de determinação R^2 em torno de 0,8 e valores de $E_{cd,VT}$ se mostrando aproximadamente 8% superiores aos valores de E_{cf} em média.

6. AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus pelo dom da vida. À empresa SOTEF, em especial ao senhor Eduardo Ravagnani pela colaboração, apoio e parceria na disponibilização das estacas utilizadas neste estudo e de seus colaboradores no auxílio à manipulação. Ao meu orientador, Prof. Andrés Batista Cheung, por todo o conhecimento compartilhado e à minha família e amigos por todo o apoio nessa trajetória.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO JUNIOR, N. T. A.; TORRES, S.; ESTOLANO, V.; BASTO, P.; MELO NETO, A. A. Análise Do Módulo De Elasticidade Estático E Dinâmico Do Concreto Através Dos Ensaio De Resistência À Compressão E Velocidade Da Propagação De Onda Ultrassônica. **Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto. 2018.**
- ALMEIDA, S. F. **Análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura.** São Carlos, 2005. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522-1:** Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522-2:** Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração. Rio de Janeiro. 2021.
- BARBOZA, A. S. R.; LAZZARI, B. M.; PINTO, R. C. A.; OLIVEIRA, R. A.; BITTENCOURT, T. N. **Propriedades dos Materiais.** In. KIMURA, A. E.; PARSEKIAN, G. A.; ALMEIDA, L. C.; SANTOS, S. H. C.; BITTENCOURT, T. N. IBRACON/ABECE:

Estruturas de Concreto Armado, v.1. 1 ed. Ed. IBRACON, São Paulo. 2022.

HOLA, J.; SHABOWICZ. State-of-the-art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures – anticipated development trends. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, volume 10, issue 3, pages 5-18. Wrocław, Poland, 2010.

JESUS, V. L. B. de; SASAKI, D. G. G. **Uma visão diferenciada sobre o ensino de forças impulsivas usando um smartphone.** Revista brasileira de ensino de física, vol.38. Rio de Janeiro–RJ. 2016.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo, IBRACON, 2014.

NEVILLE, A.M. (1982). Propriedades do concreto. São Paulo: Pini.

PACHECO, J.; BILESKY, P.; MORAIS, T. R.; GRANDO, F.; HELENE, P. Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto. **Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto.** 2014.

ROSS, R.J. Nondestructive evaluation of wood: second edition. Gen. **Tech. Rep. FPL-GTR-238.** Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 169 p. 2015

SHEHATA, L.D. Deformações instantâneas de concreto. In: ISAÍÁ, G.C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005.

SANTOS, S.B.; GAMBALE, E.A.; ANDRADE, M.A.S. Modelos de predição do módulo de elasticidade do concreto. In: 48º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Anais..., 2006.

TAKAZONO, J. G.; CHEUNG, A. B. Utilização de Smartphone para Classificação Mecânica do *Pinus* pelo Método de vibração Transversal. **XVI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. II Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira. IBRAMEM.** São Carlos – SP. 2018.