SBCC|2023
I Simpósio Brasileiro da Ciência do Cimento

Desenvolvimento de um novo sistema integrado de baixo custo para medição contínua do módulo de elasticidade em materiais cimentícios desde idades iniciais.

Development of a new low-cost integrated system for continuous measurement of the modulus of elasticity in cementitious materials since early ages

Amir Mahdi Araghi
Universidade de Brasília | Brasília, DF| amirmahdiaraghi74@gmail.com

Renan Rocha Ribeiro
University of Minho, ISISE, ARISE | Guimarães, Portugal | renan.rocha.ribeiro@gmail.com

José Granja
University of Minho, ISISE, ARISE | Guimarães, Portugal | granja@civil.uminho.pt

Miguel Azenha
University of Minho, ISISE, ARISE | Guimarães, Portugal | miguel.azenha@civil.uminho.pt

Rodrigo de Melo Lameiras
Universidade de Brasília | Brasília, DF| rmlameiras@unb.br

Resumo

O método experimental EMM-ARM é uma das técnicas utilizadas para determinar o módulo de elasticidade de materiais cimentícios em suas primeiras idades. A versão original do EMM-ARM tinha a limitação do seu uso devido aos custos associados à plataforma proprietária do sistema de aquisição de dados. Para contornar esta limitação, foram desenvolvidas versões de baixo custo anteriormente, mas essas versões ou não integram um sistema de excitação ao sistema de monitoramento, ou utilizam sistemas complexos de excitação. O objetivo deste estudo é desenvolver um novo sistema automatizado de baixo custo que integra todos os estágios do teste (excitação, aquisição e pós-processamento) em um único sistema. Para validar o novo sistema desenvolvido, foram realizados ensaios utilizando esse sistema e o método de Compressão Cíclica. Os resultados de módulo de elasticidade obtidos por ambas as técnicas foram comparados para as idades de 1 e 3 dias. Os resultados desta pesquisa demonstraram uma boa concordância entre os valores do módulo de elasticidade obtidos pelo novo sistema e pela técnica de compressão cíclica.

Palavras-chave: Módulo de elasticidade; Materiais cimentícios; Medição contínua; Identificação modal; Baixo custo.

ABSTRACT

The EMM-ARM experimental method is one of the techniques used to determine the modulus of elasticity of cementitious materials at early ages. The original version of EMM-ARM had the limitation of its use due to the costs associated with the proprietary data acquisition system platform. To overcome this limitation, low-cost versions were previously developed, but these versions either do not integrate an excitation system into the monitoring system or use complex excitation systems. The aim of this study is to develop a new, low-cost automated system that integrates all stages of the test (excitation, acquisition, and post-processing) into a single system. To validate the newly developed system, tests were conducted using this system and the Cyclic Compression method. The modulus of elasticity results obtained by both techniques were compared for the ages of 1 and 3 days. The results of this research demonstrated good agreement between the modulus of elasticity values obtained by the new system and the cyclic compression technique.

Keywords: Modulus of elasticity; Cementitious materials; Continuous measurement; Modal identification; Low cost.

1 INTRODUÇÃO

Há cerca de uma década, a metodologia EMM-ARM (*Elasticity Modulus Measurement through Ambient Response Method*) foi desenvolvida e otimizada para monitorar a evolução do módulo de elasticidade estático de materiais cimentícios e outros materiais que passam por transições de endurecimento fluido-sólido, desde suas fases iniciais (AZENHA et al., 2010, 2012; GRANJA; AZENHA, 2020; GRANJA, 2016). A metodologia se baseia na medição contínua da frequência de vibração de uma amostra constituída por um molde preenchido pelo material em análise. Uma desvantagem significativa do método de EMM-ARM é sua dependência de sistemas de aquisição proprietários e de alto custo. Para abordar essa questão, foram desenvolvidos alguns sistemas de ensaio de baixo custo, mas que ou dependem de uma fonte de vibração não integrada ao sistema de monitoramento (ex. um ventilador), que pode gerar dificuldades para garantir a qualidade do ensaio (RIBEIRO, 2019), ou utilizam fontes de vibração que, embora integradas ao sistema de monitoramento, dependem de sistemas complexos que adicionam componentes, e custos, ao sistema (RUSSO et al., 2023). O foco principal deste estudo é desenvolver um sistema de baixo custo para ensaios EMM-ARM em pastas de cimento, que integre os mecanismos de excitação (baseado em uma solução simplificada), aquisição de dados e pós-processamento, abrangendo a identificação modal e a determinação do módulo de elasticidade. A intenção é aprimorar e padronizar o desempenho dos testes, reduzir as dimensões das amostras e aprimorar a qualidade dos sinais capturados.

2 METODOLOGIA

Nessa seção será apresentado o sistema proposto junto com os ensaios realizados para a validação do sistema.

2.1 SISTEMA PROPOSTO

O sistema proposto consiste em três componentes:

i. a configuração física, apresentada na Figura 1a, composta pelo molde, suporte e tampas. Essa configuração, baseada em trabalhos anteriores (AZENHA et al., 2012; GRANJA; AZENHA, 2020; RIBEIRO; LAMEIRAS, 2019), apresenta um tubo de PVC em balanço ($Ø_i$=16,75 mm, $Ø_e$=20 mm) para acomodar a pasta. Ao contrário de trabalhos anteriores, a vibração é gerada por impulso de um atuador, e não por forças ambientais ou excitações senoidais. O atuador permite vibração em níveis mais altos, reduzindo a relação de esbelteza necessária e resultando em um vão livre mais curto (350 mm nesse trabalho em vez de 450 mm apresentado nos trabalhos anteriores);

ii. o hardware, apresentado na Figura 1b, composto pelos componentes eletrônicos responsáveis pela excitação, aquisição de aceleração e análise de dados. O hardware escolhido é um sistema econômico que pode ter até quatro canais diferentes em um único sistema unificado para realizar todos os testes de forma totalmente automatizada, com intervenção mínima do usuário. O sistema de 1 canal é composto por um Raspberry Pi Modelo 3B+, um acelerômetro Adxl335 GY61, um Conversor Analógico-Digital (ADC) ADS1115, um solenoide push-pull 12V/300mA e um relé. O custo do sistema de um canal é de aproximadamente 84 dólares e para cada canal a mais (até 4 canais) adiciona-se um custo de aproximadamente 40 dólares (ADAFRUIT, 2023);

iii. o software próprio, escrito na linguagem Python, para controle do hardware e pós-processamento dos dados adquiridos. A linguagem Python foi escolhida por ser amigável ao usuário e de código aberto. Após inserir os dados de entrada no software e iniciá-lo, ele automatiza a aplicação de um impulso na amostra por meio do atuador. Em seguida, registra a aceleração da amostra ao longo do período de medição, computa o espectro pelo método de Welch (WELCH, 1967), determina a frequência natural pelo método “peak-picking” e, a partir da frequência, estima o módulo de elasticidade da pasta conforme equações discutidas em trabalhos anteriores (AZENHA et al., 2012; GRANJA; AZENHA, 2020), apresentando os resultados em tempo real ao usuário.

2.2 VALIDAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO

Para validar o sistema proposto, um corpo de prova foi ensaiado pelo método EMM-ARM. Os resultados obtidos foram comparados com ensaios de compressão cíclica realizados nas idades de 1 e 3 dias, aproximadamente. No âmbito deste estudo, o sistema de monitoramento do ensaio EMM-ARM foi ajustado

para efetuar medições com duração de 5 segundos, com uma frequência de aquisição de 860Hz, a cada intervalo de 10 minutos e ao longo de três dias consecutivos.

Figura 1: Sistema proposto de 3 canais: (a) configuração física; (b) hardware.



(a) (b)

2.2.1 TESTE DE COMPRESSÃO CÍCLICA

Os testes de compressão cíclica foram conduzidos em três corpos de prova cilíndricos, com diâmetro de 5 cm e uma altura de 10 cm, aos 1 e 3 dias de idade. Antes das avaliações, a resistência à compressão foi determinada por meio de três corpos de prova adicionais para cada idade. Para garantir a adequada cura, todos os corpos de prova foram revestidos com plástico filme e submersos em um recipiente cheio de água. Esses testes foram realizados de acordo com as diretrizes da norma brasileira ABNT NBR 8522 (ABNT, 2017).

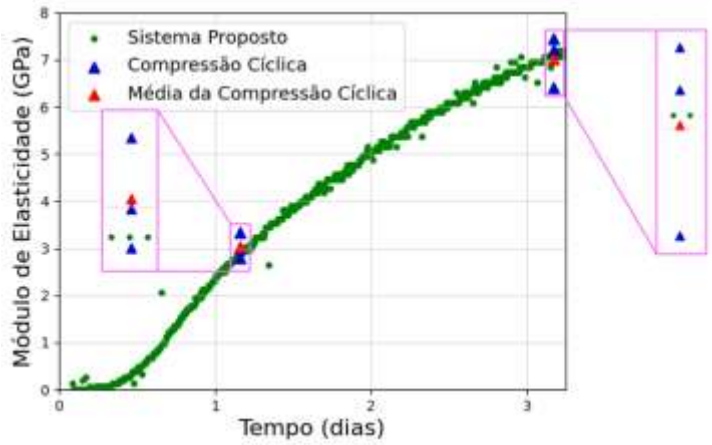
2.2.2 MATERIAIS E MISTURA

A pasta de cimento produzida teve proporção água-cimento de 0,5. O cimento utilizado foi o CP V-ARI, um cimento Portland de alta resistência inicial conforme a norma NBR 16.697 (ABNT, 2018). A resistência à compressão teve valores de 16,4 MPa à idade de 1 dia e 40 MPa à idade de 28 dias (ABNT, 2019). O procedimento de mistura seguiu as diretrizes da norma NBR NM 43 (ABNT, 2003).

3 RESULTADOS

O gráfico da Figura 2 ilustra os resultados do módulo de elasticidade obtidos pelo sistema proposto e pelos ensaios de compressão cíclica.

Figura 2: Resultados do módulo de elasticidade obtidos através do sistema proposto e ensaios de compressão cíclica.



Enquanto o teste de compressão cíclica demanda amostras separadas para cada medição, é importante notar que o sistema proposto realiza medições contínuas do módulo de elasticidade da pasta de cimento utilizando um único corpo de prova, abrangendo todas as idades, inclusive as fases iniciais. Evidencia-se pelo gráfico que os resultados do sistema proposto demonstram uma notável proximidade com os dados da compressão cíclica. Essa concordância é detalhadamente apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados do módulo de elasticidade obtidos através do sistema proposto e ensaios de compressão cíclica.

Idade [dias]	Módulo de elasticidade dos diferentes testes [Gpa]					Desvio relativo dos módulos de elasticidade do sistema proposto em relação à média da compressão cíclica [%].
	Compressão cíclica				Sistema Proposto	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média		
1.16	3.34	2.8	2.99	3.04	2.85	-6.25
3.17	7.21	6.42	7.44	7.02	7.07	0.71

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentado o desenvolvimento de um novo sistema de baixo custo para ensaios EMM-ARM para medição da evolução do módulo de elasticidade de pastas de cimento desde as idades iniciais. Através de validação experimental, evidenciou-se a viabilidade do sistema, com uma variação máxima de cerca de 6.25% em relação ao método de compressão cíclica. Os resultados deste estudo enfatizam a eficácia do sistema em rastrear a evolução do módulo de elasticidade das pastas de cimento. No entanto, a fim de uma avaliação mais abrangente do sistema, é necessário realizar mais testes.

5 AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelas seguintes agências de pesquisa brasileiras: CAPES, CNPq e FAPDF. O primeiro autor é financiado pela bolsa nº 142127/2020-5 do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). O segundo autor é financiado pela bolsa nº UI/BD/153378/2022 da Fundação para a Ciência e a Tecnologia de Portugal (FCT). O segundo, terceiro e quarto autores agradecem também o apoio do Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering (ISISE).

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR NM 43 - Portland cement - Determination of the normal consistency paste**. Rio de Janeiro.

ABNT. **NBR 8522- Determination of static modulus of elasticity and deformation by compression**. Rio de Janeiro.

ABNT. **NBR 16697- Portland cement - Requirements**. Rio de Janeiro.

ABNT. **NBR 7215 - Portland cement - Determination of compressive strength**. Rio de Janeiro.

ADAFRUIT. **Adafruit**, 2023. Disponível em: https://www.adafruit.com/.

AZENHA, Miguel; FARIA, Rui; MAGALHÃES, Filipe; RAMOS, Leonel; CUNHA, Álvaro. Measurement of the E-modulus of cement pastes and mortars since casting, using a vibration based technique. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, *[S. l.]*, v. 45, n. 1–2, p. 81–92, 2012. DOI: 10.1617/s11527-011-9750-9.

AZENHA, Miguel; MAGALHÃES, Filipe; FARIA, Rui; CUNHA, Álvaro. Measurement of concrete E-modulus evolution since casting: A novel method based on ambient vibration. **Cement and Concrete Research**, *[S. l.]*, v. 40, n. 7, p. 1096–1105, 2010. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.02.014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.02.014.

GRANJA, José; AZENHA, Miguel. Elastic Modulus Measurement Through Ambient Response Method. **Springer Tracts in Civil Engineering**, *[S. l.]*, p. 69–98, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-39738-8_3/COVER. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-39738-8_3. Acesso em: 16 maio. 2023.

GRANJA, José Luís Duarte. **Continuous characterization of stiffness of cement-based materials: experimental analysis and micro-mechanics modelling**. 2016. Universidade do Minho, *[S. l.]*, 2016.

RIBEIRO, Renan Rocha. **Development of a low-cost test system for the elastic modulus monitoring of cementitious materials since the early ages (In Portuguese)**. 2019. Universidade de Brasilia, *[S. l.]*, 2019.

RIBEIRO, Renan Rocha; LAMEIRAS, Rodrigo de Melo. Evaluation of low-cost MEMS accelerometers for SHM: frequency and damping identification of civil structures. **Latin American Journal of Solids and Structures**, *[S. l.]*, v. 16, n. 7, 2019. DOI: 10.1590/1679-78255308.

RUSSO, Thomas; RIBEIRO, Renan Rocha; ARAGHI, Amir; LAMEIRAS, Rodrigo de Melo; GRANJA, José; AZENHA, Miguel. Continuous Monitoring of Elastic Modulus of Mortars Using a Single-Board Computer and Cost-Effective Components. **Buildings**, *[S. l.]*, v. 13, n. 5, 2023. DOI: 10.3390/buildings13051117. Disponível em: https://www.mdpi.com/2075-5309/13/5/1117.

WELCH, P. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. **IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics**, *[S. l.]*, v. 15, n. 2, p. 70–73, 1967. DOI: 10.1109/TAU.1967.1161901.