

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS DIMENSÕES NO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DE ALVENARIA DE CALCÁRIO DE EDIFÍCIOS ANTIGOS**

JORGE MIGUEL VERÍSSIMO ANACLETO

**MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE ESPECIALIZAÇÃO: ESTRUTURAS
DISSERTAÇÃO**

ORIENTADOR: Prof. Doutor Pedro Manuel Garcia Vieira Neto

COORIENTADOR: Prof. Doutor Marco António Ludovico Marques

Dezembro de 2019

Dissertação submetida no Instituto Politécnico de Setúbal

Estudo da influência das dimensões no comportamento mecânico de alvenaria de calcário de edifícios antigos

Mestrado em Engenharia Civil

DECLARAÇÃO DE AUTORIA DO TRABALHO

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

Jorge Miguel Veríssimo Anacleto

(assinatura)

DIREITOS DE CÓPIA OU COPYRIGHT

© **Copyright:** Jorge Miguel Veríssimo Anacleto

O Instituto Politécnico de Setúbal tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

“O que sabemos é uma gota, o que não sabemos é um oceano.”

Sir Isaac Newton

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho de mestrado representa o término de mais uma etapa, que seria impossível sem o acompanhamento, incentivo e ajuda de algumas pessoas a quem quero agradecer.

Aos meus Pais António e Catarina, a minha irmã Joana, Avós, amigos chegados e restante família por todo o amor incondicional, educação, compreensão, suporte e confiança depositada.

À minha namorada, Inês Paiva, por todo o carinho, apoio, motivação e conselhos ao longo de todo o trabalho.

Aos orientadores, Professor Pedro Neto e Professor Marco Marques, por toda a disponibilidade, orientação, dedicação e apoio prestado.

Ao responsável técnico do laboratório Alexandre Gamito, pela grande disponibilidade e profissionalismo apresentado no decorrer da campanha experimental, tendo sido fundamental na execução do presente trabalho.

Ao Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da FCT Universidade Nova de Lisboa por ter disponibilizado as instalações para a realização dos ensaios de resistência à compressão e flexão efetuados nos provetes de argamassa

Aos meus amigos e colegas, que estiveram comigo durante todo o percurso académico, pelo companheirismo e espírito de entre ajuda no decorrer do mesmo, entre os quais, Flávio Lopes, Diogo Felicíssimo, Bruno Ferreira, Nelson Rebelo, José Ferreira, Cláudio Nicolau, Filipe Borges, André Arocha e Nuno Palha.

A todos os docentes que tive durante o percurso académico.

Os meus mais sinceros e humildes agradecimentos.

RESUMO

O presente estudo foi baseado na realização de uma investigação com base experimental, que pretende prestar uma contribuição para o conhecimento do comportamento mecânico da alvenaria de pedra, nomeadamente de calcário. De forma a analisar a influência da variação do número de fiadas de alvenaria no comportamento da compressão uniaxial, são utilizadas três séries de provetes de alvenaria de dimensões reduzidas com diferentes números de fiadas

A caracterização dos materiais constituintes da alvenaria (calcário e argamassa) é realizada. Os provetes de alvenaria utilizados, foram de alvenaria aparelhada regular de pano simples com juntas de argamassa á base de areia e cal hidráulica natural. Os materiais utilizados no trabalho experimental foram selecionados e fabricados para serem representativos das características mecânicas presentes em edifícios antigos, caracterizadas por blocos de pedra heterogêneos e argamassas de baixa resistência.

É apresentado um novo modelo de preditivo da resistência à compressão de alvenaria, tendo em consideração o número de fiadas e a altura da alvenaria. O modelo é avaliado através da comparação com outros modelos existentes e valores experimentais, os resultados apresentaram uma boa concordância entre os valores experimentais e analíticos.

Palavras-Chave: Alvenaria, Calcário, Cal hidráulica, Compressão, Modelo preditivo e fiadas.

ABSTRACT

The present study was based on a research based on experimental basis, which intends to provide a contribution to the knowledge of the mechanical behavior of stone masonry, namely limestone. In order to analyze the influence of varying the number of masonry courses on the behavior of uniaxial compression, three series of small size samples with different numbers of masonry courses are used.

The characterization of the masonry materials (limestone prisms and mortar) are performed. The masonry specimens used are single-leaf regular ashlar masonry with joints made of natural hydraulic lime mortar and sand. The materials used in the experimental work are selected and manufactured to be representative of the mechanical characteristics present in old buildings, characterized by the non-homogenous stone blocks and low strength mortars.

A new prediction model of the masonry compressive strength is herein presented that take into account the number of courses and the height of the dimensioned specimens. This procedure is evaluated by comparison with other existing models, experimental values and the results show a good agreement between the analytical and experimental values.

KEYWORDS: Masonry, Limestone, Hydraulic lime, Compression, Predictive model and Masonry courses.

ÍNDICE GERAL

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Motivação e objetivos	3
1.3. Organização do documento.....	4
2. Pesquisa bibliográfica.....	7
2.1. Alvenaria de Pedra	7
2.2. Estado de Arte	9
2.3. Argamassa	14
2.4. Pedra	14
3. Trabalho Experimental.....	17
3.1. Introdução.....	17
3.2. Caracterização da pedra	17
3.2.1. Caracterização física	18
3.2.1.1. Determinação da Porosidade aberta e massa volúmica.....	18
3.2.1.2. Determinação do Coeficiente de absorção de água (capilaridade)	20
3.2.2. Caracterização Mecânica	21
3.3. Caracterização da Argamassa	23
3.3.1. Argamassa em estado fresco	24

3.3.2. Argamassa em estado endurecido	24
3.3.2.1. Caracterização Física	24
3.3.2.1.1. Determinação da Porosidade aberta e massa volúmica.....	24
3.3.2.2. Caracterização Mecânica	25
3.4. Caracterização da Alvenaria.....	27
3.4.1. Caracterização Mecânica	29
4. Apresentação e discussão de resultados	31
4.1. Introdução.....	31
4.2. Caracterização física da pedra	31
4.2.1. Porosidade e massa volúmica	31
4.2.2. Capilaridade	32
4.3. Caracterização Mecânica da pedra	34
4.4. Caracterização física da argamassa	37
4.4.1. Em estado fresco.....	37
4.4.2. Em estado endurecido.....	37
4.4.2.1. Porosidade e massa volúmica	37
4.5. Caracterização Mecânica da Argamassa	38
4.6. Caracterização Mecânica da Alvenaria	40
4.7. Modelo preditivo	48

5. Conclusões e desenvolvimentos futuros	57
Apêndice	61
Referências Bibliográficas	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1-1 – Pirâmide de Quéops (Egito) (Geldhof 2019)	7
Figura 2.1-2 – Partenon da Acrópole (Grécia) (Ribarska 2019)	7
Figura 2.1-3 – Templo do Sol, Konârak (Índia) (Vincent 2019b).....	7
Figura 2.1-4 – Pirâmide de Kukulcán (México) (Vincent 2019a).....	7
Figura 2.1-5 – Torre de Belém (Portugal) (Therin-Weise 2019)	8
Figura 2.1-6 – Convento de Cristo em Tomar (Portugal) (Starr 2019).....	8
Figura 3.2-1 – Máquina de corte utilizada para o corte de provetes.	18
Figura 3.2-2 – Medição de provete utilizando o Paquímetro digital.	18
Figura 3.2-3 – Vista global do equipamento.....	19
Figura 3.2-4 – Recipiente com provetes cobertos.	20
Figura 3.2-5 – Ilustração esquemática de prensa com <i>LVDTs</i> dispostos e bloco.....	22
Figura 3.2-6 – Disposição Adotada na colocação dos <i>LVDTs</i>	22
Figura 3.3-1 – Moldes prismáticos moldados.	23
Figura 3.3-2 – Provetes desmoldados.	23
Figura 3.3.1-1 – Compactação de cama de argamassa.....	24
Figura 3.3.1-2 – Medição do espalhamento com craveira.....	24
Figura 3.3.2-1 – Pesagem hidrostática do provete.....	25
Figura 3.3.2-2 – Ensaio à compressão em provete de argamassa.....	26
Figura 3.3.2-3 – Ensaio à flexão em provete de argamassa (com vão especificado) ..	26

Figura 3.4-1 – Representação com as dimensões adotadas para os provetes de alvenaria.....	27
Figura 3.4-2 – Cofragem utilizada com marcações das dimensões pretendidas.....	28
Figura 3.4-3 – Cofragem com provetes de alvenaria.....	28
Figura 3.4-4 – Provetes de alvenaria durante período de cura.....	29
Figura 3.4-5 – Provetes de alvenaria após serem descofrados.....	29
Figura 3.4-6 – Esquema da disposição dos LVDTs vista frontal.	30
Figura 3.4-7 – Esquema da disposição dos LVDTs vista em planta.....	30
Figura 4.2-1 – Curva de absorção de água por capilaridade do provete 1 com linha de regressão linear.....	33
Figura 4.4-1 – Diagrama tensão-deformação dos provetes de calcário.	36
Figura 4.7-1 – Diagrama de tensão-deformação à compressão dos provetes de argamassa.....	39
Figura 4.7-2 – Diagrama de tensão-deformação à flexão dos provetes de argamassa.	40
Figura 4.8-1 – Diagramas de tensão-deformação dos provetes de alvenaria com 4 fiadas.....	42
Figura 4.8-2 – Diagramas de tensão-deformação dos provetes de alvenaria com 6 fiadas.....	42
Figura 4.8-3 – Diagramas de tensão-deformação dos provetes de alvenaria com 8 fiadas.....	43
Figura 4.8-4 – Diagramas de tensão-deformação dos provetes de alvenaria.....	43
Figura 4.8-5 – Provete 4F P1 antes do ensaio à compressão.....	44

Figura 4.8-6 – Provete 4F P1 no fim do ensaio à compressão.....	44
Figura 3.4-7 – Provete 4F P2 antes do ensaio à compressão.....	44
Figura 4.8-8 – Provete 4F P2 no fim do ensaio à compressão.....	44
Figura 4.8-9 – Provete 4F P3 antes do ensaio à compressão.....	44
Figura 4.8-10 – Provete 4F P3 no fim do ensaio à compressão.....	44
Figura 4.8-11 – Provete 6F P1 antes do ensaio à compressão.....	45
Figura 4.8-12 – Provete 6F P1 no fim do ensaio à compressão.....	45
Figura 4.8-13 – Provete 6F P2 antes do ensaio à compressão.....	45
Figura 4.8-14 – Provete 6F P2 no fim do ensaio à compressão.....	45
Figura 4.8-15 – Provete 6F P3 antes do ensaio à compressão.....	46
Figura 4.8-16 – Provete 6F P3 no fim do ensaio à compressão.....	46
Figura 4.8-17 – Provete 8F P1 antes do ensaio à compressão.....	46
Figura 4.8-18 – Provete 8F P1 no fim do ensaio à compressão.....	46
Figura 4.8-19 – Provete 8F P2 antes do ensaio à compressão.....	47
Figura 4.8-20 – Provete 8F P2 no fim do ensaio à compressão.....	47
Figura 4.8-21 – Provete 8F P3 antes do ensaio à compressão.....	47
Figura 4.8-22 – Provete 8F P3 no fim do ensaio à compressão.....	47
Figura 4.9-1 – Curva de absorção de água por capilaridade do provete 1 com linha de regressão linear.....	62
Figura 4.9-2 – Curva de absorção de água por capilaridade do provete 2 com linha de regressão linear.....	62

Figura 4.9-3 – Curva de absorção de água por capilaridade do provete 3 com linha de regressão linear.....	63
Figura 4.9-4 – Curva de absorção de água por capilaridade do provete 4 com linha de regressão linear.....	63
Figura 4.9-5 – Curva de absorção de água por capilaridade do provete 5 com linha de regressão linear.....	64
Figura 4.9-6 – Curva de absorção de água por capilaridade do provete 6 com linha de regressão linear.....	64
Figura 4.9-7 – Curva de absorção de água por capilaridade do provete 7 com linha de regressão linear.....	65
Figura 4.9-8 – Curva de absorção de água por capilaridade do provete 8 com linha de regressão linear.....	65
Figura 4.9-9 – Curva de absorção de água por capilaridade do provete 9 com linha de regressão linear.....	66

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.2-1 – Valores obtidos no ensaio da determinação da porosidade aberta e massa volúmica dos provetes de pedra.....	32
Tabela 4.2-2 – Valores obtidos no ensaio da determinação do coeficiente de absorção de água (capilaridade) dos provetes de pedra.....	34
Tabela 4.4-1 – Propriedades mecânicas dos provetes de pedra.....	36
Tabela 4.5-1 – Valores obtidos nos ensaios de espalhamento da argamassa.....	37
Tabela 4.5-2 – Valores obtidos no ensaio da determinação da porosidade aberta e massa volúmica dos provetes de argamassa.....	38
Tabela 4.7-1 – Propriedades mecânicas dos provetes de argamassa.....	39
Tabela 4.8-1 – Propriedades mecânicas dos provetes de alvenaria com 4 fiadas.....	41
Tabela 4.8-2 – Propriedades mecânicas dos provetes de alvenaria com 6 fiadas.....	41
Tabela 4.8-3 – Propriedades mecânicas dos provetes de alvenaria com 8 fiadas.....	41
Tabela 4.9-1 – Valores e parâmetros considerados para estimar a resistência à compressão.....	51
Tabela 4.9-2 – Resultados teóricos e experimentais da resistência à compressão de alvenaria.....	52
Tabela 4.9-3 – Valores erro médio total absoluto usando os modelos.....	53
Tabela 4.9-4 – Valores das medições efetuadas nos provetes de pedra.....	61
Tabela 4.9-5 – Valores médios das dimensões dos provetes de pedra.....	61

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A – Área da secção transversal de cada provete, [m²]

b - Largura do provete, [mm]

C - Coeficiente de absorção de água por capilaridade, [m²×h^{0.5}]

CoV - Coeficiente de variação, (%)

CTE - Código técnico de construção

d - Espessura do provete, [mm]

D - Valor médio de medição dos diâmetros marcados na mesa, [mm]

DT – Ensaio destrutivo

ε – Extensão

ε_R - Extensão na rotura

ε_{cR} - Extensão na rotura à compressão

ε_{fR} - Extensão na rotura à flexão

F – Força de compressão aplicada no provete, [kN]

F_c - Força de rotura à compressão, [N]

f_c – Resistência à compressão da alvenaria, [MPa]

f_{ck} – Resistência característica à compressão da alvenaria, [MPa]

f_{cm} – Resistência à compressão da argamassa, [MPa]

f_{cu} – Resistência à compressão da pedra, [MPa]

f_e - valor médio experimental de resistência à compressão, [MPa]

F_f - Força de rotura à flexão, [N]

F_p - valor de resistência à compressão da alvenaria previsto através da utilização dos modelos, [MPa]

h_p – Altura do da alvenaria [m]

LVDT - Transdutor de deslocamentos

l - Distância entre apoios, [mm]

l_0 - comprimento axial inicial do provete, [mm]

RH – Humidade relativa, [%]

m_d - Massa seca, [kg]

MDT – *Ensaio parcialmente destrutivo*

m_h – Massa de pesagem hidrostática, [kg]

m_i - Massa para os tempos (i) determinados, [kg]

m_t - Quantidade de água absorvida até um determinado instante (t), [kg/m²]

m_s - Massa saturada, [kg]

ρ_b - Massa volúmica aparente, [kg/m³]

ρ_r - Massa volúmica real, [kg/m³]

n – Número de fiadas

NDT – *Ensaio não destrutivo*

P_o - Porosidade aberta, [%]

σ_f - Resistência à flexão, [MPa]

σ_c - Resistência à compressão, [MPa]

$\sigma_{c\ max}$ - Resistência média à compressão, [MPa]

$\sigma_{f\ max}$ - Resistência média à flexão, [MPa]

σ_{max} - Resistência média, [MPa]

σ – Tensão, [MPa]

Δl - Variação de comprimento axial medida, [mm]

1. Introdução

1.1. ENQUADRAMENTO

A alvenaria de pedra é um material estrutural heterógeno, composto essencialmente por pedra e argamassas, cujas ligações e interações se apresentam complexas. Por este motivo, a correta definição de leis caracterizando o seu comportamento continua a constituir um grande desafio (C. Almeida et al. 2012).

A alvenaria de pedra é um dos materiais estruturais mais antigos. Tem sido amplamente utilizado, principalmente até meados do século XX, em uma grande variedade de construções, comuns ou monumentais, algumas sendo hoje classificadas como património cultural local, nacional ou mesmo mundial (B. Q. Silva et al. 2016).

Património construído como castelos, igrejas e palácios desempenham um papel importante na vida cultural de Portugal (Ludovico-Marques, Chastre, and Vasconcelos 2012).

No caso de construções antigas que fazem parte do património cultural, é difícil obter parâmetros mecânicos através de ensaios experimentais, porque raramente é permitido a recolha de amostras nessas estruturas (Domede, Parent, and Sellier 2017). Esta é uma situação comum para edifícios listados como históricos: ensaios destrutivos geralmente não são possíveis de realizar devido a restrições colocadas pelas autoridades de proteção e conservação do património ou pelos custos elevados associados a esses ensaios experimentais (Borri et al. 2015).

Além disso, campanhas de ensaios realizados em provetes de grande escala costumam ser demasiado caras para serem realizadas e, em alguns casos, impraticáveis devido a dificuldades associadas à extração de amostras de grandes dimensões (D García et al. 2011), o seu transporte para laboratórios é problemático e poderia levar a danos adicionais causados às amostras durante o manuseio e transporte para laboratórios (Pinho and Lúcio 2017). Assim, como alternativa, ensaios utilizando provetes de escala reduzida são atraentes, porque são mais rápidos e menos dispendiosos quando comparados com ensaio em grande escala ou à escala real (Laefer et al. 2011). Inclusive diversos autores como (David García et al. 2012; G. Vasconcelos and Lourenço 2009; Rao, Reddy, and Jagadish 1997; Augenti and Parisi

2010), utilizaram em ensaios provetes de escalas reduzidas, pelas razões anteriormente descritas.

A reabilitação de edifícios de alvenaria antiga é um tema de interesse crescente, dado o gradual interesse em conservar e restaurar, de modo a garantir a segurança e a funcionalidade deste património disseminado por todo o mundo (C. Almeida et al. 2012). Em Portugal esse mesmo interesse também é latente uma vez que os centros históricos das cidades e vilas, bem como os monumentos em geral, também utilizam este tipo de alvenaria, carecendo de conservação, reabilitação, reforço ou manutenção, prosseguindo o desenvolvimento do conhecimento específico para o efeito.

Restaurar um monumento é uma complicada tarefa científica multidisciplinar. Uma série de problemas, variando desde elementares (resistência e deformabilidade dos materiais) até complexos (preservação do sistema estrutural, determinação das intervenções mínimas, sua reversibilidade e, é claro, sua durabilidade) devem ser considerados e resolvidos antes que as decisões sejam tomadas (Kourkoulis 2010). Intervenções podem também tornar-se necessárias devido à alteração do uso de estruturas patrimoniais (Holicky et al. 2009). Além de mais, com a sua recuperação e valorização, o património adquire um novo público, conduzindo a um maior consumo turístico de bens culturais por meio de significativas alianças entre mercado e políticas de preservação. O Turismo Cultural ganha bastante relevância neste processo e vem-se constituindo como um dos segmentos turísticos mais importantes nos nossos dias (Rodrigues 2017).

Edifícios históricos e monumentos constituem uma parte do património cultural e, portanto, os países, sindicatos, organismos nacionais e internacionais devem prestar atenção à sua manutenção e preservação para protegê-los para as gerações futuras (Juhásová, Sofronie, and Bairrão 2008).

No presente trabalho são apresentados os resultados de uma campanha experimental de caracterização física e mecânica de componentes de alvenaria de pedra: blocos de calcário e argamassa de cal. É apresentado um estudo do comportamento de compressão uniaxial de alvenaria de pedra com diferentes números de fiadas utilizando provetes de dimensões reduzidas. Os resultados obtidos permitiram o desenvolvimento de um modelo empírico para

prever a resistência à compressão da alvenaria. A sua precisão é comparada com outros modelos existentes e códigos de dimensionamento.

1.2. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

O comportamento estrutural de elementos de alvenaria de pedra depende de vários fatores, designadamente das características físicas, químicas e mecânicas dos componentes de alvenaria, mas também do modo como estão dispostos (B. Q. Silva et al. 2016). Além disso, as Estruturas de alvenaria foram construídas através de várias técnicas utilizando diferentes materiais, cujas propriedades exibem uma considerável dispersão dependente dos períodos de construção e condições específicas da região (Sýkora et al. 2018). A alvenaria histórica existe em tantas formas que se torna difícil estabelecer procedimentos de cálculo simples de projeto para todos os casos existentes (Bosiljkov 2015). Devido à inerente variabilidade de alvenaria histórica, as informações sobre as suas propriedades mecânicas atuais devem ser obtidas através de ensaios (Holicky et al. 2009).

No entanto, em diversos casos os Engenheiros e técnicos podem realizar apenas uma análise visual subjetiva da alvenaria e referem-se aos escassos dados da literatura para estimar as propriedades mecânicas da alvenaria (Borri et al. 2015). Além disso, ensaios experimentais em provetes de alvenaria representativa são relativamente dispendiosos e não são práticos para projetos. Este facto persuadiu os pesquisadores a investigar relações semi-empíricas e analíticas para prever a resistência da alvenaria com base nas características dos componentes e no tipo de alvenaria (Pina-Henriques 2005).

O comportamento da alvenaria à compressão é crucial para o dimensionamento e avaliação da segurança, uma vez que as estruturas antigas de alvenaria são principalmente submetidas à compressão (Lourenço and Pina-Henriques 2006). Contudo, a informação disponível sobre as características de resistência da alvenaria de pedra é limitada (Gupta and Planning 2018; Rao, Reddy, and Jagadish 1997). As resistências à compressão dos blocos (unidades) de alvenaria e argamassas são duas das propriedades mais ensaiadas, porque os provetes são relativamente fáceis e baratos de preparar quando comparados com ensaios de outras propriedades e são essenciais para a determinação da resistência à compressão da própria alvenaria (C, Tensing, and R 2013).

A complexidade, variabilidade e informação limitada sobre a alvenaria de pedra constituem um enorme desafio, que por sua vez se transforma em uma **motivação** para procurar aprofundar o conhecimento acerca do tema. A tendência de aumento do interesse da reabilitação, constitui uma **motivação**, como é possível constatar, o peso das obras de reabilitação no total de obras concluídas manteve tendência crescente (Instituto Nacional de Estatística 2018).

A necessidade de criar ou desenvolver métodos simples para aceder à resistência da alvenaria com maior precisão, tendo em conta o custo, meios necessários e nível de intrusão nas estruturas também fazem parte das **motivações**.

A presente dissertação tem como **objetivos** contribuir para a investigação, pesquisa e desenvolvimento do conhecimento do comportamento mecânico das alvenarias de pedra, através de caracterização do material (pedra calcária e argamassa de cal hidráulica, individualmente e em conjunto). Estudar a influência do número de fiadas sobre a resistência, utilizando provetes de alvenaria com dimensões reduzidas e o desenvolvimento de um modelo preditivo da resistência à compressão da alvenaria.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

O presente trabalho é composto por cinco capítulos, nomeadamente: Introdução, Pesquisa bibliográfica, Trabalho Experimental, Apresentação e discussão de resultados e Conclusões e desenvolvimentos futuros.

Capítulo 1 (Introdução) introduz através de um enquadramento geral ao tema da dissertação. São apresentados os motivos para o desenvolvimento da presente dissertação, objetivos pretendidos e é explicitada a organização do documento.

Capítulo 2 (Pesquisa bibliográfica) desenvolve o tema da dissertação, apresentado alguns conceitos introdutórios sobre a alvenaria e os seus componentes (argamassa e pedra). O estado de arte refere e apresenta de forma resumida as informações mais pertinentes da pesquisa realizada para a elaboração do presente trabalho.

Capítulo 3 (Trabalho experimental) descreve os ensaios e metodologias utilizadas, para a caracterização física e mecânica dos componentes da alvenaria (pedra e argamassa) e caracterização mecânica da alvenaria.

Capítulo 4 (Apresentação e discussão de resultados) apresenta os resultados obtidos da campanha experimental realizada, os mesmos são analisados e comparados com outros valores observados na literatura. É apresentado um modelo preditivo, é avaliado através da comparação com outros modelos existentes.

Capítulo 5 (Conclusões e desenvolvimentos futuros) refere as principais conclusões resultantes da execução da presente dissertação. São apresentadas sugestões e ou recomendações para trabalhos futuros.

Por último, são apresentados as referências bibliográficas utilizadas e o apêndice que contem as medições realizadas nos provetes de pedra e gráficos da absorção de água por capilaridade de todos os provetes de pedra.

2. Pesquisa bibliográfica

2.1. ALVENARIA DE PEDRA

A construção de alvenaria é ancestral, sendo a tipologia do edificado conhecido das primeiras civilizações. A alvenaria de pedra encontra-se amplamente representada no património edificado mundial desde os “abrigos” do Neolítico, compreendendo todas as épocas da humanidade até fundamentalmente ao início do Século XX.

Existem testemunhos ímpares de edificado com estruturas em alvenaria de pedra construído nomeadamente por egípcios (Figura 2.1-1), gregos (Figura 2.1-2), chineses, indianos (Figura 2.1-3), tailandeses, romanos, maias (Figura 2.1-4) e aztecas (Committee 1993).



Figura 2.1-1 – Pirâmide de Quéops (Egito) (Geldhof 2019)



Figura 2.1-2 – Partenon da Acrópole (Grécia) (Ribarska 2019)



Figura 2.1-3 – Templo do Sol, Konârak (Índia) (Vincent 2019b)



Figura 2.1-4 – Pirâmide de Kukulcán (México) (Vincent 2019a)

Este tipo de construção é a mais representativa dos castelos e catedrais da Europa medieval, dos palácios e igrejas do Renascimento, Maneirismo, Barroco, Neoclássico, Romantismo até ao Revivalismo dos finais do Século XIX e início do Século XX.

As construções mais antigas existentes no país, tanto históricas (Figura 2.1-5 e Figura 2.1-6) como habitacionais, são predominantemente constituídas por paredes de alvenaria de pedra. Esta solução construtiva foi especialmente adotada em Portugal devido à relativa abundância deste material, resistência e possibilidades de aplicação (Correia 2011).



Figura 2.1-5 – Torre de Belém (Portugal) (Therin-Weise 2019)



Figura 2.1-6 – Convento de Cristo em Tomar (Portugal) (Starr 2019)

A pedra tem sido utilizada na construção com sucesso ao longo dos tempos e por todo o mundo devido à sua gama única de benefícios (Senthivel and Lourenço 2009).

A caracterização adequada da alvenaria de pedra deve envolver análises completas dos constituintes e técnicas de construção que foram usadas. No entanto, tal caracterização é uma tarefa bastante difícil devido à variabilidade das características geométricas e mecânicas/propriedades dos materiais (tipos de pedras, argamassa e enchimento, geralmente apresentando grandes dispersões) e a dependência dos procedimentos/técnicas de construção, que diferem de região para região, mesmo dentro do mesmo país (Celeste Almeida et al. 2016).

Uma grande variabilidade das características físico-mecânicas pode ocorrer entre as unidades de bloco. Resultado da heterogeneidade intrínseca da pedra em pequena escala e das variações de materiais em larga escala devido ao uso de diferentes variedades de pedras,

bem como a estados variáveis de conservação, que resultam das diferentes condições de uso e vida útil dos edifícios (Vasanelli et al. 2016).

A alvenaria de pedra é um material heterogêneo composto por blocos de pedra e juntas, cujo comportamento estrutural depende das propriedades individuais dos seus componentes, bem como das ligações entre eles (Maccarini et al. 2018).

É sabido que o comportamento mecânico do material de alvenaria depende de diversos fatores tais como, resistência à compressão e ao corte dos componentes (argamassa e blocos), forma dos blocos, razão volumétrica entre componentes e textura da parede (Borri et al. 2015).

2.2. ESTADO DE ARTE

As alvenarias foram amplamente construídas pela humanidade desde as idades pré-históricas até meados do século 20 dC (Wagemakers 2014; B. Q. Silva et al. 2016). A alvenaria de pedra é encontrada tanto em construções comuns como no património cultural. A alvenaria de pedra estrutural é um material heterogêneo composto principalmente por elementos de pedra e argamassa e abrange alvenaria regular ou irregular, entulho ou aparelhada. As argamassas fracas à base de cal prevalecem nas juntas de monumentos de alvenaria de pedra (G. de F. M. Vasconcelos 2005).

As estruturas históricas de alvenaria foram construídas utilizando várias técnicas e diferentes materiais cujas propriedades exibem uma dispersão considerável (Sýkora et al. 2018; Muñoz, Lourenço, and Moreira 2018; Segura et al. 2019). Além disso, a caracterização experimental da alvenaria existente continua a ser considerada uma tarefa desafiadora devido ao grande número de combinações possíveis de materiais constituintes, comportamentos de mecanismos mecânicos complexos e as dificuldades relacionadas às técnicas de amostragem e ensaios (Marastoni et al. 2016).

No caso dos elementos das construções do património cultural, é difícil obter esses dados através de um estudo experimental, porque a extração de amostras das estruturas existentes dos edifícios raramente é permitida, porque os estudos não podem ser intrusivos, nem afetar a sua integridade estrutural e identidade histórica (Ludovico-Marques, Chastre, and Vasconcelos 2012; Chastre and Ludovico-Marques 2018). Quando é permitido, é restrito a

quantidades muito reduzidas. Assim, os parâmetros do material devem ser cuidadosamente selecionados para avaliar a partir de ensaios realizados em um pequeno número de amostras ou de ensaios não destrutivos (*NDT*) realizados no local (Domede, Parent, and Sellier 2017; Chastre and Ludovico-Marques 2018). Ensaios não destrutivos, como ultra-sons, permitem estimar as características mecânicas dos blocos de calcário através de uma de correlação empírica (Kahraman 2001; Moradian and Behnia 2009) e também podem ser utilizados na determinação das propriedades mecânicas da alvenaria (Parent, Domede, and Sellier 2017).

Além disso, os procedimentos de amostragem devem ser sempre mínimos no caso de edifícios históricos devido ao seu valor como património cultural. Uma solução possível é oferecida pelos ensaios parcialmente destrutivos (*MDT*). Recentes investigações, mostraram o grande potencial dos ensaios parcialmente destrutivos (*MDT*) para a avaliação do comportamento à compressão em edifícios de alvenaria existentes e históricos, consistindo na extração de amostras (carotes) cilíndricas de reduzidas dimensões, sendo as mesmas submetidas a ensaios destrutivos em laboratório (Marastoni et al. 2016; Pelà et al. 2016; Pelà, Roca, and Benedetti 2016; Segura et al. 2019). Os ensaios à compressão de argamassas em edifícios históricos são problemáticos (M Drdácý et al. 2008; Miloš Drdácý 2011). A amostragem e os subsequentes ensaios da argamassa existente são definitivamente mais desafiadores do que a execução das atividades relevantes nos blocos devido às dificuldades associadas à extração de amostras de argamassa não perturbadas (Pelà, Roca, and Aprile 2018). De forma, a avaliar a resistência da argamassa, investigadores como (Pelà, Roca, and Aprile 2018) estudaram a possibilidade de combinar ensaios diferentes parcialmente destrutivos (*MDT*) in situ e laboratoriais e (Marastoni et al. 2017) apresentaram uma nova técnica de (*MDT*) denominada ensaio de penetrómetro de torque (TPT). Foram utilizadas ao longo dos anos, diferentes combinações de técnicas de ensaio para a caracterização mecânica de estruturas históricas, tais como (Lombillo et al. 2013) que combinaram ensaios não destrutivos e parcialmente destrutivos (*NDT* e *MDT*) para realizar estudo experimental preliminar de um palácio e (Sýkora et al. 2018) que combinaram ensaios destrutivos e não destrutivos (*NDT* e *DT*) no estudo de estruturas históricas de alvenaria de pedra e argila.

Alguns estudos experimentais foram realizados em provetes com dimensões reais como os seguintes: para caracterização física e ensaios de compressão de paredes de alvenaria de pedra em granito de pano simples (C. Almeida et al. 2012), no estudo do comportamento

sísmico global de edifícios de alvenaria de pedra e eficácia de soluções de reforço que relataram uma melhoria no desempenho sísmico (Senaldi et al. 2014; Magenes et al. 2013), no estudo do comportamento de fora do plano na fachada de alvenaria de granito (Costa et al. 2012), no comportamento no plano de paredes de alvenaria de granito não reforçadas (Gao and Chen 2018) e na avaliação da estabilidade de paredes de contenção de xisto (Colas, Morel, and Garnier 2010).

No entanto, campanhas de ensaios utilizando provetes com dimensões reais costumam ser muito caras (Knox, Dizhur, and Ingham 2018) para serem realizados, e em alguns casos, impraticáveis devido às dificuldades associadas à extração de amostras de com maiores dimensões (D García et al. 2011), o seu transporte para o laboratório pode ser problemático e pode conduzir a danos adicionais causados às amostras durante o seu manuseio e transporte (Pinho and Lúcio 2017), existindo ainda o risco de destruição de equipamentos em caso de colapso (Mohammed, Hughes, and Mustapha 2011; Mohammed and Hughes 2011). Como alternativa, os ensaios utilizando provetes de escala reduzida são atraentes, porque são mais rápidos e baratos que os ensaios em grande escala ou à escala real (Laefer et al. 2011). Pesquisas como (Mohammed, Hughes, and Mustapha 2011) e (Mohammed and Hughes 2011), compararam a resistência à compressão da alvenaria de um protótipo em três escalas diferentes (um meio, um quarto e um sexto de modelos à escala). Os resultados não apresentaram uma diferença significativa entre as resistências à compressão do protótipo e do provete à escala 1/2, mas apresentaram um aumento na resistência à compressão para o modelo de escala 1/4 e de 1/6. Contudo (da Porto et al. 2005) descobriu que provetes de alvenaria com juntas com camadas mais finas (1,3 mm) eram 20% mais resistentes na compressão quando comparados a provetes com juntas mais espessas (12 mm). Sugerindo que o modelo de alvenaria pode apresentar uma maior resistência à compressão devido apenas à menor espessura das juntas (Mohammed and Hughes 2011). No entanto, estudos como (Knox, Dizhur, and Ingham 2018) obtiveram resultados de ensaios que indicam que as mudanças na escala tiveram influência mínima na resistência à compressão nos blocos e provetes da alvenaria, (Hughes and Kitching 2000) apresentaram evidências de que modelos à escala são um instrumento adequado para investigar o comportamento de alvenaria estrutural e (Egermann, R., Cook, D. & Anzani 1991) chegaram a conclusões que indicam que a alvenaria pode ser razoavelmente simulada através de modelos à escala em relação aos modos de fendilhação e resistência máxima se materiais similares forem usados.

Diversos autores como (David García et al. 2012; G. Vasconcelos and Lourenço 2009; Rao, Reddy, and Jagadish 1997; Augenti and Parisi 2010; Milosevic et al. 2013), têm utilizado em ensaios provetes de pequena escala devido aos motivos mencionados anteriormente. Todavia, a investigação experimental é uma fonte indispensável de informações que permite o desenvolvimento e calibração de ferramentas numéricas capazes de prever o comportamento mecânico da alvenaria. Além disso, a reabilitação de edifícios de alvenaria antigos é um tópico de grande interesse, dada a crescente necessidade de proteção, restauro de segurança e manutenção de condições de serviço desse importante património cultural espalhado por todo o mundo (C. Almeida et al. 2012). A conservação, reparação e o reforço dos edifícios de alvenaria históricos devem preservar sua autenticidade e garantir a sua estabilidade estrutural (Luso and Lourenço 2016).

No que diz respeito à alvenaria de calcário, alguns estudos foram realizados, entre os quais: (Vintzileou and Tassios 2002) que investigaram o efeito da injeção de caldas à base de cimento na parede, efetuando ensaios experimentais para a compressão vertical ou diagonal em muretes de alvenaria. Os resultados mostraram uma melhoria drástica das características mecânicas, aumentando a resistência à compressão dos muretes entre 50% a 200% em relação à inicial. (B. Silva et al. 2014) conduziu uma campanha experimental à compressão simples e cíclica em painéis de alvenaria de pedra de três panos em duas escalas (1:1 e 2:3), tanto na condição original como após serem consolidadas com injeções de caldas à base de cal hidráulica e natural. Apresentou uma calibração de modelos analíticos para prever a resistência à compressão da alvenaria de três panos antes e após a consolidação com injeção das caldas.

(Pina-Henriques 2005) levou a cabo uma investigação experimental sobre o comportamento ao corte e compressão de muretes de alvenaria de três panos de alvenaria de grandes dimensões. O autor realizou ensaios de compressão individualmente aos panos externos e internos, bem como nos muretes completos. Os resultados obtidos em campanhas experimentais foram comparados com modelos numéricos e métodos analíticos simples, no que diz respeito à resistência à compressão da parede, exibindo uma boa concordância entre os mesmos.

(Pinho and Lúcio 2017) conduziu uma pesquisa sobre a o efeito da evolução da profundidade de carbonatação das argamassas ao longo do tempo de paredes de alvenaria irregular em

termos de características mecânicas nos ensaios de compressão e ao corte. Propuseram também uma fórmula para estimar a profundidade de carbonatação das argamassas e a resistência à compressão de alvenaria em função do tempo.

(Meimaroglou and Mouzakis 2018) realizaram uma investigação experimental das propriedades mecânicas da alvenaria de três panos construídas com calcário e argamassas de argila comprimida. Concluindo que o formato dos blocos de pedra, a sua resistência à tração e à flexão e a presença de singularidades no calcário provaram ter um grande impacto no mecanismo de colapso.

(Milosevic et al. 2013) realizaram uma campanha experimental para caracterizar o comportamento mecânico de paredes de alvenaria de pedra irregular. Provetes de alvenaria foram construídos usando dois tipos de argamassa (cal aérea e hidráulica). Para avaliar os parâmetros mecânicos mais importantes necessários para a modelação numérica, foram realizados ensaios de compressão axial, compressão diagonal e ensaios triplos.

A resistência à compressão e o módulo de elasticidade da alvenaria são os parâmetros mais importantes utilizados no dimensionamento das alvenarias (Ludovico-Marques, Chastre, and Vasconcelos 2012; C, Tensing, and R 2013; Zahra and Dhanasekar 2016). A resistência à compressão é necessária para obter a capacidade de carregamento suportado por estruturas de alvenaria (Drougkas, Roca, and Molins 2015). Devido a estas restrições e exigências, torna-se necessário considerar diferentes formas de previsão das propriedades mecânicas de uma alvenaria, através de métodos analíticos simples baseados nos parâmetros básicos dos materiais constituintes, como a resistência à compressão da argamassa e dos blocos.

Ao longo dos anos, diversas tentativas foram feitas para criar e desenvolver modelos preditivos baseados em resultados experimentais ou na teoria. Modelos simples foram desenvolvidos para prever a resistência à compressão da alvenaria (Gumaste et al. 2007; Kaushik et al. 2007; C, Tensing, and R 2013; Kumavat 2016) considerando parâmetros como a resistência à compressão da argamassa (Hendry 1998) e dos blocos (Hendry 1998). Além disso, critérios semelhantes têm sido utilizados para propostas de dimensionamento em códigos de referência como o Eurocode 6 (EC-Standards 2005) e as *British Standards* (Standard 1998). Alguns autores também consideraram parâmetros adicionais em modelos como fração volumétrica da unidade de alvenaria e argamassa (Thaickavil and Thomas

2018), a relação altura/espessura (Thaickavil and Thomas 2018) e número de fiadas da alvenaria (Dymiotis and Gutleederer 2002).

2.3. ARGAMASSA

A caracterização de uma argamassa antiga, utilizada centenas de anos atrás em construções de alvenaria, é uma tarefa muito complicada. Em muitos casos, a possibilidade de extrair amostras adequadas é muito cara e a quantidade necessária de material para desenvolver uma campanha experimental nem sempre está disponível (David García et al. 2012).

No trabalho de restauro, a escolha dos materiais, textura, cor e decoração dos revestimentos de acabamento de um edifício deve ser influenciada por requisitos de funcionalidade, dimensionamento do edifício, climáticos, localização e disponibilidade de recursos locais. Geralmente, por razões de compatibilidade, argamassas à base de cal são recomendadas (M. R. Veiga et al. 2017).

As composições com traço de cal/areia de 1:3 parecem ter valores equilibrados nas principais características (R. Veiga and Santos 2015). Além disso, o traço de 1:3 de cal/areia e cal hidráulica natural foram utilizados por diversos autores na literatura para realizar as suas campanhas experimentais, tais como (B. Silva et al. 2014; Milosevic et al. 2013; Valluzzi, Porto, and Modena 2001; Drougkas, Roca, and Molins 2016; Marastoni et al. 2017).

A argamassa adotada é composta por um único ligante de cal hidráulica natural NHL 5, classificado de acordo com a EN 459-1 (European Committee for standardization 2010). O traço volumétrico utilizado de ligante/areia foi de 1/3, seguindo as proporções de argamassas tradicionais (Milosevic et al. 2013; Pelà, Roca, and Benedetti 2016) e uma razão água/ligante igual a 0,56. A areia utilizada na argamassa é muito semelhante à "Areia de Corroios", utilizada nas argamassas da Idade Média. Hoje em dia esta areia é utilizada em argamassas aplicadas na reabilitação de edifícios patrimoniais, tais como o Castelo de São Jorge, em Lisboa.

2.4. PEDRA

As pedras naturais constituem juntamente com as madeiras, dos mais antigos materiais de construção: um dado que pode contribuir para esta constatação resulta destes materiais poderem ser aplicados praticamente sem alteração do seu estado natural. Desde as

construções megalíticas até às construções atuais, a pedra tem sido o material mais usado e o de maior duração (Moreira 2009).

Quando os trabalhos de pedra em edifícios históricos são investigados, a avaliação da resistência dos blocos de pedras naturais trata-se de uma questão fundamental (Vasanelli et al. 2017).

Vários autores mostraram que as propriedades mecânicas, como resistência à compressão e módulo de elasticidade, estão relacionados com as propriedades físicas como porosidade densidade (Ludovico-Marques, Chastre, and Vasconcelos 2012; Přikryl 2001; Tuğrul 2004; Yusof and Zabidi 2016). O ensaio de compressão uniaxial nos provetes de pedra é um método importante para determinar a resistência da pedra. O comportamento mecânico da pedra pode ser avaliado através dos correspondentes diagramas de tensão-deformação completos (Ludovico-Marques, Chastre, and Vasconcelos 2012; Fairhurst and Hudson 1999; Pan, Feng, and Hudson 2006).

Em pedras naturais, as heterogeneidades microscópicas aumentam a variação dos resultados obtidos nos ensaios de laboratoriais e a previsão do comportamento desses materiais é mais difícil quando comparada ao comportamento de materiais fabricados pelo homem (Ba et al. 2008).

A pedra estudada é um calcário Jurássico, às vezes fossilífero, extraído da zona portuguesa de Porto de Mós do maciço calcário estremenho

3. Trabalho Experimental

3.1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho aborda, em primeiro lugar, a caracterização mecânica e física dos componentes da alvenaria: pedra natural e argamassa. Posteriormente foi também caracterizado o comportamento mecânico de três conjuntos de provetes de alvenaria de calcário com 4, 6 e 8 fiadas.

No que se refere aos provetes de pedra natural, na caracterização mecânica foram realizados ensaios de compressão uniaxial, na caracterização física foram efetuados ensaios de porosidade e capilaridade.

Em relação à argamassa, na caracterização mecânica foram realizados ensaios de compressão uniaxial e flexão, na caracterização física foram efetuados ensaios de porosidade e consistência.

Para o estudo do comportamento mecânico foram realizados ensaios de compressão uniaxial em provetes de alvenaria de calcário.

Os ensaios foram realizados no Laboratório do Departamento de Engenharia civil da Escola Superior de Tecnologia do Barreiro do Instituto Politécnico de Setúbal, com exceção dos ensaios de resistência à compressão e flexão dos provetes de argamassa que foram realizados no Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DA PEDRA

A qualidade das pedras é avaliada através das suas propriedades físicas e do seu comportamento mecânico (Goodman, Wiley, and Moye 1989).

A pedra utilizada no presente estudo é um calcário jurássico, às vezes fossilífero, extraído da zona portuguesa de Porto de Mós, no Maciço Calcário Estremenho (Maciço Estremenho).

Foram utilizados provetes prismáticos com dimensões de aproximadamente $50 \times 50 \times 100$ mm³, correspondendo a uma relação entre altura e comprimento de 2, de forma a seguir

recomendações sobre as dimensões dos provetes (EN NP 1936 2008; RILEM 1980; Fairhurst and Hudson 1999).

Os provetes foram cortados com a Máquina de corte modelo BS 650 (Figura 3.2-1) e as medições das dimensões foram realizadas com a utilização de um Paquímetro digital (Figura 3.2-2) com precisão de 0,01 mm. Os valores das medições efetuadas nos provetes estão presentes no apêndice na Tabela 4.7-4.



Figura 3.2-1 – Máquina de corte utilizada para o corte de provetes.



Figura 3.2-2 – Medição de provete utilizando o Paquímetro digital.

De forma, a ser possível uma correlação direta entre as propriedades físicas e mecânicas, foram utilizados os mesmos provetes para os ensaios de caracterização física (porosidade e capilaridade) e caracterização mecânica (ensaio da determinação da resistência á compressão).

3.2.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

3.2.1.1. DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE ABERTA E MASSA VOLÚMICA

A determinação da densidade e porosidade aberta foi realizada em 9 provetes, os ensaios foram realizados de acordo com as recomendações do *RILEM* (RILEM 1980) e *EN 1936* (EN NP 1936 2008). Estas normas e recomendações sugerem a utilização de um sistema vácuo para saturar as amostras. Os provetes foram saturados por vácuo. O equipamento experimental utilizado é apresentado na Figura 3.2-3. A pesagem hidrostática foi realizada em provetes saturados depois dos vazios terem sido preenchidos por água. O volume de poros acessíveis à água foi então determinado pela utilização do princípio de Arquimedes, que permite calcular a porosidade e as densidades aparentes e reais.

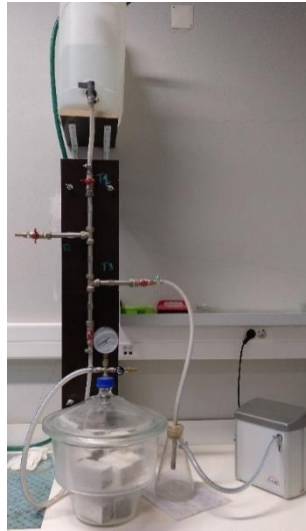


Figura 3.2-3 – Vista global do equipamento.

Para a obtenção dos resultados da massa volúmica aparente (ρ_b), massa volúmica real (ρ_r) e porosidade aberta (P_o), foram utilizadas as seguintes equações (1,2,3):

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \times 10^3, \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (1)$$

$$\rho_r = \frac{m_d}{m_d - m_h} \times 10^3, \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (2)$$

$$P_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 10^2, \text{ \%} \quad (3)$$

Sendo:

m_d - Massa seca, [kg];

m_s - Massa saturada, [kg];

m_h – Massa de pesagem hidrostática, [kg].

3.2.1.2. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA (CAPILARIDADE)

O ensaio do coeficiente de absorção de água por capilaridade foi realizado nos mesmos provetes utilizados nos ensaios anteriores. A determinação do coeficiente de absorção de água da capilaridade foi realizada de acordo com as recomendações da NP EN 1925 (NP EN 1925: 2000 2000). Na Figura 3.2-4, é apresentado o recipiente onde os provetes foram imersos em água desionizada a uma altura constante de aproximadamente 3 ± 1 mm. O recipiente foi coberto de forma a evitar a evaporação dos provetes húmidos. O coeficiente de absorção de água por capilaridade (C) em $[\text{kg}/(\text{m}^2 \times \sqrt{h})]$, foi determinado a partir da regressão linear que passa pela origem do gráfico da massa de água absorvida $[\text{kg}]$ por unidade de área $[\text{m}^2]$ em função da raiz quadrada do tempo $[\sqrt{h}]$.



Figura 3.2-4 – Recipiente com provetes cobertos.

Para calcular a quantidade de água absorvida (m_i) até um determinado instante (t) foi utilizada a seguinte equação (4):

$$m_t = \frac{m_i - m_d}{A} \times 10^3, [\text{kg}/\text{m}^2] \quad (4)$$

Sendo:

m_i - Massa para os tempos (i) determinados, $[\text{kg}]$;

m_d - Massa seca, $[\text{kg}]$;

A - área da base do provete em contacto com a água, $[\text{m}^2]$.

3.2.2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Os ensaios de compressão uniaxial nos provetes de calcário foram realizados utilizando uma prensa servo-controlada Servosis, modelo MÊS-300, com capacidade de carga de até 3000 kN e curso de pistão de 100 mm.

Os ensaios foram realizados de acordo com as recomendações (*SM for the Complete Stress-Strain Curve for Intact Rock in Uniaxial Compression – 1999*) (Fairhurst and Hudson 1999) e sob controlo de deslocamentos com uma taxa de deslocamento axial constante de 10 $\mu\text{m/s}$. O deslocamento axial foi medido através de quatro *LVDTs* (com um campo linear de 25 mm e uma resolução de 500×10^{-6} /mm), cada um fixado próximo aos cantos do provete, entre os pratos inferior e superior da prensa (Figura 3.2-5).

A medida de deslocamento médio foi calculada a partir dos deslocamentos medidos nos quatro *LVDTs* (Figura 3.2-6). Os diagramas de tensão-deformação foram obtidos considerando a medida aproximada de deslocamento médio entre os pratos da prensa.

Antes da realização dos ensaios à compressão, os provetes de pedra foram secos na estufa ventilada à temperatura (70 ± 5) °C até atingir massa constante e após foram armazenados à temperatura de (20 ± 5) °C até que fosse atingido o equilíbrio térmico.

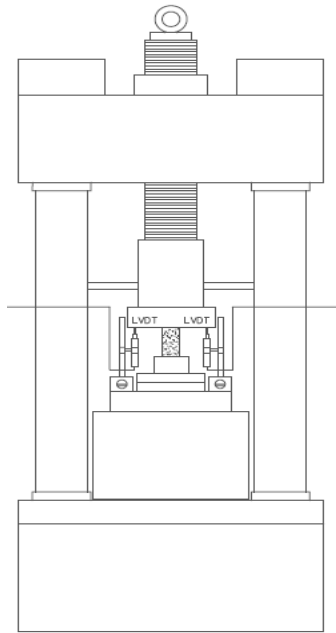


Figura 3.2-5 – Ilustração esquemática de prensa com LVDTs dispostos e bloco.

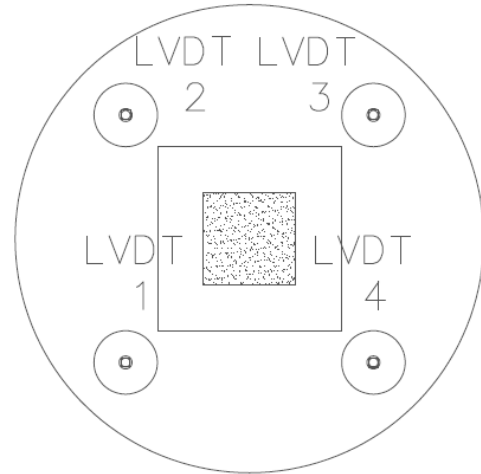


Figura 3.2-6 – Disposição Adotada na colocação dos LVDTs.

Para o cálculo das tensões e extensões foram utilizadas as seguintes expressões (5) e (6):

Para o cálculo de tensão (σ):

$$\sigma = \frac{F}{A}, \text{ [MPa]} \quad (5)$$

Sendo:

F - Força de compressão aplicada no provete, [kN];

A - área da secção transversal de cada provete, [m²].

Para o cálculo de extensão (ϵ):

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (6)$$

Sendo:

Δl - variação de comprimento axial medida, [mm];

l_0 - comprimento axial inicial do provete, [mm].

Os valores utilizados para o cálculo da área da secção transversal, comprimento axial inicial de cada provete encontram se no apêndice em Tabela 4.7-5.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA

Para a caracterização da argamassa, foram realizados ensaios à argamassa em estado fresco e endurecido.

A preparação da argamassa e produção dos provetes (Figura 3.3-1) foi realizada segundo a norma *EN 1015-2* (BSI 2004), tendo sido ajustado o tempo de amassadura de forma a obter uma mistura homogênea.

Os moldes foram cobertos com folhas de polietileno e os provetes foram desmoldados (Figura 3.3-2) aos 3 dias de idade. Os provetes de argamassa foram armazenados a uma temperatura e humidade controladas (de aproximadamente 25 °C e *RH* 50%). durante o restante período de cura (até perfazer os 28 dias de idade).

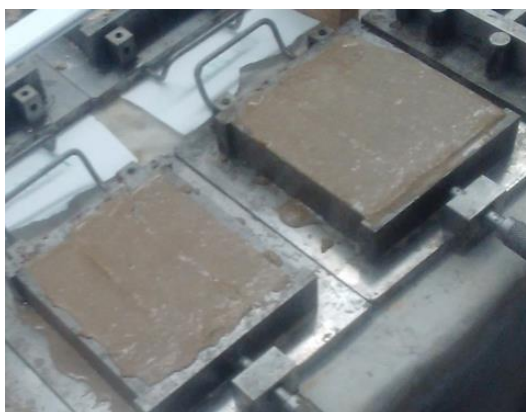


Figura 3.3-1 – Moldes prismáticos moldados.



Figura 3.3-2 – Provetes desmoldados.

3.3.1. ARGAMASSA EM ESTADO FRESCO

Os ensaios na argamassa foram realizados em estado fresco e endurecido. O ensaio de espalhamento (ou consistência) da argamassa fresca (Figura 3.3.1-1, Figura 3.3.1-2) conduzido de acordo com a *EN 1015-3: 2004* (EN 1015-3 2004) e foram obtidos de duas amostras recolhidas durante a construção dos provetes de alvenaria.



Figura 3.3.1-1 – Compactação de cama de argamassa.



Figura 3.3.1-2 – Medição do espalhamento com craveira.

O valor de espalhamento médio (%) foi calculado, utilizando a seguinte expressão (7):

$$\text{Espalhamento} = \frac{D-100}{100} \times 100, [\%] \quad (7)$$

Sendo:

D - Valor médio de medição dos diâmetros marcados na mesa [mm].

3.3.2. ARGAMASSA EM ESTADO ENDURECIDO

3.3.2.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

3.3.2.1.1. DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE ABERTA E MASSA VOLÚMICA

A determinação da densidade e porosidade aberta foi realizada em 6 provetes resultantes dos ensaios de caracterização mecânica, os ensaios foram realizados de acordo com as recomendações do *RILEM* (RILEM 1980) e *EN 1936* (EN NP 1936 2008). O Procedimento

experimental foi semelhante ao realizado para a pedra natural, com exceção da obtenção do valor de massa seca (m_d). A pesagem que foi tida em consideração para massa seca (m_d), foi realizada após a pesagem hidrostática (m_h) (Figura 3.3.2-1) e pesagem de massa saturada (m_s) dos provetes, sendo os provetes novamente submetidos a uma secagem à temperatura de (70 ± 5) °C até massa constante.



Figura 3.3.2-1 – Pesagem hidrostática do provete.

3.3.2.2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Seis provetes de argamassa com dimensões $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, foram submetidos aos ensaios de Resistência à tração por flexão e Resistência compressão aos 28 dias de cura. De modo a garantir um processo de cura adequado, os provetes de argamassa foram armazenados a um temperatura e humidade controladas (de aproximadamente 25 °C e RH 50%) durante o período de cura. Antes dos ensaios de resistência, os provetes foram submetidos a uma secagem até ser atingida a massa constante, em estufa ventilada a (60 ± 5) °C.

Os ensaios de resistência à compressão e resistência à tração por flexão (C580 - 02 (Method 2012)) foram realizados na máquina de ensaios Zwick Z050 (FCT Nova), com uma carga máxima de teste de 50 kN. Os equipamentos utilizados nos ensaios são exibidos na Figura 3.3.2-2 e Figura 3.3.2-3, para os ensaios de resistência à compressão e resistência à flexão, respetivamente. Os ensaios mecânicos foram realizados em argamassas com a mesma taxa

de deslocamento axial constante (10 µm/s) usada nos ensaios realizados em provetes de pedra.

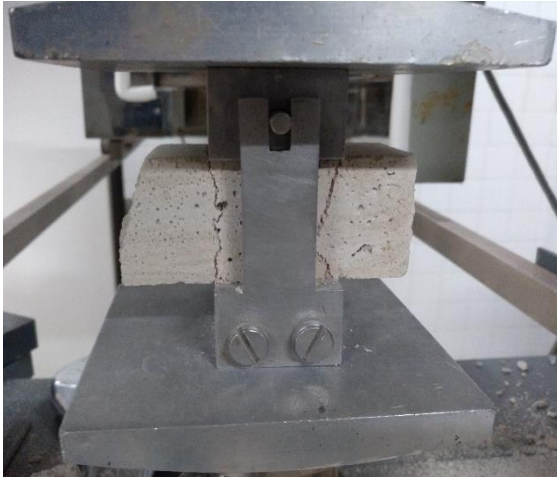


Figura 3.3.2-2 – Ensaio à compressão em provete de argamassa.



Figura 3.3.2-3 – Ensaio à flexão em provete de argamassa (com vão especificado).

Para a determinação de resistência à flexão (σ_f), foi utilizada a seguinte expressão (8) de cálculo da tensão máxima à flexão simples, em secções retangulares:

$$\sigma_f = \frac{3}{2} \times \frac{F_f \times l}{b \times d^2}, \text{ [MPa]} \quad (8)$$

Sendo:

F_f - força de rotura à flexão [N];

l - Distância entre apoios [mm];

b - Largura do provete [mm];

d - Espessura do provete [mm].

Para a determinação de resistência à compressão (σ_c), foi utilizada a seguinte expressão (9):

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A}, \text{ [MPa]} \quad (9)$$

Sendo:

F_c - força de rotura à compressão [N];

A - área da secção comprimida [mm²].

3.4. CARACTERIZAÇÃO DA ALVENARIA

Um total de 9 provetes de alvenaria de pedra com um pano único aparelhado regular com juntas foi construído. As dimensões dos provetes foram definidos com base em (BS EN 1052-1: 1999) (European Committee for standardization 1999). As proporções de dimensões ($75 \times 150 \times 50 \text{ mm}^3$) e formas dos blocos unitários foram estabelecidas de acordo com as dimensões e formas típicas dos blocos de uma alvenaria calcária compactada representativa da área de Perugia (Borri et al. 2015).

Para a definição das dimensões foram ainda considerados outros fatores como: características e limitações dos equipamentos disponíveis para a realização dos ensaios e dimensões dos blocos originais de pedra, tendo sido utilizada uma dimensão que permitiu otimizar a utilização da pedra disponível (reduzindo ao máximo o desperdício da matéria prima).

Foram preparados 3 provetes de alvenaria, cada um dos 3 conjuntos com diferentes números de fiadas com as seguintes dimensões (ilustradas na Figura 3.4-1): alturas de 250 mm, 370 mm e 490 mm, correspondentes a 4, 6 e 8 fiadas, respetivamente, comprimento de 310 mm e largura de 75 mm.

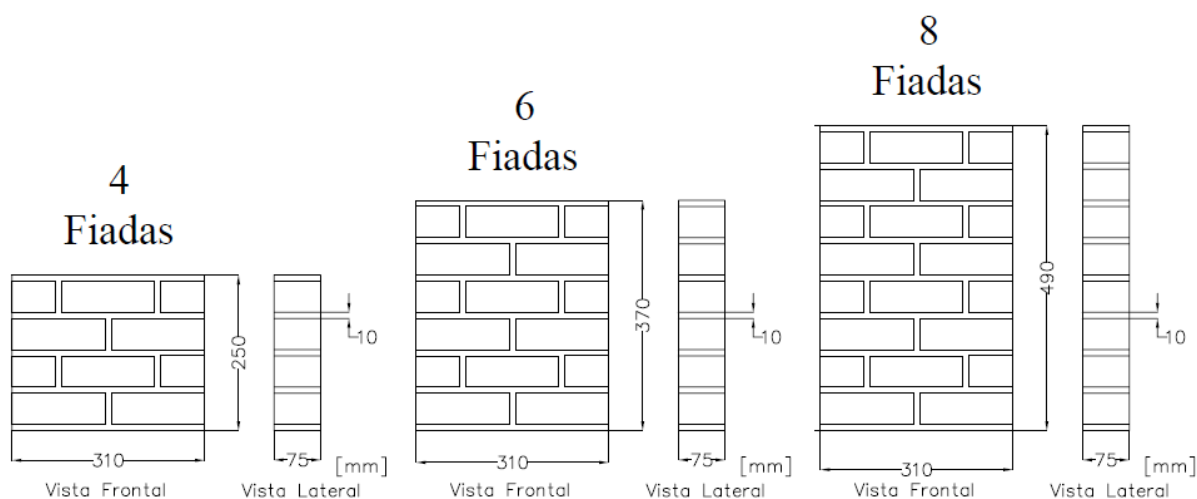


Figura 3.4-1 – Representação com as dimensões adotadas para os provetes de alvenaria.

Para todos os provetes, a espessura adotada para as juntas de argamassa foi de aproximadamente 10 mm, como foi também adotada em vários trabalhos relevantes (G. Vasconcelos and Lourenço 2009; Drougkas, Roca, and Molins 2015; Kaushik et al. 2007; Thaickavil and Thomas 2018; Kumavat 2016; Parisi, Balestrieri, and Asprone 2016; Augenti and Parisi 2010).

Na Figura 3.4-2 é exibida a cofragem utilizada na construção, projetada e especialmente construída para o fabrico dos provetes de alvenaria, e na Figura 3.4-3 é exibida a cofragem juntamente com o conjunto de provetes de alvenaria de 6 fiadas após terem sido construídos. Os restantes conjuntos de provetes foram construídos utilizando a mesma cofragem.

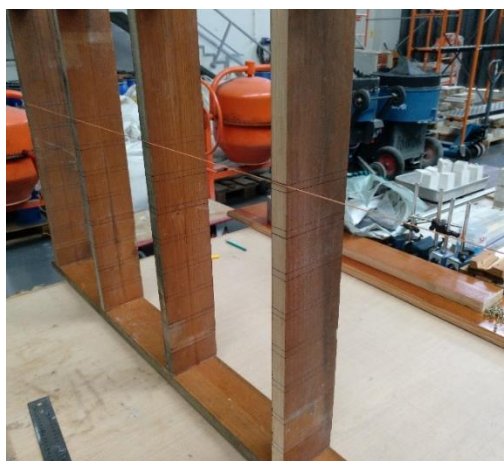


Figura 3.4-2 – Cofragem utilizada com marcações das dimensões pretendidas.



Figura 3.4-3 – Cofragem com provetes de alvenaria.

Os três primeiros dias após a construção dos provetes ficaram cobertos com folhas de polietileno e foram mantidos na cofragem (Figura 3.4-4). Após esse período, foram descofrados, deixados descobertos e armazenados em condições de laboratório (de aproximadamente de 25° C e RH 50%) (Figura 3.4-5) atingir um período de cura de 28 dias.



Figura 3.4-4 – Provetes de alvenaria durante período de cura.



Figura 3.4-5 – Provetes de alvenaria após serem descofrados.

3.4.1. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Os provetes de alvenaria foram ensaiados sob carregamento de compressão uniaxial aos 28 dias. Os ensaios de compressão uniaxial dos provetes de alvenaria foram realizados com recurso a uma prensa servo-controlada Servos, modelo ME-404CI, com capacidade de carga dinâmica de até 600 kN e com capacidade de carga estática de 360 kN.

Os ensaios foram realizados sob a mesma taxa de controlo de deslocamento axial constante utilizada nos provetes de pedra e argamassa, ou seja 10 $\mu\text{m/s}$.

De forma a ser induzida uma carga uniforme foi aplicada sob placas de aço rígidas (S355J2 + N com 2 centímetros da espessura), conectadas à parte superior e inferior da prensa utilizada no ensaio.

A medição da deformação dos provetes durante os ensaios foi registrada através de quatro LVDTs (com um campo linear de 25 mm e uma resolução de 500×10^{-6} mm) medindo os deslocamentos na placa superior próximo de cada canto do provete. A medição aproximada do deslocamento vertical dos provetes de alvenaria é obtida através da média dos deslocamentos medidos pelos LVDTs entre as placas (Figura 3.4.1-1 e Figura 3.4.1-2).

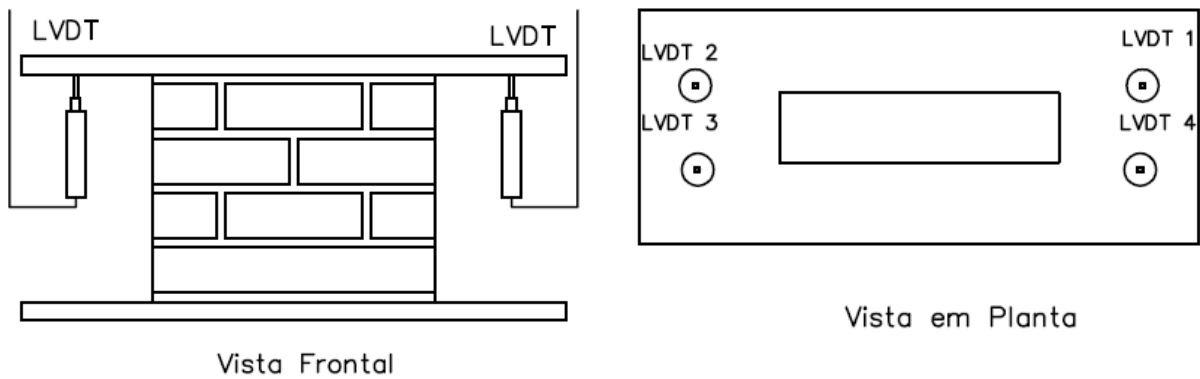


Figura 3.4.1-1 – Esquema da disposição dos LVDTs vista frontal.

Figura 3.4.1-2 – Esquema da disposição dos LVDTs vista em planta.

A tensão foi calculada com recurso à utilização da expressão (5), sendo a área considerada como a base dos provetes de alvenaria, a mesma é igual para todos os ensaios. O cálculo da extensão foi realizado com recurso à expressão (6), onde o comprimento inicial (l_0) corresponde à altura dos provetes de alvenaria (sendo variável de acordo com o número de fiadas ensaiado) e a variação de comprimento axial (Δl) é da média das medições dos LVDTs.

4. Apresentação e discussão de resultados

4.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios experimentais, descritos no capítulo anterior. Os resultados serão apresentados seguindo a mesma ordem de apresentação da campanha experimental. Inicialmente, serão apresentados os valores obtidos na caracterização física e mecânica da pedra e argamassa. Por último, serão apresentados os resultados dos provetes de alvenaria, os valores são analisados e é efetuada uma análise global.

4.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA PEDRA

4.2.1. POROSIDADE E MASSA VOLÚMICA

Os valores obtidos da massa seca (m_d), massa hidrostática (m_h), massa saturada (m_s) e porosidade aberta (P_o), de massa volúmica aparente (ρ_b) e massa volúmica real (ρ_r) de cada provete, médios e coeficientes de variação são apresentados na Tabela 4.2-1.

Os valores médios obtidos nos ensaios foram os seguintes: 16,0% de porosidade aberta (p_o) com um coeficiente de variação (CoV=5,0%), 2264,9 kg/m³ de massa volúmica aparente (ρ_b) com um coeficiente de variação (CoV=1,0%) e 2696,3 kg/m³ de massa volúmica real (ρ_r) com um coeficiente de variação (CoV=0,1%).

Identificação dos provetes	m_d	m_h	m_s	P_o	ρ_b	ρ_r
	[g]	[g]	[g]	[%]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
1	574,1	361,1	612,9	15,4	2280,0	2695,4
2	571,7	359,6	611,0	15,7	2273,8	2695,8
3	576,3	362,3	615,6	15,5	2275,7	2693,4
4	577,4	363,7	614,9	14,9	2298,3	2702,0
5	563,4	354,7	604,9	16,6	2252,1	2699,8
6	576,1	362,7	614,0	15,1	2292,0	2699,3
7	541,3	340,3	581,7	16,7	2242,5	2693,4
8	537,9	338,2	578,8	17,0	2235,5	2693,2
9	538,9	338,9	580,1	17,1	2234,5	2694,8
Média	-	-	-	16,0	2264,9	2696,3
CoV (%)	-	-	-	5,0	1,0	0,1

Tabela 4.2-1 – Valores obtidos no ensaio da determinação da porosidade aberta e massa volúmica dos provetes de pedra.

4.2.2. CAPILARIDADE

Os valores obtidos das massas para determinados instantes de tempo, coeficientes de absorção de água (C) para cada provete e valores médios de coeficiente de absorção de água (C) coeficiente de variação (CoV) são apresentados na Tabela 4.2-2. O valor médio obtido de coeficiente de absorção de água (C) foi de $4,5 \text{ m}^2 \times \text{h}^{0,5}$ com coeficiente de variação (CoV=9,3%). O coeficiente de absorção da água por capilaridade representa o declive da reta tangente ao primeiro troço do gráfico de absorção de água, e foi obtido utilizando uma linha de tendência linear para obter o declive como é possível observar na Figura 4.2-1 (exemplo provete 1), todas as curvas traçadas com linhas de tendência encontram-se presentes no apêndice (Figura 4.7-1- Figura 4.7-9).

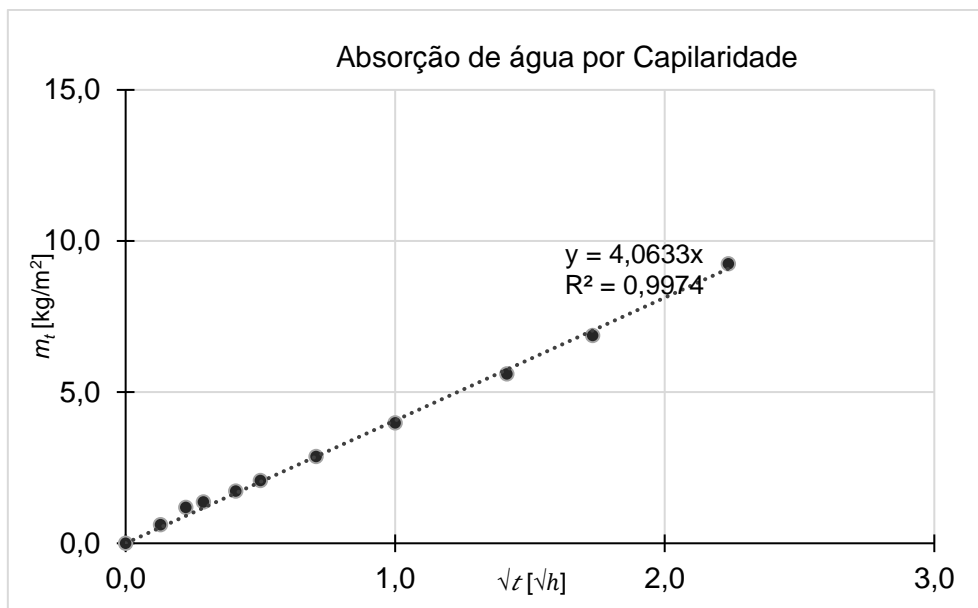


Figura 4.2-1 – Curva de absorção de água por capilaridade do provete 1 com linha de regressão linear.

tempo [min]	Identificação dos provetes								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Massa dos Provetes no instante t [g]								
0	574,06	571,65	576,28	577,35	563,38	576,06	541,26	537,94	538,90
1	575,60	573,19	578,38	579,41	565,00	578,20	543,13	539,68	541,37
3	577,03	574,66	579,92	580,90	566,50	578,61	543,66	540,15	542,01
5	577,50	575,07	580,39	581,30	567,58	579,54	544,33	540,59	542,88
10	578,38	575,86	581,08	581,93	567,30	580,12	545,16	541,37	543,56
15	579,25	576,83	582,12	582,56	568,36	581,00	546,19	542,34	544,71
30	581,26	579,07	584,51	584,68	570,87	583,03	548,70	544,80	547,54
60	584,02	582,10	587,74	587,62	574,46	585,92	552,38	548,42	551,60
120	588,09	586,47	592,15	591,81	579,78	590,11	557,91	553,81	557,55
180	591,26	589,92	595,45	594,97	583,89	593,25	562,32	558,12	562,28
300	597,22	596,46	601,72	600,57	591,50	599,20	570,68	566,22	571,08
1440	610,01	608,20	612,73	611,80	601,89	610,22	579,23	575,84	577,66
2880	610,22	608,40	612,93	612,01	602,13	610,46	579,46	576,05	577,89
4320	610,39	608,57	613,11	612,18	602,30	610,64	579,65	576,25	578,11
5760	610,50	608,67	613,21	612,28	602,42	610,73	579,76	576,36	578,22
10080	610,78	608,93	613,56	612,59	602,77	611,04	580,11	576,69	578,61
C [kg/(m²·h^{0,5})]	4,07	4,23	4,47	4,08	4,70	3,97	4,80	4,60	5,34
Média	4,5								
CoV (%)	9,3								

Tabela 4.2-2 – Valores obtidos no ensaio da determinação do coeficiente de absorção de água (capilaridade) dos provetes de pedra.

4.3. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA PEDRA

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão realizados aos provetes de pedra, valores médios e coeficientes de variação, estão resumidos na Tabela 4.3-1. Os diagramas de tensão-deformação registrados a partir dos ensaios estão representados na Figura 4.3-1.

O valor médio obtido para a resistência à compressão (σ_{max}) é de 36,5 MPa, com um coeficiente de variação de 23,3% superior a 15%, mostrando a existência de uma dispersão significativa nos resultados. Um facto importante é que a resistência à compressão das pedras varia entre uma gama de valores de 23,53 MPa a 51,18 MPa, o que significa que existem provetes de pedra com praticamente o dobro da resistência de outros provetes, sendo evidenciada a heterogeneidade do material. Mesmo que os provetes de pedra tenham sido cortados do mesmo bloco de massa rochosa, existe sempre dispersão dos resultados experimentais. Esta dispersão pode ser o resultado da estrutura e textura não homogênea

das pedras calcárias devido às diferentes propriedades da matriz, cimento natural, veios e outras descontinuidades, fragmentos de fósseis que causam uma ampla gama de valores de resistência, deformação e limites de iniciação de fendilhação (R. Ulusay, Ö. Aydan, H. Gerçek, M.A. Hindistan 2016). Além disso, valores similares e até superiores de coeficientes de variação foram relatados para diversos tipos de pedra na literatura, entre os quais: para pedra de calcário (Pinho and Lúcio 2017) com resistência à compressão de 46 MPa e coeficiente de variação de 50%. Em arenitos (D García et al. 2011) (que também se trata de uma rocha sedimentar) com resistências à compressão de 40 MPa e 64,4 MPa e 34% e 24,33% valores de coeficiente de variação. Para pedras calcárias (Corradi, Borri, and Vignoli 2003) com resistência à compressão de 57,5 MPa e coeficiente de variação de 35% . Para granito (Muñoz, Lourenço, and Moreira 2018) com resistência à compressão de 47,3 MPa com coeficiente de variação de 37,4% e (C. Almeida et al. 2012) com resistência à compressão de 60 MPa com coeficiente de variação de 30% e módulo de elasticidade com coeficiente de variação de 30%.

Os resultados experimentais da extensão axial na rotura (ϵ_R) apresentaram um valor médio de $4,2 \times 10^{-3}$, com um coeficiente de variação de 13,4% (menor que 15%). É necessário ter em consideração que, quando se trata de materiais naturais, como pedras, as heterogeneidades microscópicas no material aumentam a variação nos resultados de ensaios de laboratório dificultando as previsões de comportamento do material em relação às de materiais fabricados pelo homem (Ba et al. 2008).

Apesar da tentativa de registrar comportamento pós-pico (tendo sido o ensaio realizado com controlo de deslocamentos), na maioria dos provetes (1, 2, 3, 5, 7 e 8), pode se verificar quedas bruscas de resistência após atingir a tensão máxima, exibindo claramente um comportamento frágil. No entanto, alguns provetes (4, 6 e 9), apresentaram um comportamento pós-pico com uma queda mais suave no diagrama de tensão.

Provetes de Calcário		
Identificação dos Provetes	σ_{max}	$\epsilon_R \times 10^{-3}$
	[MPa]	
1	45,26	4,6
2	44,14	3,8
3	51,18	4,0
4	26,00	3,4
5	23,53	4,6
6	35,76	4,3
7	32,94	5,0
8	36,21	5,2
9	33,40	5,0
Média	36,49	4,4
CoV [%]	23,3	13,4

Tabela 4.3-1 – Propriedades mecânicas dos provetes de pedra.

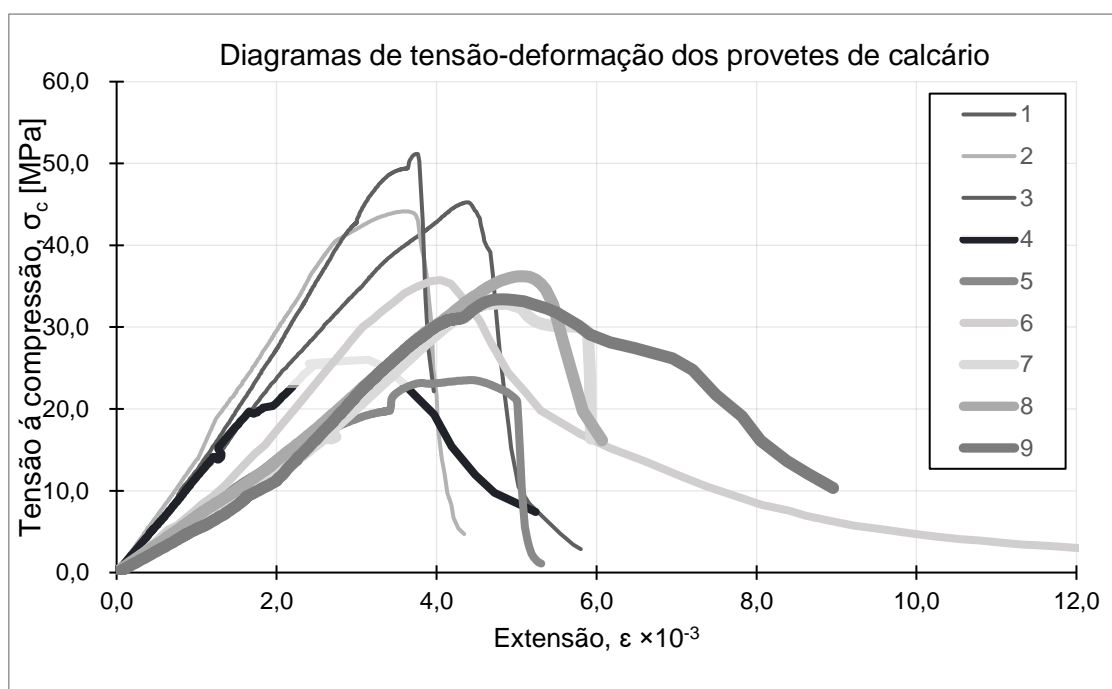


Figura 4.3-1 – Diagrama tensão-deformação dos provetes de calcário.

4.4. CARATERIZAÇÃO FÍSICA DA ARGAMASSA

4.4.1. EM ESTADO FRESCO

Os valores das medições dos diâmetros registados, o valor de espalhamento expresso em percentagem e valor médio estão presentes na Tabela 4.4-1. O valor médio de espalhamento obtido nos ensaios foi de aproximadamente 38%.

	Medição 1	Medição 2
D_1 [mm]	144,7	135,1
D_2 [mm]	136,1	137,2
D_3 [mm]	136,7	137,9
espalhamento %	39,2	36,7
Média %	38,0	

Tabela 4.4-1 – Valores obtidos nos ensaios de espalhamento da argamassa.

4.4.2. EM ESTADO ENDURECIDO

4.4.2.1. POROSIDADE E MASSA VOLÚMICA

Os valores obtidos da massa seca (m_d), massa hidrostática (m_h), massa saturada (m_s) e porosidade aberta (P_o), de massa volúmica aparente (ρ_b) e massa volúmica real (ρ_r) de cada provete, médios e coeficientes de variação (CoV) são apresentados na seguinte Tabela 4.4-2. Os valores médios obtidos nos ensaios foram os seguintes: 32,9% de porosidade aberta (P_o) (CoV=0,4%), 1765,7 kg/m³ de massa volúmica aparente (ρ_b) (CoV=0,2%) e 2632,7 kg/m³ de massa volúmica real (ρ_r) com um (CoV≈0%). Foi possível observar que a variação, representada por o coeficiente de variação foi praticamente inexistente em todas as propriedades estudadas.

Identificação dos provetes	m_d	m_h	m_s	ρ_o	ρ_b	ρ_r
	[g]	[g]	[g]	[%]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
1	237,9	147,6	282,3	32,9	2280,0	2695,4
2	235,5	146,0	279,0	32,7	2273,8	2695,8
3	245,5	152,3	291,4	33,0	2275,7	2693,4
4	208,6	129,4	247,7	33,0	2298,3	2702,0
5	224,7	139,3	267,0	33,1	2252,1	2699,8
6	238,4	147,9	282,7	32,8	2292,0	2699,3
Média	-	-	-	32,9	1765,7	2632,7
CoV (%)	-	-	-	0,4	0,2	0,0

Tabela 4.4-2 – Valores obtidos no ensaio da determinação da porosidade aberta e massa volúmica dos provetes de argamassa.

4.5. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA ARGAMASSA

Os resultados dos ensaios de compressão e tração por flexão são apresentados na Tabela 4.5-1. Os diagramas de tensão-deformação obtidos nos ensaios de compressão e flexão são apresentados na Figura 4.5-1 e Figura 4.5-2 respetivamente. O valor médio da resistência à compressão ($\sigma_{c\ max}$) é de 1,43 MPa (CoV=6,7%). O valor médio da resistência à flexão ($\sigma_{f\ max}$) são de 0,27 MPa (CoV=22,2%). No que diz aos valores obtidos para a resistência à compressão e a medida aproximada da extensão na rotura (ϵ_{cR}), observa-se uma dispersão relativamente reduzida (com valores de 7% e 4% de coeficientes de variação, respetivamente). A extensão na rotura à flexão (ϵ_{fR}) apresenta valor 0 nos provetes número 1 e 2 porque os diagramas obtidos não apresentaram um comportamento adequado (demasiado ruído) e como tal não foram considerados. Em relação à resistência à compressão obtida, considerando o traço volúmico adotado de 1:3, o mesmo ligante utilizado (cal hidráulica) e tempo de cura semelhante (28 dias), foram encontrados valores aproximados na literatura respetivamente de 1,72 MPa em (Valluzzi, Porto, and Modena 2001) e 1,68 MPa em (C. Almeida et al. 2012).

Identificação do provete	$\sigma_{c\ max}$	$\epsilon_{cR} \times 10^{-3}$	$\sigma_{f\ max}$	$\epsilon_{fR} \times 10^{-3}$
	[MPa]		[MPa]	
1	1,39	19,5	0,30	n.d
2	1,61	20,1	0,35	n.d
3	1,29	17,8	0,28	3,5
4	1,40	19,7	0,28	1,8
5	1,43	18,7	0,25	1,7
6	1,45	18,8	0,15	1,0
Média	1,43	19,1	0,27	2,0
CoV (%)	6,73	3,99	22,23	45,22

n.d – não determinado

Tabela 4.5-1 – Propriedades mecânicas dos provetes de argamassa.

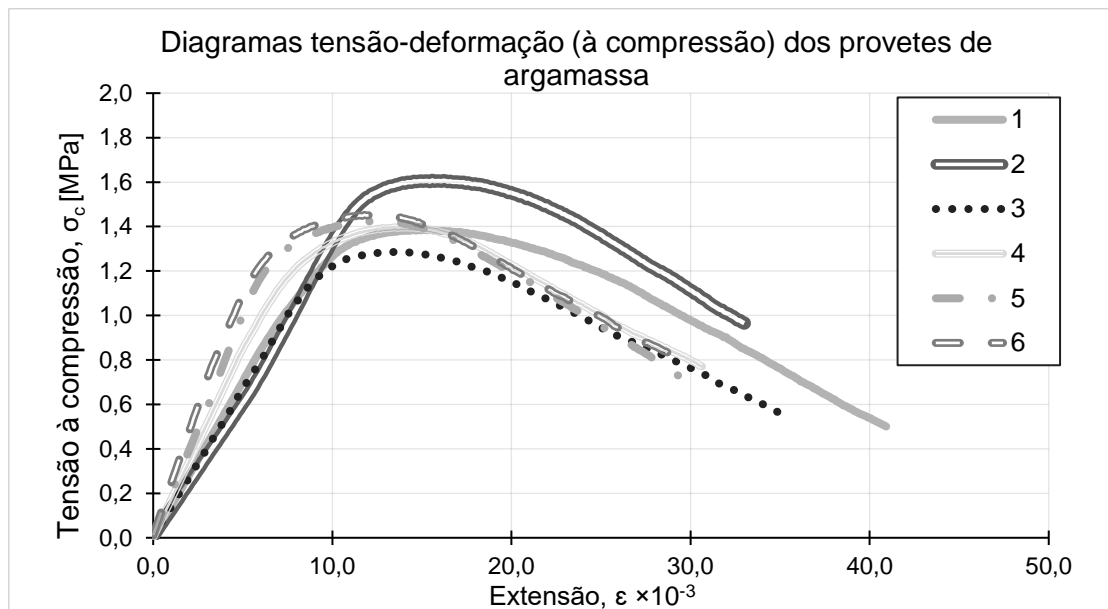


Figura 4.5-1 – Diagrama de tensão-deformação à compressão dos provetes de argamassa.

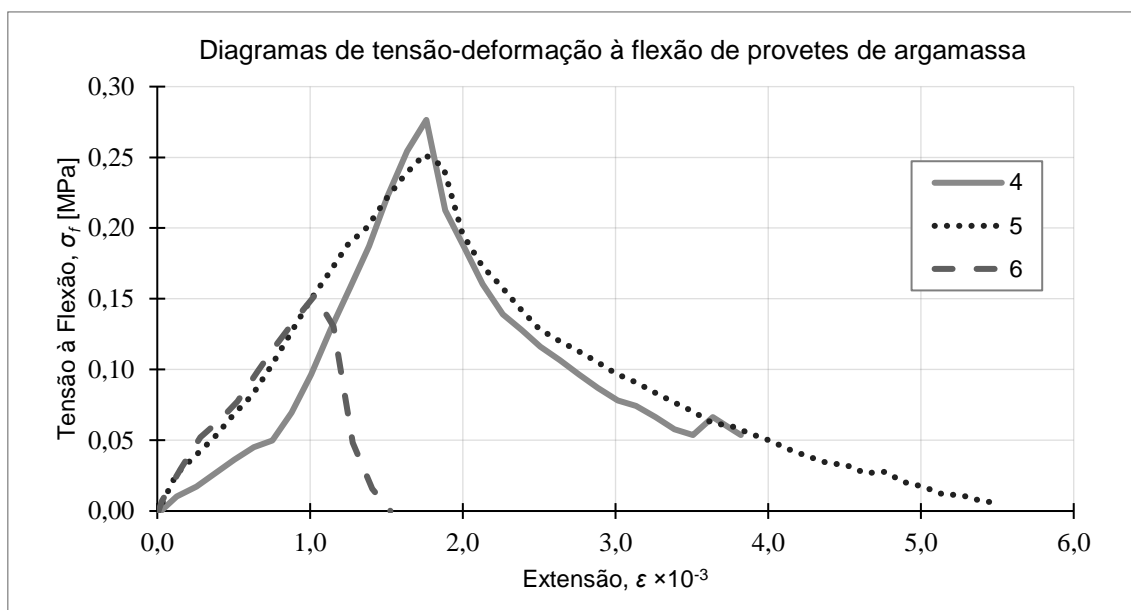


Figura 4.5-2 – Diagrama de tensão-deformação à flexão dos provetes de argamassa.

4.6. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA ALVENARIA

Os resultados dos ensaios dos provetes de alvenaria são apresentados nas Tabelas Tabela 4.6-1, Tabela 4.6-2 e Tabela 4.6-3. Os diagramas de tensão-deformação obtidos são exibidos nas Figura 4.6-1, Figura 4.6-2, Figura 4.6-3 e Figura 4.6-4 para provetes com 4,6,8 fiadas respectivamente e considerando todos os provetes. No que diz respeito aos valores médios da resistência à compressão (σ_{max}), são obtidos os seguintes resultados: para provetes de alvenaria com 4 fiadas, um valor de 7,66 MPa (CoV=9,9%), para 6 fiadas, um valor de 8,97 MPa (CoV=4,9%) e para 8 fiadas, um valor de 12,28 MPa (CoV=3,4%). Os resultados obtidos revelam a tendência do aumento da resistência à compressão com o incremento do número de fiadas. Esta dispersão deve resultar principalmente dos blocos de pedra (calcário) com diferentes características mecânicas (como evidenciado pelo coeficiente de variação e pela gama de valores obtidos), que demonstraram desempenhar um papel decisivo na resistência da alvenaria, como esperado. Considerando todas os provetes de alvenaria em termos dos valores médios da resistência à compressão, é de 9,64 MPa (CoV=21,0%). Valores de dispersão da mesma ordem também foram observados na literatura, evidenciada por valores aproximados do coeficiente de variação da resistência à compressão de alvenaria em campanhas de laboratório, como (David García et al. 2012) com coeficiente de variação de 24,3% para alvenaria de arenito e em (Oliveira et al. 2012) com coeficiente de variação de

19,0% para o pano externo de alvenaria de granito. Imagens dos provetes de alvenaria com respetivamente 4, 6 e 8 fiadas, são ilustradas seguidamente na Figura 4.6-5 até Figura 4.6-22, antes do início dos ensaios de compressão axial e após colapso dos provetes.

A identificação dos provetes, é realizada da seguinte forma: (n)F P(m), em que (n) é o número de fiadas e (m) o número do provete.

Identificação dos Provetes	σ_{max}	$\epsilon_R \times 10^{-3}$
	[MPa]	
4F P1	6,97	14,82
4F P2	7,29	8,51
4F P3	8,72	8,06
Média	7,66	10,46
CoV (%)	9,9	29,5

Tabela 4.6-1 – Propriedades mecânicas dos provetes de alvenaria com 4 fiadas.

Identificação dos Provetes	σ_{max}	$\epsilon_R \times 10^{-3}$
	[MPa]	
6F P1	9,17	7,27
6F P2	9,38	7,35
6F P3	8,37	6,93
Média	8,97	7,18
CoV (%)	4,9	2,5

Tabela 4.6-2 – Propriedades mecânicas dos provetes de alvenaria com 6 fiadas.

Identificação dos Provetes	σ_{max}	$\epsilon_R \times 10^{-3}$
	[MPa]	
8F P1	11,98	9,62
8F P2	11,99	5,75
8F P3	12,87	6,11
Média	12,28	7,16
CoV (%)	3,4	24,4

Tabela 4.6-3 – Propriedades mecânicas dos provetes de alvenaria com 8 fiadas.

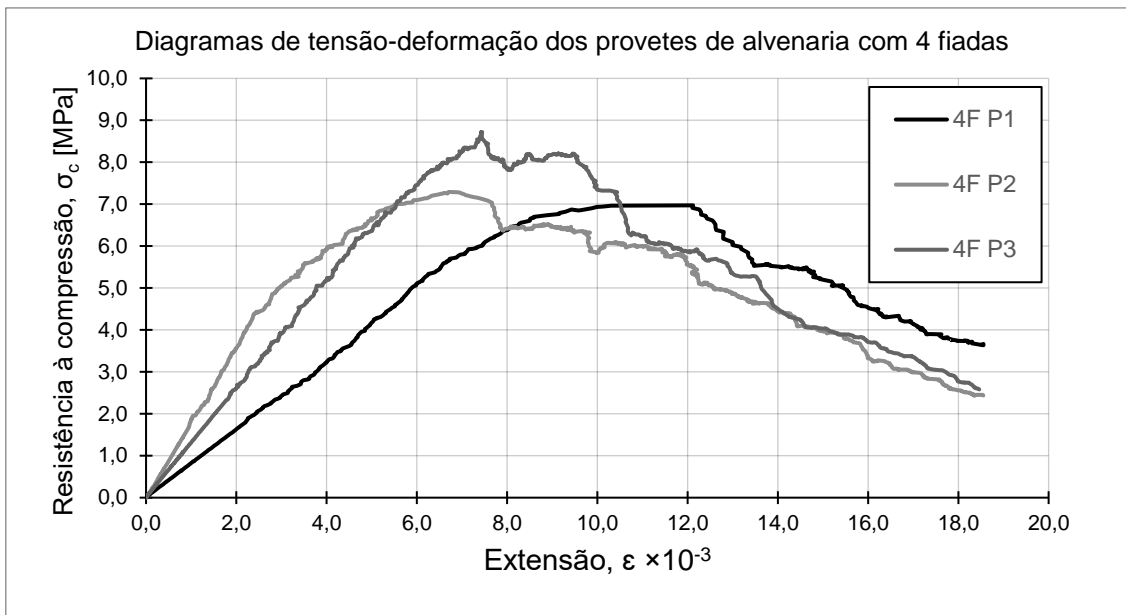


Figura 4.6-1 – Diagramas de tensão-deformação dos provetes de alvenaria com 4 fiadas.

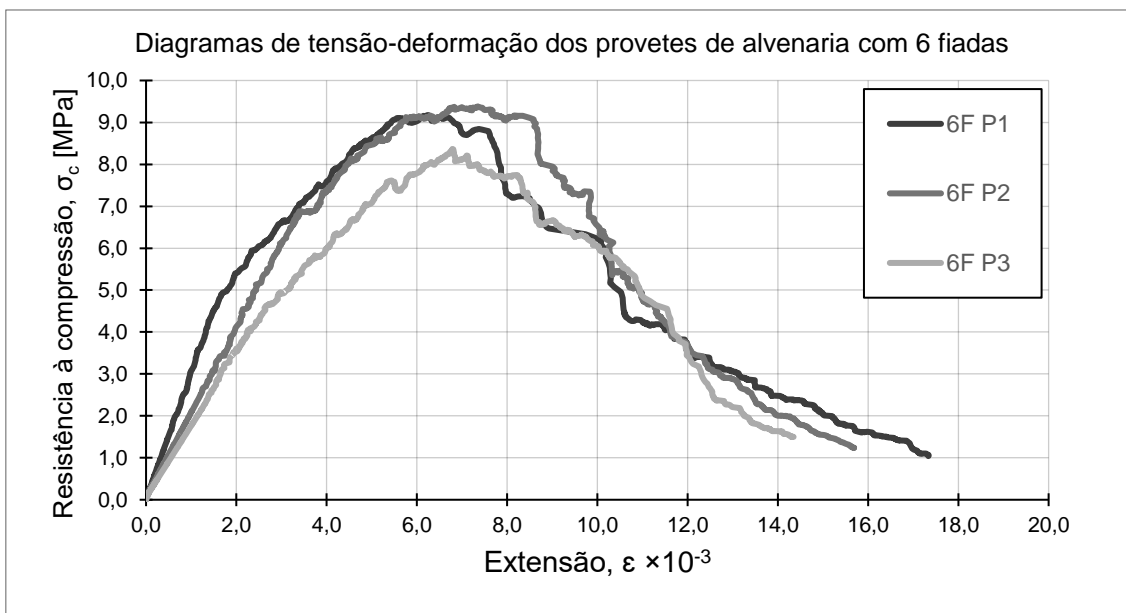


Figura 4.6-2 – Diagramas de tensão-deformação dos provetes de alvenaria com 6 fiadas.

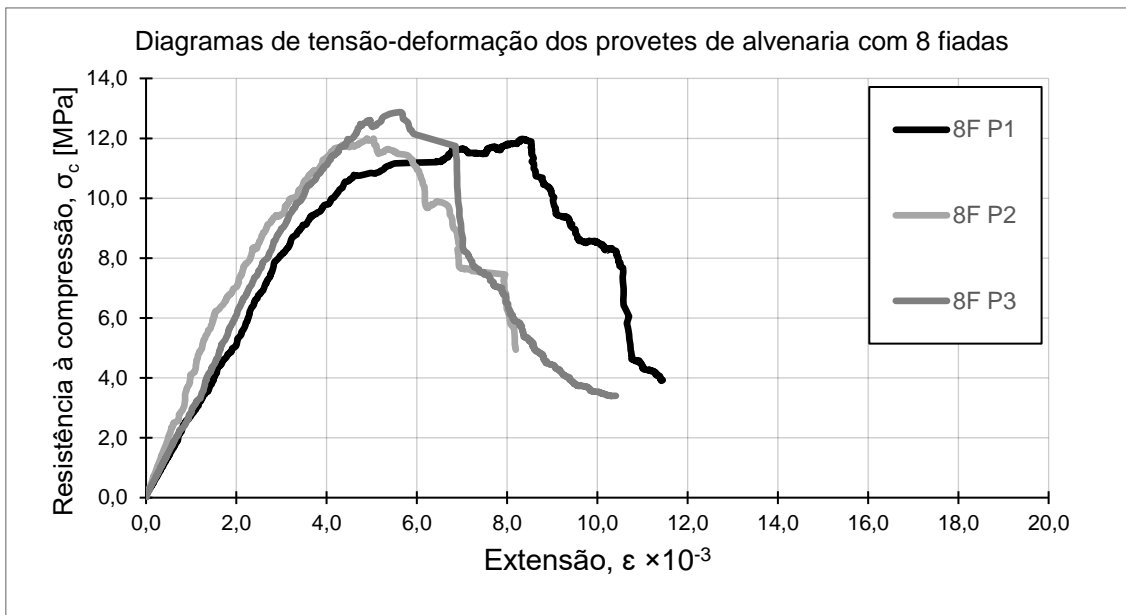


Figura 4.6-3 – Diagramas de tensão-deformação dos provetes de alvenaria com 8 fiadas.

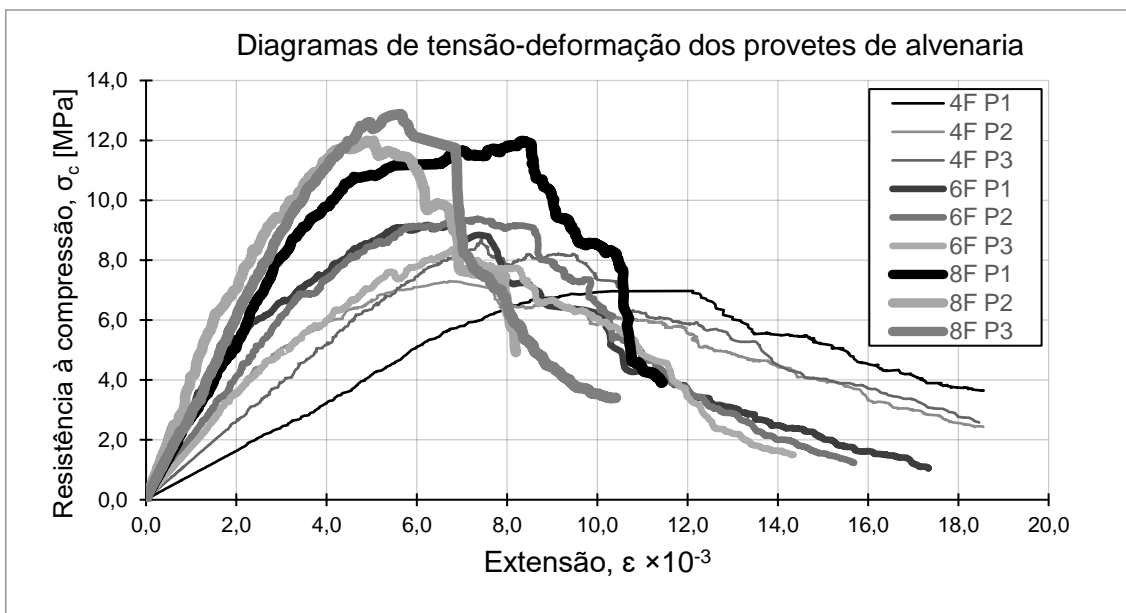


Figura 4.6-4 – Diagramas de tensão-deformação dos provetes de alvenaria.



Figura 4.6-5 – Provete 4F P1 antes do ensaio à compressão.



Figura 4.6-6 – Provete 4F P1 no fim do ensaio à compressão.



Figura 4.6-7 – Provete 4F P2 antes do ensaio à compressão.



Figura 4.6-8 – Provete 4F P2 no fim do ensaio à compressão.



Figura 4.6-9 – Provete 4F P3 antes do ensaio à compressão.



Figura 4.6-10 – Provete 4F P3 no fim do ensaio à compressão.



Figura 4.6-11 – Provete 6F P1 antes do ensaio à compressão.



Figura 4.6-12 – Provete 6F P1 no fim do ensaio à compressão.



Figura 4.6-13 – Provete 6F P2 antes do ensaio à compressão.



Figura 4.6-14 – Provete 6F P2 no fim do ensaio à compressão.



Figura 4.6-15 – Provete 6F P3 antes do ensaio à compressão.



Figura 4.6-16 – Provete 6F P3 no fim do ensaio à compressão.



Figura 4.6-17 – Provete 8F P1 antes do ensaio à compressão.



Figura 4.6-18 – Provete 8F P1 no fim do ensaio à compressão.



Figura 4.6-19 – Provete 8F P2 antes do ensaio à compressão.



Figura 4.6-20 – Provete 8F P2 no fim do ensaio à compressão.



Figura 4.6-21 – Provete 8F P3 antes do ensaio à compressão.



Figura 4.6-22 – Provete 8F P3 no fim do ensaio à compressão.

4.7. MODELO PREDITIVO

É proposta uma nova expressão empírica, como mostra a equação (10), para a previsão da resistência à compressão (f_c) das paredes de alvenaria. Esta equação é obtida através do melhor ajuste de curvas aos valores experimentais considerando a resistência dos blocos de pedra e argamassa, o número de fiadas e a altura total da parede.

A equação (10) é a expressão proposta:

$$f_c = \left(1 - e^{-\left(0,059 \times n^{0,205} \times 7,943 \times (h_p)^{0,3} \right)} \right) \times \left(0,193 \times f_{cu}^{1,3} \times f_{cm}^{0,28} \right), \text{ [MPa]} \quad (10)$$

Sendo:

f_c – Resistência à compressão da alvenaria, [MPa];

f_{cu} – Resistência à compressão da pedra, [MPa];

f_{cm} – Resistência à compressão da argamassa, [MPa];

n – Número de fiadas;

h_p – Altura do provete de alvenaria, [m].

O modelo proposto, equação (10), é avaliado através da comparação com outras equações existentes (11-18), utilizando valores obtidos a partir dos ensaios realizados e por outros autores. Para prever a resistência à compressão da alvenaria (f_c), a seguinte equação (11) que foi proposta por *Engesser* (1907) (*Huerta* 2004) e revista por *Huerta*, é usada:

$$f_c = \frac{1}{3} f_{cu} + \frac{2}{3} f_{cm}, \text{ [MPa]} \quad (11)$$

As seguintes equações (12,13) foram propostas por *Hendry* (1998) e citadas por (*Foraboschi and Vanin* 2014), expressões que permitem o estimar a resistência da compressão da alvenaria (f_c) quando é conhecida a resistência à compressão do bloco (f_{cu}) ou da argamassa (f_{cm}), são aplicáveis para alvenaria de tijolo e pedra:

$$f_c = \sqrt{f_{cu}}, \text{ [MPa]} \quad (12)$$

$$f_c = \sqrt[3]{f_{cm}} \quad , \quad [\text{MPa}] \quad (13)$$

As seguintes equações (14-16) propostas por *Hendry* (1998) e citadas por (*Foraboschi and Vanin* 2014) são usadas para prever a resistência à compressão de alvenaria (f_c) de tijolo e pedra:

$$f_c = 0,7 \sqrt{f_{cu}} \sqrt[3]{f_{cm}} \quad , \quad [\text{MPa}] \quad (14)$$

$$f_c = \frac{f_{cu}}{6} + \frac{\sqrt{f_{cu} + f_{cm}}}{4} - \frac{f_{cm}}{20} + 1,4 \quad , \quad [\text{MPa}] \quad (15)$$

A equação seguinte (16), distingue o tipo de bloco de alvenaria, f_0 é igual a 0 para alvenaria de tijolo, 0,5 N / mm² no caso de alvenaria de pedra com blocos quadrados e 2,5 N / mm² no caso de alvenaria de pedra sem blocos quadrados. O coeficiente δ é igual a 0,1 no caso de blocos de tijolo e 0,5 no caso de blocos de pedra.

$$f_c = \left(\frac{2}{3} f_{cu} - f_0 \right) + \delta f_{cm} \quad , \quad [\text{MPa}] \quad (16)$$

No que diz respeito ao uso de códigos de dimensionamento, são utilizadas as equações da resistência à compressão característica da alvenaria (f_k) do *Eurocode 6 (2005)* (EC-Standards 2005), *Spanish Technical Building Code (2008)* (CTE 2008), uma vez que estas normas são mais comuns nos trabalhos presentes na literatura. Para permitir uma comparação adequada com a equação proposta, é necessário transformar a resistência característica em resistência à compressão média, então a resistência característica obtida através da *Spanish Technical Building Code (2008)* (CTE 2008) e do *Eurocode 6 (2005)* (EC-Standards 2005) tem de ser multiplicada por um fator igual a 1,2 , conforme recomendado na *EN1052-1* (European Committee for standardization 1999).

A resistência à compressão característica fornecida pelo Eurocode 6 (2005) (EC-Standards 2005) é dada pela equação (17):

$$f_k = K f_{cu}^{0,7} f_{cm}^{0,3}, \text{ [MPa]} \quad (17)$$

O K é uma constante. Para pedra natural dimensionada foi utilizado o valor de $K = 0,45$.

A equação (18) fornecida pelo *Spanish Technical Building Code (2008)* (CTE 2008), permite a determinação da resistência à compressão característica da alvenaria:

$$f_k = K f_{cu}^{0,65} f_{cm}^{0,25}, \text{ [MPa]} \quad (18)$$

O K é uma constante, que depende da qualidade dos blocos de alvenaria. Estas equações podem ser usadas se a espessura das juntas da argamassa, tanto na horizontal quanto na vertical, estiver entre 8 mm e 15 mm. Um valor de $K = 0,44$ foi adotado para os provetes do presente trabalho.

Os valores experimentais obtidos neste estudo e em outros estudos, em conjunto com os parâmetros utilizados para a determinação da resistência à compressão de alvenaria são apresentados na Tabela 4.7-1. É atribuído um número de caso para facilitar a sua proveniência.

Caso	f_{cu} (MPa)	f_{cm} (MPa)	n	h_p (m)	δ	f_0	K (EC6)	K (CTE)	f_e (MPa)
4 fiadas	36,5	1,4	4	0,25	0,5	2,5	0,45	0,44	7,66
6 fiadas	36,5	1,4	6	0,37	0,5	2,5	0,45	0,44	8,97
8 fiadas	36,5	1,4	8	0,49	0,5	2,5	0,45	0,44	12,28
1	40,0	0,3	3	0,40	0,5	2,5	0,45	0,44	8,07
2	40,0	1,0	3	0,40	0,5	2,5	0,45	0,44	9,93
3	104,9	2,8	3	0,28	0,5	0,5	0,45	0,44	33,40
4	104,9	9,4	3	0,28	0,5	0,5	0,45	0,44	48,00
5	86,1	2,8	3	0,28	0,5	0,5	0,45	0,44	30,40
6	86,1	9,4	3	0,28	0,5	0,5	0,45	0,44	38,60
7	20,6	10,0	5	0,79	0,5	2,5	0,45	0,44	8,70
8	6,5	11,6	5	0,99	0,1	0,0	0,55	0,6	2,84
9	6,5	14,4	5	0,99	0,1	0,0	0,55	0,6	3,10
10	6,5	23,9	5	0,99	0,1	0,0	0,55	0,6	2,89
11	26,9	3,2	9	0,60	0,1	0,0	0,55	0,6	11,00
12	26,9	12,7	9	0,60	0,1	0,0	0,55	0,6	14,50
13	26,9	95	9	0,60	0,1	0,0	0,55	0,6	17,8
14	5,0	2,7	8	0,53	0,1	0,0	0,55	0,6	2,75
15	12,6	1,2	9	0,54	0,1	0,0	0,55	0,6	2,48
16	30,7	1,2	5	0,29	0,1	0,0	0,55	0,6	5,82
17	18,0	1,9	11	0,66	0,1	0,0	0,55	0,6	6,51
18	18,0	1,9	5	0,29	0,1	0,0	0,55	0,6	6,49

Tabela 4.7-1 – Valores e parâmetros considerados para estimar a resistência à compressão.

Proveniência dos valores utilizados: 1- (D García et al. 2011) Provetes de alvenaria regular com argamassa de baixa resistência; 2- (D García et al. 2011) Provetes de alvenaria regular com argamassa mais resistente; 3- (Rao, Reddy, and Jagadish 1997) - Carregamento paralelo a bandas minerais com argamassa de baixa resistência; 4- (Rao, Reddy, and Jagadish 1997) Carregamento paralelo a bandas minerais com argamassa mais forte; 5- (Rao, Reddy, and Jagadish 1997) Carregamento paralelo a bandas com argamassa de baixa resistência; 6- (Rao, Reddy, and Jagadish 1997) Carregamento paralelo a bandas com argamassa mais resistente; 7- (Pina-Henriques 2005) Tipo de rocha Noto, Pano exterior; 8- (Radovanović et al. 2015) Provetes de alvenaria de tijolo de argila com argamassa M10-1; 9- (Radovanović et al. 2015) Provetes de alvenaria de tijolo de argila com argamassa M10-2; 10- (Radovanović et al. 2015) Provetes de alvenaria de tijolo de argila com argamassa M20; 11- (Binda, Fontana, and Frigerio 1988) Muretes de alvenaria de tijolos sólidos de barro macio com argamassa M1; 12- (Binda, Fontana, and Frigerio 1988) Muretes de alvenaria de tijolos sólidos de barro macio com argamassa M2; 13- (Binda, Fontana, and Frigerio 1988) Muretes de alvenaria de tijolos sólidos de barro macio com argamassa M3; 14- (Boffill et al. 2019) Provetes do tipo 1 de tijolos de barro sólido; 15- (Boffill et al. 2019) Provetes do tipo 2 de tijolos de barro maciço;

16- (Pelà et al. 2016) Provetes de tijolos de barro empilhados; 17- (Segura, Pelà, and Roca 2018) Paredes de tijolos maciços feitos à mão; 18- (Segura, Pelà, and Roca 2018) Provetes de tijolos sólidos feitos à mão empilhados.

Sendo: (f_{cu}) - Resistência à compressão da pedra; (f_{cm}) - Resistência à compressão da argamassa; (h_p) - Altura total da alvenaria; (f_e) - Valor médio experimental da Resistência à compressão da alvenaria.

Os resultados obtidos através dos modelos utilizados (equações (11-18)), equação proposta (10) e os valores experimentais da resistência à compressão média de alvenaria são apresentados na Tabela 4.7-2.

Caso	Resistência à compressão da alvenaria (MPa)									
	f_e	$f_{eq.10}$	$f_{eq.11}$	$f_{eq.12}$	$f_{eq.13}$	$f_{eq.14}$	$f_{eq.15}$	$f_{eq.16}$	$f_{eq.17}$	$f_{eq.18}$
4 fiadas	7,66	7,71	13,11	6,04	1,13	4,76	8,95	22,54	7,45	5,98
6 fiadas	8,97	9,03	13,11	6,04	1,13	4,76	8,95	22,54	7,45	5,98
8 fiadas	12,28	10,06	13,11	6,04	1,13	4,76	8,95	22,54	7,45	5,98
1	8,07	6,00	13,53	6,32	0,67	2,96	9,64	24,32	4,98	4,30
2	9,93	8,40	14,00	6,32	1,00	4,43	9,62	24,67	7,14	5,81
3	33,40	36,01	36,83	10,24	1,41	10,11	21,34	70,83	19,10	14,06
4	48,00	50,55	41,23	10,24	2,11	15,13	21,09	74,13	27,47	19,03
5	30,40	27,86	30,57	9,28	1,41	9,15	17,97	58,30	16,64	12,36
6	38,60	39,10	34,97	9,28	2,11	13,71	17,72	61,60	23,92	16,74
7	8,70	8,55	13,53	4,54	2,15	6,84	5,72	16,23	8,96	6,71
8	2,84	2,09	9,90	2,55	2,26	4,04	2,97	5,50	5,11	4,49
9	3,10	2,22	11,77	2,55	2,43	4,35	2,91	5,78	5,45	4,74
10	2,89	2,56	18,10	2,55	2,88	5,14	2,67	6,73	6,35	5,38
11	11,00	9,03	11,10	5,19	1,47	5,35	7,09	18,25	9,37	8,18
12	14,50	13,29	17,43	5,19	2,33	8,47	6,82	19,20	14,17	11,55
13	17,80	23,34	72,30	5,19	4,56	16,57	3,89	27,43	25,92	19,10
14	2,75	0,91	3,42	2,22	1,39	2,16	2,78	3,57	2,71	2,60
15	2,48	2,54	5,03	3,55	1,07	2,67	4,37	8,54	4,15	3,95
16	5,82	6,34	11,06	5,54	1,07	4,17	7,87	20,59	7,74	7,04
17	6,51	4,86	7,27	4,24	1,24	3,68	5,42	12,18	6,06	5,54
18	6,49	3,58	7,27	4,24	1,24	3,68	5,42	12,18	6,06	5,54

Tabela 4.7-2 – Resultados teóricos e experimentais da resistência à compressão de alvenaria.

E. – Valores experimentais; Eq.- Equação; Eq.10 – proposta; Eq.11 - Engesser (1907) (Huerta 2004); Eq.12 até 16 - Hendry citada por (Foraboschi and Vanin 2014); Eq. 17 - Eurocode 6 (2005) (EC- Standards 2005); Eq.18 - Spanish Technical Building Code (2008) (CTE 2008).

Para verificar a precisão do modelo proposto, foi utilizado o erro médio percentual absoluto, que é uma medida de precisão da previsão. O erro médio percentual absoluto é calculado através da seguinte equação (19):

$$MAPE = \left| \frac{f_e - f_p}{f_e} \right| \times 100, [\%] \quad (19)$$

Sendo:

MAPE – Erro médio percentual absoluto;

f_e – Valor médio experimental de resistência à compressão da alvenaria, [MPa];

f_p (MPa) – Valor teórico da resistência à compressão da alvenaria, [MPa].

Os resultados do erro médio percentual absoluto (MAPE) obtidos através da equação proposta e dos modelos usados (equação (10-18), valores médios, mínimos e máximos do erro percentual absoluto médio são apresentados na Tabela 4.7-3.

Erro médio percentual absoluto (%)									
Caso	$f_{eq.10}$	$f_{eq.11}$	$f_{eq.12}$	$f_{eq.13}$	$f_{eq.14}$	$f_{eq.15}$	$f_{eq.16}$	$f_{eq.17}$	$f_{eq.18}$
4 fiadas	0,6	71,2	21,2	85,3	37,9	16,8	194,2	2,8	22,0
6 fiadas	0,7	46,1	32,7	87,5	47,0	0,3	151,2	17,0	33,4
8 fiadas	18,1	6,8	50,8	90,8	61,2	27,1	83,5	39,3	51,3
1	25,7	67,7	21,6	91,7	63,3	19,4	201,3	38,3	46,7
2	15,4	41,0	36,3	89,9	55,4	3,2	148,4	28,1	41,5
3	7,8	10,3	69,3	95,8	69,8	36,1	112,1	42,8	57,9
4	5,3	14,1	78,7	95,6	68,5	56,1	54,4	42,8	60,4
5	8,4	0,6	69,5	95,4	69,9	40,9	91,8	45,3	59,3
6	1,3	9,4	76,0	94,5	64,5	54,1	59,6	38,0	56,6
7	1,8	55,6	47,8	75,2	21,3	34,3	86,6	2,9	22,9
8	26,3	248,7	10,2	20,3	42,4	4,5	93,7	79,9	58,1
9	28,3	279,7	17,7	21,5	40,2	6,2	86,5	75,9	52,9
10	11,4	526,4	11,7	0,3	78,0	7,7	132,9	119,6	86,2
11	17,9	0,9	52,9	86,6	51,4	35,5	65,9	14,8	25,6
12	8,4	20,2	64,2	83,9	41,6	53,0	32,4	2,2	20,3
13	31,1	306,2	70,9	74,4	6,9	78,1	54,1	45,6	7,3
14	66,9	24,5	19,1	49,6	21,5	1,2	29,7	1,4	5,4
15	2,2	103,0	43,2	56,7	7,7	76,3	244,3	67,4	59,2
16	8,9	90,0	4,8	81,5	28,4	35,2	253,8	32,9	20,9
17	25,2	11,9	34,8	80,9	43,3	16,7	87,5	6,8	14,8
18	44,8	12,0	34,7	80,9	43,2	16,5	87,7	6,7	14,7
Max. MAPE %	66,9	526,4	78,7	95,8	78,0	78,1	253,8	119,6	86,1
Min. MAPE %	0,6	0,6	4,8	0,3	6,9	0,3	29,7	1,4	5,4
Média %	18,7	101,2	42,4	70,8	45,4	31,9	106,8	38,4	39,5

Tabela 4.7-3 – Valores erro médio total absoluto usando os modelos.

Sendo: Eq.- Equação; Eq.10 – proposta; Eq.11 - Engesser (1907) (Huerta 2004); Eq.12 até 16- Hendry citada por (Foraboschi and Vanin 2014); Eq. 17 - Eurocode 6 (2005) (EC-Standards 2005); Eq.18 - Spanish Technical Building Code (2008) (CTE 2008); MAPE – Erro médio percentual absoluto; Max. – Máximo; Min. – Mínimo.

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas Tabela 4.7-2 e Tabela 4.7-3, é possível observar uma boa concordância entre o modelo proposto (equação (10)) e os resultados experimentais. A equação proposta apresenta apenas um caso (caso 13 (Binda, Fontana, and Frigerio 1988)) em que sobrestima um valor significativo em relação ao resultado experimental, e pode ser devido ao facto de o caso 13 ter utilizado uma argamassa com resistência bastante diferente da gama de resistências que o modelo foi desenvolvido, com resistência à compressão de aproximadamente 95 MPa. O erro médio percentual absoluto máximo é de 66,9% (subestimando em relação ao valor experimental) e foi obtido no caso 14 (Boffill et al. 2019). Para os casos analisados, o modelo proposto apresenta o menor valor médio de erro percentual médio absoluto quando comparado ao obtidos através dos restantes modelos (11-18), com um valor de 18,7%. Dos modelos utilizados (equação (11-18)), os que apresentaram os valores médios mais reduzidos de percentagem média de erro absoluta foram as equações (15) (Hendry citado por (Foraboschi and Vanin 2014)), (17) (Eurocode 6 (2005) (EC-Standards 2005) e (18) (*Spanish Technical Building Code (2008)* (CTE 2008)), com valores médios de 31,9%, 38,4% e 39,5%, respetivamente. Os resultados obtidos através do modelo da (11) (*Engesser (1907)* (Huerta 2004) sobrestima em 16 casos e da (16) (Hendry citados por (Foraboschi and Vanin 2014)) sobrestima todos os casos. Os resultados obtidos usando os modelos das equações (12,13,14) (*Hendry* citado por (Foraboschi and Vanin 2014)), subestimam os valores experimentais na maioria dos casos, sendo muito conservadores.

Em geral, a expressão proposta fornece os resultados mais aproximados dos valores experimentais e os valores variação entre os valores experimentais médios e os valores previstos são mais reduzidos. Como afirmado, a expressão proposta no presente estudo permite obter os resultados mais próximos dos valores experimentais analisados, fornecendo uma forma adequada de estimar a resistência à compressão da alvenaria de pedra. Embora o modelo preditivo tenha sido desenvolvido para avaliar a resistência à compressão da alvenaria de pedra, quando a equação foi testada foram obtidos resultados favoráveis mesmo para diferentes materiais como cerâmica, argila e tijolos artesanais. É necessário ter em atenção que as várias fórmulas existentes foram desenvolvidas especificamente para materiais e formas geométricas específicas, razão pela qual qualquer tentativa de usá-las como valores para alvenaria com diferentes propriedades ou tipologias pode conduzir a

resultados incorretos. Devido à extrema complexidade deste tipo de construções, os ensaios de laboratório são recomendados para obter resultados mais precisos.

5. Conclusões e desenvolvimentos futuros

O presente trabalho foi realizado com o intuito de prestar um contributo para o conhecimento do comportamento mecânico da alvenaria de pedra, teve como principal objetivo o desenvolvimento de um modelo analítico preditivo da resistência à compressão da alvenaria. Foi analisada a influência do número de fiadas na resistência à compressão dos provetes de alvenaria e a mesma foi incluída no modelo desenvolvido.

A caracterização mecânica e física dos constituintes de alvenaria (argamassa e pedra de calcário) foi realizada com sucesso, permitindo a obtenção de valores dentro dos limites que seriam expectáveis e comparáveis com os valores obtidos por outros autores na literatura. A caracterização física dos provetes de alvenaria, permitiu a aquisição de resultados necessários para o desenvolvimento do modelo. Podendo de um modo geral, afirmar-se que a campanha experimental foi realizada com sucesso.

Foi possível retirar diversas conclusões, as quais serão seguidamente enunciadas:

- Os blocos ou unidades que constituem a alvenaria, desempenham um papel determinante na resistência à compressão da alvenaria;
- Os provetes de pedra provenientes do mesmo bloco, apresentaram resultados diferentes nos parâmetros de extensão e resistência, confirmando que se trata de um material heterogéneo, o que afeta diretamente os resultados obtidos nos ensaios realizados nos provetes de alvenaria;
- Os materiais utilizados no trabalho experimental foram selecionados e utilizados para representar as características mecânicas presentes em edifícios antigos, caracterizados pela heterogeneidade nos blocos de pedra e argamassas com baixa resistência;
- Um novo modelo empírico é proposto para prever a resistência à compressão da alvenaria de pedra calcária de pano único, os parâmetros necessários são a resistência à compressão de pedra e argamassa, número de fiadas e altura da parede;

- O modelo preditivo proposto permitiu a obtenção de resultados mais próximos dos experimentais quando comparado com expressões presentes na literatura, possibilitando obter uma estimativa boa da resistência à compressão para a gama valores analisados;
- O comportamento da alvenaria à compressão é diretamente afetado pelas dimensões e tipologias adotadas. Neste estudo, a influência do número de fiadas e da altura da alvenaria é tida em consideração no comportamento da alvenaria;
- A expressão proposta, equação (10), um método mais preciso para prever a resistência à compressão da alvenaria, contudo são necessários mais resultados experimentais de diferentes tipos de pedra, argamassa e tipologias;
- O modelo empírico apresentado é mais adequado para alvenaria de pedra calcária aparelhada de pano único com unidades de (bloco de pedra calcária) heterogêneos;
- Os resultados alcançados na campanha experimental podem ser adotados como referência em alvenaria de calcário com argamassa de cal hidráulica;

Como desenvolvimentos futuros pretendo dar continuidade ao trabalho experimental, contribuindo para o desenvolvimento do conhecimento do comportamento mecânico de alvenarias, através do recurso a:

- Análise numérica para o caso de estudo;
- Diferentes tipos de pedra e argamassa;
- Amostras de maiores dimensões, nomeadamente à escala real;
- Análise do efeito do número de fiadas com diferentes tipologias e dimensões;
- Avaliação do efeito de diferentes tipologias de alvenaria em relação ao: tipo de secção transversal, aparelho, arranjo de pedras e juntas.
- Análise de alvenarias em arco;
- Análise do efeito de soluções de reforço estrutural;

- Utilização e correlação de métodos de ensaio *NDT* e *MDTS*;
- Análise de outros fatores das alvenarias como por exemplo: espessura de junta, número de panos, resistência à flexão, tração e corte;
- Utilização de extensômetros e outros sistemas de medição de deslocamentos, nomeadamente por intermédio de análise de imagens digitais.

Concluindo, o presente trabalho serviu para a aquisição, desenvolvimento e aplicação de novos conhecimentos em relação à alvenaria. A componente experimental, permitiu a observação direta e colocação em prática de conhecimentos adquiridos no decorrer do curso e do presente trabalho.

Através da realização da presente dissertação foi possível constatar a complexidade e variabilidade do comportamento mecânico de alvenaria de pedra e as dificuldades associadas às campanhas experimentais. Foi observado que a informação sobre o comportamento mecânico de alvenaria de pedra, ainda não está totalmente estabelecida.

Além disso, a reabilitação tem cada vez maior peso no âmbito dos procedimentos de conservação e restauro de monumentos, sendo necessário investigar e desenvolver métodos simples para quantificar os parâmetros adequados seguindo níveis de intrusão mínimos. O surgimento e desenvolvimento de novas tecnologias e técnicas permitem que o comportamento mecânico seja estudado através de novas metodologias. Pelas razões anteriormente indicadas é mostrado que é necessário dar a continuidade aos estudos de investigação apresentados na dissertação.

Apêndice

Medições dos provetes de pedra:

Identificação do provete	medições											
	Largura [mm]				Comprimento [mm]				Espessura [mm]			
1	50,24	50,03	50,29	50,5	100,38	100,39	100,41	100,67	50,1	51,03	50,22	50,87
2	50,3	50,29	50,4	50,69	100,39	100,37	100,56	100,55	50,11	50,51	50,27	50,56
3	49,89	50,06	50,33	50,89	100,16	100,27	100,54	100,39	50,48	51,05	50,1	51,11
4	50,33	50,17	49,98	50,76	99,84	99,96	99,81	99,92	50,47	50,23	50,37	50,56
5	50,32	50,41	50,4	50,55	100,1	99,55	100,2	99,81	50,34	49,91	50,51	50,21
6	50,39	50,21	50,4	50,43	99,66	100,12	99,94	99,85	50,47	50,28	49,92	50,38
7	49,27	50,23	49,46	50,55	97,54	96,49	98,08	96,53	50,22	50,85	50,15	50,27
8	50,28	49,26	50,1	49,77	96,68	96,78	98,13	98,04	50,69	50,37	50,41	50,27
9	49,7	49,68	50,04	49,24	96,79	97,9	98,21	96,48	50,24	51,67	50,29	50,35

Tabela 4.7-4 – Valores das medições efetuadas nos provetes de pedra.

Identificação do provete	Dimensões médias		
	Largura [mm]	Comprimento [mm]	Espessura [mm]
1	50,27	100,46	50,56
2	50,42	100,47	50,36
3	50,29	100,34	50,69
4	50,31	99,88	50,41
5	50,42	99,92	50,24
6	50,36	99,89	50,26
7	49,88	97,16	50,37
8	49,85	97,41	50,44
9	49,67	97,35	50,64

Tabela 4.7-5 – Valores médios das dimensões dos provetes de pedra.

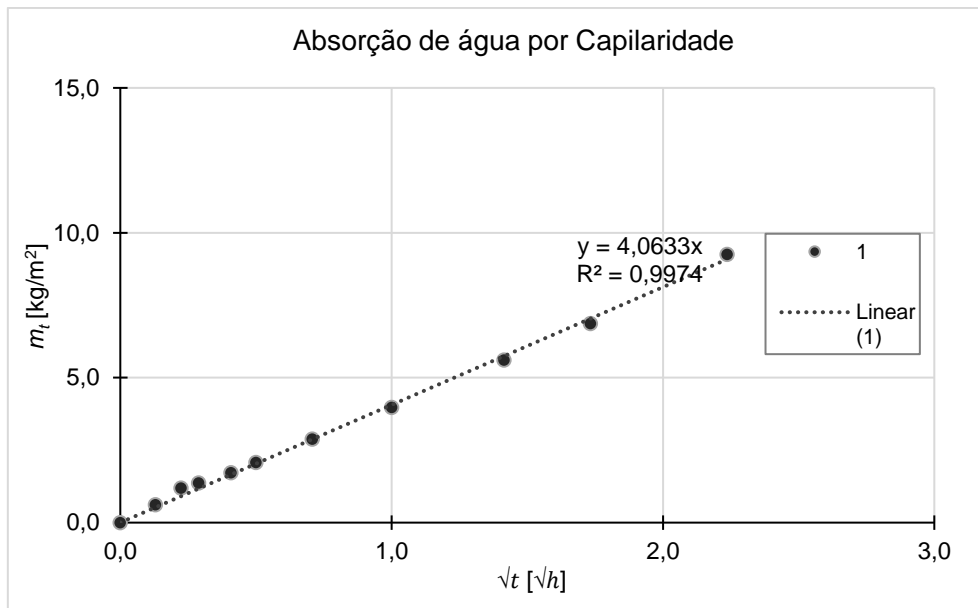


Figura 4.7-1 – Curva de absorção de água por capilaridade do provete 1 com linha de regressão linear.

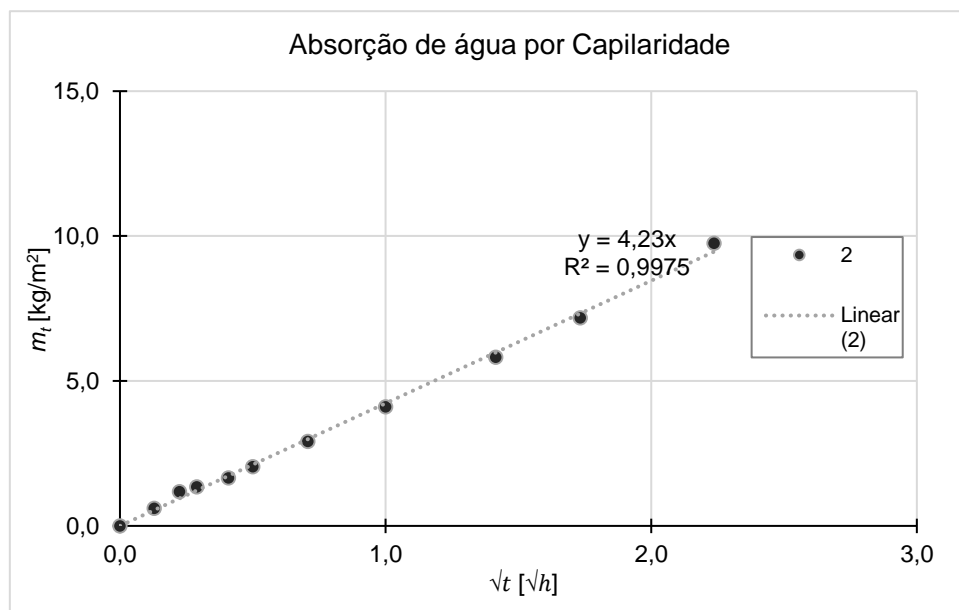


Figura 4.7-2 – Curva de absorção de água por capilaridade do provete 2 com linha de regressão linear.

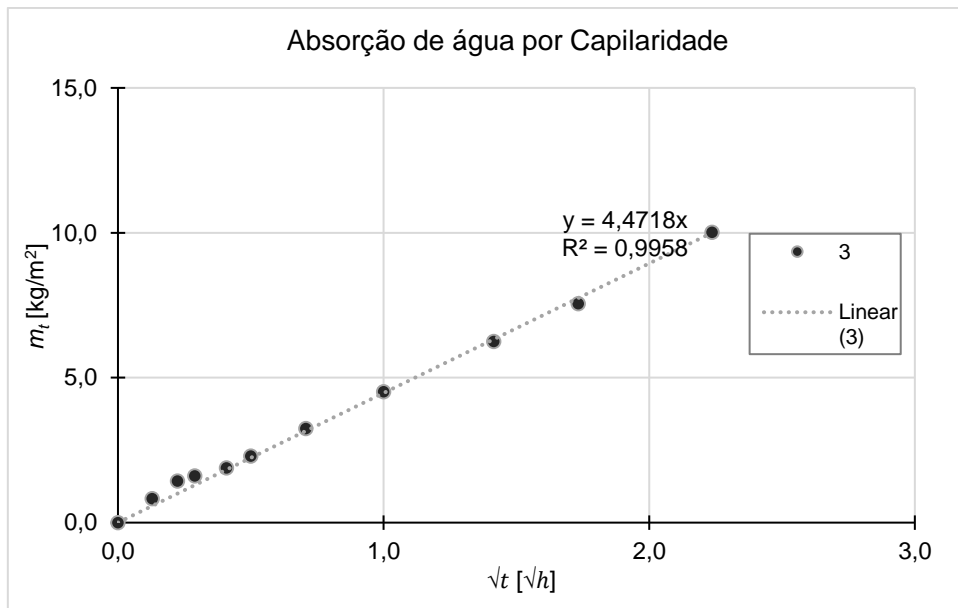


Figura 4.7-3 – Curva de absorção de água por capilaridade do provete 3 com linha de regressão linear.

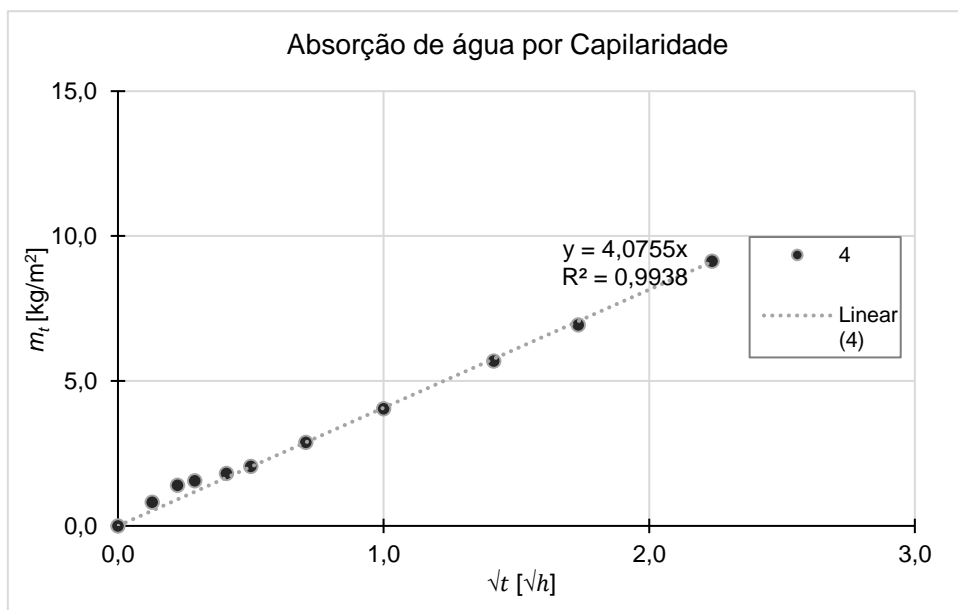


Figura 4.7-4 – Curva de absorção de água por capilaridade do provete 4 com linha de regressão linear.

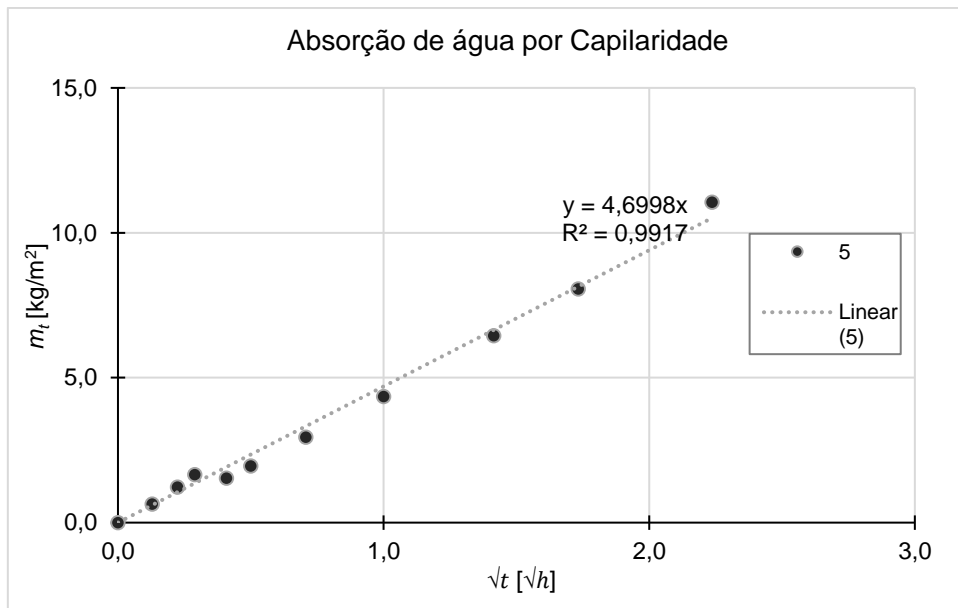


Figura 4.7-5 – Curva de absorção de água por capilaridade do provete 5 com linha de regressão linear.

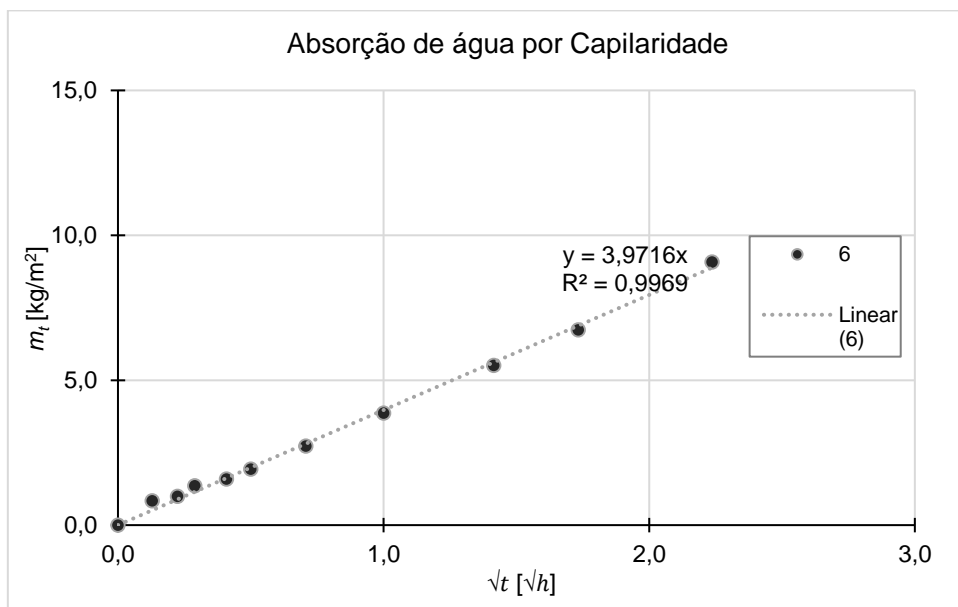


Figura 4.7-6 – Curva de absorção de água por capilaridade do provete 6 com linha de regressão linear.

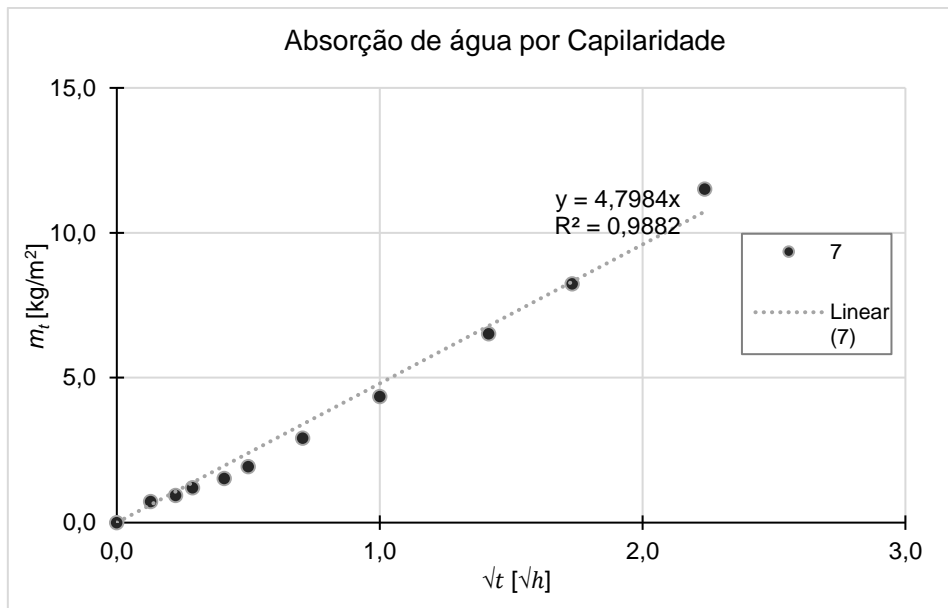


Figura 4.7-7 – Curva de absorção de água por capilaridade do provete 7 com linha de regressão linear.

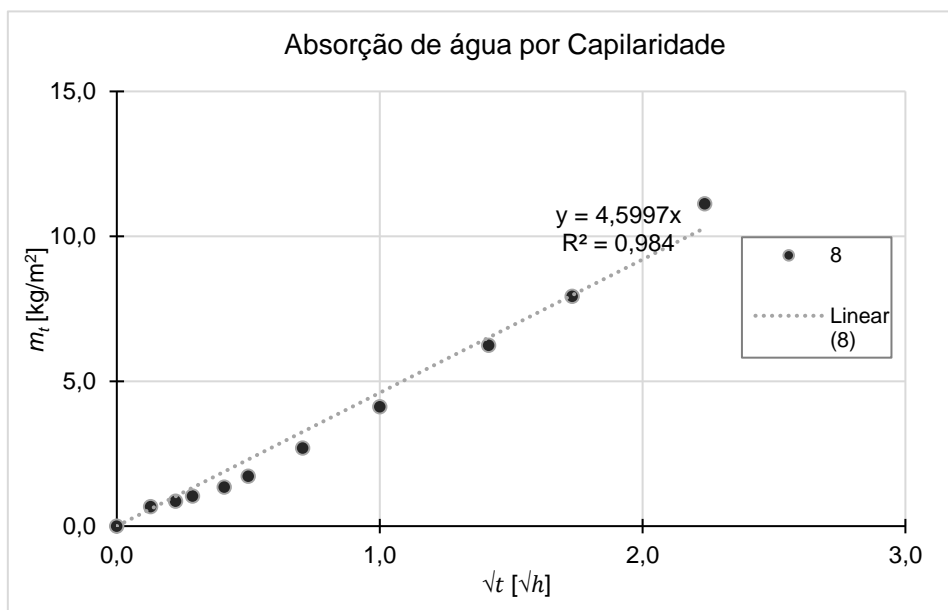


Figura 4.7-8 – Curva de absorção de água por capilaridade do provete 8 com linha de regressão linear.

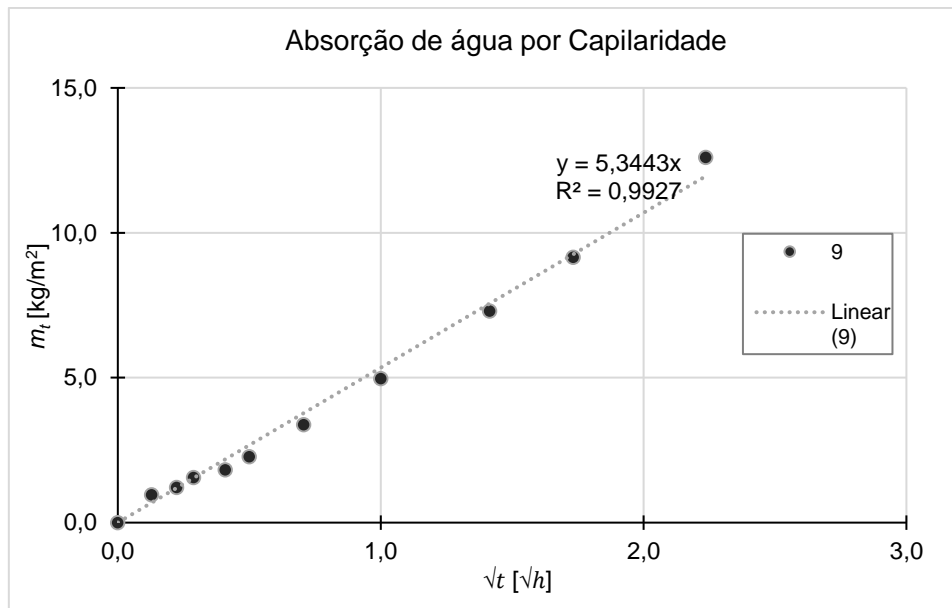


Figura 4.7-9 – Curva de absorção de água por capilaridade do provete 9 com linha de regressão linear

Referências Bibliográficas

- Almeida, C., J. Paulo Guedes, A. Arêde, C. Q. Costa, and A. Costa. 2012. "Physical Characterization and Compression Tests of One Leaf Stone Masonry Walls." *Construction and Building Materials* 30. Elsevier Ltd: 188–97. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.11.043.
- Almeida, Celeste, João Paulo, António Arêde, and Aníbal Costa. 2016. "Geometric Indices to Quantify Textures Irregularity of Stone Masonry Walls." *Construction and Building Materials* 111. Elsevier Ltd: 199–208. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.038.
- Augenti, N., and F. Parisi. 2010. "Constitutive Models for Tuff Masonry under Uniaxial Compression." *Journal of Materials in Civil Engineering* 22 (11): 1102–11. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000119.
- Ba, Ann, Akira Kobayashi, Tomofumi Koyama, Pengzhi Pan, and Mikael Rinne. 2008. "Numerical Modelling of Uniaxial Compressive Failure of Granite with and without Saline Porewater." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 45: 1126–42. doi:10.1016/j.ijrmms.2007.12.001.
- Binda, L., A. Fontana, and G. Frigerio. 1988. "Mechanical Behaviour of Brick Masonries Derived From Unit and Mortar Characteristics." *Proc. 8th Int. Brick and Block Masonry Conf., Dublin, Ireland, 1, 205-216* 53 (9): 205–16. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- Boffill, Y., H. Blanco, I. Lombillo, and L. Villegas. 2019. "Assessment of Historic Brickwork under Compression and Comparison with Available Equations." *Construction and Building Materials* 207. Elsevier Ltd: 258–72. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.02.083.
- Borri, Antonio, Marco Corradi, Giulio Castori, and Alessandro De Maria. 2015. "A Method for the Analysis and Classification of Historic Masonry." *Bulletin of Earthquake Engineering* 13 (9). Springer Netherlands: 2647–65. doi:10.1007/s10518-015-9731-4.
- Bosiljkov, Meta Kržan; Samo Gostič; Serena Cattari; Vlatko. 2015. "Acquiring Reference Parameters of Masonry for the Structural Performance Analysis of Historical Buildings." *Bulletin of Earthquake Engineering* 13 (1): 203–36. doi:10.1007/s10518-014-9686-x.

- BSI. 2004. "BS EN 1015-2:1999 Methods of Test for Mortar for Masonry - Part 2: Bulk Sampling of Mortars and Preparation of Test Mortars."
- C, Freeda Christy, D Tensing, and Mercy Shanthi R. 2013. "Experimental Study on Axial Compressive Strength and Elastic Modulus of the Clay and Fly Ash Brick Masonry." *Journal of Civil Engineering and Construction Technology Full* 4 (4): 134–41. doi:10.5897/JCECT12.089.
- Chastre, Carlos, and Marco Ludovico-Marques. 2018. "Nondestructive Testing Methodology to Assess the Conservation of Historic Stone Buildings and Monuments." In *Handbook of Materials Failure Analysis With Case Studies from the Construction Industries*, 255–94. Elsevier Ltd. doi:10.1016/B978-0-08-101928-3/00013-6.
- Colas, Anne Sophie, Jean Claude Morel, and Denis Garnier. 2010. "Full-Scale Field Trials to Assess Dry-Stone Retaining Wall Stability." *Engineering Structures* 32 (5): 1215–22. doi:10.1016/j.engstruct.2009.12.047.
- Committee, International Scientific. 1993. *Cultural Tourism*. The ICOMOS International Specialized Committee on Cultural Tourism.
- Corradi, M, A Borri, and A Vignoli. 2003. "Experimental Study on the Determination of Strength of Masonry Walls." *Construction and Building Materials* 17 (03): 325–37. doi:10.1016/S0950-0618(03)00007-2.
- Correia, Elisa. 2011. "Análise Experimental de Um Murete de Alvenaria de Pedra Tradicional de Grandes Dimensões." *Dissertação Para Obtenção Do Grau de Mestre Em Engenharia Civil*.
- Costa, Alexandre A., António Arêde, Alfredo Campos Costa, Andrea Penna, and Aníbal Costa. 2012. "Out-of-Plane Behaviour of a Full-Scale Stone Masonry Façade. Part 1: Specimen and Ground Motion Selection." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 41 (11): 1549–68. doi:10.1002/eqe.
- CTE. 2008. "Spanish Technical Building Code."
- Domede, N, T Parent, and A Sellier. 2017. "Mechanical Behaviour of Granite : A Compilation ,

- Analysis and Correlation of Data from around the World.” *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 8189 (July). Taylor & Francis: 1–19. doi:10.1080/19648189.2016.1275984.
- Drdácký, M, D Mašín, MD Mekonone, and Z Slížková. 2008. “Compression Tests on Non-Standard Historic Mortar Specimens.” *Proc. Historical Mortars Conference HMC08*. https://web.natur.cuni.cz/uhigug/masin/download/DMMS_HMC08.pdf.
- Drdácký, Miloš. 2011. “Non-Standard Testing of Mechanical Characteristics of Historic Mortars.” *International Journal of Architectural Heritage* 5 (4–5): 383–94. doi:10.1080/15583051003717788.
- Drougkas, Anastasios, Pere Roca, and Climent Molins. 2015. “Numerical Prediction of the Behavior , Strength and Elasticity of Masonry in Compression.” *Engineering Structures* 90. Elsevier Ltd: 15–28. doi:10.1016/j.engstruct.2015.02.011.
- . 2016. “Compressive Strength and Elasticity of Pure Lime Mortar Masonry.” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 49 (3). Springer Netherlands: 983–99. doi:10.1617/s11527-015-0553-2.
- Dymiotis, Christiana, and Brigitte M. Gutleiderer. 2002. “Allowing for Uncertainties in the Modelling of Masonry Compressive Strength.” *Construction and Building Materials* 16 (8): 443–52. doi:10.1016/S0950-0618(02)00108-3.
- EC-Standards. 2005. “En 1996-1-1 - EC6.” In *Eurocode 6 - Design of Masonry Structures*, 1–123. Brussels: CEN.
- Egermann, R., Cook, D. & Anzani, A. 1991. “An Investigation into the Behaviour of Scale Model Brick Walls.” *Proceedings of the Ninth International Brick/Block Masonry Conferences.*, no. 1: 628–635.
- EN 1015-3. 2004. “EN 1015-3: 2004. Methods of Test for Mortar for Masonry — Part 3: Determination of Consistence of Fresh Mortar (by Flow Table).,” no. February 1999: 7. doi:10.1116/1.586523.
- EN NP 1936. 2008. “Natural Stone Test Methods. Determination of Real Density and Apparent

Density, and of Total and Open Porosity.”

- European Committee for standardization. 1999. “BS EN 1052-1:1999 -Methods of Test for Masonry - Part 1: Determination of Compressive Strength.” *European Committee for Standardization*, 11.
- . 2010. *EN 459-1:2010 Building Lime Part 1: Definitions, Specifications and Conformity Criteria*.
- Fairhurst, C.E., and J.A. Hudson. 1999. “SM for the Complete Stress-Strain Curve for Intact Rock in Uniaxial Compression.” *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 279–89.
- Foraboschi, Paolo, and Alessia Vanin. 2014. “Experimental Investigation on Bricks from Historical Venetian Buildings Subjected to Moisture and Salt Crystallization.” *Engineering Failure Analysis* 45. Elsevier Ltd: 185–203. doi:10.1016/j.engfailanal.2014.06.019.
- Gao, Xiaopeng, and Zhongfan Chen. 2018. “In-Plane Experimental Behavior of Full-Scale Unreinforced Crude Stone Masonry Walls under Cyclic Loading.” *AIP Conference Proceedings* 1986. doi:10.1063/1.5047125.
- García, D, J T San-José, Leire Garmendia, Rosa San-Mateos, David Garcia, Jose T San-Jose, Leire Garmendia, and Rosa San-Mateos. 2011. “Experimental Study of Traditional Stone Masonry under Compressive Load and Comparison of Results with Design Codes.” *Materials and Structures* 45 (7): 995–1006. doi:10.1617/s11527-011-9812-z.
- García, David, José T. San-José, Leire Garmendia, and Pello Larrinaga. 2012. “Comparison between Experimental Values and Standards on Natural Stone Masonry Mechanical Properties.” *Construction and Building Materials* 28 (1): 444–49. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.012.
- Geldhof, David. 2019. “Pirâmide de Quéops (Egito).” Accessed July 18. whc.unesco.org/pt/documentos/108472.
- Goodman, Richard E, John Wiley, and Daniel G Moye. 1989. *Introduction to Rock Mechanics*. Second Edi. Wiley.

- Gumaste, K. S., K. S Nanjunda Rao, B. V Venkatarama Reddy, and K. S. Jagadish. 2007. "Strength and Elasticity of Brick Masonry Prisms and Wallettes under Compression." *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 40 (2): 241–53. doi:10.1617/s11527-006-9141-9.
- Gupta, Pulkit, and Town Planning. 2018. "Experimental Evaluation of Compressive Strength and Stress Strain Behaviour for Stone Masonry Prism Having Various." *International Journal of Advance Engineering and Research Development* Volume 5 (04): 1991–98.
- Hendry, Arnold W. 1998. "Structural Masonry." *Cement and Concrete Research* 1 (6): 17 of 293. doi:10.1016/0008-8846(71)90025-1.
- Holicky, M, M Hrabanek, J Kolisko, and M Sykora. 2009. "Assessment of Masonry Strength in a Heritage Building" 109: 185–95. doi:10.2495/STR090171.
- Huerta, Santiago. 2004. "Arcos, Bóvedas y Cúpulas. Geometría y Equilibrio En El Cálculo Tradicional de Estructuras de Fábrica," 24 of 637. http://oa.upm.es/1136/1/Huerta_2004_Arcos_bovedas_y_cupulas.pdf.
- Hughes, T G, and N Kitching. 2000. "Small Scale Testing of Masonry." *12th International Brick/Block Masonry Conference*.
- Instituto Nacional de Estatística. 2018. "Estatísticas Da Construção e Habitação 2017." www.ine.pt.
- Juhásová, Emília, Ramiro Sofronie, and Rogério Bairrão. 2008. "Stone Masonry in Historical Buildings - Ways to Increase Their Resistance and Durability." *Engineering Structures* 30 (8): 2194–2205. doi:10.1016/j.engstruct.2007.07.008.
- Kahraman, S. 2001. "Evaluation of Simple Methods for Assessing the Uniaxial Compressive Strength of Rock." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 38 (7): 981–94. doi:10.1016/S1365-1609(01)00039-9.
- Kaushik, Hemant B, Durgesh C Rai, Sudhir K Jain, and M Asce. 2007. "Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression." *Journal of Materials in Civil Engineering*, no. September: 728–39. doi:10.1061/(ASCE)0899-

1561(2007)19.9:(728).

- Knox, C. L., D. Dizhur, and J. M. Ingham. 2018. "Experimental Study on Scale Effects in Clay Brick Masonry Prisms and Wall Panels Investigating Compression and Shear Related Properties." *Construction and Building Materials* 163. Elsevier Ltd: 706–13. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.149.
- Kourkoulis, S K. 2010. "Experimental Study of the Size- and Shape-Effects of Natural Building Stones." *Construction and Building Materials* 24 (5). Elsevier Ltd: 803–10. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.10.027.
- Kumavat, Hemraj Ramdas. 2016. "An Experimental Investigation of Mechanical Properties in Clay Brick Masonry by Partial Replacement of Fine Aggregate with Clay Brick Waste." *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*. Springer India. doi:10.1007/s40030-016-0178-7.
- Laefer, Debra F., Linh Truong Hong, Aykut Erkal, James H. Long, and Edward J. Cording. 2011. "Manufacturing, Assembly, and Testing of Scaled, Historic Masonry for One-Gravity, Pseudo-Static, Soil-Structure Experiments." *Construction and Building Materials* 25 (12). Elsevier Ltd: 4362–73. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.03.066.
- Lombillo, I., C. Thomas, L. Villegas, J. P. Fernández-Álvarez, and J. Norambuena-Contreras. 2013. "Mechanical Characterization of Rubble Stone Masonry Walls Using Non and Minor Destructive Tests." *Construction and Building Materials* 43. Elsevier Ltd: 266–77. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.02.007.
- Lourenço, Paulo B, and José Pina-Henriques. 2006. "Validation of Analytical and Continuum Numerical Methods for Estimating the Compressive Strength of Masonry" 84: 1977–89. doi:10.1016/j.compstruc.2006.08.009.
- Ludovico-Marques, Marco, Carlos Chastre, and Graça Vasconcelos. 2012. "Modelling the Compressive Mechanical Behaviour of Granite and Sandstone Historical Building Stones." *Construction and Building Materials* 28 (1). Elsevier Ltd: 372–81. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.083.
- Luso, Eduarda, and Paulo B Lourenço. 2016. "Experimental Characterization of Commercial

- Lime Based Grouts for Stone Masonry Consolidation.” *Construction and Building Materials* 102. Elsevier Ltd: 216–25. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.096.
- Maccarini, Helena, Graça Vasconcelos, Hugo Rodrigues, Javier Ortega, and Paulo B Lourenço. 2018. “Out-of-Plane Behavior of Stone Masonry Walls: Experimental and Numerical Analysis.” *Construction and Building Materials* 179. Elsevier Ltd: 430–52. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.216.
- Magenes, Guido, Andrea Penna, Ilaria Enrica Senaldi, Maria Rota, and Alessandro Galasco. 2013. “Shaking Table Test of a Strengthened Full-Scale Stone Masonry Building with Flexible Diaphragms.” *International Journal of Architectural Heritage* 8 (3): 349–75. doi:10.1080/15583058.2013.826299.
- Marastoni, Diego, Andrea Benedetti, Luca Pelà, and Giacomo Pignagnoli. 2017. “Torque Penetrometric Test for the In-Situ Characterisation of Historical Mortars: Fracture Mechanics Interpretation and Experimental Validation.” *Construction and Building Materials* 157 (December): 509–20. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.120.
- Marastoni, Diego, Luca Pelà, Andrea Benedetti, and Pere Roca. 2016. “Combining Brazilian Tests on Masonry Cores and Double Punch Tests for the Mechanical Characterization of Historical Mortars.” *Construction and Building Materials* 112. Elsevier Ltd: 112–27. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.168.
- Meimaroglou, Nikiforos, and Harris Mouzakis. 2018. “Mechanical Properties of Three-Leaf Masonry Walls Constructed with Natural Stones and Mud Mortar.” *Engineering Structures* 172 (March). Elsevier: 869–76. doi:10.1016/j.engstruct.2018.06.015.
- Method, Standard Test. 2012. “C580-02 Standard Test Method for Flexural Strength and Modulus of Elasticity of Chemical- Resistant Mortars , Grouts , Monolithic Surfacing , and Polymer Concretes.” In *Annual Book of ASTM Standards*. Vol. 02. doi:10.1520/C0580-02R12.1.
- Milosevic, Jelena, António Sousa Gago, Mário Lopes, and Rita Bento. 2013. “Experimental Assessment of Shear Strength Parameters on Rubble Stone Masonry Specimens.” *Construction and Building Materials* 47. Elsevier Ltd: 1372–80.

doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.06.036.

- Mohammed, A., and T. G. Hughes. 2011. "Prototype and Model Masonry Behaviour under Different Loading Conditions." *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 44 (1): 53–65. doi:10.1617/s11527-010-9608-6.
- Mohammed, A., T. G. Hughes, and A. Mustapha. 2011. "The Effect of Scale on the Structural Behaviour of Masonry under Compression." *Construction and Building Materials* 25 (1). Elsevier Ltd: 303–7. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.025.
- Moradian, Z. A., and Mahmoud Behnia. 2009. "Predicting the Uniaxial Compressive Strength and Static Young's Modulus of Intact Sedimentary Rocks Using the Ultrasonic Test." *International Journal of Geomechanics* 9 (1): 14–19. doi:10.1061/(ASCE)1532-3641(2009)9:1(14).
- Moreira, Anabela Mendes. 2009. "Pedras Naturais." *Sebenta de Apoio a Materiais de Construção I*.
- Muñoz, Rosana, Paulo B Lourenço, and Susana Moreira. 2018. "Experimental Results on Mechanical Behaviour of Metal Anchors in Historic Stone Masonry." *Construction and Building Materials* 163: 643–55. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.090.
- NP EN 1925 : 2000. 2000. "Natural Stone Test Methods. Determination of Water Absorption Coefficient by Cappillarity."
- Oliveira, Daniel V., Rui A. Silva, Enrico Garbin, and Paulo B. Lourenço. 2012. "Strengthening of Three-Leaf Stone Masonry Walls: An Experimental Research." *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 45 (8): 1259–76. doi:10.1617/s11527-012-9832-3.
- Pan, Peng-zhi, Xia-ting Feng, and J A Hudson. 2006. "Numerical Simulations of Class I and Class II Uniaxial Compression Curves Using an Elasto-Plastic Cellular Automaton and a Linear Combination of Stress and Strain as the Control Method." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 43: 1109–17. doi:10.1016/j.ijrmms.2006.02.005.
- Parent, T, N Domede, and A Sellier. 2017. "Multi-Scale Mechanical Behavior of a Gothic Monument Composed of Ashlar Masonry . Application to the Design of a Reinforcement

- Technique Multi-Scale Mechanical Behavior of a Gothic Monument Composed of Ashlar Masonry . Application to the Design of a Reinf.” *International Journal of Architectural Heritage* 11 (3). Taylor & Francis: 399–414. doi:10.1080/15583058.2016.1238970.
- Parisi, Fulvio, Claudio Balestrieri, and Domenico Asprone. 2016. “Nonlinear Micromechanical Model for Tuff Stone Masonry: Experimental Validation and Performance Limit States.” *Construction and Building Materials*. Construction and Building Materials. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.078.
- Pelà, Luca, Elisa Canella, Alessandra Aprile, and Pere Roca. 2016. “Compression Test of Masonry Core Samples Extracted from Existing Brickwork.” *Construction and Building Materials* 119: 230–40. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.05.057.
- Pelà, Luca, Pere Roca, and Alessandra Aprile. 2018. “Combined In-Situ and Laboratory Minor Destructive Testing of Historical Mortars.” *International Journal of Architectural Heritage* 12 (3): 334–49. doi:10.1080/15583058.2017.1323247.
- Pelà, Luca, Pere Roca, and Andrea Benedetti. 2016. “Mechanical Characterization of Historical Masonry by Core Drilling and Testing of Cylindrical Samples.” *International Journal of Architectural Heritage* 10 (2–3). Taylor & Francis: 360–74. doi:10.1080/15583058.2015.1077906.
- Pina-Henriques, José. 2005. “Masonry under Compression: Failure Analysis and Long-Term Effects.” *PhD Thesis*.
- Pinho, Fernando F S, and Válder J G Lúcio. 2017. “Rubble Stone Masonry Walls in Portugal Material Properties , Carbonation Depth and Mechanical Characterization Rubble Stone Masonry Walls in Portugal Material Properties , Carbonation Depth.” *International Journal of Architectural Heritage* 00 (00). Taylor & Francis: 1–18. doi:10.1080/15583058.2017.1289424.
- Porto, Francesca da, Enrico Garbin, Claudio Modena, and Maria Rosa Valluzzi. 2005. “Failure Modes for in Plane Loaded Masonry Walls Made with Thin Layer Mortar.” *10th Canadian Masonry Symposium, Banff, Canada*, 694–703.
- Přikryl, R. 2001. “Some Microstructural Aspects of Strength Variation in Rocks.” *International*

- Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 38 (5): 671–82. doi:10.1016/S1365-1609(01)00031-4.
- R. Ulusay, Ö. Aydan, H. Gerçek, M.A. Hindistan, E. Tun. 2016. *Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*. Vol. 1. London: Taylor & Francis Group. doi:10.1109/tau.1969.1162058.
- Radovanović, Željka, Radmila Sindić, Sretena Dimovska, Nina Serdar, Nikolai Vatin, and Vera Murgul. 2015. “The Mechanical Properties of Masonry Walls - Analysis of the Test Results.” *Procedia Engineering* 117 (1): 870–78. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.155.
- Rao, K. Venu Madhava, B. V.Venkatarama Reddy, and K. S. Jagadish. 1997. “Strength Characteristics of Stone Masonry.” *Materials and Structures* 30 (4): 233–37. doi:10.1007/BF02486181.
- Ribarska, Aneta. 2019. “Partenon Da Acrópole (Grécia).” Accessed July 18. whc.unesco.org/en/documents/118898.
- RILEM. 1980. *Recommended Tests to Measure the Deterioration of Stone and to Assess the Effectiveness of Treatment Methods. Mat Const.* Edited by Bourdais-Dunoud. Bourdais-Dunoud.
- Rodrigues, Bonifácio Humberto do Rosário. 2017. “Turismo Cultural e Desenvolvimento . A Rota Das Catedrais e o Caso de Santarém.” *Tese de Doutoramento*. [https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/33090/4/Turismo Cultural e Desenvolvimento.pdf](https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/33090/4/Turismo%20Cultural%20e%20Desenvolvimento.pdf).
- Segura, Jorge, Luca Pelà, and Pere Roca. 2018. “Monotonic and Cyclic Testing of Clay Brick and Lime Mortar Masonry in Compression.” *Construction and Building Materials* 193 (October): 453–66. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.198.
- Segura, Jorge, Luca Pelà, Pere Roca, and Albert Cabané. 2019. “Experimental Analysis of the Size Effect on the Compressive Behaviour of Cylindrical Samples Core-Drilled from Existing Brick Masonry.” *Construction and Building Materials* 228. Elsevier Ltd: 116759. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.116759.

- Senaldi, Ilaria, Guido Magenes, Andrea Penna, Alessandro Galasco, and Maria Rota. 2014. "The Effect of Stiffened Floor and Roof Diaphragms on the Experimental Seismic Response of a Full-Scale Unreinforced Stone Masonry Building." *Journal of Earthquake Engineering* 18 (3): 407–43. doi:10.1080/13632469.2013.876946.
- Senthivel, R, and P B Lourenço. 2009. "Finite Element Modelling of Deformation Characteristics of Historical Stone Masonry Shear Walls." *Engineering Structures* 31 (9). Elsevier Ltd: 1930–43. doi:10.1016/j.engstruct.2009.02.046.
- Silva, Bruno, Aikaterina Evina, Maria Rosa, and Claudio Modena. 2014. "Calibration of Analytical Formulations Predicting Compressive Strength in Consolidated Three-Leaf Masonry Walls." *Construction and Building Materials* 64. Elsevier Ltd: 28–38. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.044.
- Silva, Bruno, Quelhas, Athanasios Pappas, João Miranda Guedes, Francesca da Porto, and Claudio Modena. 2016. "Numerical Analysis of the In-Plane Behaviour of Three-Leaf Stone Masonry Panels Consolidated with Grout Injection." *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1–27. doi:10.1007/s10518-016-9969-5.
- Standard, British. 1998. "EN 1052-1:1998 Methods of Test for Masonry - Part 1: Determination of Compressive Strength."
- Starr, Fiona. 2019. "Convento de Cristo Em Tomar (Portugal)." Accessed July 18. whc.unesco.org/pt/documentos/109620.
- Sýkora, Miroslav, Dimitris Diamantidis, Milan Holický, Jana Marková, and Árpád Rózsás. 2018. "Assessment of Compressive Strength of Historic Masonry Using Non-Destructive and Destructive Techniques." *Construction and Building Materials* 193: 196–210. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.180.
- Thaickavil, Nassif Nazeer, and Job Thomas. 2018. "Behaviour and Strength Assessment of Masonry Prisms." *Case Studies in Construction Materials* 8 (December 2017). Elsevier: 23–38. doi:10.1016/j.cscm.2017.12.007.
- Therin-Weise, M & G. 2019. "Torre de Belém (Portugal)." Accessed July 18. whc.unesco.org/pt/documentos/117817.

- Tuğrul, Atiye. 2004. "The Effect of Weathering on Pore Geometry and Compressive Strength of Selected Rock Types from Turkey." *Engineering Geology* 75 (3–4): 215–27. doi:10.1016/j.enggeo.2004.05.008.
- Valluzzi, M R, F Porto, and C Modena. 2001. "Behaviour of Multi-Leaf Stone Masonry Walls Strengthened by Different Intervention Techniques." *Historical Constructions*, 1023–32.
- Vasanelli, Emilia, Angela Calia, Donato Colangiuli, Francesco Micelli, and Maria Antonietta. 2016. "Assessing the Reliability of Non-Destructive and Moderately Invasive Techniques for the Evaluation of Uniaxial Compressive Strength of Stone Masonry Units." *Construction and Building Materials* 124. Elsevier Ltd: 575–81. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.130.
- Vasanelli, Emilia, Donato Colangiuli, Angela Calia, Zoubir-mehdi Sbartai, and Denys Breysse. 2017. "Combining Non-Invasive Techniques for Reliable Prediction of Soft Stone Strength in Historic Masonries." *Construction and Building Materials* 146. Elsevier Ltd: 744–54. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.146.
- Vasconcelos, G., and P. B. Lourenço. 2009. "Experimental Characterization of Stone Masonry in Shear and Compression." *Construction and Building Materials* 23 (11). Elsevier Ltd: 3337–45. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.06.045.
- Vasconcelos, Graça de Fátima Moreira. 2005. "Experimental Investigations on the Mechanics of Stone Masonry: Characterization of Granites and Behavior of Ancient Masonry Shear Walls." *PhD Thesis. Universidade Do Minho*, 266 p.
- Veiga, M Rosário, Ana Fragata, Ana Luisa Velosa, Ana Cristian, Goreti Margalha, M Rosário, Ana Fragata, et al. 2017. "Lime-Based Mortars : Viability for Use as Substitution Renders in Historical Buildings." *International Journal of Architectural Heritage* 3058 (July). doi:10.1080/15583050902914678.
- Veiga, Rosário, and Ana Rita Santos. 2015. "Natural Hydraulic Lime Mortars in Rehabilitation." *Revista Pedra & Cal* 58: 38–40.
- Vincent, Ko Hon Chiu. 2019a. "Pirâmide de Kukulcán (México)." Accessed July 18. whc.unesco.org/en/documents/128143.

- . 2019b. “Templo Do Sol, Konârak (Índia).” Accessed July 18. whc.unesco.org/pt/documentos/13684.
- Vintzileou, Elizabeth, and Theodoros P. Tassios. 2002. “Three-Leaf Stone Masonry Strengthened by Injecting Cement Grouts.” *Journal of Structural Engineering* 121 (5): 848–56. doi:10.1061/(asce)0733-9445(1995)121:5(848).
- Wagemakers, Bart. 2014. “A Review of Archaeology in the ‘Land of Tells and Ruins’. A History of Excavations in the Holy Land Inspired by the Photographs and Accounts of Leo Boer.” *Bulletin of the History of Archaeology* 24 (March): 17. doi:10.5334/bha.2417.
- Yusof, N.Q.A.M., and H. Zabidi. 2016. “Correlation of Mineralogical and Textural Characteristics with Engineering Properties of Granitic Rock from Hulu Langat, Selangor.” *Procedia Chemistry* 19. Elsevier Ltd.: 975–80. doi:10.1016/j.proche.2016.03.144.
- Zahra, Tatheer, and Manicka Dhanasekar. 2016. “Prediction of Masonry Compressive Behaviour Using a Damage Mechanics Inspired Modelling Method.” *Construction and Building Materials* 109. Elsevier Ltd: 128–38. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.01.048.