

MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DE ARGAMASSAS

DYNAMIC MODULUS OF ELASTICITY OF MORTARS

MARQUES, Ana Isabel

Bolsista de Doutorado, Laboratório Nacional de Engenharia Civil
aimarques@lnec.pt

MORAIS, João

Bolsista de Iniciação à Investigação Científica, Laboratório Nacional de Engenharia Civil
jmorais@lnec.pt

SANTOS, Carlos

Investigador Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil
csantos@lnec.pt

MORAIS, Paulo

Investigador Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil
pmorais@lnec.pt

VEIGA, Maria do Rosário

Investigadora Principal com Habilitação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil
rveiga@lnec.pt

RESUMO

O estudo da deformabilidade de argamassas de revestimento é essencial para a minimização de uma das anomalias mais frequentes nas fachadas de edifícios: o aparecimento e a propagação de fissuras. Estas fissuras ocorrem devido a tensões internas na argamassa de revestimento, em consequência de deslocamentos impostos pela estrutura de suporte subjacente. Os estudos de deformabilidade devem incluir um ou mais métodos experimentais para a determinação do módulo de elasticidade (E) das argamassas de revestimento em questão. Neste artigo apresenta-se uma campanha de ensaios experimentais realizados para determinar o E dinâmico de várias composições de argamassas de cimento, cal hidráulica e cal aérea, utilizando três métodos experimentais. Os resultados obtidos foram comparados entre si por forma a verificar a qualidade e a fiabilidade de cada método experimental.

Palavras-chave: Argamassas. Módulo de elasticidade dinâmico. Métodos experimentais.

ABSTRACT

The study of the deformability of coating mortars is relevant to the minimization of one of the most frequent anomalies in building facades: the appearance and propagation of cracks. These cracks appear because of internal stresses in the coating mortar, in consequence of displacements imposed by the underlying support structure. The deformability studies must include one or more experimental methods for determining the modulus of elasticity (E) of the coating mortars in question. In this paper we present a campaign of experimental tests to determine the dynamic E of various compositions of cement, hydraulic lime and air lime using three experimental methods. The obtained results were compared to each other in order to verify the quality and reliability of each experimental method.

Keyword: Mortars. Dynamic modulus of elasticity. Experimental methods.

1. INTRODUÇÃO

As argamassas de revestimento de paredes devem ter a capacidade de se deformar adequadamente sem ocorrer abertura de fissuras quando submetidas a ações do tipo cíclico, térmico ou de retração das mesmas ações, as quais provocam deformações restringidas pela aderência a um suporte mais rígido (Veiga, 2000). Quando a argamassa não apresenta essa capacidade, surgem tensões de tração internas no revestimento que podem levar ao aparecimento de fissuras. Esta é uma das anomalias mais frequentes e prejudiciais nas fachadas de edifícios, ao comprometer as suas funções estéticas e de proteção. Para minimizar este fenómeno, é essencial conhecer o módulo de elasticidade (E) das argamassas de revestimento em questão, para se alcançar a compatibilidade desejável entre a argamassa e o suporte subjacente. (Tamin, 1986).

Grande parte da deformação imposta por um suporte de alvenaria resistente é da responsabilidade da capacidade de deformação da respetiva argamassa de assentamento, pois é esta que acomoda as unidades de alvenaria. Por essa razão, caso exista a necessidade de conhecer a capacidade de deformação do suporte, é necessário previamente caracterizar a argamassa de assentamento, sendo a determinação do E bastante importante para este efeito.

Neste artigo descreve-se um estudo de deformabilidade a várias argamassas com ligante de cimento, cal hidráulica ou cal aérea, representativas dos revestimentos mais utilizados em Portugal. É também estudado um tipo de argamassa de assentamento, constituída por cal aérea e dois tipos de areia (areia de rio e de areiro), o qual pretende simular a argamassa utilizada nas paredes resistentes de alvenaria de edifícios antigos. Para cada uma das argamassas determinou-se o E dinâmico através da realização de ensaios não destrutivos em provetes, utilizando três métodos experimentais: determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas pelo método direto, pelo método indireto e pelo o método da Frequência de Ressonância. Os dois métodos de Ultrassons baseiam-se na relação estabelecida por *Rayleigh* entre a velocidade de propagação do som em meio sólido com a massa volúmica e as características elásticas do material. O terceiro método baseia-se na relação entre a frequência de ressonância do provete e o E dinâmico do respetivo material. Estes ensaios foram aplicados em provetes com diferentes idades, com o objetivo de avaliar a fiabilidade e a qualidade dos resultados obtidos pelos vários métodos utilizados.

2. DESCRIÇÃO DA EXECUÇÃO DOS PROVETES DE ARGAMASSA

A campanha experimental incluiu ensaios com dezasseis tipos de argamassas diferentes, nomeadamente: seis tipos de argamassa à base de cimento, cinco tipos à base de cal aérea e cinco tipos à base de cal hidráulica. Estes tipos de argamassas variaram na sua composição, tipo de agregado utilizado, processo de cura e procedimento de fabrico (fabricada em laboratório ou recolhida *in situ*). Também se produziram provetes com dois tipos de moldagem: provetes moldados em moldes metálicos normalizados ou moldados sobre tijolos, conforme se indica no Quadro 1. As composições de argamassa fabricadas em laboratório foram preparadas usando uma misturadora de laboratório. As argamassas recolhidas *in situ* foram preparadas utilizando uma betoneira, tendo sido recolhidas durante a sua aplicação numa parede de alvenaria e, posteriormente, transportadas para um ambiente laboratorial com salas condicionadas.

Quadro 1: Descrição das argamassas utilizadas neste estudo

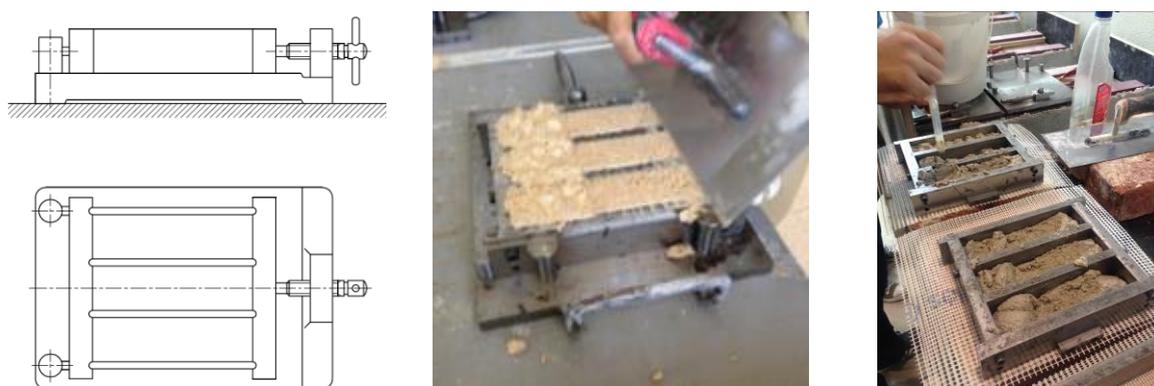
Ligante	Composição	Identificação	Tipo de argamassa	Tipo de agregado	Tipo de fabrico e moldagem	
Cal aérea	1:2	CA_1:2	Revestimento	Areia de rio	Fabricada em laboratório e em molde metálico	
	1:3	CA_1:3R		Areia de rio		
		CA_1:3A		Areia de areeiro		
	1:3	145A	Assentamento	2/3 de areia de rio 1/3 de areia de areeiro	Recolhida <i>in situ</i> e moldada sobre tijolo	
	145A_T					
Cal Hidráulica	1:2	CH_1:2	Revestimento	Areia de rio	Fabricada em laboratório e em molde metálico	
	1:3	CH_1:3R		Areia de rio		
		CH_1:3A		Areia de areeiro		
	1:2	35A_S		Areia de rio	Recolhida <i>in situ</i> e moldada sobre tijolo	
1:2	35A_T3	Areia de rio		Recolhida <i>in situ</i> e moldada sobre tijolo		
Cimento	1:2	Ci_1:2		Revestimento	Areia de rio	Fabricada em laboratório e em molde metálico
	1:3	Ci_1:3			Areia de rio	
		Ci_1:3R	Areia de rio			
	1:4	Ci_1:4R	Areia de areeiro			
		Ci_1:4A	Areia de areeiro			
1:3	25A_S	Areia de rio	Recolhida <i>in situ</i> e moldada sobre tijolo			
	25A_T4	Areia de rio	Recolhida <i>in situ</i> e moldada sobre tijolo			

Fonte: Autor, 2019

Parte dos tipos de argamassas estudados foram moldados em moldes metálicos normalizados, conforme se ilustra na Figura 1 (centro), enquanto os restantes foram moldados

em cima de tijolos cerâmicos maciços, conforme se ilustra na Figura 1 (direita). A variante de moldagem sobre tijolos foi executada com o objetivo de estudar as propriedades das argamassas quando moldadas em diferentes condições. Os tijolos usados para esta função são do mesmo tipo dos tijolos que compõem a parede de alvenaria onde foram aplicadas as argamassas recolhidas *in situ*.

Figura 1: Moldagem das argamassas: (esquerda) molde metálico normalizado, (centro) argamassa moldada em moldes metálicos e, (direita) argamassa moldada sobre tijolo



Fonte: Autor, 2019

Realizaram-se ensaios de trabalhabilidade e de determinação da massa volúmica da argamassa no estado fresco para todas as composições, de acordo com a norma EN 1015-3 (CEN, 2006b), conforme se indica no Quadro 2.

Quadro 2: Propriedades das argamassas no estado fresco

Identificação	Relação água-ligante (%)	Massa volúmica do produto em pasta (kg/m^3)	Consistência (mm)
CA_1:2	19,5	1968,7	146
CA_1:3R	20,0	1947,7	149
CA_1:3A	18,9	1970,7	143
145A	19,7	1963,6	141
145A_T	28,5	1975,8	150
CH_1:2	15,8	2029,0	140
CH_1:3R	16,8	2007,3	143
CH_1:3A	17,2	2010,0	145
35A_S	17,3	2066,8	175
35A_T3			
Ci_1:2	13,6	2030,0	160
Ci_1:3	16,2	1980,0	159
Ci_1:4R	17,9	2050,0	163
Ci_1:4A	18,1	2070,0	164
25A_S	16,8	2028,4	187
25A_T4			

Fonte: Autor, 2019

O processo de moldagem sobre tijolos começa com a colocação de dois tijolos, paralelamente entre si, sobre uma superfície plana. De seguida, coloca-se sobre os tijolos um troço de rede de fibra de vidro com malha quadrada de 5 mm com o objetivo de diminuir a aderência entre a argamassa e os tijolos, de forma a facilitar a remoção dos provetes depois de moldados. Finalmente coloca-se um molde metálico normalizado sem o fundo por cima desta rede e molda-se a argamassa, seguindo os princípios indicados em EN 1015-11:1999/A1 (CEN, 2006a). Esta configuração permite que os tijolos absorvam alguma da água da argamassa durante a moldagem, mantendo a capacidade de produção de provetes prismáticos com as dimensões padronizadas $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, conforme se ilustra na Figura 1 (esquerda).

O processo de cura dos provetes moldados em moldes metálicos foi realizado em ambiente controlado, seguindo os requisitos da norma EN 1015-11 (CEN, 2006a). Este processo começa com a colocação do molde dentro de um saco plástico de polietileno durante dois dias, de forma a garantir uma humidade relativa de $95 \pm 5\%$ no seu interior. Os provetes são mantidos numa sala a $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, com humidade relativa de $65 \pm 5\%$. Posteriormente, os provetes são retirados do molde e mantidos sob as mesmas condições de cura durante um período de cinco dias, após o qual os provetes são retirados do saco e mantidos na sala condicionada até à data de realização dos ensaios, conforme se ilustra na Figura 2.

O processo de cura dos provetes moldados sobre tijolo foi realizado sempre nas mesmas condições das paredes de alvenaria onde essas argamassas foram aplicadas. Os moldes metálicos foram desmoldados dos provetes ao fim de dois dias após a sua moldagem sobre os tijolos. Durante os primeiros sete dias, os provetes foram borrifados com água pelo menos duas vezes por dia, conforme se ilustra na Figura 3. Após este período de sete dias, os provetes foram colocados junto às respetivas paredes até à data de realização dos ensaios. Este procedimento garantiu que os provetes tivessem ficado sujeitos às mesmas condições de temperatura e de humidade relativa que as paredes, com valores médios de 25°C de temperatura e 55% de humidade relativa.

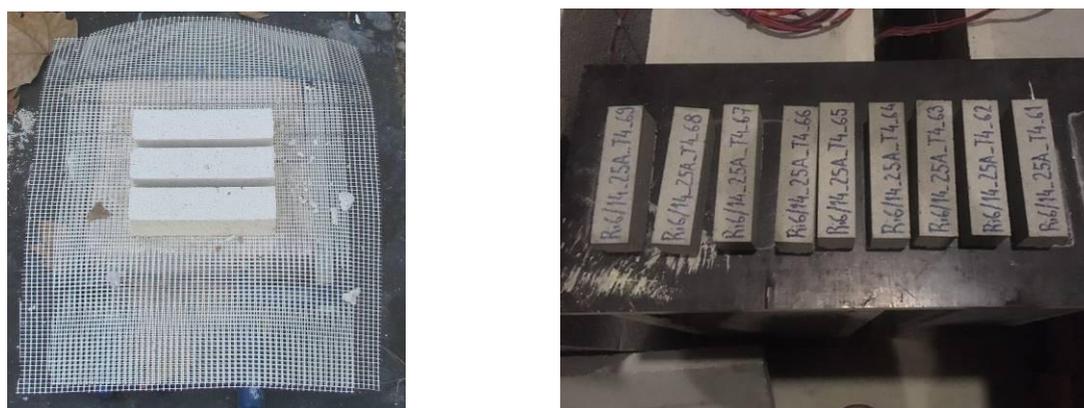
Figura 2: Processo de cura dos provetes moldados moldes metálicos

MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DE ARGAMASSAS
Ana Isabel Marques



Fonte: Autor, 2019

Figura 3: Processo de cura dos provetes moldados sobre tijolo



Fonte: Autor, 2019

Procedeu-se à caracterização mecânica de cada composição de argamassa a diferentes idades. Este procedimento de caracterização mecânica das composições das argamassas incluiu vários tipos de ensaios, nomeadamente: determinação da resistência à flexão e à compressão de provetes e determinação do E dinâmico pelo método da Frequência de Ressonância e pelos métodos de Ultrassons direto e de Ultrassons indireto. Em cada ensaio utilizaram-se sempre, no mínimo, três provetes. O Quadro 3 resume os ensaios realizados neste estudo, com a indicação da idade dos provetes, aquando do ensaio realizado.

Quadro 3: Idade dos provetes a que foram ensaiados

Identificação	Tipo de cura das argamassas	Idade (dias)
CA_1:2	Em laboratório	28 e 90
CA_1:3R	Em laboratório	28 e 90
CA_1:3A	Em laboratório	28 e 90
145A	Em laboratório	28, 90 e 180
145A_T	<i>In situ</i>	90, 180 e 360
CH_1:2	Em laboratório	28 e 90
CH_1:3R	Em laboratório	28 e 90
CH_1:3A	Em laboratório	28 e 90
35A_S	Em laboratório	28, 90 e 180
35A_T3	<i>In situ</i>	28 e 90
Ci_1:2	Em laboratório	14, 21, 28 e 90

Ci_1:3	Em laboratório	14, 21, 28 e 90
Ci_1:4R	Em laboratório	14, 21, 28 e 90
Ci_1:4A	Em laboratório	14, 21, 28 e 90
25A_S	Em laboratório	28, 90 e 180
25A_T4	<i>In situ</i>	28 e 90

Fonte: Autor, 2019

3. DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios de determinação da resistência à flexão e à compressão foram realizados em conformidade com a norma EN 1015-11 (CEN, 2006a) (Figura 4). O objetivo destes ensaios é obter a resistência à flexão e à compressão da argamassa em estudo, como parte do procedimento de caracterização mecânica da mesma, funcionando como mecanismo de controlo da qualidade das argamassas produzidas. Os resultados destes ensaios também foram utilizados para observar a relação entre o E dinâmico e a resistência à compressão das várias argamassas (Lucas, 2016).

Figura 4: Ensaio para determinação da resistência das argamassas: (esquerda) à flexão e (direita) à compressão



Fonte: Autor, 2019

O procedimento de determinação do E dinâmico pelo método da Frequência de Ressonância consiste num ensaio não-destrutivo em que se induz vibração no provete num espectro alargado de frequências, com o objetivo de determinar a sua frequência de ressonância fundamental. Esta frequência é depois usada para calcular o valor de E do provete. Este procedimento foi realizado num equipamento de ensaios Zeus ZRM 2005, usando o método da Frequência de Ressonância Longitudinal, de acordo com a norma EN 14146 (CEN, 2004a). Durante o ensaio, o provete é fixo no equipamento pela sua secção transversal central, ficando a fonte de excitação vibratória numa das extremidades do provete e o sensor para medição da resposta na extremidade oposta (Figura 5). A vibração induzida produz uma resposta sob a forma de deslocamento. A frequência que gerar deslocamentos com maior amplitude corresponde à frequência de ressonância do provete (F), para o modo de vibração

que está a ser excitado. O E dinâmico do provete pode então ser calculado usando a seguinte fórmula (CEN, 2004a):

$$E_d = 4L^2 \times F^2 \times \rho \times 10^{-9}$$

Onde:

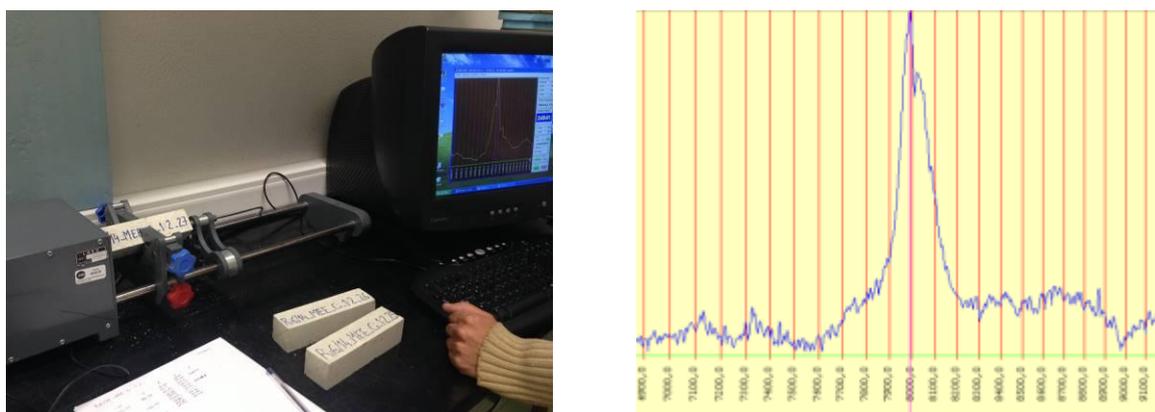
E_d corresponde ao módulo de elasticidade dinâmico (GPa);

L corresponde ao comprimento do provete (m);

F corresponde à frequência fundamental de vibração longitudinal do provete (Hz);

ρ corresponde à densidade do provete (kg/m^3).

Figura 5: Ensaio para determinação do E dinâmico através do Método da Frequência de Ressonância: (esquerda) dispositivo de ensaio e (direita) exemplo do gráfico obtido com este dispositivo



Fonte: Autor, 2019

O procedimento empregue na determinação do E dinâmico pelo método dos Ultrassons consiste noutra ensaio não-destrutivo em que se determina o E dinâmico do provete através da obtenção do valor da velocidade de propagação de uma onda ultrassónica no provete. Esse procedimento foi realizado com um equipamento de medição ultrassónico Steinkamp BP-7, usando o método direto (Figura 6, esquerda) e o método indireto (Figura 6, direita), de acordo com a norma EN 12504-4 (CEN, 2004b). Genericamente, este tipo de equipamento de medição é constituído por uma sonda emissora e uma sonda recetora, que em conjunto fazem a medição do tempo de propagação da onda ultrassónica injetada no provete. O equipamento utilizado usa sondas do tipo exponencial e as ondas ultrassónicas emitidas são do tipo longitudinal, também conhecidas como ondas P .

O método direto consiste em colocar as duas sondas em faces opostas do provete, medindo assim o tempo de propagação do sinal entre as duas faces. O método indireto requer várias leituras ao longo de uma linha na mesma face do provete. No método indireto, a sonda emissora é colocada perto de uma das extremidades do provete e a sonda recetora é deslocada

ao longo do provete a intervalos regulares, fazendo pelo menos três aquisições em cada ponto. Em ambos os métodos, a velocidade de propagação da onda é calculada tendo em conta o tempo de propagação medido e a respetiva distância entre as duas sondas. No método direto este cálculo consiste, simplesmente, em dividir a distância entre as sondas pelo tempo de transmissão, medido pelo equipamento. No método indireto a velocidade é obtida através do declive da regressão linear traçada com todos os pares de pontos “tempo de transmissão” – “distância entre sondas” obtidos durante o ensaio. Finalmente, o valor do E dinâmico do provete é calculado de acordo com a seguinte fórmula, baseada no trabalho de *Rayleigh* (CEN, 2004b):

$$E_d = \frac{(1+\nu) \times (1-2\nu)}{(1-\nu)} \times v^2 \times \rho \times 10^{-9}$$

Onde:

E_d corresponde ao módulo de elasticidade dinâmico (GPa);

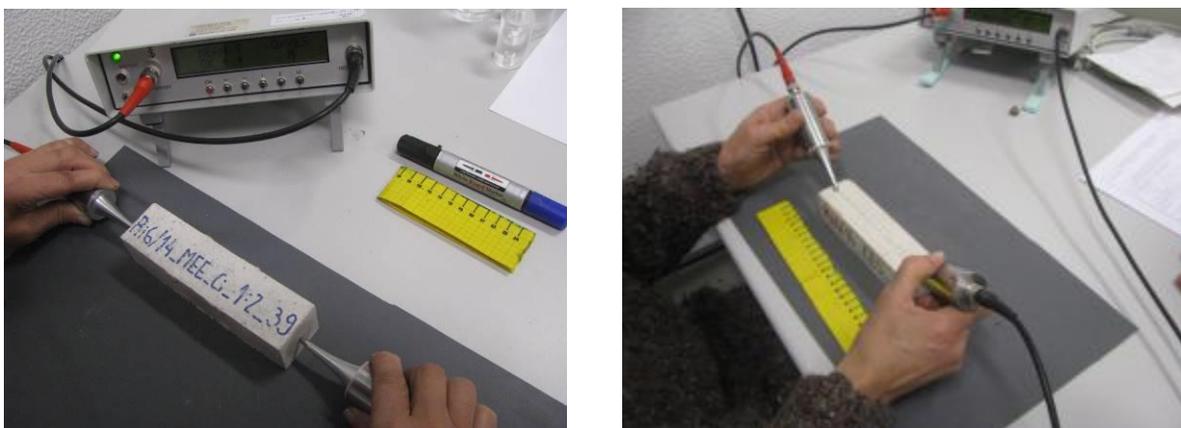
L corresponde ao comprimento do provete (m);

v corresponde à velocidade de propagação da onda ultra-sónica no provete (m/s);

ν corresponde ao coeficiente de Poisson do material do provete (-);

ρ corresponde à densidade do provete (kg/m^3).

Figura 6: Ensaio para determinação do E dinâmico através da injeção de Ultrassons no provete: (esquerda) método direto e (direita) método indireto



Fonte: Autor, 2019

4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os resultados do E dinâmico obtidos das diversas composições de argamassa estudadas foram analisados para se conseguir classificar os três métodos de ensaio usados em termos de qualidade do ensaio e de fiabilidade dos resultados que cada método produz.

A avaliação da qualidade de ensaio de cada método assentou numa análise qualitativa das condições de execução dos ensaios e da facilidade de obtenção dos resultados. Assim, a

qualidade dos três métodos experimentais foi analisada segundo os seguintes parâmetros:

- Dificuldade de execução do ensaio, avaliada em termos subjetivos pelos operadores;
- Repetibilidade das medições efetuadas sobre um mesmo provete.

A avaliação da fiabilidade dos três métodos experimentais foi efetuada com base nos resultados experimentais obtidos na campanha experimental descrita anteriormente. Para o caso da fiabilidade, prestou-se particular atenção à influência dos seguintes fatores:

- Tipo de argamassa, incluindo os diferentes traços;
- Tipo de moldagem e cura usada nos provetes;
- Idade dos provetes aquando do respetivo ensaio.

De seguida, os resultados do E dinâmico obtidos pelos três métodos foram comparados com os valores da resistência à compressão de cada provete, com o objetivo de analisar a relação de proporcionalidade direta que existe entre estas duas grandezas (Lucas, 2016). Finalmente verificou-se a dispersão dos resultados obtidos por cada método através do cálculo do respetivo coeficiente de variação (CV).

4.1. QUALIDADE DOS MÉTODOS

No Quadro 4 caracterizam-se os três métodos experimentais em estudo, relativamente a vários critérios que se consideraram relevantes para qualificar a qualidade da execução dos ensaios. Esta avaliação foi compilada tendo por base a perceção dos operadores que colaboraram neste estudo, sendo cada categoria classificada com Suficiente, Bom ou Muito Bom.

Quadro 4: Classificação dos três métodos experimentais em termos de qualidade de realização de ensaios

Método Experimental	(1) Convergência dos resultados	(2) Rapidez de execução do ensaio	(3) Repetibilidade do método	(4) Dependência do operador
Frequência de Ressonância	Bom	Muito Bom	Bom	Bom
Ultrassons - método direto	Muito Bom	Muito Bom	Bom	Bom
Ultrassons - método indireto	Suficiente	Suficiente	Suficiente	Suficiente

Fonte: Autor, 2019

- 1) Convergência dos resultados: este critério avalia a capacidade do método experimental em obter o valor “correto”, com o menor número de tentativas possível. Por valor “correto” entende-se o valor exatável de obter nas condições específicas do ensaio;
- 2) Rapidez de execução do ensaio: consiste no tempo médio necessário para executar o

ensaio;

- 3) Repetibilidade do método: capacidade de cada método produzir resultados idênticos em ensaios distintos, fazendo uso do mesmo provete e realizados nas mesmas condições (ex: o mesmo operador, o mesmo ambiente);
- 4) Dependência do operador: este critério avalia a dependência dos resultados obtidos tendo em conta fatores relacionáveis com o operador que realizou o ensaio. Este critério refere-se a questões específicas, tais como a como necessidade de aplicação de força manual durante o ensaio, e não ao rigor técnico de cada operador.

Relativamente aos dois métodos de Ultrassons, os autores reconhecem as virtudes e defeitos das sondas exponenciais, principalmente quando comparadas com as sondas planas que também podem ser usadas com estes métodos. Este estudo foi realizado com sondas exponenciais por serem as sondas com maior gama de aplicação em termos de geometria e condições superficiais dos provetes ou locais em estudo (ex: paredes de um edifício).

4.2. FIABILIDADE DOS MÉTODOS

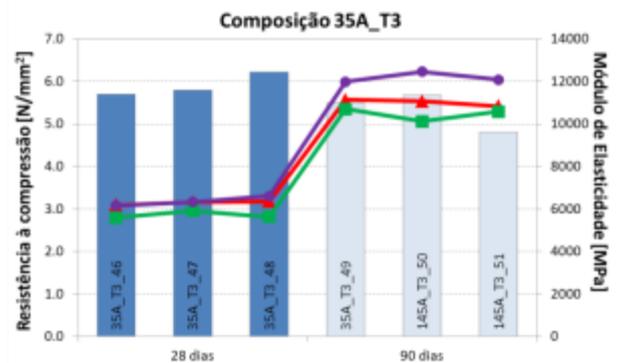
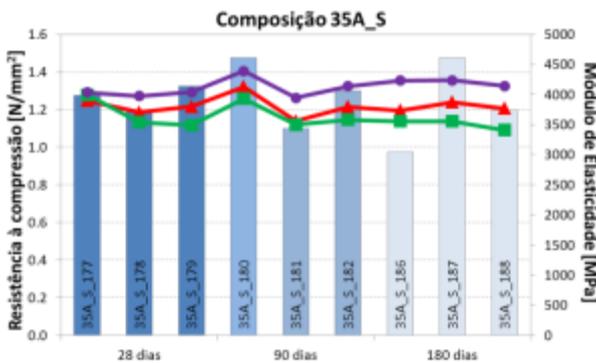
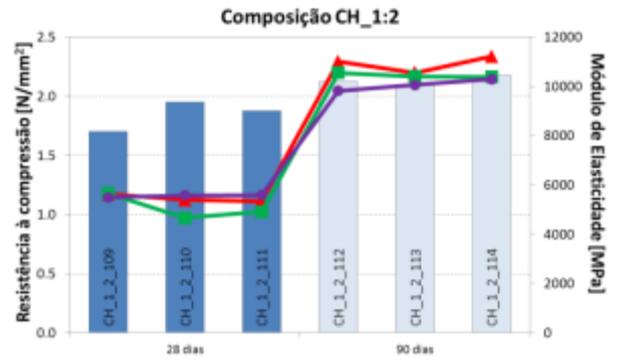
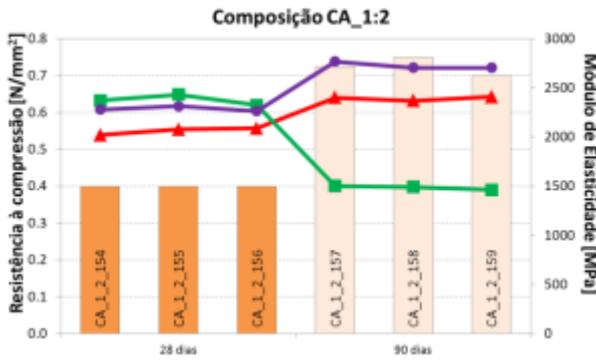
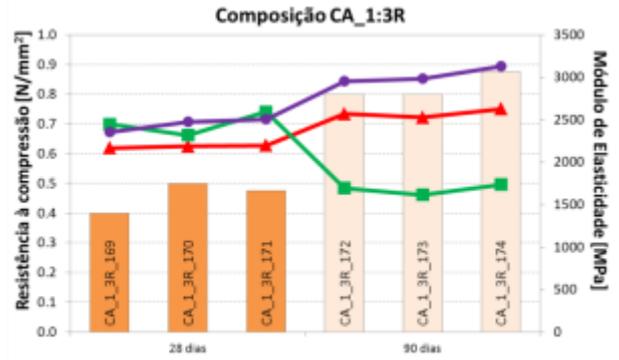
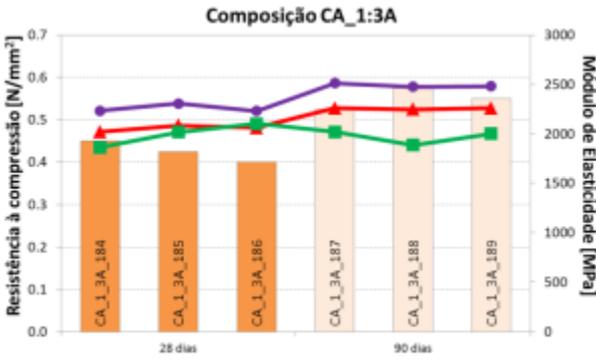
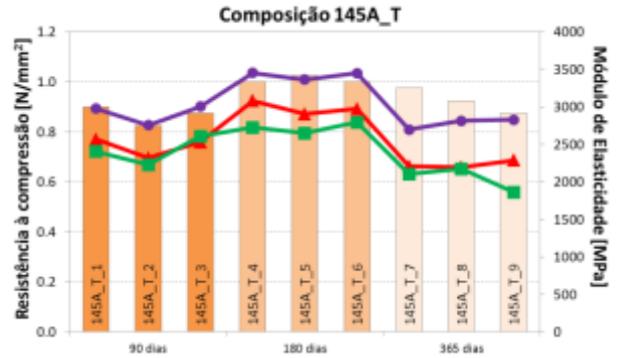
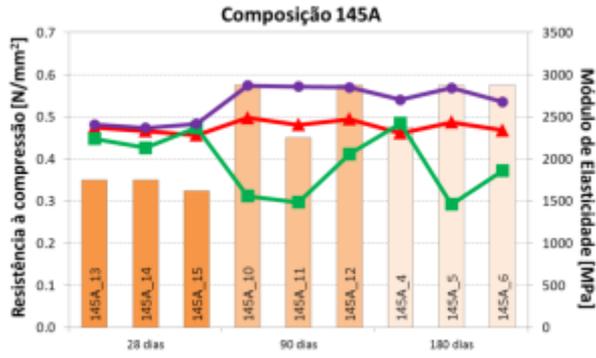
A Figura 7 apresenta a comparação entre a resistência à compressão e o E dinâmico, determinado por cada um dos métodos, para as dezasseis composições de argamassa estudadas. Esta comparação também é feita tendo em conta a idade dos provetes à qual os respetivos foram ensaiados.

Os gráficos apresentados apresentam 3 gamas de cor, nomeadamente: laranja para argamassas de cal aérea, azul para argamassas de cal hidráulica e cinza para argamassas de cimento. As barras representam os valores obtidos para a resistência à compressão, lidos no eixo da esquerda, enquanto as linhas representam os valores de E dinâmico obtidos nos mesmos provetes pelos três métodos, lidos no eixo da direita.

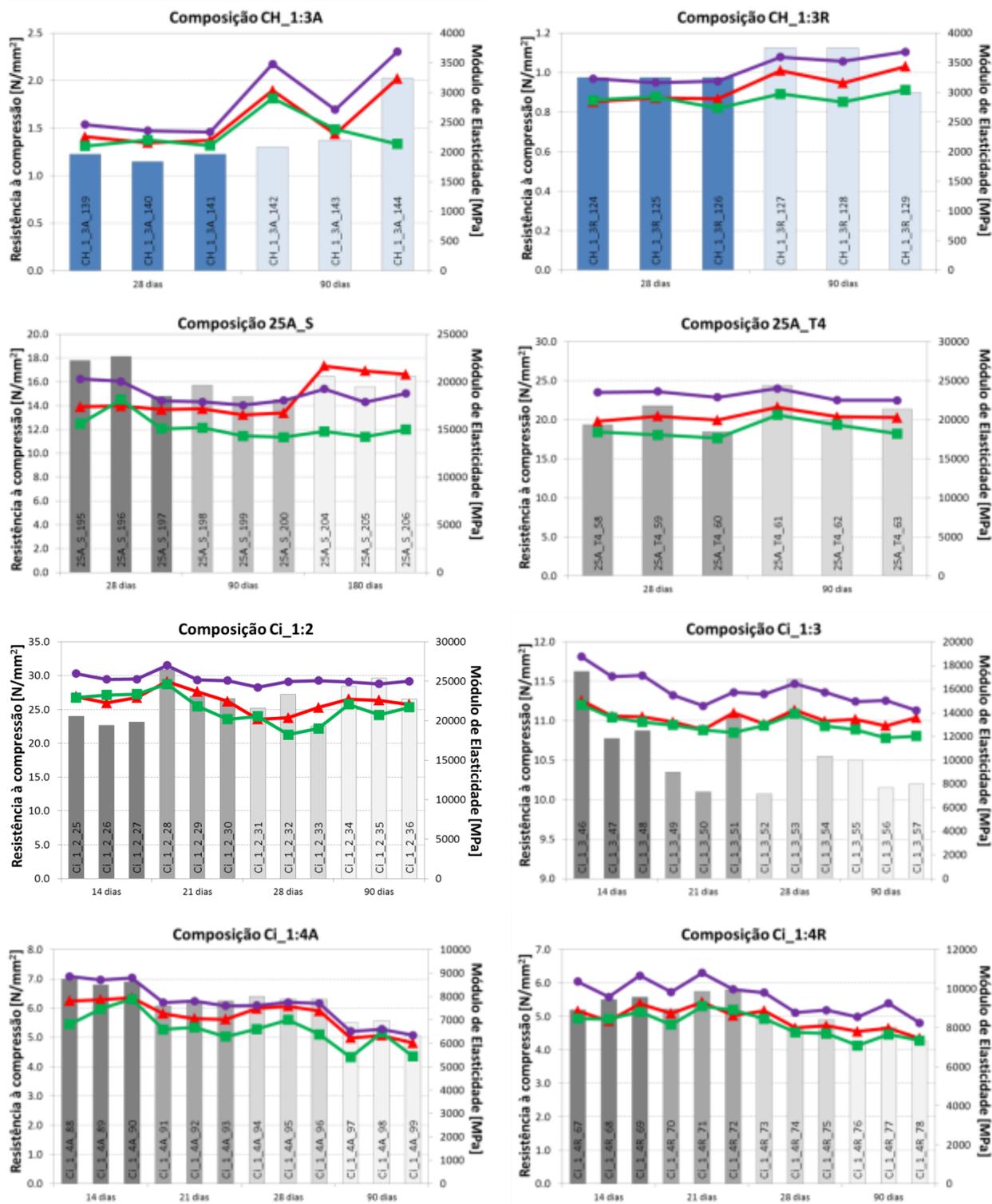
Figura 7: Gráficos de comparação da resistência à compressão das dezasseis composições estudadas com o respetivo E dinâmico determinado pelos três métodos experimentais



MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DE ARGAMASSAS
Ana Isabel Marques



MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DE ARGAMASSAS
Ana Isabel Marques



Fonte: Autor, 2019

Com base nos gráficos anteriores é possível verificar que a fiabilidade dos três métodos não depende significativamente do tipo de argamassa do provete, nem do tipo de moldagem e cura, nem da idade do provete.

Os valores de E dinâmico obtidos, que estão dentro das gamas esperadas (Veiga,

2010), permitem avaliar a respetiva relação com a resistência à compressão para cada método. Assim, verifica-se que tanto o método da Frequência de Ressonância, como o método dos Ultrassons direto conseguem cumprir de forma aceitável a evolução da resistência à compressão para cada composição, com o aumento da respetiva idade dos provetes. Também se verifica que estes dois métodos produzem resultados semelhantes entre si, reforçando mutuamente a fiabilidade dos mesmos. O método dos Ultrassons indireto apresenta repetidas vezes discrepâncias acentuadas relativamente aos valores obtidos pelos outros dois métodos e falhas no seguimento da evolução da resistência à compressão dos provetes, resultando numa fiabilidade inferior, quando comparada com a dos outros dois métodos. A explicação para estas discrepâncias pode estar no facto de as medições realizadas por este método serem fortemente influenciadas pelo estado da superfície. Esta dependência justifica que as discrepâncias sejam maiores nas argamassas de cal, mais vulneráveis às ações externas.

É importante ter em conta que, no caso de argamassas aplicadas, o método de Ultrassons indireto pode ser o único método aplicável. Além disso, a sensibilidade deste método às anomalias da superfície em que é realizada a medição pode ser uma vantagem quando se pretende avaliar o estado de conservação da superfície de um reboco aplicado e não caracterizar o material argamassa.

O Quadro 5 apresenta o resumo dos resultados médios obtidos para a resistência à compressão e o E dinâmico obtidos com os três métodos, para as dezasseis composições em estudo, juntamente com o valor do CV calculado relativamente ao E dinâmico.

Quadro 5: Resumo dos resultados médios obtidos aos 90 dias de idade para todas as composições em estudo

Identificação	Resistência à Compressão (N/mm ²)	Ultrassons - método direto		Ultrassons - método indireto		Frequência de Ressonância	
		Módulo de Elasticidade (MPa)	CV	Módulo de Elasticidade (MPa)	CV	Módulo de Elasticidade (MPa)	CV
CA_1:2	0,73	2392	0,009	1486	0,014	2726	0,013
CA_1:3R	0,83	2574	0,019	1681	0,036	3022	0,031
CA_1:3A	0,55	2256	0,003	1970	0,037	2490	0,008
145A	0,53	2455	0,018	1701	0,183	2858	0,004
145A_T	0,87	2470	0,055	2411	0,079	2910	0,047
CH_1:2	2,13	10920	0,031	10445	0,009	10052	0,024
CH_1:3R	1,05	3318	0,044	2949	0,035	3600	0,022
CH_1:3A	1,57	2857	0,172	2472	0,158	3293	0,156
35A_S	1,29	3828	0,074	3671	0,063	4157	0,054
35A_T3	5,33	11017	0,015	10471	0,029	12181	0,020

MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DE ARGAMASSAS
Ana Isabel Marques

Ci_1:2	28,23	22481	0,016	21515	0,032	24884	0,007
Ci_1:3	10,28	13322	0,027	12175	0,031	14743	0,031
Ci_1:4R	4,39	7740	0,034	7362	0,039	8678	0,059
Ci_1:4A	5,38	6191	0,027	5767	0,104	6481	0,020
25A_S	15,00	16814	0,019	14565	0,037	17832	0,014
25A_T4	21,93	20752	0,036	19385	0,062	23007	0,038
CV médio por método	-	-	0,037	-	0,059	-	0,034

Fonte: Autor, 2019

Os resultados do Quadro 5 reforçam a afirmação anterior de que o método da Frequência de Ressonância e o método dos Ultrassons direto têm maior fiabilidade do que o método dos Ultrassons indireto, por apresentarem valores de *CV* médio mais baixos.

5. CONCLUSÕES

Tendo em conta os resultados obtidos com os três métodos de determinação do *E* dinâmico, foi possível classificar e apurar a qualidade e a fiabilidade dos resultados obtidos com cada um dos métodos. Caso seja possível utilizar qualquer um destes métodos, recomenda-se o método da Frequência de Ressonância ou o método dos Ultrassons direto. Caso não seja possível a utilização de nenhum destes dois métodos, a utilização do método dos Ultrassons indireto é igualmente adequada para a determinação do *E* dinâmico, devendo os resultados ser analisados com algum cuidado se houver degradação superficial. Salienta-se ainda que o método por Ultrassons indireto tem um campo de aplicação específico muito importante em duas situações: 1) no caso de revestimentos aplicados, ou de comparação com revestimentos aplicados, pode ser o único método viável; 2) quando se pretende avaliar o estado de conservação superficial de um revestimento e localizar fissuras ou outras anomalias este método fornece importantes informações. Podemos então afirmar que todos os métodos apresentaram qualidade e fiabilidade adequadas para aplicações científicas ou de engenharia.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho insere-se no Projeto de Investigação e Inovação 2013-2020 do LNEC "REuSE- Revestimentos para Reabilitação: Segurança e Sustentabilidade".

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EN 14146 **Natural stone test methods. Determination of the dynamic modulus of elasticity (by measuring the fundamental resonance frequency)**, 2004a.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EN 12504-4 **Testing concrete. Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity**, 2004b.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EN 1015-11: 1999/A1 **Methods of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar**, 2006a.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EN 1015-3:1999/A2 **Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)**, 2006b.

LUCAS, J.; BRITO, J.; VEIGA, M. R.; FARINHA, C. **The effect of using sanitary ware as aggregates on rendering mortars' performance**, Materials & Design, Vol. 91, nº 5, p.155-164, fevereiro de 2016.

TAMIN, P. F. **Étude du comportement mécanique des revêtements de façade**. 1986. Tese de Doutoramento. École Nationale des Ponts et Chaussées. Paris 1986.

VEIGA, M. R. **Influence of Application Conditions on the Cracking Susceptibility of Renderings**, RILEM Publications S.A:R.L, Concrete Science and Engineering, Vol 2, p.134-140, setembro de 2000.

VEIGA, M. R.; FRAGATA, A.; LUÍSA, A.; VELOSA, A.; MAGALHÃES, A.; MARGALHA, G. **Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings**. International Journal of Architectural Heritage, Vol. 4, p.177–195, 2010.