

AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DE ARGAMASSAS – COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS

Pereira L.¹, Branco, F. G.², Godinho, L.³, Ortega, J. M.⁴

¹- UNIVERSIDADE DE COIMBRA, ISISE, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL, Portugal

²- UNIVERSIDADE DE COIMBRA, ISISE, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL, Portugal; fjbranco@dec.uc.pt

³- UNIVERSIDADE DE COIMBRA, ISISE, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL, Portugal; lgodinho@dec.uc.pt

⁴- UNIVERSIDADE DE ALICANTE, ESPANHA; jm.ortega@ua.es

Primeiro autor.

Correio eletrónico: lfpereira@uc.pt

Palavras-chave: Módulo de Young; Frequência de Ressonância; ultrassons;

RESUMO.

Os ensaios não destrutivos são úteis no estudo do desempenho mecânico dos materiais sem danificar ou destruir os provetes. São, por esse motivo, extremamente úteis quer em contexto laboratorial quer em contexto de análise de estruturas já aplicadas e em utilização. O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) é um parâmetro frequentemente utilizado para estimar a integridade física de estruturas, e pode ser determinado através da velocidade de propagação de ultrassons (UPV) ou através da determinação das frequências naturais de vibração de cada estrutura, entre outras formas. O objetivo deste trabalho foi o de estimar o módulo de elasticidade dinâmico com base em ensaios de determinação das velocidades de propagação de ultrassons e através de frequências de ressonância fundamentais, em diferentes argamassas, compostas por quatro tipos de agregados e quatro tipos de cimento. Os resultados foram posteriormente comparados entre si. Os resultados obtidos a partir destas diferentes metodologias são muito similares, o que atesta a coerência e confiança nos métodos utilizados; permitem ainda obter dados adicionais sobre o comportamento das diferentes argamassas analisadas.

1.1 INTRODUÇÃO

Os métodos de ensaio não destrutivos [FJFGB1] (NDT – *Non-Destructive Testing*) estão a tornar-se cada vez mais interessantes devido à possibilidade de estimar as propriedades dos materiais sem destruição dos provetes. Tradicionalmente, a caracterização dos parâmetros físicos e mecânicos relevantes para avaliar o desempenho de materiais de construção como os betões ou argamassas era realizada através de técnicas destrutiva, que tinham como consequência a destruição dos elementos testados [1]. No entanto, os esforços no sentido de se estimarem parâmetros elásticos de materiais isotrópicos utilizando metodologias de NDT são conhecidos, pelo menos, desde os trabalhos de [2–4] A temática da propagação de vibrações em materiais cimentícios tem sido estudada de forma intensa e crescente, em função do desenvolvimento de novas metodologias e tecnologias experimentais. A determinação do módulo de Young dinâmico (E_d) de argamassas e betões é uma ferramenta poderosa para

estudar e interpretar a estrutura e a interdependência entre os componentes de uma mistura cimentícia [5]. A estimativa direta da resistência mecânica e a determinação do módulo de elasticidade (E) podem ser realizados em laboratório em provetes moldados e condições controladas. Já a análise das propriedades mecânicas e elásticas em estruturas já construídas e em fase de vida útil é geralmente efetuada recorrendo a métodos semi-destrutivos ou destrutivos, que exigem a extração de uma amostra *in situ* (ou a produção de amostras na fase de implementação para posterior ensaio em laboratório). Isto significa que o parâmetro E é geralmente inferido após a edificação da estrutura, na sequência de ensaios para determinação da resistência à compressão e da aplicação de relações empíricas estabelecidas. Este processo tende a culminar na aplicação de requisitos excessivamente conservadores, conduzindo à utilização de betões ou argamassas com características (e custos) muito superiores às estritamente necessárias, com o objetivo de garantir o requisito mínimo de E [6]. A aplicação de métodos indiretos permite estimar estas propriedades através de NDT's, o que garante a repetibilidade do procedimento e facilita todo o processo, já que possibilita, por exemplo, a monitorização ao longo do tempo de diferentes lotes de betão ou argamassa aplicados em obra em diferentes ocasiões [7]. Para além da sua natureza não invasiva, uma das grandes vantagens dos NDT's é a capacidade de providenciarem resultados fidedignos através da aplicação de cargas num reduzido intervalo de tempo, o que impede que se exceda o domínio elástico. Os resultados obtidos estão assim isentos de deformações inelásticas dependentes do tempo e histerese, sendo assim diretamente relacionáveis com a estrutura interna do material [8].

Duas das metodologias atuais mais utilizadas são as que envolvem (1) a aplicação de energia elástica de ondas e (2) a medição da velocidade de propagação de ondas através de um corpo. Os NDT's são aplicados em materiais cimentícios, embora não como única metodologia, desde as fases iniciais, para avaliar características da pasta de cimento tais como o tempo de presa e endurecimento da mistura [9], e o coeficiente de Poisson (μ) [10]. Estas metodologias permitem ainda detetar vazios e fraturas em betões e argamassas [11]. As técnicas de ressonância são frequentemente utilizadas para monitorizar o estado de conservação de estruturas ao longo do seu período de vida útil [12], e para determinar os módulos de elasticidade (E) e de cisalhamento (G) [13]. Já os métodos que recorrem à *UPV* são frequentemente utilizados para estimar a resistência à compressão [11-14] e também para estimar o E de argamassas e betões. A interdependência entre a *UPV*, a resistência à compressão uniaxial (*UCS*) e o E em função do tipo de fibras incorporadas (nylon, vidro, polipropileno, ou aço) é conhecida por devolver resultados confiáveis [15], rápidos e baratos, e constitui uma ferramenta de monitorização não invasiva de estruturas eventualmente danificadas por sismos ou fadiga [16].

A aplicação de agregados leves (*LWA*) em argamassas no setor da construção é uma prática com interesse crescente, uma vez que proporciona características consideradas úteis à obra, como a redução do peso próprio das estruturas, assim como a melhoria do seu desempenho térmico e acústico.

A cortiça é um material renovável e biodegradável que se extrai da casca do sobreiro, e que devido à sua estrutura celular homogénea apresenta baixa densidade, assim como baixa condutividade térmica e boa absorção sonora [17]. Face à também crescente preocupação com questões ambientais, e com o objetivo de melhorar a sustentabilidade no setor da construção, a cortiça assume-se naturalmente como um material apetecível para incorporar em argamassas e betões, tal como a argila expandida [18,19]. A incorporação de argila expandida em argamassas demonstrou resultar em elevados coeficientes de absorção sonora [20,21] e permitiu diminuir a densidade e a penetração de cloretos, contribuiu de forma negativa para um decréscimo da resistência mecânica e aos ciclos gelo/degelo, mas também aumentou a trabalhabilidade, o isolamento térmico e acústico, e a resistência ao fogo [22].

Neste estudo, todos os ensaios *UPV* foram realizados em provetes já endurecidos, para evitar a influência da fase fluida. Foram produzidas argamassas com quatro tipos de agregados e quatro tipos de cimento. Foram produzidos dois tipos de provetes: uns com 160mmX40mmX40mm, para os ensaios de resistência mecânica e *UPV* e outros, com 200mmX100mmX20mm, para ensaios de determinação da frequência fundamental de ressonância (*RF*). Os ensaios foram realizados ao longo de um período de seis meses. Realizaram-se testes aos 7, 28 e 180 dias, para avaliar a evolução do comportamento dos

provetes ao longo do tempo. O Ed obtido a partir dos ensaios de determinação da frequência de ressonância é apresentado e posteriormente comparado com os valores do módulo de elasticidade dinâmico obtido a partir dos ensaios UPV (*EUPV*), cujos resultados são também apresentados.

2. MATERIAIS

As argamassas estudadas produzidas com quatro tipos diferentes de agregados: areia (referência), cortiça natural e expandida, e argila expandida. Utilizaram-se ainda quatro tipos de ligante. Os ligantes utilizados eram baseados em cimento Portland comum (CEM I), com diferentes tipos de adições, em conformidade com a norma EN 197-1 [23] (ver Tabela 1). Produziu-se uma argamassa de referência (REF) com proporções em massa cimento/areia de 1:3 e água/cimento (W/C) de 0,5. A razão W/C foi mantida constante em todas as séries produzidas e ensaiadas. Foram produzidas misturas com LWA – cortiça natural (NC) e expandida (EC), e argila expandida (AE) – substituindo 50% (em volume) da quantidade de areia REF por cada um destes LWA. A densidade e dimensão granular dos LWA foram determinados [17,24], [25] Os materiais NC e EC apresentam uma densidade de 70 kg/m^3 e um diâmetro de 4-5mm, tendo sido produzidos pela corticeira Amorim. O agregado AE apresenta uma dimensão 0/2mm e uma densidade de 490 kg/m^3 , tendo sido produzido pela empresa Argex. A Figura 1 mostra os agregados utilizados neste estudo.



Figura 1 – Materiais usados neste estudo (da esquerda para a direita: cortiça natural (NC), cortiça expandida (EC), argila expandida (AE), e areia (REF)).

Os ensaios UPV foram realizados em provetes com dimensão nominal 160mmx40mmx40mm. Já os ensaios RF foram realizados em provetes com dimensão nominal de 10mmx100mmx25mm. Todos os provetes foram desmoldados 24 horas após a amassadura e submersos em água a $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ até ao dia dos ensaios. Para os ensaios RF foram preparados 3 provetes, pelo que os valores apresentados representam a média desses provetes. A Figura 2 representa um exemplo das amostras preparadas para o ensaio RF (provetes 3NC).



Figura 2 – Exemplo de argamassa preparada para este estudo (com cimento tipo 3 e cortiça natural).

A Tabela 1 detalha a composição dos cimentos utilizados neste estudo.

Tabela 1 – Tipo de ligantes utilizados.

Designação	Tipo de ligante (EN 197-1)	Composição
1	CEM I 42,5R	Cimento comercial composto por $\geq 95\%$ de clínquer; $\leq 5\%$ de outros componentes menores;
2	CEM II/B-L 32,5N	Cimento comercial composto $65\% \leq$ clínquer $\leq 79\%$; $21\% \leq$ calcário $\leq 35\%$; $\leq 5\%$ de outros componentes menores;
3	CEM III/B 32,5N-SR	Cimento comercial composto por 25% de clínquer; 70% de escória de alto forno; 5% de outros componentes menores;
4	CEM II/A-V	Mistura de CEM I 42,5R com 20% de cinza volante.

Foi atribuído, a cada provete, um número compreendido entre 1 e 4, indicando o tipo de ligante, seguido das letras correspondente ao agregado utilizado. Assim, “2AE” corresponde à série de provetes produzidos com cimento CEM II/B-L 32,5N, em que 50% do volume de areia foi substituído por argila expandida (AE).

3. METODOLOGIA

O E_d foi determinado com base nos resultados dos ensaios *RF*, e também através de ensaios *UPV*. Finalmente, os resultados foram analisados e discutidos. Neste estudo, o E_d foi determinado experimentalmente de acordo com os procedimentos preconizados nas normas ASTM E 1876 [26] e C215 [27]. Os ensaios foram realizados utilizando uma placa de aquisição National Instruments, com dois canais de entrada (martelo de impacto e acelerómetro). O processamento dos dados e os cálculos subsequentes foram realizados recorrendo ao software Matlab. Os cálculos de E_d obtido dos ensaios *RF* (a partir das frequências longitudinais e flexurais) foram realizados de acordo com o estipulado nas normas ASTM

E1876, ASTM C215, e NP EN 14146. A Figura 3 mostra um exemplo de um ensaio de determinação da frequência fundamental de ressonância flexural.



Figura 3 – Exemplo de ensaio para determinação da frequência de ressonância.

A figura 4 representa o registo do pico de frequência de ressonância de um ensaio RF.

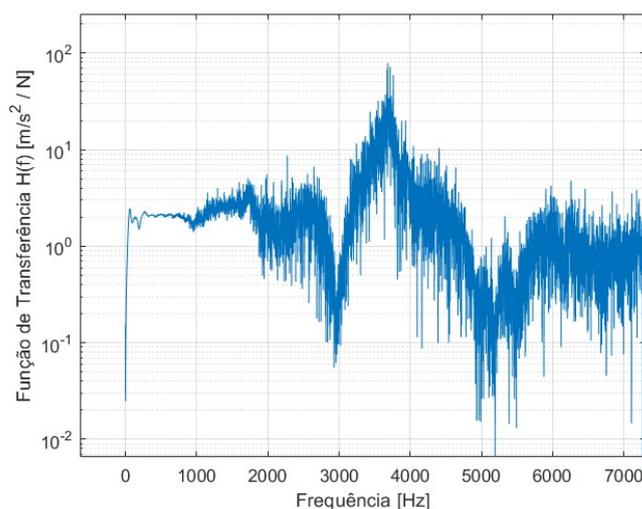


Figura 4 – Exemplo de um pico de ressonância do ensaio RF.

A velocidade ultrassónica dos impulsos (UPV) foi registada recorrendo a um aparelho PUNDIT (Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicator Testing). Este aparelho utiliza um par de transdutores piezoelétricos que avaliam o tempo de propagação de uma onda longitudinal entre esses transdutores. Neste estudo, a UPV foi medida com os transdutores localizados em faces opostas (transmissão direta), para assegurar que a energia de transmissão era máxima. A equação que permite determinar o módulo de Young dinâmico a partir da UPV (E_{UPV}) num meio considerado homogéneo e infinito é a seguinte [28]:

$$E_{upv} = \frac{\rho V^2(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)}$$

(1)

em que E_{UPV} representa o módulo de Young dinâmico (MN/m^2), V é a velocidade do impulso (km/s), ρ é a densidade (kg/m^3), e μ é o coeficiente de Poisson. A Figura 5 mostra um momento do ensaio PUNDIT.

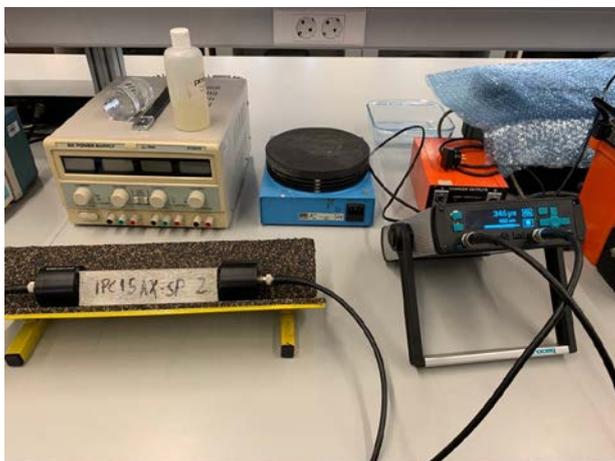


Figure 5 – Exemplo de um ensaio PUNDIT.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta a evolução da UPV ao longo do tempo (desde os 3 aos 85 dias).

Tabela 2 – Evolução da UPV ao longo do tempo (m/s).

Age (days)	3	10	15	22	29	35	85
Specimens							
1REF	3904	4057	4151	4153	4197	4188	4162
2REF	3751	3917	3916	3951	4010	3993	3936
3REF	4134	4164	4233	4211	4275	4316	4205
4REF	4041	4140	4225	4296	4284	3936	4092
1AE	3233	3903	3887	3940	3871	3969	3543
2AE	3600	3728	3689	3717	3750	3808	3624
3AE	3656	3772	3810	3587	3870	3906	3818
4AE	3574	3598	3743	3749	3832	3385	3960
1EC	1951	2090	2120	2117	2141	2167	2072
2EC	1999	2084	2072	2107	2110	2085	1978
3EC	2149	2213	2274	2245	2291	2318	2225
4EC	2645	2788	2886	2926	2953	2858	3080
1NC	2754	3139	3173	3176	3260	3156	2941
2NC	2901	2957	3124	3042	3123	3135	2959
3NC	2604	3024	2917	3003	3019	3083	3022

Verificou-se que o aumento da UPV é mais significativo nos primeiros 15 dias de idades dos provetes. Após esta idade, os valores de UPV medidos demonstram uma variabilidade considerada normal em argamassas.

A Tabela 3 apresenta as frequências (longitudinais e flexurais) de ressonância (Hz) registadas nos ensaios RF realizados nos provetes.

Tabela 3 – Frequências de ressonância medidas (flexurais e longitudinais).

Provetes	ASTM C215		NP EN 14146		ASTM 1876	
	Flex.	Long.	Flex.	Long.	Flex.	Long.
1REF	3014	9196	3014	9196	2948	9142
1AE	2599	8370	2599	8370	2892	8423
1EC	2024	7195	2024	7195	1920	6401
1NC	1857	6707	1857	6707	1993	6111
2REF	2651	9445	2651	9445	2558	8853
2AE	2455	8309	2455	8309	2709	7871
2EC	1800	5751	1800	5751	1881	5902
2NC	1838	5807	1838	5807	1941	5735
3REF	2366	8130	2366	8130	2594	8142
3AE	2404	7416	2404	7416	2521	7746
3EC	1508	5668	1508	5668	1543	5462
3NC	1636	5466	1636	5466	1721	5266
4REF	2636	8777	2636	8777	2877	8548
4AE	2587	8661	2587	8661	2801	8315
4EC	1784	6606	1784	6606	2064	5990
4NC	1665	6138	1665	6138	1950	5945

Analisando a Tabela 3, verifica-se uma maior aproximação entre os valores obtidos seguindo as normas ASTM C215 e NP EN 14146, provavelmente devido à similaridade dos métodos de suporte dos provetes.

A Tabela 4 apresenta os valores de E_d determinados através de todas as metodologias testadas.

Tabela 4 – Valores do módulo de Young dinâmico calculados para todas as metodologias.

Provetes	ASTM E 1876		ASTM C215		NP EN 14146		UPV
	Flex	Long	Flex	Long	Flex	Long	
1REF	26,85	22,66	28,19	27,06	28,29	27,07	31,06
1AE	24,96	16,56	20,27	18,67	20,33	18,67	18,28
1EC	9,68	8,23	10,60	11,72	10,65	11,73	4,85
1NC	8,79	6,22	7,63	8,83	7,65	8,83	8,99
2REF	23,58	20,75	25,77	27,79	25,61	27,79	27,09
2AE	21,27	14,06	17,40	17,39	17,57	17,39	14,07
2EC	8,72	6,60	7,90	7,06	8,03	7,07	2,74
2NC	7,88	5,39	7,04	6,32	7,08	6,32	8,35
3REF	24,81	18,37	20,56	21,09	20,83	21,10	32,38
3AE	19,39	14,08	17,62	14,56	17,80	14,56	22,91
3EC	5,99	5,76	5,81	7,05	5,90	7,06	3,20
3NC	6,29	4,54	5,67	5,72	5,68	5,72	9,95
4REF	30,83	20,48	26,39	24,65	25,84	24,66	28,66
4AE	23,32	15,99	20,12	19,80	20,16	19,81	22,65
4EC	11,24	6,96	8,10	9,57	8,12	9,58	10,45
4NC	8,59	5,92	6,42	7,39	6,47	7,40	8,84

O erro absoluto médio (MAE) é uma métrica que expressa a soma do erro médio absoluto de, neste caso, pares dos valores de E_d das normas ASTM E 1876, ASTM C215 e NP EN 14146

relativamente a uma referência, neste caso os valores [FJFGB2] de E_{UPV} . Assim o MAE dos valores de E_d determinados a partir das frequências de ressonâncias fundamentais (longitudinais e flexurais) das normas ASTM E 1876, ASTM C215 e NP EN 14146, e sempre relativamente ao E_{UPV} , é apresentado na FIGURA 3, de acordo com a equação de [29]:

$$MAE = n^{-1} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (2)$$

A Figura 6 apresenta o MAE para o E_d calculado a partir das frequências de ressonância fundamentais flexurais dos provetes, classificados por normas.

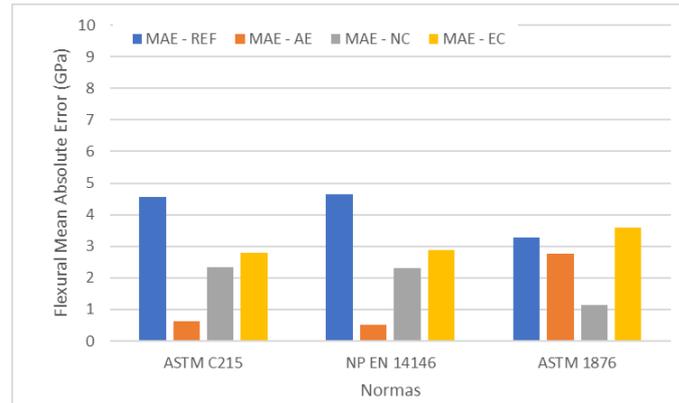


Figure 6 - Erro absoluto médio (MAE), relativamente ao E_{UPV} , do E_d calculado a partir das frequências fundamentais de ressonância flexurais.

Pode-se concluir, analisando a Figura 6, que o MAE (relativamente ao E_{UPV}) dos provetes REF é o mais elevado de todos os materiais ensaiados, seguido pelos provetes EC. Em duas das normas (ASTM C215 e NP EN 14146), o material que demonstrou menor MAE foi a argila expandida (AE), com valores abaixo de 1 GPa.

A Figura 7 apresenta o MAE para o E_d calculado a partir das frequências de ressonância fundamentais longitudinais dos provetes, classificados por normas.

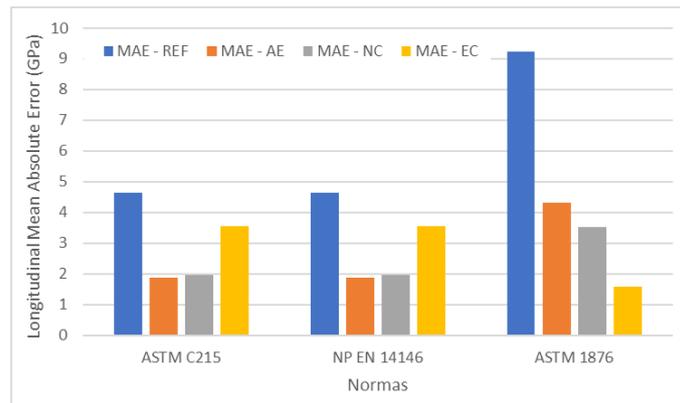


Figure 7 – Erro absoluto médio (MAE), relativamente ao E_{UPV} , do E_d calculado a partir das frequências fundamentais de ressonância e longitudinais.

Observando a Figura 7, é possível verificar que, assim como no cenário anterior (E_d obtido a partir das frequências de ressonância flexurais), o MAE dos provetes REF é o mais elevado. No entanto, os resultados dos provetes EC não são tão coerentes, já que apresentam uma dispersão maior nas normas ASTM C215 e NP EN 14146, mas demonstram o melhor (menor) MAE seguindo os procedimentos da norma ASTM E 1876. Neste tipo de vibração de ressonância, os provetes EC e AE apresentam um comportamento similar.

5. CONCLUSÕES

Os três métodos experimentais de determinação da frequência de ressonância aplicados neste estudo (ASTM C215, ASTM E1876, e NP EN 14146) devolveram resultados similares aos obtidos através do método UPV. O E_d da grande maioria dos provetes ensaiados com o método RF diferiu menos de 2GPa do E_{UPV} .

Os provetes com MAE's mais baixos, relativamente ao E_{UPV} são os compostos por cimento do tipo 4 e os provetes preparados com cortiça natural e expandida com cimento dos tipos 1 e 2. Contrariamente ao que se esperava teoricamente, uma vez que o ensaio UPV é realizado com ondas longitudinais, o E_d calculado a partir das frequências de ressonância flexural apresentam valores de MAE menores, o que significa que estão mais próximos do E_{UPV} . O MAE global dos provetes AE é consideravelmente melhor do que o MAE das restantes tipologias de provetes. Em média, o MAE dos provetes AE foi de 1,99 GPa, enquanto o dos provetes REF foi de 5,17 GPa, o dos provetes NC e ED foi de 2,21 e 2,99 GPa, respetivamente. Os provetes REF registaram as maiores frequências de ressonância fundamental (flexurais e longitudinais), o que naturalmente se traduziu num E_d mais elevado nessas misturas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto de Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas (ISISE), sob a referência UIDB/04029/2020, e pelos fundos FEDER através do CENTRO 2020, PORTUGAL 2020, no âmbito do projeto CENTRO-01-0247-FEDER-047067 (Life4stone).

REFERÊNCIAS

- [1] F. Ávila, E. Puertas, J. M. Azañón, and R. Gallego, "Free-free resonance method for the mechanical characterization of carbonate rocks used as building stones," *Mater. Construcción*, vol. 72, no. 345, pp. e276–e276, 2022.
- [2] G. Grime, "XXII. The determination of Young's Modulus for building materials by a vibration method," *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, vol. 20, no. 132, pp. 304–310, 1935.
- [3] J. M. Ide, "Some dynamic methods for determination of Young's modulus," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 6, no. 10, pp. 296–298, 1935.
- [4] S. Spinner, T. W. Reichard, and W. E. Tefft, "A comparison of experimental and theoretical relations between Young's modulus and the flexural and longitudinal resonance frequencies of uniform bars," *J. Res. Natl. Bur. Stand. Sect. A, Phys. Chem.*, vol. 64, no. 2, p. 147, 1960.
- [5] B. Zech and M. J. Setzer, "The dynamic modulus of hardened cement paste. Part 2: ice formation, drying and pore size distribution," *Mater. Struct.*, vol. 22, no. 2, pp. 125–132, 1989.
- [6] J. S. Popovics, J. Zemajtis, and I. Shkolnik, "A study of static and dynamic modulus of elasticity of concrete," *ACI-CRC Final Rep.*, 2008.

- [7] S. V. Kolluru, J. S. Popovics, and S. P. Shah, "Determining elastic properties of concrete using vibrational resonance frequencies of standard test cylinders," *Cem. Concr. aggregates*, vol. 22, no. 2, pp. 81–89, 2000.
- [8] N. Swamy and G. Rigby, "Dynamic properties of hardened paste, mortar and concrete," *Matériaux Constr.*, vol. 4, no. 1, pp. 13–40, 1971.
- [9] H. J. Yim, Y. H. Bae, and Y. Jun, "Hydration and microstructural characterization of early-age cement paste with ultrasonic wave velocity and electrical resistivity measurements," *Constr. Build. Mater.*, vol. 303, p. 124508, 2021.
- [10] L. Ahmed, "Dynamic measurements for determining Poisson's ratio of young concrete," *Nord. Concr. Res.*, vol. 58, no. 1, pp. 95–106, 2018.
- [11] P. Pal, "Dynamic Poisson's ratio and modulus of elasticity of pozzolana Portland cement concrete," *Int. J. Eng. Technol. Innov.*, vol. 9, no. 2, p. 131, 2019.
- [12] C. Malone, J. Zhu, J. Hu, A. Snyder, and E. Giannini, "Evaluation of alkali-silica reaction damage in concrete using linear and nonlinear resonance techniques," *Constr. Build. Mater.*, vol. 303, p. 124538, 2021.
- [13] L. Barboni, G. R. Gillich, C. P. Chioncel, C. O. Hamat, and I. C. Mituletu, "A method to precisely determine the Young's modulus from dynamic measurements," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 416, no. 1, p. 12063.
- [14] M. Karimaei, F. Dabbaghi, M. Dehestani, and M. Rashidi, "Estimating compressive strength of concrete containing untreated coal waste aggregates using ultrasonic pulse velocity," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 3, p. 647, 2021.
- [15] D. C. Pereira, "Prediction of the Compressive Strength and Dynamic Modulus of Fiber Reinforced Concrete by Ultrasonic Pulse Velocity Measurement at Early Ages," George Southern University, 2020. [Online]. Available: <https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/etd/2083>
- [16] T. H. Panzera, A. L. Christoforo, F. P. Cota, P. H. R. Borges, and C. R. Bowen, "Ultrasonic pulse velocity evaluation of cementitious materials," *Adv. Compos. Mater. Nat. man-made Mater.*, pp. 411–436, 2011.
- [17] F. G. Branco and L. Godinho, "On the use of lightweight mortars for the minimization of impact sound transmission," *Constr. Build. Mater.*, vol. 45, pp. 184–191, 2013.
- [18] J. M. Ortega, F. G. Branco, and L. Pereira, "Effects in the Short-Term of Combining an Eco-Friendly Slag Cement and Several Lightweight Aggregates in Relation to the Microstructure and Water Ingress Ability of Mortars," in *Presented at 1st International Electronic Conference on Applied Sciences*, 2020, vol. 10, p. 30.
- [19] J. M. Ortega, F. G. Branco, L. Pereira, and L. Marques, "Chloride Ingress Resistance, Microstructure and Mechanical Properties of Lightweight Mortars with Natural Cork and Expanded Clay Prepared Using Sustainable Blended Cements," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 9, p. 1174, 2022.
- [20] L. Lourenço de Sousa, L. Pereira, L. Godinho, and P. A. Mendes, "Acoustic properties of porous concrete—Experiments and modelling," in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 2020, vol. 261, no. 6, pp. 127–137.
- [21] L. L. de Sousa, L. Pereira, D. Ramos, L. Godinho, and P. A. Mendes, "Acoustic absorption of porous concrete—normal incidence vs diffuse field conditions," 2021.
- [22] A. M. Rashad, "Lightweight expanded clay aggregate as a building material—An overview," *Constr. Build. Mater.*, vol. 170, pp. 757–775, 2018.
- [23] EN 197-1, *CEN - EN 197-1 Cement Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements*. Belgium, 2011, p. 56.
- [24] M. de L. B. da Costa and F. G. Branco, "CORK CONCRETE MECHANICAL BEHAVIOR UNDER HIGH TEMPERATURES," 2013.
- [25] F. G. Branco, A. Tadeu, and M. de Lurdes Belgas CREis, "Can cork be used as a concrete aggregate?," *Int. J. Hous. Sci. Its Appl.*, vol. 31, no. 1, p. 1, 2007.

- [26] ASTM E1876, "Standard test method for dynamic young's modulus," *Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*, West Conshohocken, vol. 1876–21. ASTM International, 2021.
- [27] ASTM C215, "Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens." ASTM International West Conshohocken, PA, USA, 2014.
- [28] V. M. Malhotra and N. J. Carino, *Handbook on nondestructive testing of concrete*. CRC press, 2003.
- [29] C. J. Willmott and K. Matsuura, "Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance," *Clim. Res.*, vol. 30, no. 1, pp. 79–82, 2005.