



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Civil**



## **Patologias e ensaios de diagnóstico nas alvenarias de pedra da Citadella em Budapeste, Hungria**

**RICARDO LEVI MOREIRA**  
(Licenciado em Engenharia Civil)

Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil  
na Área de Especialização em Edificações

Orientador:

Doutora Paula Raquel Pires da Cunha Lamego

Júri:

Presidente: Doutor Filipe Manuel Vaz Pinto Almeida Vasques

Vogais:

Doutor Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

Doutora Paula Raquel Pires da Cunha Lamego

**Novembro de 2020**



## **AGRADECIMENTOS**

Um especial agradecimento à minha avó e aos meus tios por todo o carinho, amor e educação que me dão e por todo o esforço que sempre fizeram para me proporcionar todas as oportunidades que me permitissem atingir todos os meus objetivos e tornar-me na pessoa que sou hoje.

À Professora Doutora Paula Lamego, minha orientadora, por toda a energia colocada neste trabalho e sobretudo por todo o apoio, atenção e disponibilidade prestados durante a elaboração e revisão do mesmo.

Ao Professor Doutor Ákos Török, por toda a informação e conhecimento transmitidos e por proporcionar as oportunidades de elaborar os testes *in-situ*.

Por fim, um agradecimento muito especial à minha namorada por todo o apoio e compreensão incondicionais durante todo o percurso de realização deste trabalho para o qual abdiquei de tanto do nosso tempo juntos.



## RESUMO

Com o objetivo de obtenção do grau de Mestre, o presente trabalho foi desenvolvido no âmbito do Trabalho Final de Mestrado do Curso de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, na área de especialização de Edificações, com o tema: “Patologias e ensaios de diagnóstico nas alvenarias de pedra da Citadella em Budapeste, Hungria”.

Este trabalho traduz o diagnóstico da condição e das patologias existentes numa determinada secção das paredes de alvenaria de pedra calcária de um monumento histórico situado no topo da colina Gellert em Budapeste. O monumento em questão tem o nome de Citadella e trata-se de uma fortificação construída em 1854 com o objetivo de fortalecer o domínio do império Austríaco na Hungria e mais concretamente na cidade de Budapeste. A colina de Gellert foi declarada património mundial pela UNESCO em 1987 juntamente com o Castelo de Buda e o Panorama do rio Danúbio e como tal também a Citadella passa a ser património protegido.

O presente trabalho pretende estudar e apresentar as formas mais importantes de degradação das paredes de alvenaria da Citadella, onde devido à sua natureza monumental e por sua vez de património protegido, a sua condição deve ser determinada através de métodos de ensaio não destrutivos. A presença de humidade nas pedras é estudada através do ensaio com o Humidímetro Portátil, enquanto que a sua resistência mecânica à compressão uniaxial é estudada através dos ensaios com o Martelo de Schmidt N-34 e com o Duroscópio. São também apresentados mapeamentos que determinam a proporção e a distribuição das patologias mais comuns existentes na superfície do paramento, tendo sido feita também uma análise percentual das mesmas.

Ao longo deste estudo, são feitas correlações entre as patologias mais comuns e os diferentes tipos de pedras existentes na secção de alvenaria estudada, pelo fato de o monumento ter sido sujeito a obras de reabilitação no passado onde foram substituídos elementos de pedra que para além de serem mais recentes também apresentam uma litologia ligeiramente diferente. Entre as patologias mais comuns são realçadas as patologias causadas por ações climáticas como é o caso das crostas de intempérie e o seu destacamento, eflorações salinas e desagregação granular. São ainda correlacionados os resultados obtidos nos testes in-situ com as patologias identificadas, com vista a

compreender os efeitos que as mesmas poderão ter na condição e no processo de degradação das pedras e no paramento em geral.

Por fim, com fundamento nas conclusões dos diagnósticos de patologias e testes elaborados, são propostas algumas das intervenções mais adequadas e necessárias para uma possível restauração do monumento no futuro, com base em técnicas de consolidação, técnicas de reforço e técnicas de proteção contra a humidade.

## **PALAVRAS CHAVE**

Monumento, Diagnóstico, Patologias, Paredes de alvenaria de pedra, Calcário oolítico grosso, Ensaios *in-situ*, Humidímetro Portátil, Esclerómetro de Schmidt, Mapeamentos.

## **ABSTRACT**

With the objective of obtaining a Master's degree, the present work was developed within the scope of the Final Master's Work of the Civil Engineering Course of the Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, in the Building specialization area, with the theme: "Pathologies and diagnostic tests in the stone masonry of Citadella, Hungary".

This work translates the diagnosis of the condition and pathologies existing in a certain section of the limestone masonry walls of a historic monument located at the top of the Gellert hill in Budapest. The monument in question has the name of Citadella and it is a fortification built in 1854 with the aim of strengthening the dominance of the Austrian empire in Hungary and more specifically in the city of Budapest. Gellert Hill was declared a World Heritage Site by UNESCO in 1987 together with Buda Castle and the Danube River Panorama and as such Citadella also becomes protected heritage.

The present work intends to study and present the most important forms of degradation of Citadella masonry walls, where due to its monumental nature and in turn protected heritage, its condition must be determined through non-destructive testing methods. The presence of moisture in the stones is studied through the test with the Portable Moisture Tester, while its mechanical resistance to uniaxial compression is studied through the tests with the Schmidt Hammer N-34 and with the Duroscope. Mappings that determine the proportion and distribution of the most common pathologies on the surface of the wall are also presented, as well as a percentage analysis of its proportions.

Throughout this study, correlations are made between the most common pathologies and the different types of stones existing in the studied masonry section, due to the fact that the monument has undergone rehabilitation works in the past where stone elements have been replaced which in addition to being more recent also have a slightly different lithology. Among the most common pathologies, pathologies caused by climatic actions, such as weather crusts and their detachment, saline efflorescences and granular breakdown, are highlighted. The results obtained in the in-situ tests are also correlated with the pathologies identified, in order to understand the effects that they may have on the condition and process of stone degradation and on the wall in general.

Finally, based on the conclusions of the diagnoses of pathologies and elaborated tests, some of the most appropriate and necessary interventions for a possible restoration of the

monument in the future are proposed, based on consolidation techniques, reinforcement techniques and moisture protection techniques.

## **KEYWORDS**

Monument, Diagnosis, Pathologies, Ancient stone masonry walls, Coarse limestone, In-situ testing, Portable moisture tester, Schmidt hammer, Mappings.

# ÍNDICE DE TEXTO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Enquadramento Geral .....	1
1.2.	Objetivos.....	2
1.3.	Estrutura e Organização.....	3
2.	CARACTERIZAÇÃO DO MONUMENTO.....	5
2.1.	Enquadramento Histórico .....	5
2.2.	Localização .....	8
2.3.	Clima.....	9
2.4.	Caracterização Arquitetónica.....	12
2.4.1.	Fachadas da Cidadella .....	16
2.4.2.	Secções da Cidadella .....	17
2.5.	Caracterização Construtiva .....	17
2.5.1.	Material.....	17
2.5.2.	Paredes.....	18
2.5.3.	Fundações .....	20
2.6.	Conclusões .....	20
3.	MÉTODOS DE INSPEÇÃO E ENSAIO .....	23
3.1.	Considerações gerais.....	23
3.2.	Metodologia da avaliação <i>IN-SITU</i> .....	23
3.3.	Classificação das técnicas de ensaio <i>IN-SITU</i> .....	25
3.4.	Técnicas de ensaio <i>IN-SITU</i> utilizadas .....	27
3.4.1.	Tubo de Karsten .....	28
3.4.2.	Humidímetro Portátil.....	33
3.4.3.	Martelo ou Esclerómetro de Schmidt .....	35

3.4.4.	Duroscópio .....	43
3.5.	Conclusões .....	46
4.	RESULTADOS DOS ENSAIOS <i>IN SITU</i> .....	49
4.1.	Considerações Gerais .....	49
4.2.	Metodologia de Teste .....	49
4.3.	Características Litológicas das pedras constituintes da secção de parede em estudo	52
4.4.	Patologias verificadas na secção de parede em estudo .....	54
4.5.	Ensaio de humidade superficial .....	58
4.5.1.	Apresentação e discussão dos resultados .....	59
4.5.2.	Comparação com ensaios realizados por outros autores no mesmo paramento .....	69
4.6.	Ensaio de resistência mecânica à compressão uniaxial .....	70
4.6.1.	Estimativa da resistência mecânica à compressão .....	72
5.	MAPEAMENTO DIGITAL E ANÁLISE DE DADOS .....	76
5.1.	Considerações Gerais .....	76
5.2.	Metodologia .....	76
5.3.	Resultados dos mapeamentos e análise .....	77
5.4.	Propostas de intervenção e reabilitação futuras .....	86
5.5.	Conclusões .....	87
6.	CONCLUSÕES .....	88
6.1.	Considerações finais .....	88
6.2.	Conclusões finais .....	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	90

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Cidadella em 1860, (MTVA Archivum, 2019). .....	5
Figura 2.2 - Pintura do aspeto original da Cidadella, (Civertan Bt., s.d.). .....	5
Figura 2.3 - Obras de demolição após a retirada total do exército Austríaco da fortaleza (1899), (MTVA Archivum, 2019). .....	6
Figura 2.4 - Vestígios de danos provocados na segunda guerra mundial, (Építészforum, Kft., 2019). .....	6
Figura 2.5 - Reconstrução da Cidadella em 1961, (MTVA Archivum, 2019). .....	7
Figura 2.6 - Cidadella nos tempos atuais, (Építészforum, Kft., 2019). .....	7
Figura 2.7 - Colina de Gellert e Cidadella, (Google Maps, 2020) .....	9
Figura 2.8 - Temperatura máxima (linha vermelha) e mínima (linha azul) médias, com faixas do 25º ao 75º e do 10º ao 90º percentil. As linhas finas pontilhadas são as temperaturas médias percebidas correspondentes, (Cedar Lake Ventures, Inc., 2019) .	11
Figura 2.9 - Percentagem de dias em que vários tipos de precipitação são observados, exceto por quantidades desprezíveis: só chuva, só neve e mista (chuva e neve no mesmo dia), (Cedar Lake Ventures, Inc., 2019). .....	11
Figura 2.10 - Número de horas em que o sol é visível (linha preta). De baixo (mais amarelo) para cima (mais cinza), as faixas coloridas indicam: luz solar total, crepúsculo (civil, náutico e astronômico) e noite total, (Cedar Lake Ventures, Inc., 2019). .....	12
Figura 2.11 - Planta da Cidadella, (Építészforum, Kft., 2019). .....	12
Figura 2.12 - Forte Principal da Cidadella, (Építészforum, Kft., 2019). .....	13
Figura 2.13 - Extremidade Este da Cidadella, (Építészforum, Kft., 2019). .....	14
Figura 2.14 - Parte central da fortaleza evidenciada a verde, (Építészforum, Kft., 2019). .....	14
Figura 2.15 - Planta dos níveis inferiores da Cidadella, (Építészforum, Kft., 2019). .....	15
Figura 2.16 - Fachada Sul, (Építészforum, Kft., 2019). .....	16
Figura 2.17 - Fachada Norte, (Építészforum, Kft., 2019). .....	16
Figura 2.18 - Fachada Oeste, (Építészforum, Kft., 2019). .....	16
Figura 2.19 - Fachada Este, (Építészforum, Kft., 2019). .....	16
Figura 2.20 - Secção longitudinal de toda a fortaleza, (Építészforum, Kft., 2019). .....	17

Figura 2.21 - Secção longitudinal do forte principal da fortaleza (com legenda), (Építészforum, Kft., 2019).....	17
Figura 2.22 - Tipo de aparelho e de assentamento das alvenarias de pedra da Citadella, adaptado de (GNDT, s.d.).....	18
Figura 2.23 - Classificação da secção das paredes de alvenaria de pedra da Citadella quanto ao número de panos, (GNDT, s.d.); (Mezey, 2016). ....	19
Figura 2.24 - Reforço dos cunhais das paredes com cadeia de angulo em cantaria, (Pinho, 1997).....	19
Figura 2.25 - Janela da Citadella, (Mezey, 2016).....	20
Figura 3.1 - Esquema de tubos de Karsten para superfícies a) verticais e b) horizontais, (LNEC, 2008). ....	29
Figura 3.2 - Tubos de Karsten e equipamentos auxiliares ao ensaio.....	31
Figura 3.3 - Etapas do ensaio do tubo de Karsten, (Apps, 2011).....	32
Figura 3.4 - Humidímetro utilizado no trabalho de campo (Gann-Hydromette UNI 1). 34	
Figura 3.5 - Martelo de Schmidt utilizado no trabalho de campo (Tipo N-34).....	38
Figura 3.6 - Esquema simplificado do funcionamento mecânico do esclerómetro.....	38
Figura 3.7 - Esclerómetro de Schmidt – Secção Longitudinal, (Oz-diagnostico, 2020).39	
Figura 3.8 - Ábaco de Gálos, (Gálos, 2003).....	43
Figura 3.9 - Duroscópio.....	43
Figura 3.10 - Duroscópio (faces, secção de corte e esquema mecânico). ....	45
Figura 4.1 - Planta da Citadella com a parede alvo de testes evidenciada a laranja.....	50
Figura 4.2 - Imagem da parede P1 com as pedras testadas evidenciadas a amarelo. ....	51
Figura 4.3 - Pormenor da localização das pedras testadas na parede P1 e respetiva numeração.....	51
Figura 4.4 - Localização do Perfil vertical 1 na parede P1 e pormenor do mesmo.....	52
Figura 4.5 - Localização do Perfil vertical 2 na parede P1 e pormenor do mesmo.....	52
Figura 4.6 - Superfície de uma pedra de calcário oolítico onde são perceptíveis os oólitos de calcite, (Jones, 2020). ....	53
Figura 4.7 - Superfície de uma pedra de calcário bioclástico onde são perceptíveis vestígios da presença de bioclastos.....	54
Figura 4.8 - Crosta negra, lisa e fina (filmes negros). ....	55
Figura 4.9 - Crostas escuras de cor acinzentada e morfologia esférica. ....	55

Figura 4.10 - Crostas brancas finas: a) destacamento por mm de superfície, b) destacamento por formação de bolhas.....	56
Figura 4.11 - Crosta branca espessa com destacamento.....	56
Figura 4.12 - Desintegração granular e presença de eflorescências salinas. ....	57
Figura 4.13 - Localização dos pontos de medição do ensaio de humidade relativa em cada pedra. ....	58
Figura 4.14 - Análise e resultados do ensaio com Humidímetro na pedra P1-1. ....	60
Figura 4.15 - Análise e resultados do ensaio com Humidímetro na pedra P1-2. ....	61
Figura 4.16 - Análise e resultados do ensaio com Humidímetro na pedra P1-3. ....	62
Figura 4.17 - Análise e resultados do ensaio com Humidímetro na pedra P1-4. ....	63
Figura 4.18 - Análise e resultados do ensaio com Humidímetro na pedra P1-5. ....	64
Figura 4.19 - Análise e resultados do ensaio com Humidímetro na pedra P1-6. ....	65
Figura 4.20 - Análise e resultados do ensaio com Humidímetro na pedra P1-7. ....	66
Figura 4.21 - Análise e resultados do ensaio com Humidímetro no Perfil Vertical I. ...	67
Figura 4.22 - Análise e resultados do ensaio com Humidímetro no Perfil Vertical II. ..	68
Figura 4.23 - Valores dos testes de Humidade Relativa de estudos anteriores, adaptado de (Tamás & Cebula, 2016). ....	69
Figura 5.1 - Mapa de material original e material substituído do paramento P1. ....	80
Figura 5.2 - Mapa de Crostas Negras presentes na superfície do paramento P1.....	81
Figura 5.3 - Mapa de Crostas Brancas presentes na superfície do paramento P1. ....	82
Figura 5.4 - Mapa de desintegração granular presente na superfície do paramento P1. ....	83
Figura 5.5 - Mapa de fraturas, fendas e fissuras presente na superfície do paramento P1. ....	84
Figura 5.6 - Mapa Litológico e de resultados dos ensaios realizados no paramento P1. ....	85



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 - Número de medições feitas no teste de humidade relativa com o Humidímetro.....	59
Tabela 4.2 - Características físicas do calcário grosso em várias regiões da Hungria, traduzido de (Fodor & Kleb, 1986). .....	73
Tabela 4.3 - Valores de resistência mecânica à compressão uniaxial .....	74
Tabela 5.1 - Materiais e patologias presentes na parede analisada. ....	78



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 - Classificação das técnicas de ensaio in-situ de acordo com os seus fatores e características.....	25
Quadro 3.2 - Propriedades físicas mais importantes e respetivos métodos de ensaio in-situ, (Török, Bostenaru Dan, & Pøikryl, 2010). .....	26
Quadro 3.3 - Componentes de cariz Químico/ Mineralógico e respetivas ferramentas e métodos de medição mais frequentes, (Török, Bostenaru Dan, & Pøikryl, 2010).....	27
Quadro 3.4 - Ensaio in-situ realizados nas paredes de alvenaria de pedra da Cidadella	28
Quadro 4.1 - Localização, orientação e dimensões da parede testada.....	50



## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 - Valores médios de ressalto dos testes com o Martelo de Schmidt e com o Duroscópio na parede P1.....	71
Gráfico 5.1 - Caraterização dos materiais da parede P1.....	78
Gráfico 5.2 – Caraterização das patologias na parede P1.....	79



## **ABREVIATURAS**

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

COVID-19 – *Corona Virus Disease 2019*

ADEC – *Área Departamental de Engenharia Civil*

EN – *European Norm*

FTIR – *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*

ICOMOS – *International Council on Monuments and Sites*

ISEL – *Instituto Superior de Engenharia de Lisboa*

KISZ – *Magyar Kommunista Ifjúsági Szövetség*

LiDAR – *Light Detection and Ranging*

LNEC – *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*

MERRA-2 – *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2*

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

RILEM – *Réunion Internationale des Laboratoires D'Essais et Recherches sur les Matériaux et les Constructions*

UNESCO – *United Nations Council on Monuments and Sites*

UV – *Ultraviolet*

XRD – *X-Ray Diffraction*

XRF – *X-Ray Fluorescence*

2D – *2 Dimensões*



## **SIMBOLOGIA**

### **Alfabeto Latino**

IE – Índice Esclerométrico

R – Valor de Ressalto

### **Alfabeto Grego**

$\sigma$  – Tensão

$\sigma_c$  – Resistência à compressão uniaxial



## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. Enquadramento Geral**

Os monumentos são um testemunho material da história e desenvolvimento de qualquer civilização. Por atravessarem várias épocas, estes tornam-se uma das melhores fontes de informação referenciando aspetos culturais, económicos e simbólicos de uma população, conferindo em simultâneo uma certa identidade ao local onde se encontram.

Após a sua construção os monumentos têm um período de vida útil que termina no momento em que estes ou os seus elementos construtivos deixem de cumprir as suas exigências funcionais de desempenho. São diversos os fatores que sob a forma de agentes de degradação contribuem para a limitação do tempo de vida útil de um monumento. Entre eles, os mais frequentes são a utilização humana e as ações climáticas. Como tal, e devido ao seu valor cultural, social e arquitetónico, tornam-se indispensáveis a sua conservação e recuperação. Para qualquer processo de reabilitação ou conservação ser realizado de uma maneira segura e eficaz sem que sejam criadas condições para o agravamento de danos posteriores, estes devem ser executados de forma prudente e com recurso a diagnósticos precisos e eficientes que identifiquem os danos existentes e respetivas causas, de forma a definir terapias que se adequem á eliminação ou minimização das mesmas, (ICOMOS, 2003).

O diagnóstico deve ser devidamente realizado, pois dele podem resultar identificações de patologias incorretas e/ou escolhas inadequadas de terapias para o tratamento das patologias verificadas.

Um diagnóstico competente e adequado pode ser realizado através de um bom conhecimento da localização e história do monumento, das ações climáticas e humanas a que está e foi sujeito, e do serviço e desempenho dos materiais e elementos que o constituem.

Uma das formas mais frequentes de avaliação da condição e desempenho dos elementos construtivos de monumentos é o recurso à realização de ensaios não destrutivos diretamente no local. Estes tipos de testes são denominados de testes *in-situ* e a sua execução traz inúmeras vantagens à perceção das patologias e respetivas causas existentes em qualquer edificação. A sua vertente não destrutiva enquadra-se no aspeto de proteção do monumento pelo seu valor patrimonial e é altamente aconselhada pelas entidades reguladoras da defesa do património.

Neste contexto o presente trabalho de final de mestrado é orientado para o estudo das paredes de alvenaria de pedra da Citadella em Budapeste com vista a diagnosticar e avaliar o seu estado quanto à presença de patologias que contribuam para a sua degradação. Apesar de não ter sofrido alterações significativas até aos dias de hoje, são visíveis nas paredes do edifício traços de danos referentes à sua utilização com propósito militar nas Guerras Mundiais e na revolução húngara de 1956.

A degradação das paredes de pedra calcária da Citadella é significativa, apresentando degenerações ao nível das propriedades físicas das pedras que apresentam características propensas à captação de água e formação de crostas de intempérie. Este aspeto realça a necessidade de restauração do edifício uma vez que atualmente se encontra inativo e sem poder ser visitado.

O calcário grosseiro que compõe as pedras das alvenarias é uma rocha fácil de esculpir e fabricar, e talvez por isso tenha sido utilizada com bastante frequência como pedra de construção e decorativa no século XIX em muitos edifícios e monumentos de Budapeste, aleado ao facto de existirem bastantes pedreiras de calcário nos arredores da cidade e na Hungria em geral.

O ensaio de humidade superficial, com recurso ao Humidímetro Portátil, e os ensaios de resistência mecânica á compressão uniaxial, com o auxílio do Martelo de Schmidt e do Duroscópio são os testes que sustentam esta avaliação. Como tal, neste trabalho são expostos todos os conhecimentos adquiridos sobre a eficácia destas técnicas de ensaio na avaliação do estado de degradação e do desempenho em serviço de paredes de alvenaria de pedra em monumentos históricos.

### **1.2. Objetivos**

Este trabalho pretende aprofundar os conhecimentos sobre as condições e respetivas características de desempenho das paredes de alvenaria de pedra calcária do monumento da Citadella, baseando esse estudo na informação obtida através das técnicas de ensaio *in-situ* utilizadas. Assim, pretende-se utilizar os resultados obtidos para identificar, de forma mais exata, os tipos de patologias causadas por intemperismo existentes, retirando conclusões acerca das condições em que as alvenarias se encontram.

Em relação às técnicas de ensaio *in-situ* utilizadas, pretende-se avaliar a sua viabilidade e aplicabilidade no caso em estudo, bem como contribuir para a sua melhoria ao expor os níveis de precisão dos seus resultados perante os objetivos que envolvem a sua utilização.

De uma forma pormenorizada, são seguidamente apresentados todos os objetivos deste trabalho, principais e secundários:

- Descrição morfológica das patologias existentes nas paredes de alvenaria de pedra do monumento da Citadella, com destaque para as patologias causadas por intemperismo, por se tratar da principal causa das mesmas;
- Estudar o impacto que as ações ambientais podem ter nas paredes de alvenaria compostas por pedra calcária;
- Mostrar a aplicabilidade e viabilidade dos ensaios não destrutivos na avaliação das condições das paredes de alvenaria de pedra de um monumento;
- Estudar a potencialidade e a sensibilidade do ensaio de humidade superficial com o Humidímetro na avaliação da quantidade de humidade relativa presente nas pedras e na avaliação do nível de elevação de água proveniente do solo por capilaridade;
- Estudar a potencialidade e sensibilidade dos ensaios com o Martelo de Schmidt e com o Duroscópio na avaliação da resistência mecânica à compressão uniaxial dos elementos de pedra constituintes das paredes de alvenaria;
- Relacionar a influência das patologias por intemperismo presentes nas pedras das alvenarias com os resultados obtidos nos testes *in-situ* realizados;
- Elaborar uma análise percentual das proporções das diferentes patologias e litologias, presentes no paramento em estudo, bem como mapeamentos digitais em 2D que apresentem e sintetizem não só a sua localização, mas também a dos resultados obtidos nos ensaios realizados;
- Sugerir métodos de reabilitação possíveis e adequados perante as patologias mais graves identificadas.

### **1.3. Estrutura e Organização**

O presente trabalho encontra-se essencialmente dividido em seis capítulos, sendo cada um destes subdividido em subcapítulos, visando uma organização coerente dos conteúdos dispostos.

## Capítulo 1

O capítulo 1 consiste na introdução, onde se apresenta um enquadramento geral do tema, são explicados de forma sucinta os objetivos, bem como a metodologia adotada durante o mesmo e é também definida a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 é referente à caracterização do monumento onde se procede a uma caracterização arquitetónica e construtiva do monumento e são esclarecidos aspetos importantes, como a sua localização, as ações climáticas a que está exposto e o seu enquadramento histórico.

O capítulo 3 é alusivo aos métodos de inspeção e ensaios *in-situ* utilizados. Numa primeira parte são abordados os métodos de inspeção e ensaio *in-situ* de uma forma geral, onde é referida a sua metodologia de avaliação e são classificadas as diversas técnicas de ensaio existentes e que podem ser aplicadas no estudo de alvenarias de pedra. Numa segunda parte são abordadas as técnicas de ensaio *in-situ* utilizadas neste trabalho, que correspondem ao Humidímetro portátil, martelo de Schmidt e Duroscópio, mencionando os seus campos de aplicação, vantagens e desvantagens, o funcionamento dos equipamentos e respetivos procedimentos experimentais.

O capítulo 4 corresponde à apresentação e análise dos resultados. Deste capítulo fazem parte a descrição das características litológicas das pedras avaliadas e a caracterização das diversas patologias existentes na secção de alvenaria de pedra estudada. São também apresentados e analisados os resultados obtidos nos testes *in-situ* realizados.

O capítulo 5 é referente ao mapeamento digital e análise de dados, onde se apresenta uma análise das proporções das patologias mais comuns presentes no paramento em estudo, bem como um conjunto de mapeamentos digitais em 2D com o objetivo de ilustrar as informações acerca da localização das diferentes características litológicas do material, das manifestações patológicas presentes no paramento e dos resultados obtidos nos ensaios realizados.

No sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões relativas ao trabalho desenvolvido, assim como perspectivas de posterior desenvolvimento do tema em estudo.

## **2. CARACTERIZAÇÃO DO MONUMENTO**

### **2.1. Enquadramento Histórico**

Após a revolução húngara de 1848, que acabou por degenerar na guerra pela independência da Hungria no seio do Império Austríaco (1804 a 1867) e na consequente vitória por parte dos reformistas húngaros, o conselho militar de Viena decidiu construir uma fortaleza no ponto mais alto de Budapeste, na colina de Gellert, com o objetivo de intimidar e manter sob controlo os separatistas húngaros e toda a cidade, (Hungary Starts Here, 2011). Esta fortaleza é apelidada de Cidadella, nome húngaro que vem da palavra “cidadela” que define qualquer tipo de fortaleza ou fortificação construída num ponto estratégico de uma cidade e destinada a proteger uma guarnição ou poder político dos próprios habitantes assegurando a lealdade dos cidadãos, (Farinha, 2018). As obras de construção da Cidadella têm início no ano de 1850 pelos planos do Engenheiro General Emmanuel Zitta, sendo a obra confiada ao engenheiro Ferenc Kasselic e ao arquiteto Mátyás Zitterbarth, e foram concluídas em 1854, tendo a duração de 4 anos, (Hungary Starts Here, 2011). Nas Figura 2.1 e Figura 2.2 é possível observar o seu aspeto original.

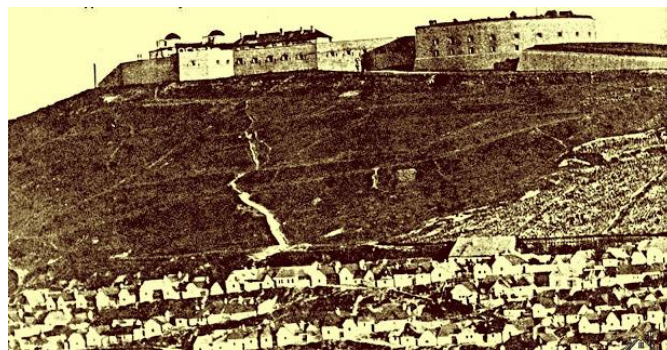


Figura 2.1 - Citadella em 1860, (MTVA Archivum, 2019).



Figura 2.2 - Pintura do aspeto original da Citadella, (Civertan Bt., s.d.).

## Capítulo 2

Em 1867, após o compromisso Austro-húngaro que tornaria a Hungria novamente num estado soberano independente, a Citadella perde a utilidade militar sendo que só em 1899 acontece a retirada total do exército austríaco do interior da fortaleza, (Hungary Starts Here, 2011). Nesse momento, devido á pressão entusiasta da população de Budapeste, foram promovidas demolições simbólicas de algumas partes das muralhas da fortaleza, tal como se pode observar nas imagens da Figura 2.3, como é o caso da parte superior da entrada principal, demolições essas que só não avançaram mais devido à falta de recursos económicos para o efeito.

Posteriormente, os anos de 1944 e 1945 trazem de volta a sua utilidade para fins militares durante a segunda guerra mundial, servindo de base de defesa aérea para as tropas alemãs e húngaras, bem como centro hospitalar para os feridos de guerra, (Mezey, 2016). Ainda hoje são visíveis danos causados por projeteis balísticos nas suas fachadas que remetem a esses tempos, conforme representado na Figura 2.4.



Figura 2.3 - Obras de demolição após a retirada total do exército Austríaco da fortaleza (1899), (MTVA Archivum, 2019).



Figura 2.4 - Vestígios de danos provocados na segunda guerra mundial, (Építészfórum, Kft., 2019).

Terminada a segunda guerra mundial, a Citadella volta a ser alvo de demolições simbólicas, mas em 1961 a sua reconstrução, representada na Figura 2.5, foi levada a cabo pelos membros ativistas do primeiro distrito da Liga da Juventude Comunista (KISZ) que trabalharam em serviço social para reconstruir a Citadella. A partir da década de 1960, a Citadella passa a ser concebida como destino turístico, sendo transformada num hotel e restaurante, (Mezey, 2016). Atualmente o monumento encontra-se fechado desde 2014 servindo apenas de local de implementação de várias antenas de transmissão de frequências de rádio como se pode ver na Figura 2.6.

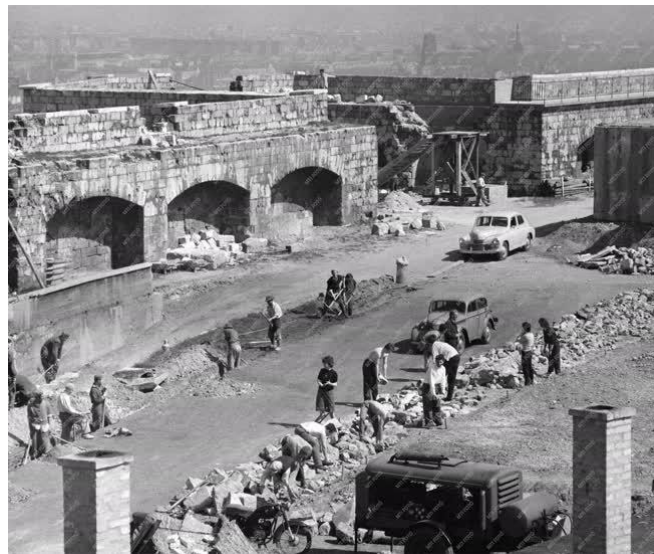


Figura 2.5 - Reconstrução da Citadella em 1961, (MTVA Archivum, 2019).

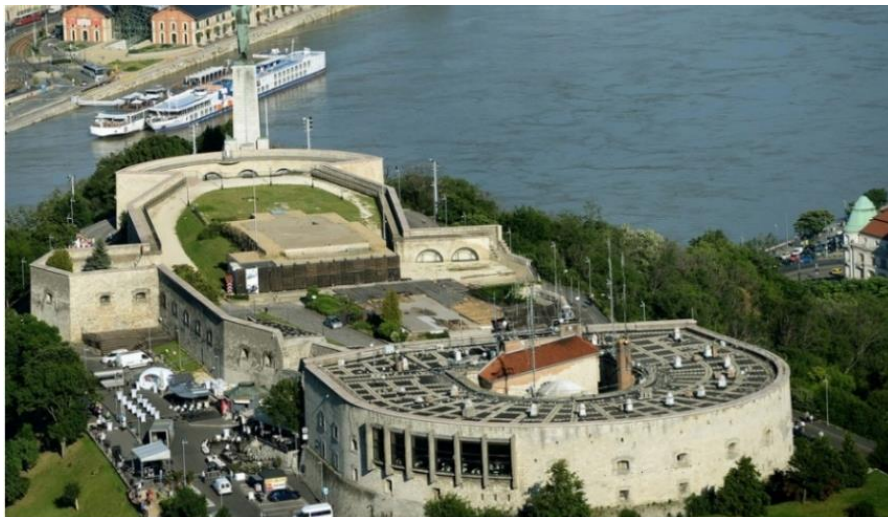


Figura 2.6 - Citadella nos tempos atuais, (Építészforum, Kft., 2019).

## 2.2. Localização

A Citadella está localizada na colina Gellert, que faz parte das colinas de Buda (Buda Hills), nos 1º e 11º distritos da cidade de Budapeste na Hungria, fazendo fronteira com o rio Danúbio, Sas Hill, Naphegy e Castle Hill.

A colina Gellert tem uma elevação de 140 metros acima do rio Danúbio e 235 metros acima do nível do mar, e é composta majoritariamente por rochas dolomíticas formadas no final do período Triásico. Esta massa rochosa pode ser notada na encosta norte da colina, ao longo do penhasco do Danúbio, na forma de rochas de cor avermelhada e calcário dolomítico de água doce. A encosta sul, onde registros históricos indicam ter-se tratado de uma zona rica em plantações de vinhas e práticas de vinicultura, hoje em dia é uma área verde de parques urbanos, repleta das mais diversas formas de vegetação e local de alguns “playgrounds” e jardins botânicos. Atualmente a colina também dá lugar a uma área residencial valiosa onde várias embaixadas marcam também presença pelas ruas que a serpenteiam, (Mezey, 2016). Na figura 2.7, para além da localização da Hungria no mapa europeu e a localização de Budapeste no mapa da Hungria, é possível observar a encosta norte da colina Gellert, bem como a maior parte da sua área envolvente.

Considerada Património Mundial da UNESCO em 1987, a Colina Gellert é hoje em dia uma das zonas da Hungria com maior riqueza histórica, cultural e geológica, (UNESCO, 1992-2020). Outras das suas características são a presença de várias cavernas resultantes da erosão do subsolo causada por movimentos das placas tectónicas, pela abundância de aquíferos termais e pela elevada porosidade das rochas calcárias que compõe grande parte da massa rochosa da colina como já referido anteriormente, (Haas, 2012).



Figura 2.7 - Colina de Gellert e Cidadella, (Google Maps, 2020)

### **2.3. Clima**

A maior parte dos monumentos históricos que hoje podemos contemplar são dotados de uma elevada robustez estrutural, fator que tem permitido a sua sobrevivência ao longo dos anos. Apesar disso, com o passar do tempo, é normal que estas estruturas sofram uma degradação progressiva, resultante de causas naturais, como a exposição às ações climáticas que contribuem de forma significativa para o desgaste e envelhecimento dos materiais de construção.

Os impactos do aquecimento global sobre o património histórico e cultural são um dos aspetos da mudança climática a ter mais em conta, uma vez que os edifícios antigos são em geral mais permeáveis que os modernos e um aumento na humidade e temperatura atmosféricas aumenta o risco de infiltrações, impregnação salina e acumulação de biomassa nas superfícies. A chuva ácida, as mudanças bruscas de temperatura e humidade, os fenómenos gelo-degelo e a velocidade do vento também determinam a fragilização dos materiais construtivos por corrosão e erosão de superfícies, bem como a perda de detalhes e relevos arquitetónicos. Este tema foi levado ao conhecimento da UNESCO em 2005 por um grupo de organizações e indivíduos interessados, tendo sido aprovada uma política oficial pela UNESCO na 16ª Sessão da Assembleia Geral de 2007, (ICOMOS Scientific Council, 2007-2008);(UNESCO, 2007).

## Capítulo 2

O clima em Budapeste tem mudado muito ao longo dos últimos 100 anos, induzido por recentes comportamentos climáticos que registam com maior frequência os fenómenos evidentes de um aquecimento global. Como tal, as temperaturas máximas e mínimas ao longo do ano em Budapeste têm ficado mais próximas, ainda que distantes o suficiente para provocarem fenómenos de gelo-degelo nas mais diversas estruturas e materiais.

Todos os dados meteorológicos a seguir apresentados são retirados da Análise Retrospetiva da Era Moderna (MERRA-2) da NASA e têm base numa análise estatística de resultados históricos feita entre os anos 1980 e 2016, (Cedar Lake Ventures, Inc., 2019).

Atualmente em Budapeste, o verão é morno e o inverno é frio e seco. Na Figura 2.8 é apresentado um diagrama com o fluxo de temperaturas máximas, mínimas e médias ao longo do ano, onde se pode ver que neste período a temperatura varia em média entre os  $-3^{\circ}\text{C}$  e os  $27^{\circ}\text{C}$  sendo que raramente atinge os  $11^{\circ}\text{C}$  no inverno ou os  $33^{\circ}\text{C}$  no verão. A estação morna tem a duração de 3,6 meses, de 23 de Maio a 11 de Setembro, com uma temperatura máxima diária acima dos  $22^{\circ}\text{C}$ . O dia mais quente do ano verifica-se no início do mês de Agosto onde são registadas em média, temperaturas máximas de  $27^{\circ}\text{C}$  e mínimas de  $16^{\circ}\text{C}$ . A estação fria permanece por 3,5 meses, de 20 de Novembro a 2 de Março com uma temperatura máxima diária em média abaixo dos  $8^{\circ}\text{C}$ . O dia mais frio do ano verifica-se a meio do mês de Janeiro com médias de  $-3^{\circ}\text{C}$  de temperatura mínima e  $3^{\circ}\text{C}$  de temperatura máxima. Na Figura 2.9 é possível observar que a maior percentagem de precipitação é verificada entre finais de Abril e finais de Agosto com uma probabilidade acima dos 22%.

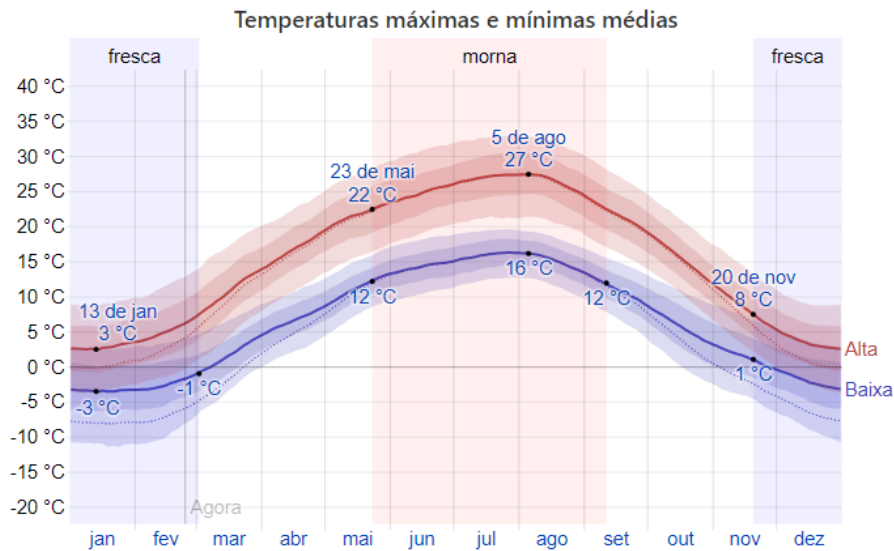


Figura 2.8 - Temperatura máxima (linha vermelha) e mínima (linha azul) médias, com faixas do 25º ao 75º e do 10º ao 90º percentil. As linhas finas pontilhadas são as temperaturas médias percebidas correspondentes, (Cedar Lake Ventures, Inc., 2019)

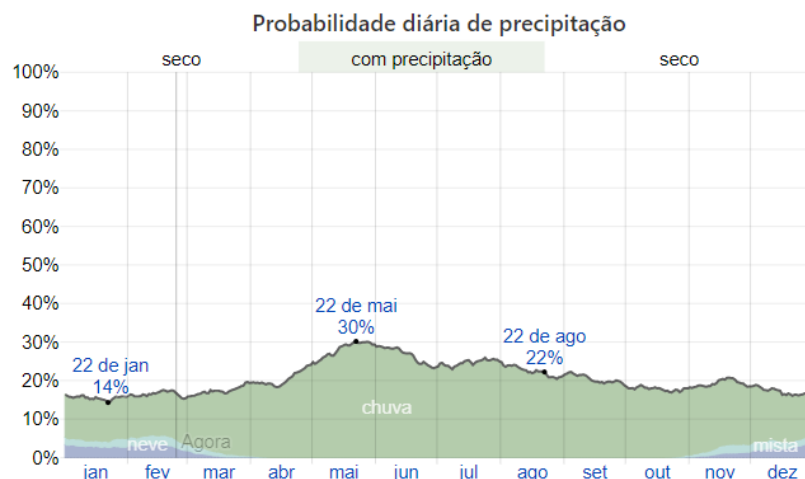


Figura 2.9 - Percentagem de dias em que vários tipos de precipitação são observados, exceto por quantidades desprezíveis: só chuva, só neve e mista (chuva e neve no mesmo dia), (Cedar Lake Ventures, Inc., 2019).

Na Figura 2.10 é possível observar que a duração do dia em Budapeste varia substancialmente ao longo do ano, o dia mais curto conta em média com 8 horas de luz solar e o dia mais longo com 16 horas de luz solar.

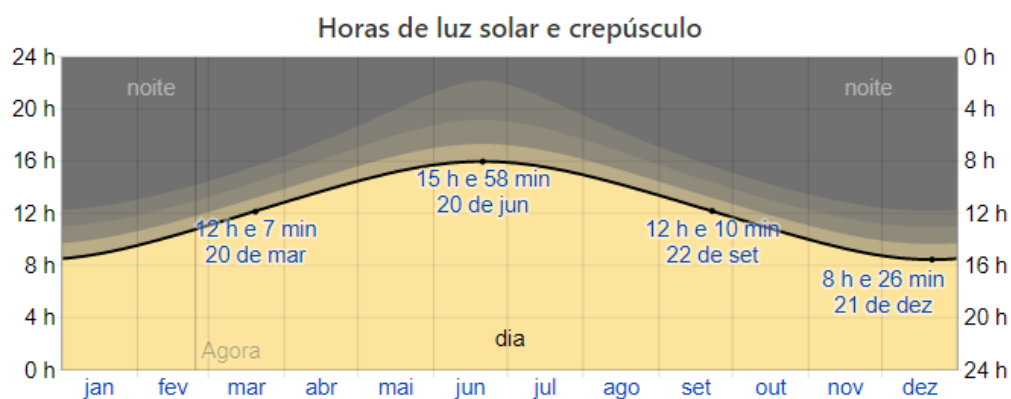


Figura 2.10 - Número de horas em que o sol é visível (linha preta). De baixo (mais amarelo) para cima (mais cinza), as faixas coloridas indicam: luz solar total, crepúsculo (civil, náutico e astronômico) e noite total, (Cedar Lake Ventures, Inc., 2019).

A velocidade média anual do vento é de 3,4 m/s, a direção predominante do vento é vinda de Noroeste, mas também se pode considerar oeste uma direção de vento comum.

A sensação de humidade em Budapeste não varia de forma significativa mantendo-se aproximadamente nos 5% ao longo do ano.

## 2.4. Caracterização Arquitetónica

A estrutura da fortaleza tem 220 metros de comprimento e varia entre 45 e 60 metros de largura, as suas paredes com uma altura variável entre os 9 e os 16 metros e com espessura entre os 1,5 e 3 metros, são de alvenaria de pedra calcária. Observando a planta da Cidadella apresentada na Figura 2.11, pode-se dizer que a estrutura é parcialmente simétrica ao longo do eixo espacial Este-Oeste e composta por 3 partes distintas.

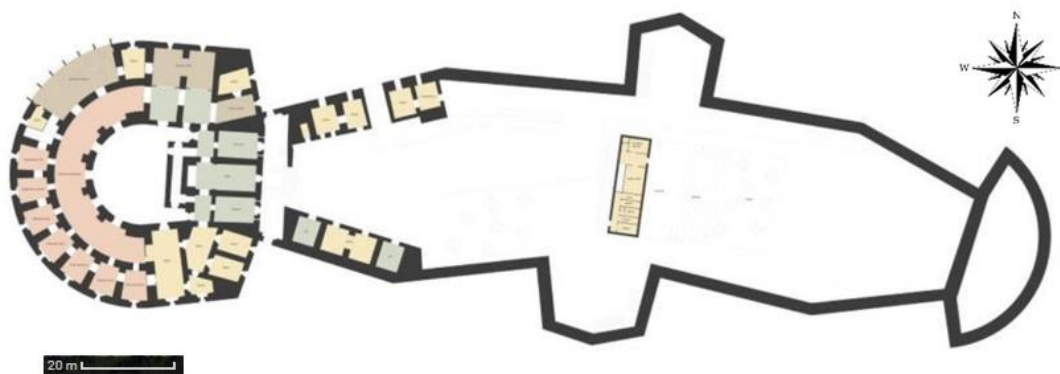


Figura 2.11 - Planta da Cidadella, (Építészforum, Kft., 2019).

Como se pode constatar nas Figura 2.11 e Figura 2.12, a extremidade Oeste tem uma forma arqueada, semicircular, e é o local onde se encontra o forte principal que está construído em forma de “D” em volta de um pátio também ele semicircular. Este forte é composto maioritariamente por 2 pisos, mas existe numa parcela do edifício um compartimento no subsolo que faz com que tenha 3. As paredes divisórias têm uma posição radial, com os seus eixos a convergirem no centro do semicírculo e grande parte das divisões são do tipo casamata, estilo arquitetónico militar de instalações fechadas, robustas, de paredes espessas e tetos abobadados. Tanto a fachada exterior como a fachada do pátio são compostas por 2 fileiras de janelas com ombreiras da espessura da parede. Podemos ainda encontrar um recorte a noroeste da parede da fortificação que dá lugar a uma janela panorâmica com vista para Buda e ainda pequenos recortes quadrangulares na parte superior da fachada que serviam como postos de vigia e de circulação de ar, (Mezey, 2016).

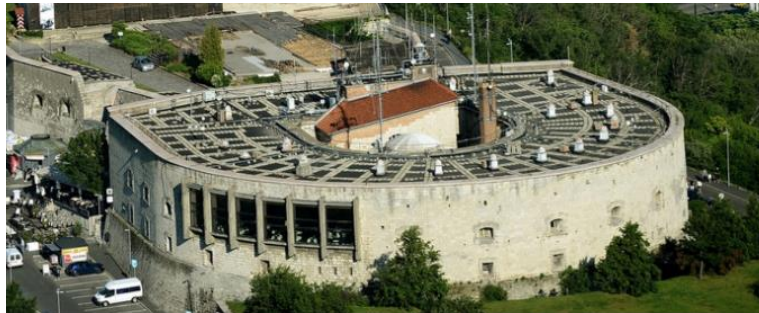


Figura 2.12 - Forte Principal da Citadella, (Építészforum, Kft., 2019).

A extremidade Este da fortaleza, representada nas imagens da Figura 2.13, também tem uma forma arqueada, mas desta vez as paredes formam uma espécie de leque oriental que abrange no seu interior um pátio aberto destinado à presença de artilharia pesada. São visíveis aberturas dispostas em grupos de 3, destinadas à receção das bocas dos canhões que defendiam as margens do Danúbio a Leste da Citadella.



Figura 2.13 - Extremidade Este da Citadella, (Építészforum, Kft., 2019).

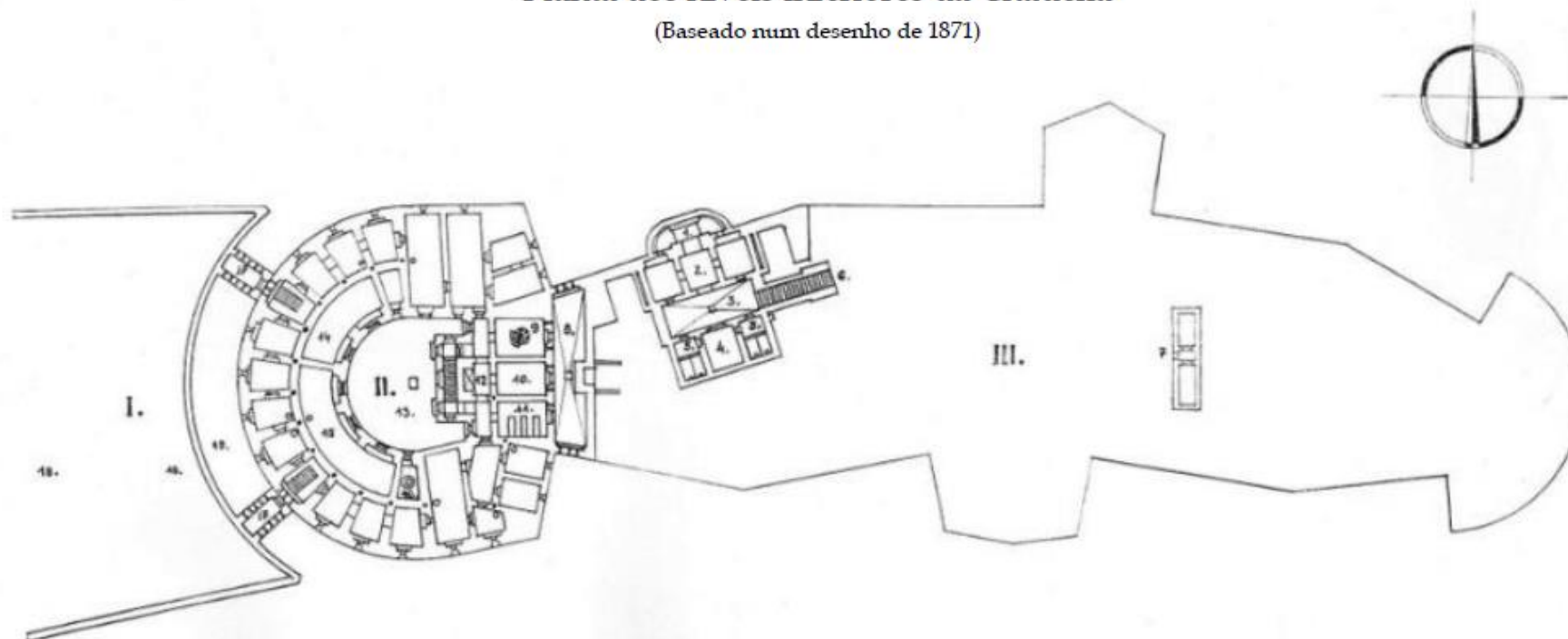
Por último, a parte central da fortaleza, evidenciada a verde na Figura 2.14, é toda ela um amplo pátio preparado para receber artilharia e movimentações militares, em que as paredes que o delimitam se estendem de um lado ao outro da fortaleza formando ângulos internos de aproximadamente  $160^\circ$  e assumindo formas poligonais que convergem num baluarte tanto na fachada norte como na sul, pormenor que defende rigorosamente o conceito arquitetónico militar das fortalezas desenvolvido no século XIX que promovia uma construção das muralhas em forma de estrela para que os impactos causados pelos projeteis inimigos não atingissem as paredes numa trajetória perpendicular às mesmas. Este sistema provocava o ricochete dos projeteis, reduzindo significativamente os danos do impacto.



Figura 2.14 - Parte central da fortaleza evidenciada a verde, (Építészforum, Kft., 2019).

### Planta dos níveis inferiores da Cidadella

(Baseado num desenho de 1871)



- I. Grande Inclinação Ocidental; II. Fortaleza Principal; III. Grande Pátio;**  
1. Ponte de entrada e vala; 2. Porta de entrada com mecanismo de elevação de ponte, salas de guarda; 3. Pátio profundo; 4. Cocheira; 5. Cavalariças;  
6. Escadas que levam ao pátio; 7. Caves; 8. Fosso de proteção; 9. Casas de banho; 10. Armazém;  
11. Cozinha; 12. Corredor com poço de elevador; 13. Pátio interno; 14. Armazém de pólvora; 15. Hospital da casamata; 16. Poço;  
17. Casamatas de asa que fecham a fortaleza pelo exterior; 18. Encosta de terra; 19. Fosso externo;

Figura 2.15 - Planta dos níveis inferiores da Cidadella, (Építészforum, Kft., 2019).

### 2.4.1. Fachadas da Citadella

Nas figuras que se seguem são apresentadas todas as fachadas da Citadella conforme se encontram nos dias atuais.



Figura 2.16 - Fachada Sul, (Építészfórum, Kft., 2019).



Figura 2.17 - Fachada Norte, (Építészfórum, Kft., 2019).

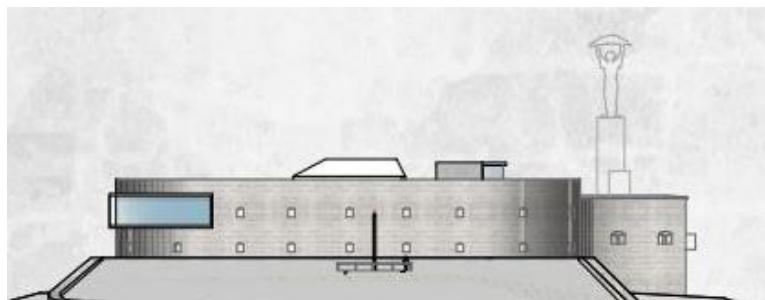


Figura 2.18 - Fachada Oeste, (Építészfórum, Kft., 2019).

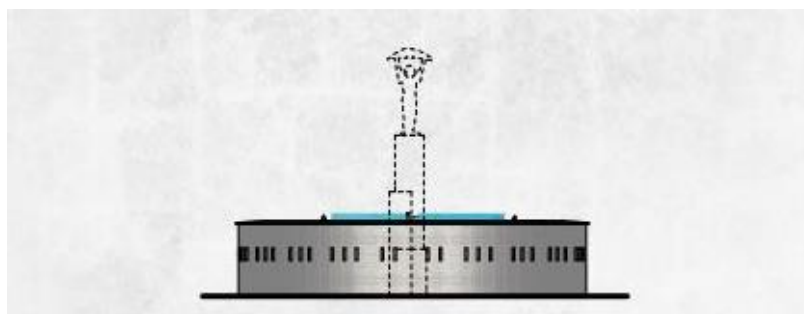


Figura 2.19 - Fachada Este, (Építészfórum, Kft., 2019).

## **2.4.2. Secções da Citadella**

As Figuras 2.20 e 2.21 correspondem a secções de corte longitudinais de toda a fortaleza e apenas do forte principal, respetivamente, permitindo apresentar a sua forma interior.



Figura 2.20 - Secção longitudinal de toda a fortaleza, (Építészforum, Kft., 2019).

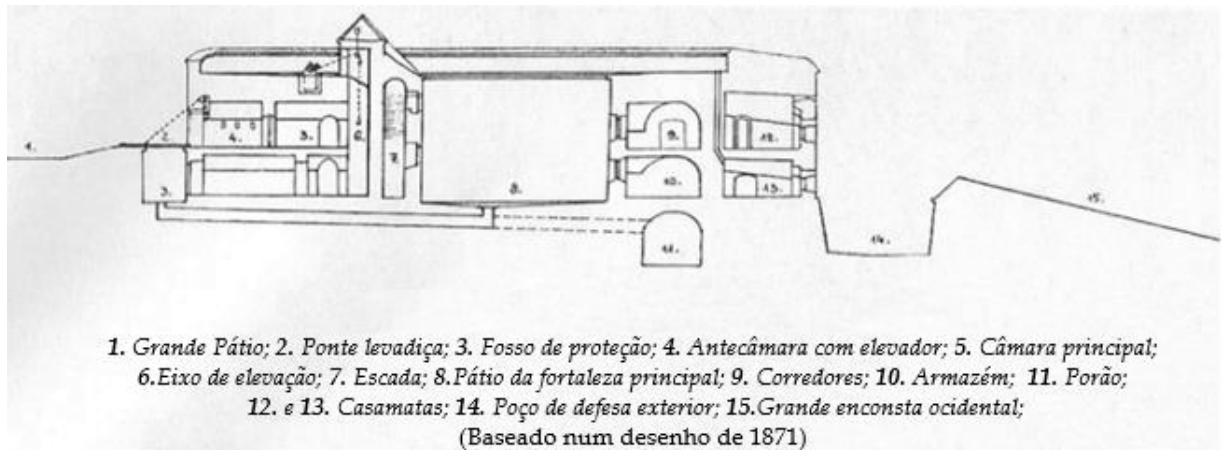


Figura 2.21 - Secção longitudinal do forte principal da fortaleza (com legenda), (Építészforum, Kft., 2019).

## **2.5. Caracterização Construtiva**

### **2.5.1. Material**

As paredes da Citadella são compostas por pedras trabalhadas de calcário grosseiro oóide, rocha sedimentar química pertencente ao grupo das rochas sedimentares de origem biogénica, (Török & Rozgonyi, 2004).

Estas pedras terão origem em pedreiras de calcário próximas da capital, onde é possível produzir calcário de granulação média, fina e grossa, como é o caso das localizações de Sóskut, Bia e Diósd nas proximidades das colinas de Buda, ou até mesmo em Kobánya ou Budafok. O calcário grosseiro tem sido regularmente utilizado ao longo dos anos em Budapeste como pedra decorativa ou material de construção e reabilitação de monumentos

como a Chain Bridge, Citadella, Mathias Church e o Parlamento. Este tipo de material não pode ser polido, mas pode ser esculpido e usado como pedra decorativa, blocos para alvenaria, pavimentos e rodapés, (Török Á. , 2006).

### 2.5.2. Paredes

As paredes exteriores da fortaleza são paredes resistentes construídas em alvenaria de cantaria, pedras com todas as faces aparelhadas e de forma geométrica, maioritariamente paralelepípedica, e ligadas por argamassa tradicional, sobrepostas e justapostas. Estas pedras têm uma densidade compreendida entre 1,8 e 2,6 g/cm<sup>3</sup>, uma resistência mecânica entre 4 e 97 MPa e proporcionam uma boa trabalhabilidade e uma aderência variável da argamassa, (Casella, 2003), (Fodor & Kleb, 1986).

Quanto ao tipo de aparelho, verificam-se juntas regulares alinhadas e desencontradas transversalmente, e um tipo de assentamento horizontal/vertical das pedras, como se pode perceber na Figura 2.22. Relativamente ao tipo de secção, é possível observar através da Figura 2.23 que as paredes são de pano simples com uma espessura significativa, que pode variar entre os 1,5 e os 3 metros, e compostas por mais do que uma pedra transversal, (Binda & Penazzi, 2002).

Nos cunhais das paredes, a cantaria é colocada de maneira a formar uma cadeia de ângulo que permite melhorar o travamento das paredes, (Pinho, 1997). Este pormenor de reforço dos cunhais pode ser melhor compreendido através do desenho da Figura 2.24.

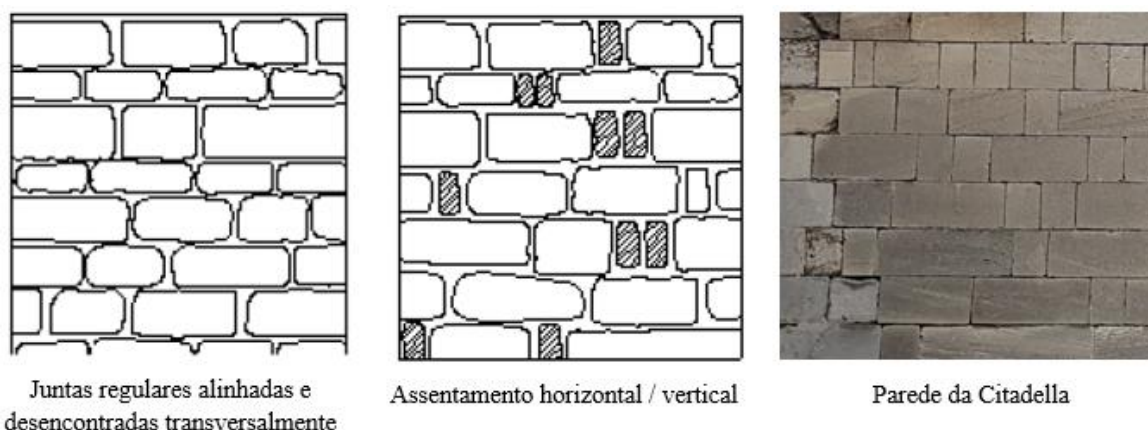
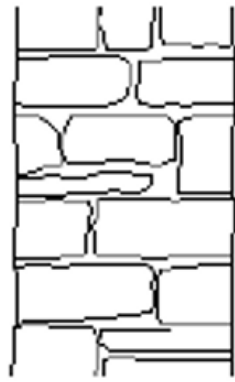


Figura 2.22 - Tipo de aparelho e de assentamento das alvenarias de pedra da Citadella, adaptado de (GNDT, s.d.).



Secção de parede de pano simples, de grande espessura e mais do que uma pedra transversal

Figura 2.23 - Classificação da secção das paredes de alvenaria de pedra da Cidadella quanto ao número de panos, (GNDT, s.d.); (Mezey, 2016).

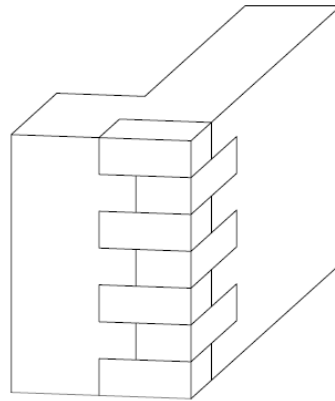


Figura 2.24 - Reforço dos cunhais das paredes com cadeia de ângulo em cantaria, (Pinho, 1997).

Como se pode observar na Figura 2.25, as zonas de interrupção das paredes resistentes, como aberturas de portas ou janelas, são reforçadas no seu contorno com pedras de maiores dimensões formando as vergas, ombreiras e peitoris. As vergas são em forma de arco de forma a transferir as cargas verticais para as pedras que complementam as ombreiras nas superfícies laterais das aberturas. A razão para a não existência de elementos homogêneos nos contornos dos vãos presume-se face à fraca resistência à flexão da pedra.



Figura 2.25 - Janela da Citadella, (Mezey, 2016).

### **2.5.3. Fundações**

Não se sabe muito sobre o tipo de fundações do monumento em questão, mas de acordo com Török, Á., tratam-se de fundações diretas contínuas, executadas em alvenaria de pedra calcária, idêntica à dos paramentos, mas menos cuidada, em que as pedras seriam lançadas sobre o terreno em valas ou poços escavados com espessura maior que os paramentos e cobrindo toda a sua área de base de implementação. Sabe-se ainda que a base destas fundações não tem profundidade constante, seguindo o relevo da camada de rocha mais rígida e mais difícil de escavar da colina.

## **2.6. Conclusões**

A Citadella é um monumento importante integrante da história da Hungria numa época em que a revolta do povo húngaro contra o império Austríaco dá início à guerra da Independência húngara em 1848.

Erguida em 1854 pelo império Austríaco, esta fortaleza teve como objetivo controlar todos os movimentos revolucionários por parte dos separatistas húngaros para que a derrota sofrida pelo império austríaco não tomasse proporções mais gravosas.

Situada na colina de Gellert, considerada património mundial da UNESCO em 1987, a Citadella é hoje em dia um dos monumentos mais icónicos de Budapeste, não só pela sua história e significado controverso, mas também por se encontrar fechada ao público desde 2014 e por isso ser motivo de debates constantes com o intuito de lhe dar nova vida e utilidade.

Este monumento tem vindo a servir os mais diversos estados de utilização. Desde propósitos militares, sob a forma de fortificação de defesa da cidade de Budapeste no sec. XIX e base de defesa aérea e centro hospitalar na segunda guerra mundial, a destino turístico sob a forma de hotel e restaurante a partir da década de 1960. Atualmente encontra-se abandonado e sem qualquer atividade.

Quanto ao clima a cidade de Budapeste proporciona um verão morno e um inverno frio e seco onde se registam em média temperaturas máximas de 27°C e mínimas de 3°C ao longo do ano, submetendo a Citadella a ações climáticas que contribuem para a degradação dos seus materiais construtivos, como é o caso das mudanças bruscas de temperatura e os fenómenos de gelo-degelo.

Arquitetonicamente, com 220 metros de comprimento, uma largura entre 45 e 60 metros, e paredes com uma altura entre os 9 e os 16 metros, a Citadella apresenta na sua forma uma simetria ao longo do eixo espacial Este-Oeste e é composta por 3 partes distintas. Um forte em forma semicircular situado na extremidade oeste, um pátio aberto em forma de leque oriental na extremidade este e um amplo pátio destinado a movimentações militares na parte central, com as suas paredes a convergir em dois baluartes.

No aspeto construtivo, o material de que são compostas as pedras da alvenaria da Citadella é o calcário grosseiro oóide que tem origem em pedreiras de calcário próximas de Budapeste. As suas paredes exteriores são construídas em alvenaria de pedra aparelhada, com juntas alinhadas e desencontradas, e compostas por um pano simples com mais do que uma pedra transversal. Relativamente às fundações, sabe-se que são diretas e contínuas, e que apresentam uma base com profundidade variável.



### **3. MÉTODOS DE INSPEÇÃO E ENSAIO**

#### **3.1. Considerações gerais**

De modo a identificar e avaliar o estado de conservação, as patologias, as causas de deterioração e tratamentos mais adequados para as paredes de alvenaria de pedra calcária da fortaleza da Citadella, é necessário conhecer e analisar as suas características em exercício da sua função. Como tal, e por se tratar de um monumento, considerado património de estado, a metodologia de avaliação deve ser feita através de técnicas de ensaio *in-situ* não destrutivas.

A primeira parte deste capítulo tem como objetivo dar a conhecer a importância do uso das técnicas de ensaio *in-situ* não destrutivas para diagnosticar as condições de uma estrutura ou edifício que se enquadrem no conceito de monumento ou de património protegido, abordando as técnicas mais correntes aplicadas a alvenarias de pedra antiga.

Na segunda parte são aprofundadas as técnicas de ensaio previstas de utilizar no âmbito deste trabalho como é o caso da técnica do tubo de Karsten, do medidor de humidade relativa (Humidímetro), do martelo ou Esclerómetro de Schmidt e do Duroscópio. No entanto, por não ter sido possível a deslocação ao local para a realização do ensaio do Tubo de Karsten, devido à obrigatoriedade de confinamento imposta pela crise epidemiológica do COVID-19, os resultados do mesmo não são aqui apresentados.

São também abordados os respetivos campos de aplicação, vantagens e desvantagens, funcionamento dos equipamentos utilizados, procedimentos experimentais, interpretação e variabilidade de resultados, bem como os fatores que influenciam a eficiência de cada técnica.

#### **3.2. Metodologia da avaliação *IN-SITU***

O desempenho em serviço das paredes de alvenaria de pedra, tanto em termos estruturais como em termos estéticos, vai sofrendo uma diminuição progressiva ao longo dos tempos devido ao ataque dos mais diversos agentes de degradação. Assim sendo, de forma a caracterizar o estado de degradação dos materiais de construção e suas causas, a avaliação do seu desempenho torna-se muito importante pois permite-nos conhecer as medidas de correção e prevenção necessárias. Esta avaliação do nível de desempenho é feita com recurso

a metodologias de inspeção e diagnóstico das quais são exemplo os ensaios realizados no local ou *in-situ*. (Flores-Colen, 2009)

A avaliação do desempenho de uma fachada requer que o seu desempenho em serviço e o desempenho especificado em projeto sejam comparados. Esta comparação pode ser realizada através de métodos empíricos (baseado na experiência de quem avalia), métodos experimentais (ensaios realizados em laboratório ou *in-situ*) e métodos teóricos (processos de modelação numérica), sendo que a escolha do método mais adequado depende do desempenho que se conhece, dos custos envolvidos e da quantidade de informação retida na avaliação feita, (Flores-Colen, 2009).

No âmbito deste trabalho, o objeto em estudo é uma secção das paredes de alvenaria de pedra de um monumento construído em 1854 que padece de um projeto. Mas, como referido anteriormente, uma vez que o monumento sofreu uma demolição parcial de algumas das suas paredes e mais tarde uma reconstrução das mesmas, a avaliação de desempenho será muitas vezes feita comparando as condições de serviço das partes das paredes originais com as reconstruídas posteriormente à demolição.

Relativamente aos métodos de avaliação experimental sabe-se que as técnicas de avaliação em laboratório têm a vantagem de ser mais precisas, mas em contrapartida, as técnicas *in-situ* permitem uma avaliação do desempenho em condições reais e não possuem normalmente uma índole tão destrutiva. Com as técnicas *in-situ* é possível identificar os materiais usados e as suas técnicas de aplicação, diagnosticar as alterações sofridas pelo objeto de estudo e as suas causas, e ainda ajudam a selecionar os métodos de intervenção mais adequados, (Tavares, M. et al., 2005); (Flores-Colen, Brito, & Freitas, 2006). Estas técnicas têm como limitações o aumento de tempo de inspeção e a produção de resultados confusos e de difícil interpretação, bem como a pouca precisão de algumas técnicas e a existência de poucas, e normalmente onerosas, técnicas 100% fiáveis, (Flores-Colen, 2009).

Para uma melhor avaliação da condição dos objetos em estudo, é recomendada por alguns autores a combinação dos resultados obtidos através da realização de várias técnicas de ensaio *in-situ* e ensaios realizados em laboratório, (Tavares, M. et al., 2005); (Flores-Colen, 2009).

### 3.3. Classificação das técnicas de ensaio *IN-SITU*

Existem diversas classificações propostas por vários autores, tendo em conta as mais diversas características. Neste ponto será abordada a classificação das técnicas de ensaio *in-situ* que tem em conta os seus fatores e características e que será utilizada neste trabalho, (Flores-Colen, Brito, & Freitas, 2006); (Török, Bostenaru Dan, & Pøikryl, 2010):

Quadro 3.1 - Classificação das técnicas de ensaio *in-situ* de acordo com os seus fatores e características.

Fatores	Características de técnicas de ensaio <i>in-situ</i>
Nível de destruição	Destrutivas; Semi-destrutivas; Não destrutivas.
Nível de hostilidade	Invasivas; Não invasivas.
Princípios em que se baseiam	Mecânicos; Elétricos, Magnético; Eletromecânicos; Ultra-sónicos; Radioativos; Sensoriais; Térmicos; Químicos e outros.
Tipo de tecnologia utilizada	Baixa a Alta.
Objetivos	Propriedades mecânicas; Durabilidade; Propriedades geométricas; Identificação do material; Avaliação da condição; Monitoramento de mudanças.
Atividades em que intervêm	Controlo da qualidade; Inspeção de Edifícios; Verificação da aplicação dos regulamentos; Pesquisa/Investigação.

É um facto que algumas técnicas possuem limitações na realização dos ensaios e na interpretação dos mesmos pelo que nem sempre proporcionam resultados satisfatórios. No entanto, ao respeitarmos a adequabilidade de cada técnica em prol das características próprias à sua utilização, aumentamos a facilidade de utilização e conseqüentemente a qualidade das informações resultantes.

Na preservação de bens pertencentes ao património cultural ou natural a possibilidade de se fazer um diagnóstico rápido e *in-situ* é uma mais valia de grande importância, (Török, Bostenaru Dan, & Pøikryl, 2010). As técnicas de ensaio *in-situ* não destrutivas mais usuais são feitas com recurso a equipamentos pequenos, ligeiros e de fácil transporte, permitindo uma inspeção mais prática e mais económica. Os métodos de teste e diagnóstico de monumentos de pedra podem ser divididos em dois grupos de acordo com o tipo de propriedade que é medida: Propriedades físicas ou Composição Química/Mineralógica. As

propriedades físicas das pedras testadas têm uma ampla variedade, que vai desde a aparência visual das propriedades à superfície, até à sua resistência mecânica. Os parâmetros físicos mais importantes e respectivos métodos de ensaio *in-situ* mais típicos são apresentados no Quadro 3.2, (Török, Bostenaru Dan, & Pøikryl, 2010).

Quadro 3.2 - Propriedades físicas mais importantes e respectivos métodos de ensaio *in-situ*, (Török, Bostenaru Dan, & Pøikryl, 2010).

<b>Propriedades físicas</b>	<b>Ferramentas/Métodos de medição</b>
Cor	Tabela de cores, Colorímetro, Espectrómetro
Refletância	Refletómetro
Temperatura	Termómetro
Teor de água, Humidade	Condutómetro, Detetor de humidade, Imagens termográficas
Absorção de água	Tubo de Karsten, Método da esponja absorvente
Rugosidade da superfície	Micro-fotogrametria
Morfologia da Superfície	Imagem digital, Li DAR (Light Detection and Ranging)
Dureza	Microperfuração, Esclerómetro de Schmidt, Duroscópio
Densidade aparente	Ensaios de velocidade de pulso ultrassónicos

Devido ao recente desenvolvimento de dispositivos portáteis, os testes *in-situ* de substâncias químicas e composição mineralógica podem ser realizados de várias maneiras. Os componentes analisados podem ser agrupados em campos como mineralogia, elementos principais, elementos secundários (vestígios) e compostos orgânicos. Os componentes e respectivos equipamentos mais frequentemente utilizados estão listados no Quadro 3.3, (Török, Bostenaru Dan, & Pøikryl, 2010).

Quadro 3.3 - Componentes de cariz Químico/ Mineralógico e respetivas ferramentas e métodos de medição mais frequentes, (Török, Bostenaru Dan, & Pøikryl, 2010).

<b>Composição Química / Mineralógica</b>	<b>Ferramentas/ Métodos de medição</b>
Mineralogia	XRD Portátil (aparelho de infração de raios X)
Elementos principais	XRF Portátil (aparelho de fluorescência de raios X); Espectroscopia UV-visual; Espectroscopia de efeito Raman
Elementos secundários (vestígios)	Espectroscopia UV-visual; Espectroscopia de efeito Raman
Compostos orgânicos	Espectroscopia FTIR (infravermelhos pela transformada de Fourier)

A identificação do material é uma questão chave quando existe a necessidade de restaurar um monumento com o tipo de pedras adequado. A avaliação da sua condição pode ser usada para identificar o nível de preservação da pedra do monumento e geralmente documenta a condição atual do material. Finalmente, as mudanças nas propriedades e as condições ambientais também podem ser reveladas usando as técnicas de diagnóstico *in-situ*. As mudanças ambientais, como as mudanças climáticas e mais frequentemente a deterioração da qualidade do ar, são manifestadas nas superfícies das pedras, (Török, Bostenaru Dan, & Pøikryl, 2010). As características mais comuns a serem detetadas devido aos impactos ambientais incluem a mudança de cor, a formação de crostas sulfatadas ou sujidade acelerada. A humidade ou o teor de sal são também parcialmente afetadas por mudanças ambientais e que por sua vez afetam a composição mineralógica das pedras, argamassas, tintas e outros compostos, (Török, Bostenaru Dan, & Pøikryl, 2010).

### **3.4. Técnicas de ensaio *IN-SITU* utilizadas**

No Quadro 3.4 são apresentadas as técnicas de ensaio *in-situ* realizadas no âmbito deste trabalho, classificadas de acordo com o princípio em que se baseiam, o seu grau de destruição, os parâmetros medidos e as características que desempenham. Como já referido anteriormente, devido ao confinamento imposto pela situação pandémica causada pelo aparecimento do vírus COVID-19, não foi possível de realizar os ensaios do Tubo de Karsten na alvenaria em estudo. No entanto este ensaio não deixou de ser incluído neste capítulo devido à sua grande utilidade e importância no diagnóstico da condição e das patologias em paredes de alvenaria de pedra antiga.

Quadro 3.4 - Ensaios *in-situ* realizados nas paredes de alvenaria de pedra da Citadella

Princípio	Técnica	Grau de Destruição	Parâmetros de medição	Características de desempenho
Hidrodinâmico	Tubo de Karsten	Não-destrutivo	Absorção de água a baixa pressão ( $cm^3$ )	Permeabilidade à água líquida
Elétrico	Humidímetro	Não-destrutivo	Humidade à superfície (%)	Resistência à humidade; Absorção de água
Mecânico	Esclerómetro de Schmidt	Não-destrutivo; Semi-destrutivo	Índice Esclerométrico (IE)	Resistência mecânica superficial; Dureza
	Duroscópio	Não-destrutivo; Semi-destrutivo	Índice Esclerométrico (IE)	Resistência mecânica superficial; Dureza

Com o objetivo de recuperar, reabilitar e preservar o património histórico-cultural, como é o caso dos monumentos ou edifícios antigos de enorme valor patrimonial, torna-se cada vez mais necessário um conhecimento aprofundado dos materiais utilizados e respetivo comportamento, das técnicas de construção antigas, suas anomalias e causas, de modo a alcançar melhores condições de durabilidade e sustentabilidade. Fundamenta-se desta forma o estudo *in-situ* da condição das paredes de alvenaria de pedra do monumento objeto de estudo. Seguidamente serão apresentados cada um dos ensaios a realizar e constantes no Quadro 3.4.

### 3.4.1. Tubo de Karsten

Os testes de absorção de água têm sido amplamente utilizados para detetar a taxa de penetração de água na pedra. Os testes do tubo de Karsten visam avaliar *in-situ* o potencial dos tratamentos de consolidação ou de soluções impermeabilizantes. Também fornecem informações sobre as diferenças de absorção de água e sobre o grau de consolidação conferido pela cristalização dos sais e minerais nas crostas de intemperismo, pedras construtivas e vários tipos de cantarias, (Török Á. , 2002); (Török, Bostenaru Dan, & Pøikryl, 2010). Esta técnica de ensaio consiste em medir a quantidade de água absorvida por uma determinada superfície após um período de tempo definido, empregando para isso um conjunto de pequenos tubos de vidro graduados em  $cm^3$ , em forma de cachimbo, que são

fixos às zonas da parede objeto de estudo. São utilizados dois tipos de tubos, tubos adaptados para superfícies verticais e para superfícies horizontais conforme apresentado na Figura 3.1, (LNEC, 2008).

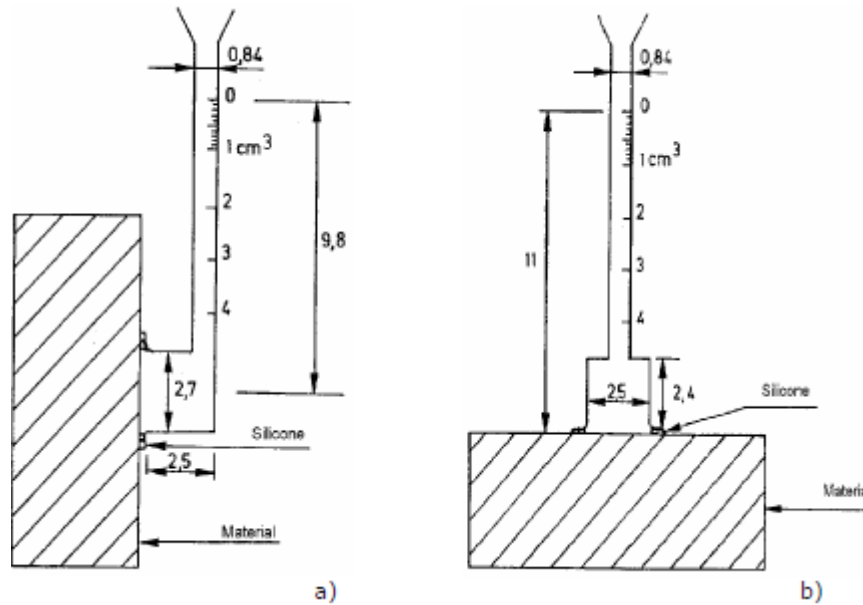


Figura 3.1 - Esquema de tubos de Karsten para superfícies a) verticais e b) horizontais, (LNEC, 2008).

As leituras da quantidade de água absorvida pela parede são efetuadas com base na redução do nível de água observado nos tubos graduados. Em geral usam-se 3 tubos em cada zona a ensaiar para ter em conta a heterogeneidade do material. As leituras são efetuadas aos 5, 10, e 15 minutos, prolongando-se muitas vezes até aos 30 minutos ou até mesmo aos 60 minutos, sempre que o nível da água nos tubos ainda permita a leitura, (LNEC, 2008).

Este método é utilizado tanto *in-situ* como em laboratório avaliando a resistência à água líquida da superfície, através da propriedade de absorção de água sob baixa pressão. Esta característica, conhecida como permeabilidade, define-se pela aptidão dos materiais serem atravessados por um fluido, quando submetidos a um gradiente de pressão.

Esta técnica é utilizada em alvenarias de pedra de cantaria com os seguintes objetivos, (adaptado de (Flores-Colen, 2009) e (Török, Bostenaru Dan, & Pøikryl, 2010)),

- Determinar a permeabilidade à água líquida das pedras e das juntas argamassadas;
- Avaliar a capacidade de impermeabilização à água das pedras e juntas de argamassa;

- Determinar o potencial de proteção fornecido por tratamentos de superfície hidrófugos ou tratamentos de consolidação avaliando a sua eficiência durante um determinado período;
- Estimar o grau de degradação das alvenarias e prever a vulnerabilidade das alterações superficiais à ação da água;
- Comparar resultados obtidos sobre diferentes tipos de pedra aplicados, em casos de reconstrução ou reabilitação.

Uma compilação de vantagens e desvantagens desta técnica, adaptada de (Török, Bostenaru Dan, & Pøikryl, 2010), (Flores-Colen, 2009), (Apps, 2011) é apresentada de seguida.

As maiores vantagens na utilização da técnica do Tubo de Karsten são a sua simplicidade e eficiência pois não exige uma fonte de energia externa nem a recolha de amostras, apresenta custos reduzidos, não necessita de um técnico de execução com um elevado grau de especialização e possibilita ensaios diretos no local com resultados mais realistas.

As principais desvantagens desta técnica são o fato de exigir uma homogeneização da superfície, depender das condições atmosféricas do local de ensaio, não simular algumas ações incidentes sobre a alvenaria como é o caso do vento ou da energia cinética, exigir cuidados na aplicação do material de fixação para que não fiquem resíduos na superfície avaliada, e a sua inadequabilidade na avaliação de elementos com elevado índice de absorção de líquidos.

De seguida é apresentado o procedimento experimental do ensaio, bem como o material necessário para a sua realização *in-situ*. Um kit de tubos de Karsten e respetivos equipamentos auxiliares ao ensaio são apresentados na Figura 3.2. Por não haver regulamentação específica para este ensaio, foi adotado um procedimento experimental baseado na ficha do LNEC FE Pa 39.1, (LNEC, 2002a), que foi elaborada com base no teste nº II.4 do (RILEM, 1980), com as devidas adaptações.

O material necessário é:

- Tubos de Karsten graduados de 0 a 4  $cm^3$ ;
- Pincel;
- Marcador;
- Luvas de proteção;
- Material de fixação para os tubos (silicone transparente ou mástique);

- Pipeta;
- Esguicho;
- Cronómetro;
- Folha de Registo.



Figura 3.2 - Tubos de Karsten e equipamentos auxiliares ao ensaio.

O procedimento Experimental deve seguir a seguinte ordem:

- Marcar com um marcador as zonas da parede onde serão colocados os tubos, tendo em conta as zonas mais regulares;
- Limpeza das zonas de colocação dos tubos com o auxílio de um pincel;
- Revestir a superfície do bordo do tubo que irá ficar em contacto com a parede com o material de fixação, sem excessos, para que a área real de revestimento em contacto com a água não sofra reduções;
- Introduzir água nos tubos, com a ajuda do esguicho, até ao nível da graduação de  $0\text{ cm}^3$  e ajustamento do nível com a pipeta;
- Realizar a primeira leitura 5 minutos após o início do ensaio;
- Repetir as leituras aos 10, 15, 30 e 60 minutos repondo o nível da água nos intervalos de medição sempre que necessário.

Os intervalos de leitura podem variar dependendo da porosidade do material. Na Figura 3.3 podem observar-se algumas etapas do procedimento experimental.



Figura 3.3 - Etapas do ensaio do tubo de Karsten, (Apps, 2011).

### 3.4.1.1. Parâmetros de medição

Com base nos valores registados em cada ensaio, são realizados gráficos de volume de água absorvido em  $cm^3$  em função do tempo, onde se obtêm retas que correspondem aos respetivos coeficientes de absorção de água, em  $kg/m^2 \cdot s$ , (Scartezini et al., 2002) citado por (Apps, 2011).

A absorção de água de uma fachada sujeita a ação da chuva e do vento durante determinado intervalo de tempo pode ser medida através da equação 3.1, (Kunzel et al. 2004) citado por (Flores-Colen, 2009):

$$A_{fachada} = C_{absorção} \times \sqrt{t_{chuva}} \quad (3.1)$$

em que:

$A_{fachada}$  – Absorção de água ( $kg/m^3$ );

$C_{absorção}$  – Coeficiente de absorção de água da camada superficial ( $kg/[m^2 \cdot \sqrt{h}]$ );

$t_{chuva}$  – Tempo de ensaio (h).

Para calcular o coeficiente de absorção de água a baixa pressão podemos adotar a equação (3.2) sugerida por (PROCEQ,2001) e citada por (Flores-Colen, 2009):

$$C_{absorção} = \frac{x \times 10^{-3}}{d^2 \times \left(\frac{\pi}{4} \times 10^{-6} \times \sqrt{t}\right)} \quad (3.2)$$

em que:

$C_{absorção}$  – Coeficiente de absorção de água da camada superficial ( $kg/[m^2 \cdot \sqrt{h}]$ );

x – Quantidade de água absorvida (ml);

d – Diâmetro da superfície em que é feita a penetração de água (mm);

t – Duração da leitura (h).

### **3.4.2. Humidímetro Portátil**

O Humidímetro Portátil é um aparelho que permite medir o teor de humidade existente em diversos materiais, como é o caso da pedra, com a particularidade de não registar valores absolutos (percentagens) de humidade presente nas superfícies. Os valores obtidos com este instrumento são comparados entre si, resultantes de diferentes pontos da superfície avaliada, permitindo fazer um mapeamento das quantidades de humidade superficial existente no objeto em avaliação, (Török, Bostenaru Dan, & Pøikryl, 2010). Este método de ensaio baseia-se no método da resistência elétrica que por sua vez é fundamentado no princípio da dependência existente entre a resistência elétrica de um material e o seu teor em água.

Os aparelhos que funcionam por condutância, como é o caso do Humidímetro, medem a condutância iónica entre dois pontos (elétrodos) quando se aplica de forma continua uma determinada voltagem. À medida que o teor de água do material aumenta, nota-se uma diminuição da sua resistência elétrica que por sua vez faz aumentar a sua condutividade. No entanto, esta correlação entre resistência elétrica e o teor em água não é linear e requer um ajuste de acordo com a temperatura, a densidade e o tipo de material avaliado. Desta forma a humidade é detetada através das alterações de resistência elétrica no substrato com especial sensibilidade à presença de sais higroscópicos.

O Humidímetro utilizado neste trabalho é o Gann-Hydromette Uni 1 composto por um medidor de humidade e um eléctrodo ativo B50 como se pode ver na Figura 3.4.

Este equipamento tem uma capacidade de medição de 0 a 199 dígitos de faixa de varredura. E tem como características, a medição rápida do teor de humidade dos materiais de construção pelo método capacitivo de medição por radiofrequência, e uma precisão da medição de temperatura garantida pelos resistores de medição Pt100 com tecnologia de quatro fios e dimensões externas de 140 mm de altura, 90 mm de largura, de 42 a 50 mm de espessura e 1,5 kg de peso.



Figura 3.4 - Humidímetro utilizado no trabalho de campo (Gann-Hydromette UNI 1).

De forma a dar a conhecer o campo de aplicação desta técnica quando aplicada em alvenarias de pedra, apresentam-se de seguida os principais objetivos da sua utilização:

- Avaliar a quantidade de humidade presente na superfície dos paramentos;
- Localizar a origem da humidade nos paramentos através da elaboração de um mapeamento que nos dá informação acerca da existência de infiltrações, da presença de sais higroscópicos ou da ocorrência de humidade capilar;
- Controlar as áreas com excesso de humidade;
- Complementar um conjunto de técnicas utilizadas para estimar qualitativamente o grau de degradação em que se encontra um determinado paramento.

Uma compilação de vantagens e desvantagens desta técnica, adaptada de alguns autores de estudos anteriores, é apresentada de seguida, (Török, Bostenaru Dan, & Pøikryl, 2010), (Flores-Colen, 2009), (Magalhães, Veiga, & Costa, 2005), (Camuffo & Bertolin, 2012), (Said & P.Eng., 2004), (Phillipson, et al., 1998).

As principais vantagens que esta técnica de ensaio apresenta são a portabilidade do equipamento, a simplicidade de realização, a fácil leitura, os seus custos reduzidos, a prescindibilidade de um técnico com elevado grau de especialização e de uma fonte de energia externa, e a rapidez de elaboração devido ao baixo tempo de resposta do sensor do equipamento.

Como principais desvantagens devem ser referidos alguns fatores que influenciam as medições colocando em dúvida a veracidade das leituras de resistência do material e respetiva correlação para o teor de água, tais como:

- a presença de substâncias eletrolíticas, caso dos iões derivados da dissolução de sais no interior dos poros do material que afetam a condutividade;
- presença de eflorescências que provocam medições e leituras dissimuladas;
- a temperatura do material e a temperatura do ar devem ser consideradas na elaboração deste ensaio devido a diminuição da resistência elétrica com o aumento da temperatura que leva a leituras mais elevadas do teor de água.
- a medição é feita à superfície encobrimo de alguma forma os valores no interior dos materiais;
- as superfícies com tratamentos químicos podem alterar a condutividade;
- a presença de infeções bacteriológicas que podem afetar a permeabilidade dos materiais em determinados pontos.

O procedimento de realização deste ensaio deve seguir os passos que a seguir se apresentam:

- i. Define-se uma malha composta pelos pontos a analisar sobre a superfície do paramento, analisando os parâmetros em altura e em zonas com anomalias (colonização biológica, alteração de cor ou indícios de degradação da pedra);
- ii. Pressiona-se o aparelho contra a superfície a ensaiar e espera-se alguns segundos pela estabilização da leitura;
- iii. Anota-se o valor obtido;
- iv. Repetem-se as medições nos vários pontos da malha estabelecida no ponto i);
- v. Mede-se a humidade relativa e temperatura do ar.

Os resultados obtidos permitirão elaborar mapeamentos do teor de humidade presente no objeto em estudo através de processos de interpolação a partir das medições realizadas.

### **3.4.3. Martelo ou Esclerómetro de Schmidt**

Todos os ensaios esclerométricos e em particular o ensaio com o esclerómetro de Schmidt, também designado de martelo de Schmidt, são baseados no método do ressalto. Este método foi desenvolvido pelo engenheiro suíço Ernst Schmidt, que dá o nome ao equipamento, em 1948, projetando um aparelho que permite medir a dureza superficial do betão pelo princípio do ressalto. Com a evolução da tecnologia, o equipamento de ensaio tem vindo a ser

modernizado e a sua utilização foi estendida a vários tipos de superfícies como são exemplo os revestimentos, pavimentos ou rochas (Nepomuceno, 1999).

O problema de usar o esclerómetro de Schmidt para testes em superfícies de pedra está relacionado com o facto de existirem vários tipos de esclerómetros, mas apenas alguns deles estarem padronizados para esse efeito, (Török, Bostenaru Dan, & Pøikryl, 2010).

Os métodos e procedimentos deste ensaio estão apresentados na norma EN 12504-2 de 2012 e especificamente para superfícies de pedra existe a norma ASTM D5873 de 2014. O ensaio em questão é classificado como um ensaio de dureza e pode ter características não-destrutivas ou semi-destrutivas, consoante o tipo de esclerómetro a utilizar e o material a avaliar.

Baseado no princípio do ressalto de uma massa de mola, após o impacto de uma extremidade de um êmbolo com a superfície, este ensaio permite-nos obter uma medida de “dureza” dessa mesma superfície e não da resistência do material, no entanto, ambas as grandezas são consideradas proporcionais. A medida obtida no ensaio é denominada de índice esclerométrico (IE), e quanto mais flexível for o material da superfície, mais energia este absorve e menor é o ressalto da massa.

Esta técnica tem sido utilizada em alvenarias de pedra com os seguintes objetivos:

- Estimar a resistência das rochas através da sua dureza superficial;
- Comparar a qualidade de diferentes tipos de pedras para fins de construção e prever a erodibilidade hidráulica das mesmas;
- Comparar a condição de diferentes partes de uma alvenaria e localizar as zonas mais afetadas por crostas de intemperismo, défice de compactação ou erosão.

As principais vantagens desta técnica de ensaio são, o fato de a utilização de qualquer tipo de esclerómetro se fazer de forma expedita, o que torna o ensaio simples e rápido de executar (Magalhães, Veiga, & Costa, 2005), não envolver um grande investimento inicial na aquisição do equipamento, tornando o ensaio relativamente económico (Brito, 1987), a portabilidade do equipamento, não necessitar de fonte de alimentação e o reduzido ou nenhum grau de destruição que o equipamento provoca, possibilitando assim a sua realização *in-situ*.

Como principais desvantagens na utilização desta técnica de ensaio temos, a possibilidade de redução da fiabilidade dos resultados no caso de existirem fatores que afetem o ensaio, permite somente uma avaliação qualitativa, os resultados nem sempre são de fácil interpretação exigindo várias leituras ou o cruzamento de dados com outras técnicas para as leituras obterem fiabilidade (Brito, 1987), os resultados dependem de uma boa calibração do aparelho, a sua utilização é limitada em rochas muito moles ou rochas muito duras por não confinar forças de compressão inferiores a 1 MPa ou superiores a 100 MPa (ASTM D5873, 2014), e a inadequabilidade para o uso em projeto dos resultados da conversão de dados de resistência do material (ASTM D5873, 2014).

#### **3.4.3.1. Fatores que influenciam os resultados**

A rugosidade da pedra é um parâmetro a ter em conta, o ensaio deve ser realizado numa superfície lisa e quando necessário deve-se alisar previamente a superfície com uma pedra abrasiva. A compacidade causada pela solidificação de sais que preenchem os poros da pedra à superfície também pode originar valores de ressalto demasiado elevados. A existência de crostas de intemperismo ou colonização biológica pode tornar os valores de ressalto demasiado baixos. A gravidade também afeta os resultados, que variam conforme a inclinação do aparelho e caso avaliemos superfícies horizontais com altura variável, (Brito, 1987). A massa e a energia armazenada na mola do aparelho também podem influenciar os resultados se não se mantiver o aparelho para o mesmo conjunto de ensaios. Por fim, a má calibração do aparelho também pode constituir influências indesejáveis na obtenção dos resultados dos ensaios.

#### **3.4.3.2. Equipamento**

Para que se compreenda bem o funcionamento do Esclerómetro de Schmidt, bem como todas as peças que o compõem, uma secção de corte longitudinal do equipamento e respetiva legenda são demonstradas na Figura 3.7. Ao pressionar o veio de compressão (êmbolo) do esclerómetro contra a superfície de pedra a ensaiar, traciona-se uma mola existente no interior do aparelho. Logo que o veio atinge o fim do seu percurso, é libertada, instantaneamente, uma massa que choca com a sua extremidade interior. O choque é transmitido à superfície a ensaiar, à qual reage, provocando um ressalto. O mesmo veio transmite esse ressalto à massa móvel, que ao deslocar-se faz mover um ponteiro visível no

exterior do invólucro do aparelho e regista o ponto máximo do ressalto da massa. Quanto mais dura e compacta é a superfície, maior será o ressalto. O valor de referência obtido através da escala do aparelho denomina-se índice esclerométrico (IE), (Oz-diagnostico, 2020). A Figura 3.6 demonstra um esquema simplificado do funcionamento mecânico do esclerómetro.



Figura 3.5 - Martelo de Schmidt utilizado no trabalho de campo (Tipo N-34).

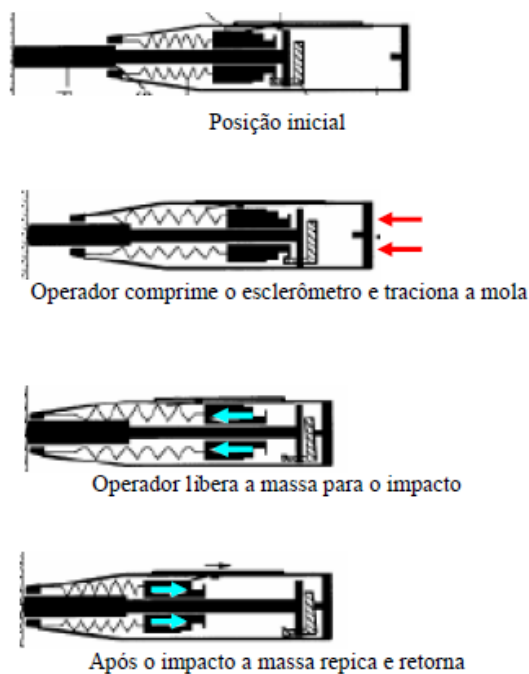


Figura 3.6 - Esquema simplificado do funcionamento mecânico do esclerómetro.

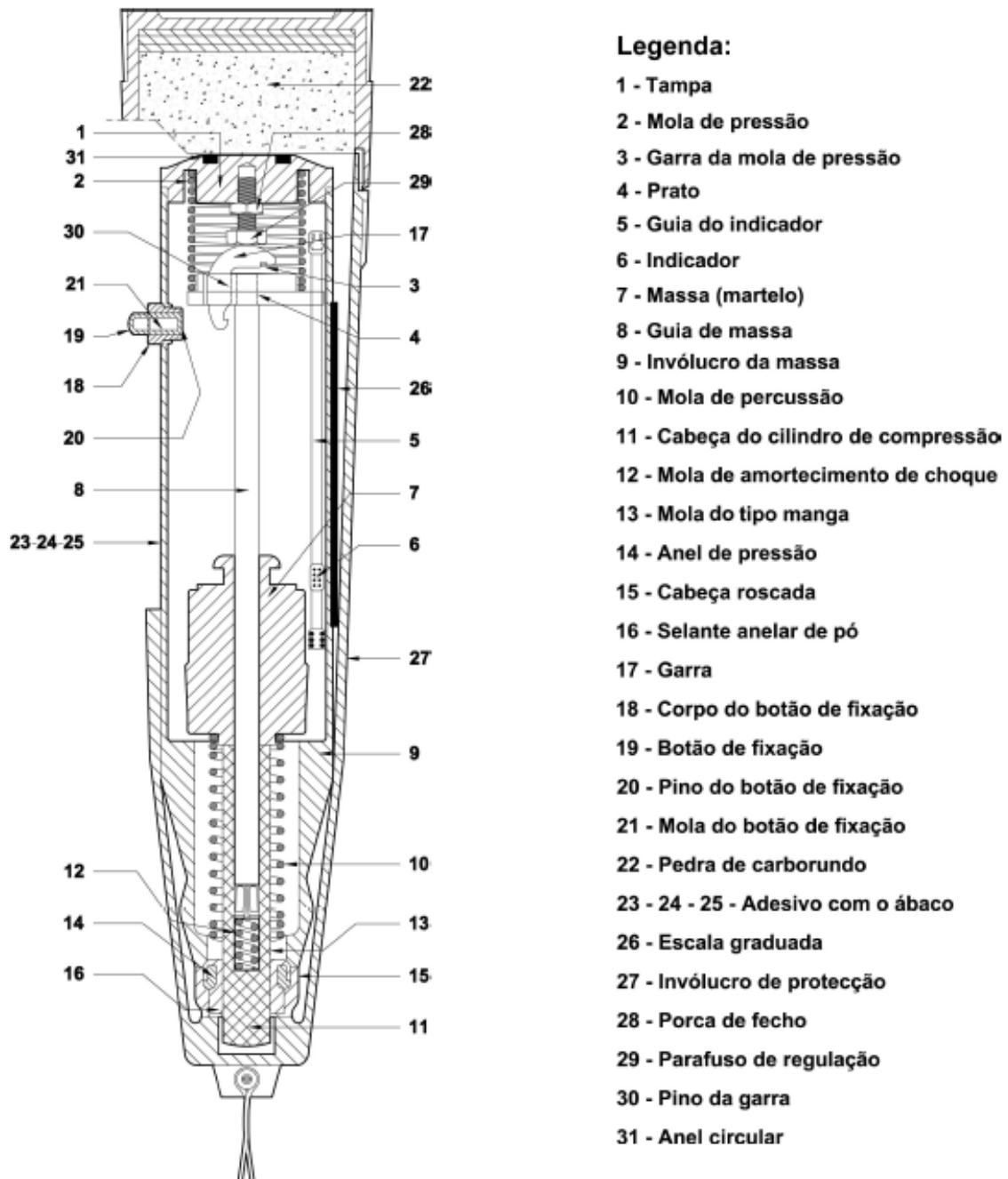


Figura 3.7 - Esclerómetro de Schmidt – Secção Longitudinal, (Oz-diagnostico, 2020).

### Capítulo 3

Os procedimentos para este ensaio seguem a norma ASTM D5873 de 2014, específica para o ensaio em pedra e a norma EN 12504-2 de 2012, que apesar de ser indicada para ensaios em betão, foi adaptada ao caso de estudo deste trabalho.

Equipamento:

- Esclerómetro de Schmidt do tipo N-34;
- Bigorna metálica de calibração com uma massa igual ou superior a 20kg e de diâmetro aproximadamente 150mm;
- Pedra abrasiva;

Preparação:

- i. Demarcar uma área de pelo menos 300 por 300 mm;
- ii. Recomenda-se que seja demarcada uma grelha de linhas afastadas de 25mm a 50mm utilizando os pontos de interceção das linhas como pontos de ensaio. É importante assegurar que os pontos estejam afastados no mínimo 25mm entre si;
- iii. Devem ser evitadas áreas com textura muito rugosa, elevada porosidade ou com buracos e obturações;
- iv. Considerar fatores de área de ensaio como a resistência da pedra, o tipo de superfície e as condições de humidade na mesma.
- v. Preparação da área de ensaio desgastando as irregularidades com a ajuda da pedra abrasiva, de forma a regularizar a superfície.
- vi. Remover toda a água que eventualmente possa estar presente na área a ensaiar;
- vii. Fazer testes de referência para verificar se o equipamento está em conformidade;
- viii. Proceder à calibração do equipamento efetuando testes na superfície da bigorna metálica e verificar se os valores obtidos estão de acordo com os recomendados pelo fornecedor;

Uso do Equipamento (Esclerómetro):

- i. Encostar, perpendicularmente, a extremidade do êmbolo de impacto à superfície a ser ensaiada, segurando firmemente no corpo do esclerómetro;
- ii. Aumentar gradualmente a pressão no êmbolo até se dar o impacto, provocando o ressalto;

- iii. O ressalto faz acionar o ponteiro circundado pela escala existente no exterior do aparelho;
- iv. Registrar todas as leituras obtidas e respectivas inclinações do esclerómetro;
- v. Após o ensaio, testar novamente o equipamento na bigorna metálica e comparar com os resultados obtidos inicialmente. Este processo permite-nos elevar o índice de segurança dos resultados;
- vi. Se os valores de teste diferirem deve-se ajustar e limpar o equipamento e repetir o ensaio;

### **3.4.3.3. Parâmetros de Medição**

Como referido anteriormente, a distância percorrida pela massa no ressalto é denominada de índice esclerométrico (IE), que pode ser obtido pela equação (3.3), (Neville, 1997) citado por (Caiado, 2014).

$$IE = \left( \frac{\delta_r - \delta_0}{\delta_i - \delta_0} \right) = \frac{\Delta_r}{\Delta_i} \quad (3.3)$$

Sendo,

$\delta_0$  – Distância da massa do esclerómetro, não ativada, à superfície a ensaiar, ou seja, alongamento inicial da referência do êmbolo do esclerómetro;

$\delta_i$  – Distância da massa do esclerómetro, pronto a disparar, à superfície a ensaiar;

$\delta_r$ - Distância da massa do esclerómetro, devido à mola se encontrar tencionada devido ao ressalto provocado pela superfície do material;

$\Delta_i$  - Deslocamento antes do impacto;

$\Delta_r$  – Deslocamento após o ressalto;

A relação  $\frac{\Delta_r}{\Delta_i}$  é geralmente expressa em percentagem (%) sendo adotada como variável independente para se fazer a correlação com a resistência do material.

Neste trabalho utiliza-se o esclerómetro portátil tipo N, mais concretamente N-34 (Figura 3.5), com uma energia de impacto de 10 a 70 N/mm<sup>2</sup>. O valor do ressalto (R) ou Índice Esclerométrico (IE) pode ser transformado no índice de resistência à compressão uniaxial do material. Este fica registado no aparelho que, em função de uma maior ou menor dureza (ou

resistência) da pedra, a massa de aço sofre maior ou menor ressalto. O valor fica registrado no próprio equipamento numa escala adimensional e pode variar entre 0 a 100.

A norma em vigor explicita que devem ser feitas um mínimo de 9 leituras por cada ponto de ensaio a fim de obter um resultado fidedigno. Deverão ainda eliminar-se todo o conjunto de valores se mais de 20% das leituras apresentarem um resultado diferente da mediana em mais de 6 unidades, (ASTM D5873, 2014).

Por último, é possível correlacionar o valor médio de ressalto (IE) obtido com a densidade média do material-pedra e a orientação do disparo do Martelo de Schmidt (perpendicular à superfície a ensaiar), de forma a determinar um valor aproximado de resistência à compressão uniaxial simples ( $\sigma_c$ ). Estudos sobre a aplicação da ferramenta no teste de elementos de alvenaria de pedra antiga mostram que podem ser desenvolvidas formulas empíricas para cada tipo de pedra correlacionando os valores de ressalto ou índice esclerométrico (“R” ou “IE”) e a resistência à compressão, (Gálos, 2003), (Török Á. , 2004). Neste trabalho são apresentadas duas opções de efetuar essa correlação para o calcário grosso, que corresponde à litologia das pedras em estudo.

A primeira opção é através da equação (3.4), que pode ser encontrada na literatura (Török Á. , Műemlékek közeteinek anyagvizsgálata, 2004).

$$\sigma_c = 0,883 \times R - 4,687 \quad (3.4)$$

Em que,

$\sigma_c$  – Resistência à compressão uniaxial simples;

$R$  – Valor do ressalto ou índice esclerométrico;

A segunda opção é com base no ábaco desenvolvido por Gálos em 2003, apresentado na Figura 3.8, segundo o qual os valores de resistência são diretamente proporcionais à metade dos valores de ressalto.

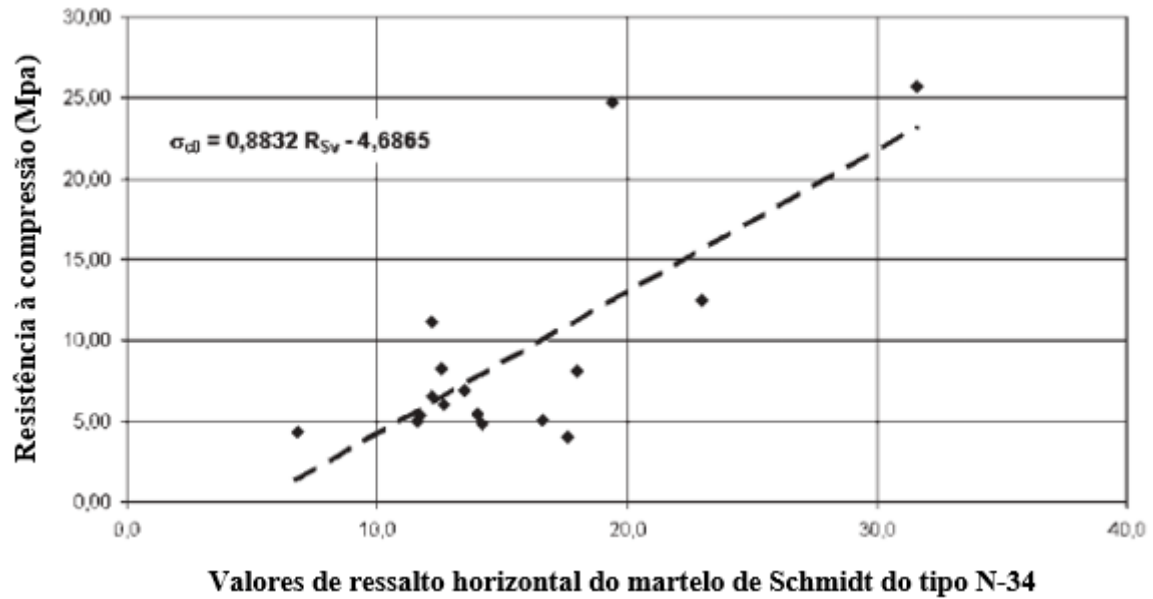


Figura 3.8 - Ábaco de Gálos, (Gálos, 2003).

#### 3.4.4. Duroscópio

O Duroscópio, apresentado na Figura 3.9, é uma ferramenta “esquecida” que funciona de acordo com um método de teste de dureza dinâmica e princípios semelhantes aos de um esclerómetro de Schmidt. Inicialmente desenvolvido para detetar pequenas flutuações na resistência em metais, nas últimas décadas a utilização deste aparelho para testar a dureza de superfícies de pedra tem sido cada vez mais frequente, (Török Á. , 2019).



Figura 3.9 - Duroscópio.

Este ensaio pode ser aplicado para testar a dureza de superfícies rochosas para detectar variações de força em pequena escala. Os valores de recuperação podem ser medidos em litologias variadas, como calcário poroso, travertino, calcário microcristalino, mármore, tufo de andesite, basalto, etc. Para que se possa retirar o melhor proveito da realização desta técnica, os valores de recuperação de Duroscópio devem ser comparados com os valores de ensaios efetuados com outros tipos de martelo Schmidt. Superfícies frescas, e intemperizadas devem ser medidas para avaliar o efeito do intemperismo sobre a força da rocha. Os valores de ressalto obtidos são então comparados com os resultados padronizados do teste de resistência laboratorial das mesmas litologias e são apresentadas relações entre os valores de recuperação Duroscópio e os valores do esclerómetro de Schmidt, (Török Á. , 2019). Os valores de recuperação do esclerómetro de Schmidt e recuperação do Duroscópio podem ser correlacionados. Este último detecta pequenas alterações na resistência da superfície, mas é mais sensível a irregularidades da superfície. No geral, é necessária uma atenção especial na interpretação dos resultados dos testes de resistência não destrutivos, uma vez que estas ferramentas não fornecem dados exatos sobre a resistência à compressão ou à tração das rochas. No entanto, os valores de recuperação do Duroscópio, semelhante ao martelo Schmidt, fornecem informações rápidas sobre a força da rocha testada, (Török Á. , 2019).

As vantagens e desvantagens do ensaio do Duroscópio são as mesmas referidas para o ensaio do esclerómetro de Schmidt (vd. [3.4.3](#)) uma vez que a semelhança entre os princípios, propósitos e funcionamento do equipamento dos dois tipos de ensaio é evidente. A única exceção, como também já foi referido, é que o Duroscópio regista valores mais reduzidos, por ser um equipamento de menores dimensões, que são relativos apenas a pequenas variações de dureza na superfície das pedras. Uma vantagem que o Duroscópio tem em relação ao esclerómetro de Schmidt é a sua característica híbrida de poder também avaliar superfícies metálicas.

Este equipamento funciona de forma semelhante ao esclerómetro de Schmidt do tipo PT, mas em dimensões menores. Encosta-se o equipamento à superfície a ensaiar e liberta-se um pêndulo que tem uma massa agregada à sua extremidade, que percorre 90° até embater na superfície. A distância em arco percorrida pela massa no ressalto após o impacto é medida através de uma escala presente na parte exterior do aparelho que indica o índice esclerométrico. A Figura 3.10 mostra o equipamento e ajuda a entender o seu mecanismo.



Figura 3.10 - Duroscópio (faces, secção de corte e esquema mecânico).

Dado que não foi encontrada qualquer literatura de referência relativa ao procedimento experimental associado ao ensaio com o Duroscópio em betão ou em pedra, optou-se por compilar a metodologia do ensaio realizada no trabalho de campo.

#### Preparação:

- i. Selecionar uma área de superfície de forma a evitar texturas muito rugosas, elevada porosidade e obturações;
- ii. Considerar fatores de área de ensaio como a resistência da pedra, o tipo de superfície e as condições de humidade na mesma.
- iii. Demarcar de uma grelha de linhas afastadas de 25 mm a 50 mm utilizando os pontos de interceção das linhas como pontos de ensaio. É importante assegurar que os pontos estejam afastados no mínimo 25mm entre si;
- iv. Remover toda a água que eventualmente possa estar presente na área a ensaiar;
- v. Fazer testes de referência para verificar se o equipamento está em conformidade;

#### Uso do Equipamento (Esclerómetro):

- i. Encostar, perpendicularmente, a extremidade do equipamento onde se encontra o êmbolo de impacto à superfície a ser ensaiada, segurando firmemente no corpo do esclerómetro;
- ii. Pressionar o botão do equipamento que solta o êmbolo para que se dê o impacto com a superfície, provocando o ressalto;

- iii. O ressalto faz acionar o ponteiro circundado pela escala existente no exterior do aparelho;
- iv. Registrar todas as leituras numa folha de registo, realizando no mínimo 10 leituras por cada área de superfície de ensaio;
- v. Após o registo de cada leitura, rodar o mecanismo situado na face do equipamento contraria a face de leitura, que coloca e trava o êmbolo novamente no lugar onde se inicia a trajetória de impacto;
- vi. Em caso de falha de alguma leitura, devido a algum aspeto do ponto da superfície selecionado que impossibilite o ressalto de forma correta, deslocar o equipamento 1 mm do ponto selecionado para medição e fazer nova tentativa;

Tal como o Esclerómetro de Schmidt, o Duroscópio também regista valores de ressalto que podem ser interpretados de forma idêntica ao índice esclerométrico (IE). Estes valores, apesar de mais reduzidos, servem igualmente para obter informações rápidas acerca da dureza da superfície em avaliação. No entanto, para que todo o seu potencial analítico seja atingido, os resultados devem ser comparados com os valores obtidos com o Martelo de Schmidt de forma a verificar a semelhança de proporções dos valores registados com ambos os testes, o que reforça a precisão da análise.

### **3.5. Conclusões**

No presente capítulo, são abordadas algumas das técnicas de ensaio *in-situ* mais comuns na avaliação do desempenho e condição de paramentos de alvenaria de pedra, realçando as utilizadas no âmbito deste trabalho.

Em geral, as técnicas abordadas possuem um grau de viabilidade aceitável no que diz respeito à avaliação do nível de degradação das alvenarias de pedra, no entanto, uma vez que os parâmetros medidos por estas técnicas não se relacionam diretamente com o nível de desempenho, a avaliação feita possui maioritariamente características qualitativas.

Foram apresentadas técnicas de ensaio *in-situ* como, Tubo de Karsten, Humidímetro, Esclerómetro de Schmidt e Duroscópio, que permitem uma avaliação de características de desempenho como, a permeabilidade à água líquida, a resistência à humidade, capacidade de absorção de água, resistência mecânica superficial e resistência aos agentes climáticos.

Foram ainda detalhados vários aspetos relacionados com a utilização de cada técnica, como os princípios de funcionamento, o campo de aplicação, vantagens e desvantagens e o procedimento experimental.

Por último, é de valor sintetizar toda a informação recolhida por estes ensaios no que diz respeito à avaliação da condição e desempenho dos paramentos de alvenaria de pedra em causa, tornando possível uma eventual análise, não só qualitativa, mas também quantitativa.

Seguidamente, no capítulo 4, é apresentado um diagnóstico de uma secção da alvenaria de pedra que constitui as paredes da fortaleza da Citadella, recorrendo a técnicas de ensaio *in-situ* não destrutivas, com o objetivo de analisar a sua condição, entender as causas da sua deterioração e definir um tratamento e um método ideal de conservação e restauro para o património em causa.



## **4. RESULTADOS DOS ENSAIOS *IN SITU***

### **4.1. Considerações Gerais**

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados no âmbito deste trabalho e descritos no capítulo anterior.

Numa primeira parte é identificada a secção da parede do monumento escolhida para análise bem como a localização das pedras testadas. São ainda examinadas as características litológicas e patologias por intemperismo, existentes nas pedras originais e nas pedras substituídas em restaurações posteriores.

Numa segunda parte são apresentados os resultados dos testes de humidade superficial feitos com o Humidímetro e dos testes de resistência à compressão uniaxial feitos com o com o Martelo de Schmidt e Duroscópio. Estes resultados são ainda analisados e comparados com resultados obtidos por outros autores em estudos feitos anteriormente de forma a complementar e tornar mais viáveis as conclusões desta pesquisa.

Numa terceira parte são apresentados mapeamentos de resultados com o objetivo de facilitar a leitura e compreensão dos resultados obtidos nos testes realizados e nas observações feitas relativamente às características litológicas de cada pedra e respetivas formas de intemperismo.

### **4.2. Metodologia de Teste**

A secção da parede analisada foi escolhida com base na sua composição em termos de pedras originais e substituídas, nas formas de dano por intemperismo, orientação, localização e área. Como tal foi escolhida uma parede com zonas de construção original e zonas restauradas, sendo que as pedras originais são compostas por um tipo de material e as pedras substituídas por um material ligeiramente diferente.

Quanto à sua localização, a secção de parede em análise faz parte do baluarte situado no lado norte do monumento e está orientada a Sudeste (110°), o que faz com que a parede seja submetida a aproximadamente 6 horas de incidência solar diária e com que esteja protegida da incidência direta do vento e da chuva, uma vez que a direção do vento nesta zona se verifica maioritariamente no sentido de Noroeste para Sudeste.

Importa ainda salientar que o paramento possui as dimensões de 13,3 m de largura, 9 m de altura e 120 m<sup>2</sup> de área.

Na Figura 4.1 pode-se visualizar uma planta do monumento onde o paramento analisado se encontra numerado e assinalado a laranja evidenciando bem os aspetos geográficos da localização e orientação referidos anteriormente. Na tabela 5.1 são apresentadas as informações exatas quanto à sua localização, orientação e dimensões.

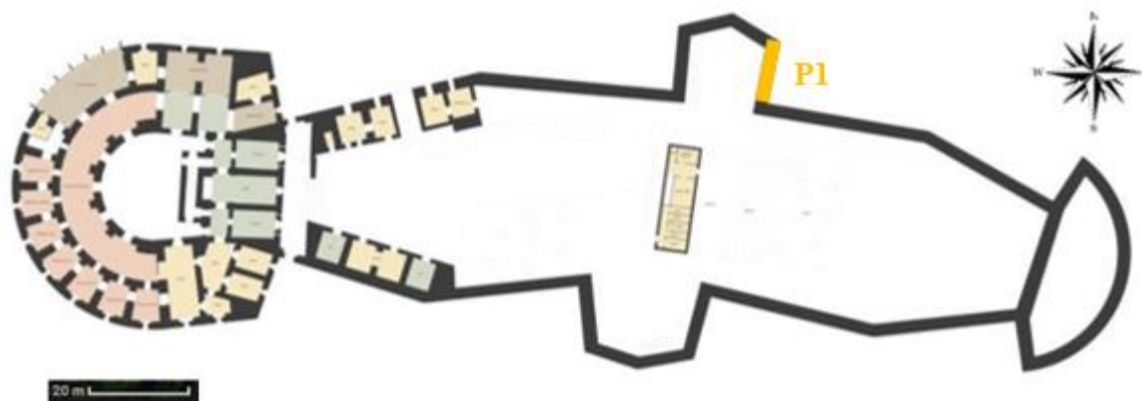


Figura 4.1 - Planta da Citadella com a parede alvo de testes evidenciada a laranja.

Quadro 4.1 - Localização, orientação e dimensões da parede testada.

Parede	Lado do Monumento (ações ambientais relevantes)	Orientação da Parede	Área (m <sup>2</sup> )
P1	Norte (sem incidência direta de vento e chuva)	Sudeste (110°)	120 m <sup>2</sup>

Os ensaios de teor de humidade superficial e de resistência mecânica à compressão uniaxial foram realizados em 7 pedras de forma isolada, fazendo parte deste número pedras originais e de substituição.

Para o ensaio de teor de humidade superficial também foram testados dois perfis verticais, um composto por pedras originais e outro por pedras de substituição, ambos constituídos por 7 pedras cada um e com uma altura aproximada de 2,14 metros a contar do nível do solo. Através desta metodologia de teste pretende-se analisar a humidade presente no paramento e estimar o limite de elevação de água absorvida por capilaridade

Nas Figuras 4.2 a 4.5 são apresentadas imagens da parede testada, onde é possível visualizar a localização das pedras e dos perfis verticais submetidos aos ensaios em questão.



Figura 4.2 - Imagem da parede P1 com as pedras testadas evidenciadas a amarelo.



Figura 4.3 - Pormenor da localização das pedras testadas na parede P1 e respetiva numeração.



Figura 4.4 - Localização do Perfil vertical 1 na parede P1 e pormenor do mesmo.



Figura 4.5 - Localização do Perfil vertical 2 na parede P1 e pormenor do mesmo.

### **4.3. Características Litológicas das pedras constituintes da secção de parede em estudo**

Como referido anteriormente, um dos principais objetivos deste trabalho é a avaliação das características mecânicas e das patologias presentes nos dois tipos de pedra pertencentes às paredes de alvenaria do monumento em questão, ou seja, nas pedras integrantes da sua construção primordial e nas pedras aplicadas em processos de restauração posteriores.

Após a observação e avaliação do material constituinte de cada pedra concluiu-se que todas as pedras pertencentes à construção original são compostas por calcário oolítico de granulação fina. Quanto às pedras aplicadas nas restaurações, foram verificados dois tipos de calcário diferentes, calcário oolítico de granulação média e calcário bioclástico grosseiro de granulação média com presença de bivalves. Esta diferença litológica pode ser explicada pelo fato de o monumento ter sido submetido a duas demolições de cariz simbólico em duas épocas diferentes, o que por sua vez deu origem a duas restaurações distintas.

O calcário oolítico é uma rocha sedimentar composta principalmente por oólitos de calcite, (CaCO<sub>3</sub>). Os oólitos, possíveis de observar na Figura 4.6, são pequenas esferas formadas pela precipitação concêntrica de carbonato de cálcio quando camadas de calcite se vão depositando em torno de um grão de areia ou pedaço de fóssil à medida que estes vão rolando em águas relativamente calmas, tornando-as redondas. Devido ao elevado teor de calcite, este tipo de pedras reage a substâncias ácidas.



Figura 4.6 - Superfície de uma pedra de calcário oolítico onde são perceptíveis os oólitos de calcite, (Jones, 2020).

Já o calcário bioclástico é uma rocha sedimentar composta por calcite e bioclóstos, fragmentos fósseis de esqueletos carbonatados de organismos marinhos, nomeadamente bivalves rudistas, depositados em ambientes marinhos que acabam por ser agregados durante a deposição dos sedimentos e sua Diagéneze, levando à sua transformação em rochas sedimentares. A Figura 4.7 trata-se da superfície de uma pedra de calcário bioclástico da Cidadella onde são perceptíveis os orifícios resultantes da agregação de bivalves durante a sua formação.



Figura 4.7 - Superfície de uma pedra de calcário bioclástico onde são perceptíveis vestígios da presença de bioclóstos.

#### **4.4. Patologias verificadas na secção de parede em estudo**

Um dos fenómenos patológicos mais comuns presentes nas pedras calcárias das paredes de cantaria da Citadella é a formação de crostas de intempérie. As crostas de intempérie podem ser classificadas e agrupadas de acordo com a sua cor e morfologia e é desta forma que neste trabalho se procede à sua identificação. Neste ponto é apresentada a caracterização das diferentes patologias por intemperismo de acordo com as linhas orientadoras definidas por Ákos Török, (Török Á. , 2011) aplicadas à parede em estudo.

Entre as crostas presentes no paramento avaliado neste trabalho podem-se identificar crostas de cor escura e crostas de cor clara.

Dos tipos de crosta de cor escura fazem parte crostas pretas planas e finas, conhecidas como filmes negros, apresentadas na Figura 4.8, e crostas escuras de cor acinzentada e morfologia esférica, perceptíveis na Figura 4.9. As crostas lisas e finas de cor preta formam-se sobretudo em superfícies parcialmente protegidas do vento e da chuva e a sua espessura média é de aproximadamente 2 mm. Os filmes negros manifestam-se em zonas de incidência solar reduzida e são geralmente baços, homogéneos e muito aderentes. As crostas esféricas escuras acinzentadas são crostas compostas por conjuntos de esferas e estão presentes em zonas da alvenaria protegidas pela chuva, mais concretamente nas extremidades e cantos dos elementos de pedra que fazem parte da alvenaria. Estas esferas podem ser caracterizadas por cachos, por terem formas que lembram cachos de uva e a sua espessura pode variar de milímetros a centímetros.



Figura 4.8 - Crosta negra, lisa e fina (filmes negros).



Figura 4.9 - Crostas escuras de cor acinzentada e morfologia esférica.

Dos tipos de crosta mais clara observaram-se crostas brancas planas e finas e crostas brancas espessas. As crostas brancas e finas, podem ser encontradas, distribuídas de uma maneira uniforme, nas superfícies dos elementos de pedra calcária oolítica de granulação fina e grossa, fazendo parte das suas características a propensão a variadas formas de intemperismo mecânico, como é o caso da escamação e formação de bolhas. As crostas brancas mais espessas são crostas de sofreram um processo de cimentação em que os sais e minerais das águas pluviais cristalizam preenchendo os poros entre os grãos dos sedimentos originais da superfície do material. Estas têm em média uma espessura de 1 cm e muitas das vezes só são perceptíveis após o início do seu destacamento. Importa ainda salientar que este tipo de crostas eleva a resistência mecânica do material.

A forma mais comum de intemperismo mecânico verificada é o destacamento das superfícies encrostadas. Os tipos de destacamento podem ser classificados com base na espessura da crosta e na morfologia da forma de destacamento. Como se pode observar na Figura 4.10, nas crostas mais finas são verificadas formas de destacamento por mm de superfície e formas de destacamento pontual por formação de bolhas, quando a crosta não desprende da

superfície de uma só vez e cujo destacamento exhibe formas circulares. Estas bolhas têm geralmente um diâmetro de 1 a 2 cm, uma superfície convexa e os casos em que a superfície foi removida dão lugar a cavidades com arestas irregulares. Tal como se pode verificar na Figura 4.11, relativamente às crostas mais espessas, o destacamento começa quase sempre nas extremidades dos blocos de pedra progredindo em direção ao seu ponto central. Nas áreas já destacadas são verificadas novas formações de crostas, chamadas crostas secundárias, e fenómenos de desagregação granular nos casos do calcário de textura oóide que serão referenciados adiante.

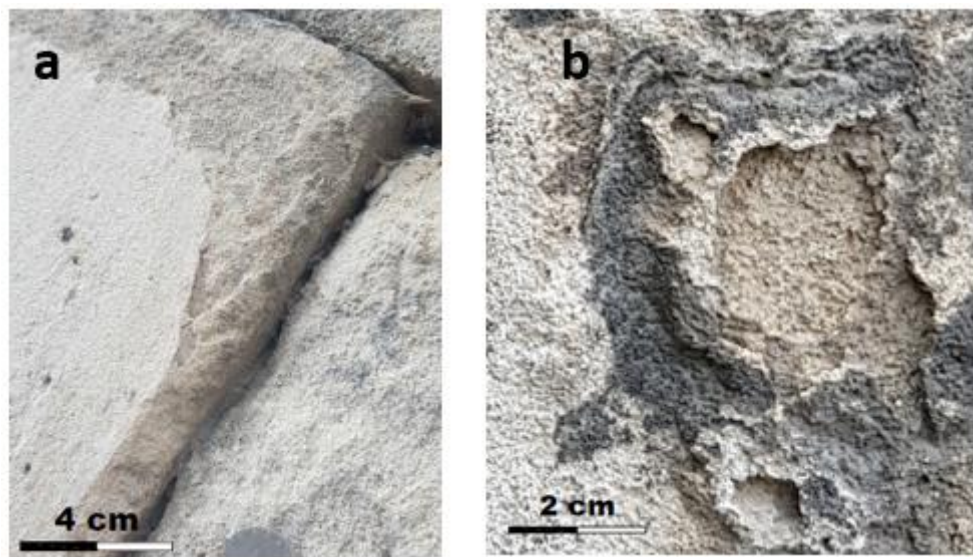


Figura 4.10 - Crostas brancas finas: a) destacamento por mm de superfície, b) destacamento por formação de bolhas.



Figura 4.11 - Crosta branca espessa com destacamento.

Outra forma de intemperismo observada é a presença de eflorescências salinas, depósitos cristalinos de cor branca resultantes da migração e posterior evaporação de águas pluviais ou provenientes do solo por capilaridade que transportam sais na sua composição.

As secções de parede compostas por elementos pertencentes à construção original apresentam na sua maioria fenómenos de desagregação granular causados pela dilatação e contração diferenciais dos minerais da pedra quando submetidos a variações de temperatura significativas. O facto de estes fenómenos serem notados sobretudo nas pedras originais deve-se à particularidade de estas serem compostas por calcário de textura oóide de granulação fina. O resultado desta desintegração é perfeitamente visível no arredondamento dos cantos dos elementos de pedra, como se pode verificar na Figura 4.12.



Figura 4.12 - Desintegração granular e presença de eflorescências salinas.

Foram também observadas patologias biológicas, entre as quais, formas de colonização biológica como a presença de algumas algas, uma proporção mínima de líquenes e o crescimento de pequenas plantas entre os elementos de pedra, mas apenas em níveis mais próximos do solo. É notória ainda a presença de guanos, depósitos orgânicos de dejetos de aves nomeadamente pombos e gaivotas, localizados nas áreas planas dos peitoris das janelas. Estes depósitos são uma fonte importante de transmissão de sais nocivos para a superfície das pedras.

O desenvolvimento de fraturas, fendas e fissuras, devido ao assentamento da estrutura do edifício e aos efeitos climáticos, são outras patologias identificadas nas paredes da Cidadella, assim como a queda de algumas pedras ou de argamassa das juntas que se devem a restauros feitos de forma inadequada. Patologias consequentes da atividade humana também estão presentes nos paramentos analisados na forma de danos causados por projeteis balísticos

durante a **segunda guerra mundial** e de algumas gravuras. Importa ainda referir que é comum a combinação de várias destas patologias e formas de intemperismo em determinados elementos de pedra.

#### 4.5. Ensaio de humidade superficial

Para o ensaio de teor de humidade superficial no paramento foi utilizado o humidímetro portátil no local, recorrendo a duas metodologias distintas. Na primeira metodologia foram testados 7 elementos de pedra pertencentes ao paramento em estudo, tendo sido feitas 10 medições em cada pedra, 5 em cada lado, distribuídas em linha vertical e separadas por distâncias iguais, de acordo com a Figura 4.13, com exceção de uma das pedras que por apresentar uma desintegração granular acentuada no lado esquerdo foram feitas 15 medições, 5 na zona da superfície onde se verificou a desintegração granular e 10 na superfície restante. Das 7 pedras testadas, 4 são referentes a elementos de pedra originais e 3 são de pedras restauradas.

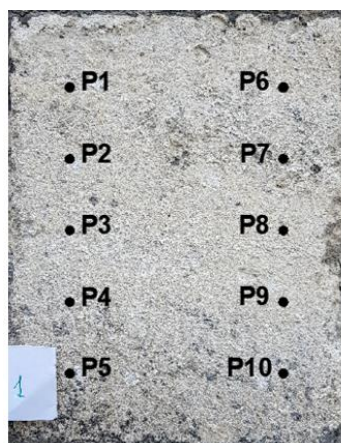


Figura 4.13 - Localização dos pontos de medição do ensaio de humidade relativa em cada pedra.

Na segunda metodologia de teste adotada foram seleccionados dois perfis verticais (Figura 4.4 e Figura 4.5), compostos por 7 elementos de pedra cada um e ambos com uma altura média de 2,14 m a contar do nível do solo. Em cada perfil vertical foram efetuadas 21 medições ao longo de um eixo vertical comum a todos os elementos sendo que, por cada elemento, foram realizadas 3 medições em pontos separados à mesma distância.

Em suma, tem-se um total de 117 medições distribuídas de acordo com o apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Número de medições feitas no teste de humidade relativa com o Humidímetro.

<b>Parede P1</b>	
<b>Elementos medidos</b>	<b>Nº de Medições</b>
Pedra P1-1	10
Pedra P1-2	10
Pedra P1-3	15
Pedra P1-4	10
Pedra P1-5	10
Pedra P1-6	10
Pedra P1-7	10
Perfil Vertical I	21
Perfil Vertical II	21
<b>Total</b>	<b>117</b>

Nas Figuras 4.14 a 4.22 podem ser visualizados os resultados obtidos no teste de teor de humidade superficial em cada elemento de pedra testados isoladamente e em cada perfil vertical. Nas mesmas, são apresentadas informações relativas à quantidade de humidade superficial presente ao longo do lado direito e ao longo do lado esquerdo de cada pedra testada de forma isolada, de modo a ser possível visualizar a sua distribuição em altura. Para os perfis verticais, pode-se acompanhar a evolução em altura da quantidade de humidade na superfície do paramento, em zonas compostas por elementos de pedra originais e zonas compostas por elementos de restauração. Em cada figura são também apresentadas informações acerca das características litológicas de cada pedra e tipos de intemperismo presentes, com o objetivo de relacionar estes aspetos com os valores medidos.

#### **4.5.1. Apresentação e discussão dos resultados**

A pedra P1-1, apresentada na Figura 4.14, é uma pedra não original, pertencente a uma das operações de restauração feitas, composta por calcário bioclástico de granulação média, onde se verificam a presença de crostas de intemperismo brancas, lisas e de espessura fina, bem como a existência de alguns pontos de crosta negra sobretudo nas cavidades mais profundas da sua superfície. A sua base encontra-se a uma altura de 1,19 metros a contar do nível do solo e conta com um valor médio de humidade superficial de 71,1.

Pode-se notar que os valores de humidade mais elevados coincidem com a zona da pedra onde também se verifica uma maior densidade de pontos de crosta negra, no canto inferior esquerdo. Isto pode dever-se ao facto de este tipo de crosta se formar em áreas de evaporação

que permanecem húmidas ou molhadas durante períodos consideráveis de tempo, apesar de não estarem sujeitas à ação direta da chuva, que é precisamente o caso destas pequenas cavidades na superfície da pedra que armazenam a água por mais tempo e fazem parte do trajeto das águas que escorrem pela superfície, (Begonha, 1997).

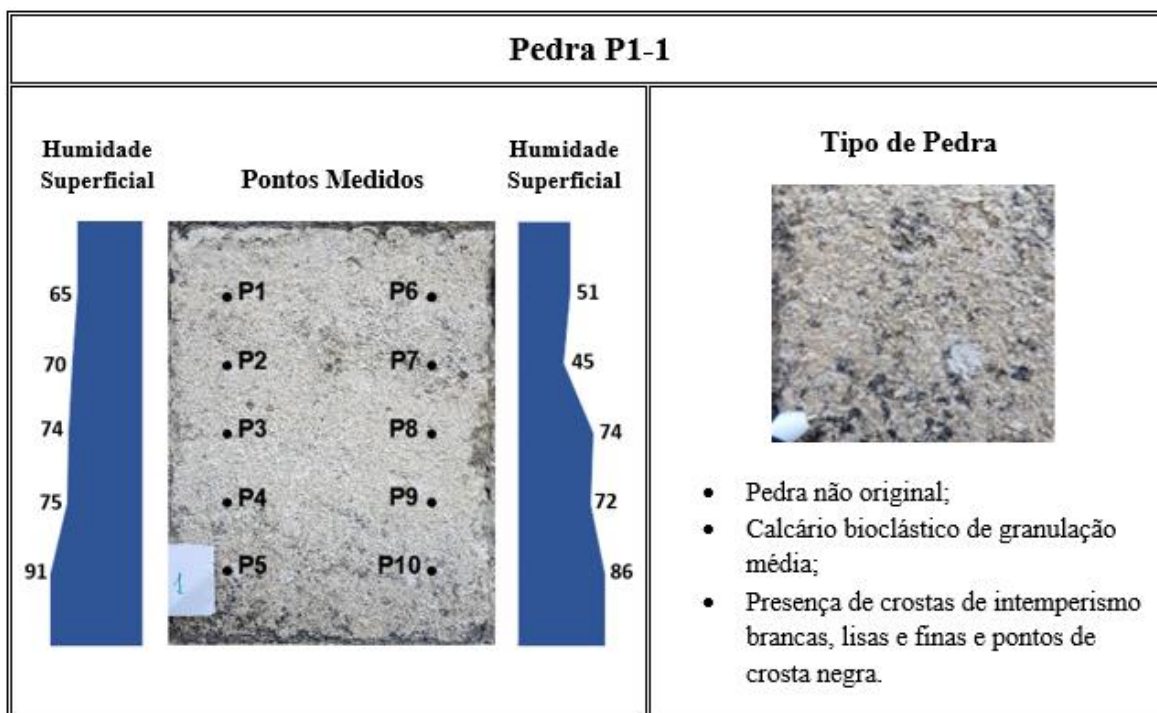


Figura 4.14 - Análise e resultados do ensaio com Humidímetro na pedra P1-1.

O elemento de pedra P1-2, apresentado na Figura 4.15, é uma pedra original composta por calcário oolítico de granulação fina com presença de crostas de intemperismo brancas e pequenos caminhos de crosta negra. A base deste elemento de pedra encontra-se a uma altura de 1,19 metros acima do nível do solo e o mesmo apresenta um valor médio de humidade superficial de 44,5.

Este é um dos elementos onde se verifica um dos níveis mais baixos de humidade na parede P1 e isso pode ser explicado pelo facto de se verificarem zonas com ausência de material, sobretudo nos cantos, devido a fratura do mesmo, e também à inexistência de argamassa em algumas partes das juntas.

Desta forma o elemento de pedra está em contacto com o ar em mais áreas para além da superfície, o que pode promover uma evaporação mais rápida da água presente nos poros do material.

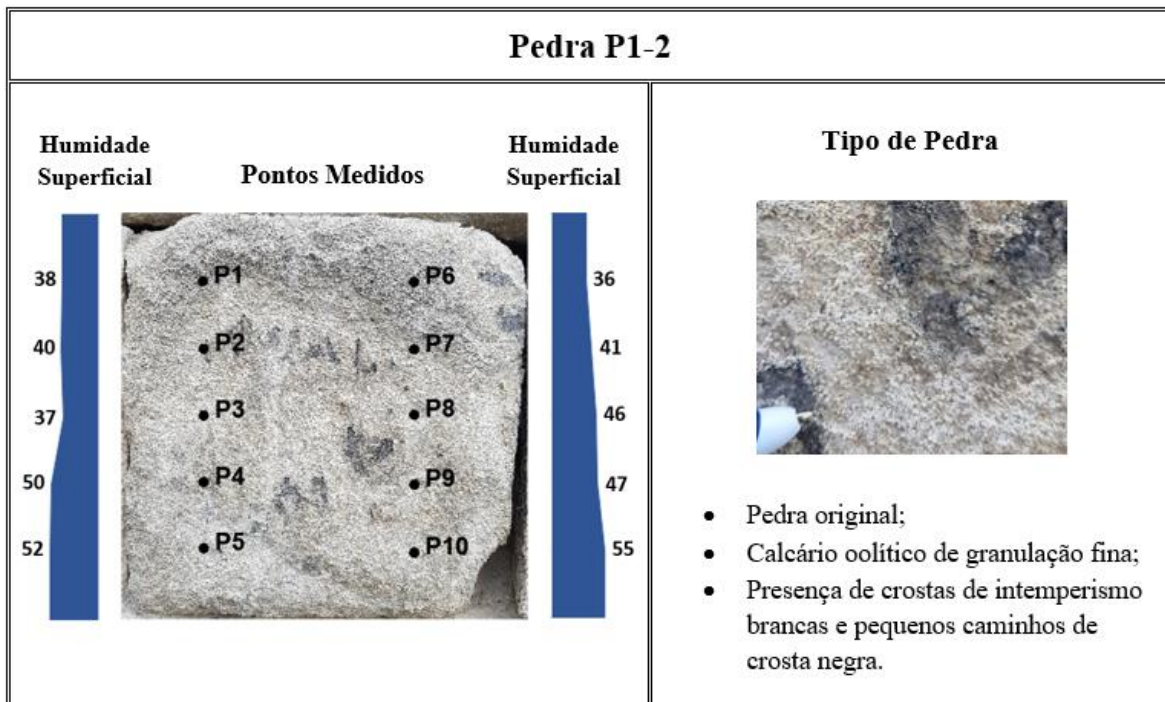


Figura 4.15 - Análise e resultados do ensaio com Humidímetro na pedra P1-2.

A pedra P1-3, que se apresenta na Figura 4.16, é uma pedra que faz parte da construção original da Citadella, é composta por calcário oolítico de granulação fina e nela podemos verificar a existência de crostas brancas espessas nos limites superiores e pequenos caminhos de crosta negra na sua zona central. São ainda visíveis fenómenos de desagregação granular acentuada, que contribuem para o arredondamento dos cantos e da superfície do elemento, e algumas manchas de cor branca que são características da presença de eflorescências salinas causadas pela cristalização de sais minerais à superfície. A base deste elemento encontra-se a uma altura de 1,5 metros acima do nível do solo e o mesmo apresenta um valor médio de humidade superficial de 57,9.

Neste elemento foram excepcionalmente efetuadas 15 medições por existirem diferenças na textura da superfície, designadamente desagregação granular acentuada na extremidade esquerda, onde se prevê o registo de valores de humidade mais elevados. Assim, optou-se por analisar esta pedra de uma forma mais precisa para que a possível disparidade de resultados e suas causas fossem evidenciados. Como prova disso, pode-se notar que as zonas onde são registados os valores de humidade mais elevados são precisamente as zonas onde se verifica uma desagregação granular mais acentuada e também a presença de maiores quantidades de eflorescências salinas, (canto inferior esquerdo, ponto de medição P5).

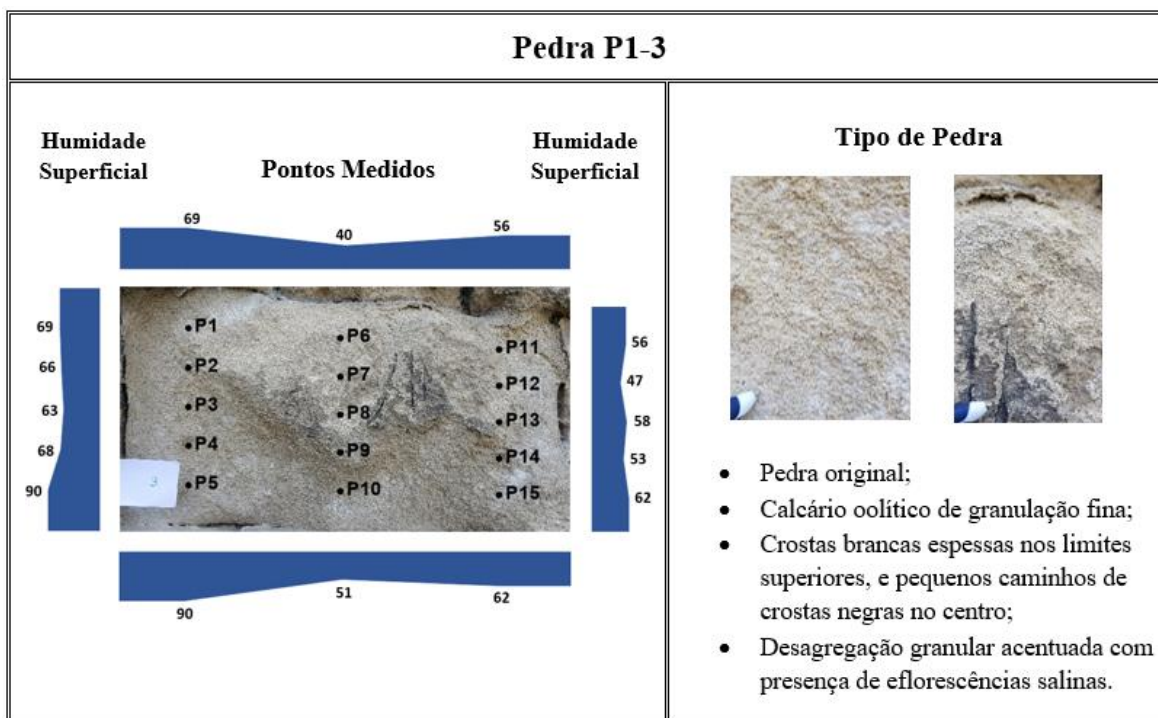


Figura 4.16 - Análise e resultados do ensaio com Humidímetro na pedra P1-3.

O elemento de pedra P1-4, apresentado na Figura 4.17, é uma pedra original composta por calcário oolítico de granulação fina com presença de várias crostas brancas finas com destacamento em forma de bolha e crostas negras finas de morfologia esférica. A sua base está situada a uma altura de 1,23 metros acima do nível do solo e registaram-se valores de humidade superficial que fazem uma média de 41,9.

Este é um elemento que, tal como o elemento P1-2, apresenta partes das juntas com ausência de argamassa pelo que os reduzidos valores de humidade medidos, relativamente aos outros elementos de pedra estudados, podem ser explicados também pelo fato de existir uma maior área em contacto com o ar, o que provoca uma evaporação mais rápida da água presente no material. No entanto, foi observada uma fratura recente no canto superior direito da pedra que pode facilitar a entrada de água das chuvas pelos poros do material, dando origem valores de humidade mais elevados no lado direito.



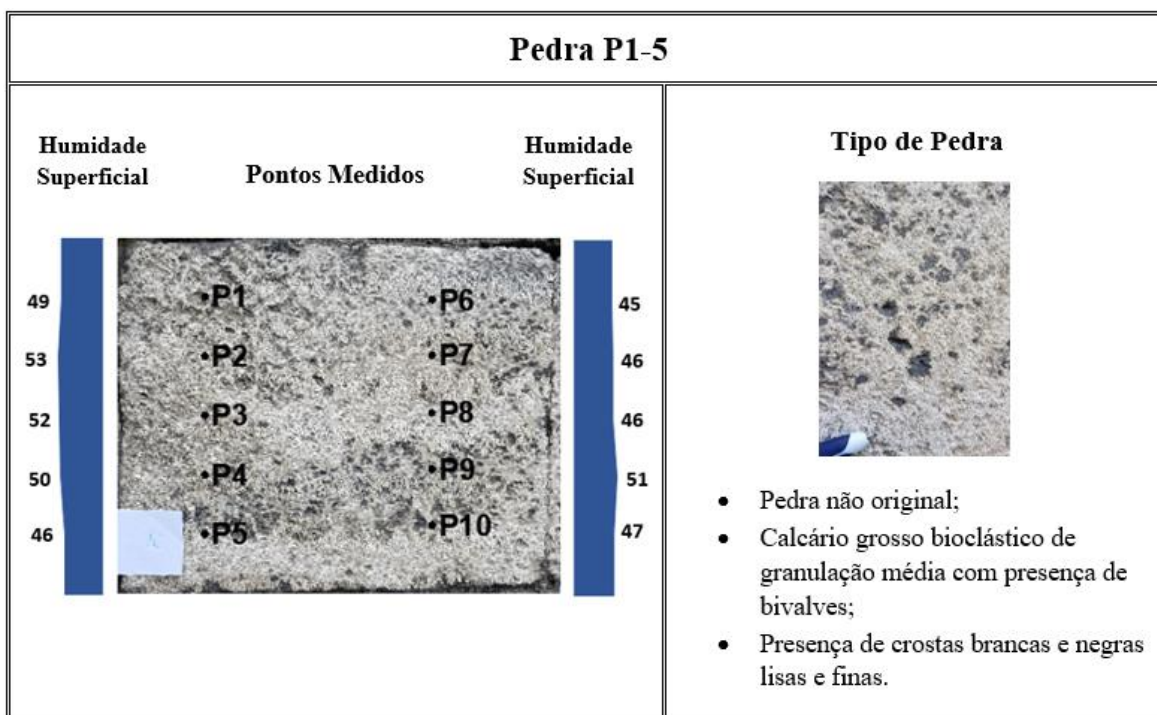


Figura 4.18 - Análise e resultados do ensaio com Humidímetro na pedra P1-5.

A pedra P1-6, exibida na Figura 4.19, é um elemento original composto por calcário oolítico de granulação fina e com a maior parte da sua superfície encrostada. Verifica-se a presença de crostas negras e brancas com destacamentos em forma de bolha. A base deste elemento está posicionada a 0,91 metros acima do nível do solo e nele foram feitos um conjunto de medições ao teor de humidade superficial que fazem uma média de 60,1.

Os valores mais elevados foram medidos nos locais onde existe empolamento e “explosão” de bolhas, como pode ser observado ponto de medição P8, com um valor de humidade de 72. Este empolamento das crostas de forma a formar bolhas que, por sua vez, “explodem” originando formações semelhantes a crateras lunares, pode ser explicado pelo facto de estas zonas da crosta estarem preenchidas com água e ao mesmo tempo serem submetidas a pressões originadas pela cristalização de sais solúveis, aliados à ocorrência de tensões de natureza térmica, [Camuffo e Bernardi, 1990] citados por (Begonha, 1997). Desta forma poder-se-á justificar os valores de humidade mais elevados medidos nestes pontos.

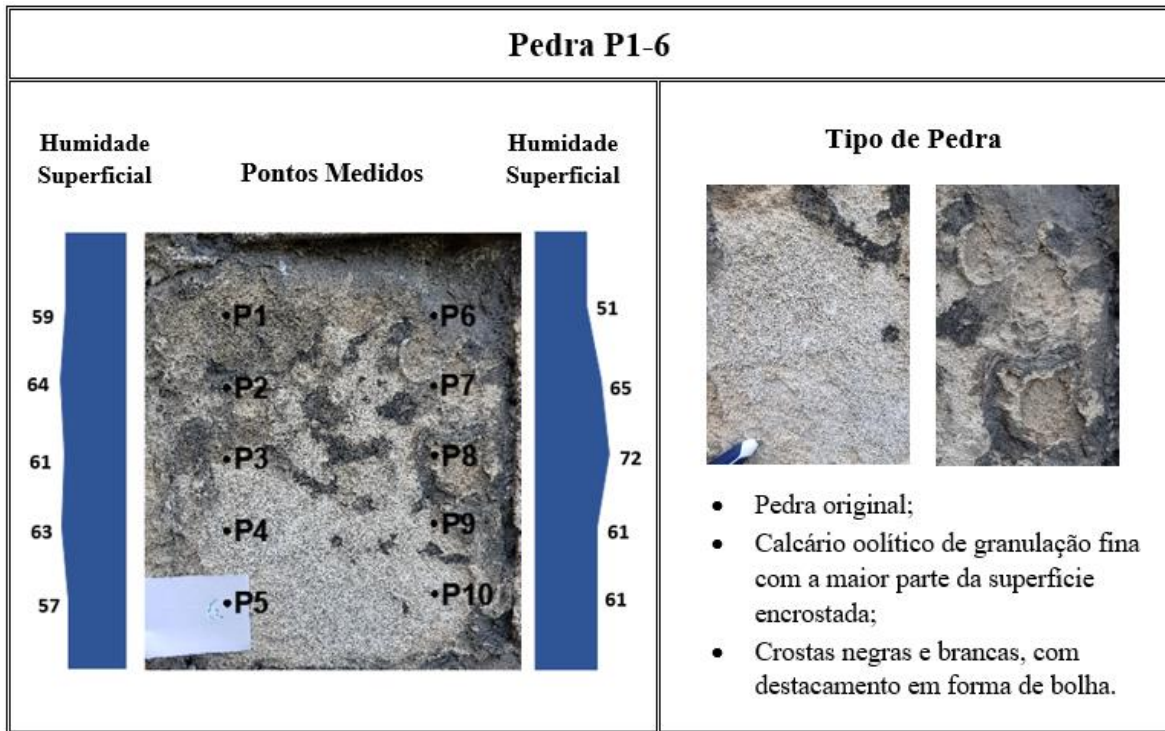


Figura 4.19 - Análise e resultados do ensaio com Humidímetro na pedra P1-6.

O bloco de pedra P1-7, retratado na Figura 4.20, é uma pedra não original e tal como a pedra P1-5 é composta por calcário bioclástico de granulação média com presença de bivalves. É visível a presença sobretudo de crostas brancas e alguns pontos de crosta negra nos pequenos orifícios da sua superfície característicos deste tipo de calcário bioclástico. A base deste elemento de pedra está localizada a uma altura de 87,5 centímetros acima do nível do solo e os valores de humidade superficial medidos neste elemento fazem uma média de 87,2.

Este elemento, apesar de ter as mesmas características litológicas e de apresentar as mesmas formas de intemperismo do elemento P1-5, possui dimensões significativamente maiores, contando com uma espessura de 20 centímetros e uma área de superfície de aproximadamente o dobro. Os valores de humidade à superfície medidos também perfazem uma média quase duplamente superior às do bloco P1-5, que podem ser explicados por estar localizado 35 centímetros mais perto do solo, fazendo com que esteja mais sujeito a fenómenos de capilaridade proveniente da água existente no solo.

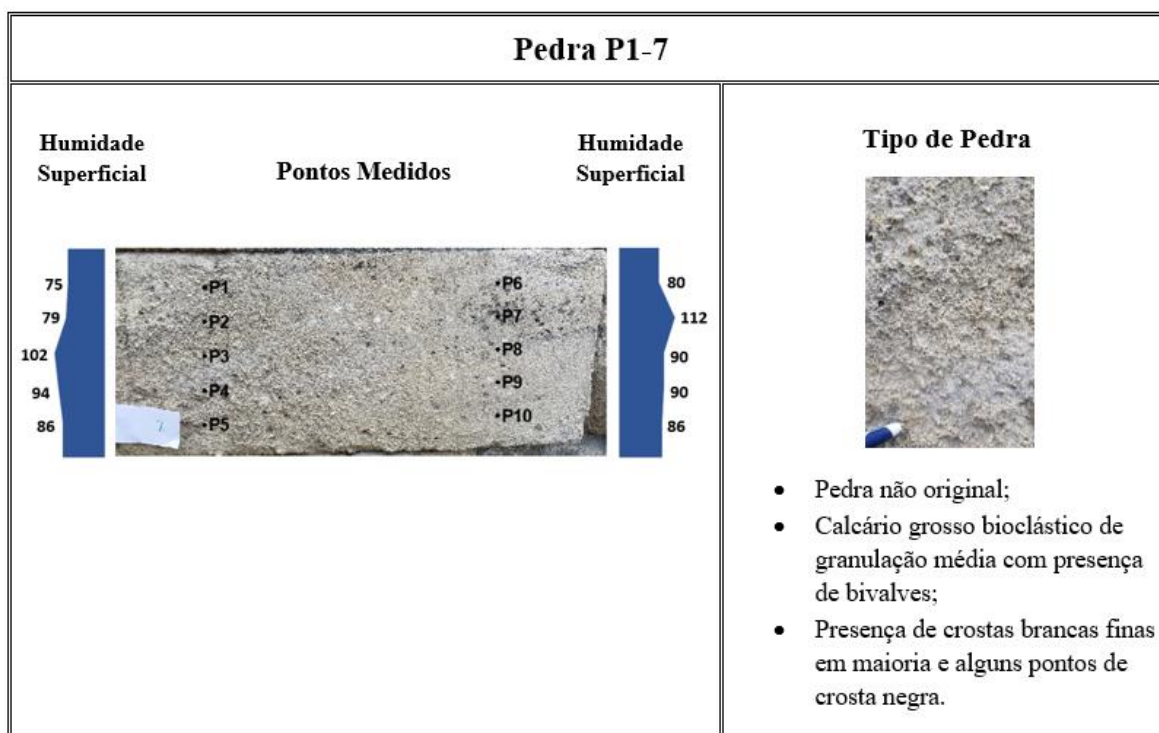


Figura 4.20 - Análise e resultados do ensaio com Humidímetro na pedra P1-7.

Como já referido anteriormente, a metodologia de teste através dos perfis verticais tem como principal objetivo avaliar a evolução da ascensão de água nas paredes por capilaridade, comparando essa evolução em pedras originais e pedras colocadas em processos de restauração.

O Perfil Vertical I que se apresenta na Figura 4.4, é um perfil pertencente à parede P1, composto na sua maioria por pedras não originais de calcário grosso bioclástico de granulação média com presença de bivalves, à exceção do primeiro e do último elemento, que consistem em pedras originais de calcário oolítico de granulação fina. Este perfil conta com a presença de crostas de intemperismo brancas e negras de espessura fina e superfície lisa e também alguns vestígios de crostas em forma de bolhas que já sofreram destacamento. Com uma altura de 2,14 metros a partir do nível do solo, este perfil apresenta valores de humidade superficial mais elevados nos primeiros 1,5 metros de altura com uma gama de valores que vão dos 57 aos 145. Dos 1,5 aos 2,14 metros de altura foram medidos valores significativamente inferiores que vão dos 40 aos 51. Desta forma podemos concluir que nesta secção da parede a humidade está presente em maior quantidade nos primeiros 5 elementos do perfil vertical e que por sua vez a ascensão de água por capilaridade atinge um máximo de 1,2 metros de altura.

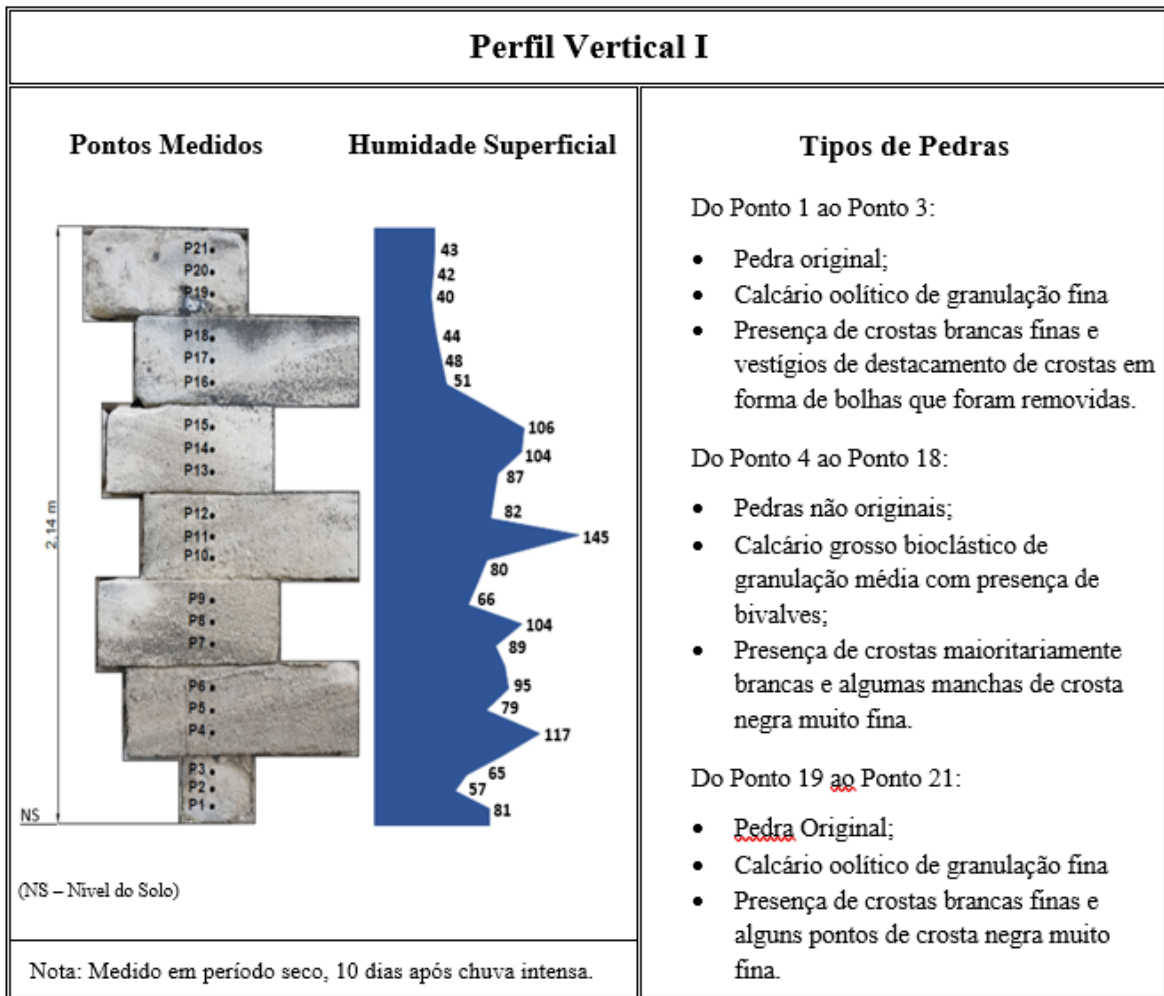


Figura 4.21 - Análise e resultados do ensaio com Humidímetro no Perfil Vertical I.

O Perfil Vertical II, apresentado na Figura 4.22, também pertencente à parede P1, é composto na totalidade por pedras originais, que por sua vez são compostas por calcário oolítico de granulação fina. Nele podemos observar crostas brancas e negras de espessura fina e crostas brancas espessas em alguns elementos. Podem ainda ser identificados fenómenos de desagregação granular e pequenas quantidades de eflorescências salinas adjacentes em quase todos os seus elementos constituintes. O perfil em questão tem também 2,14 metros de altura e é constituído por 7 elementos. Quanto aos valores de humidade superficial, são medidos níveis elevados, entre 60 e 125, desde o nível do solo até uma altura de 0,9 metros, o que entra em concordância com a análise feita aos valores obtidos no Perfil Vertical I, de que a água absorvida pelo paramento por capilaridade atinge valores a rondar os 1,5 metros de altura. No entanto pode-se notar uma subida anormal acentuada dos níveis de humidade superficial ao nível do 6º elemento de pedra do perfil vertical a contar do solo, entre os 1,5 e os 1,83 metros de altura, que pode ter origem em duas situações. A primeira hipótese está

relacionada com a probabilidade de o nível de água absorvida por capilaridade atingir alturas superiores nos blocos de pedra originais, o que pode advir do facto de as características litológicas do calcário oolítico de granulação fina serem mais propensas a uma maior e mais rápida absorção de água por capilaridade através dos seus poros. A segunda hipótese é que o nível de ascensão de água por capilaridade seja idêntico nos dois perfis, e por sua vez nos dois tipos litológicos dos elementos de pedra que deles fazem parte, sendo o valor observado uma situação pontual em que esta pedra tenha condições extraordinárias para armazenar no seu interior uma maior quantidade de água, proveniente de águas pluviais, quando esta escorre pelo paramento. A melhor forma de distinguir este tipo de fenómenos seria recorrer a ensaios laboratoriais, sendo para isso necessária a extração das pedras em questão, o que vai totalmente contra os princípios de proteção e conservação de património histórico e cultural, como é o caso dos monumentos.

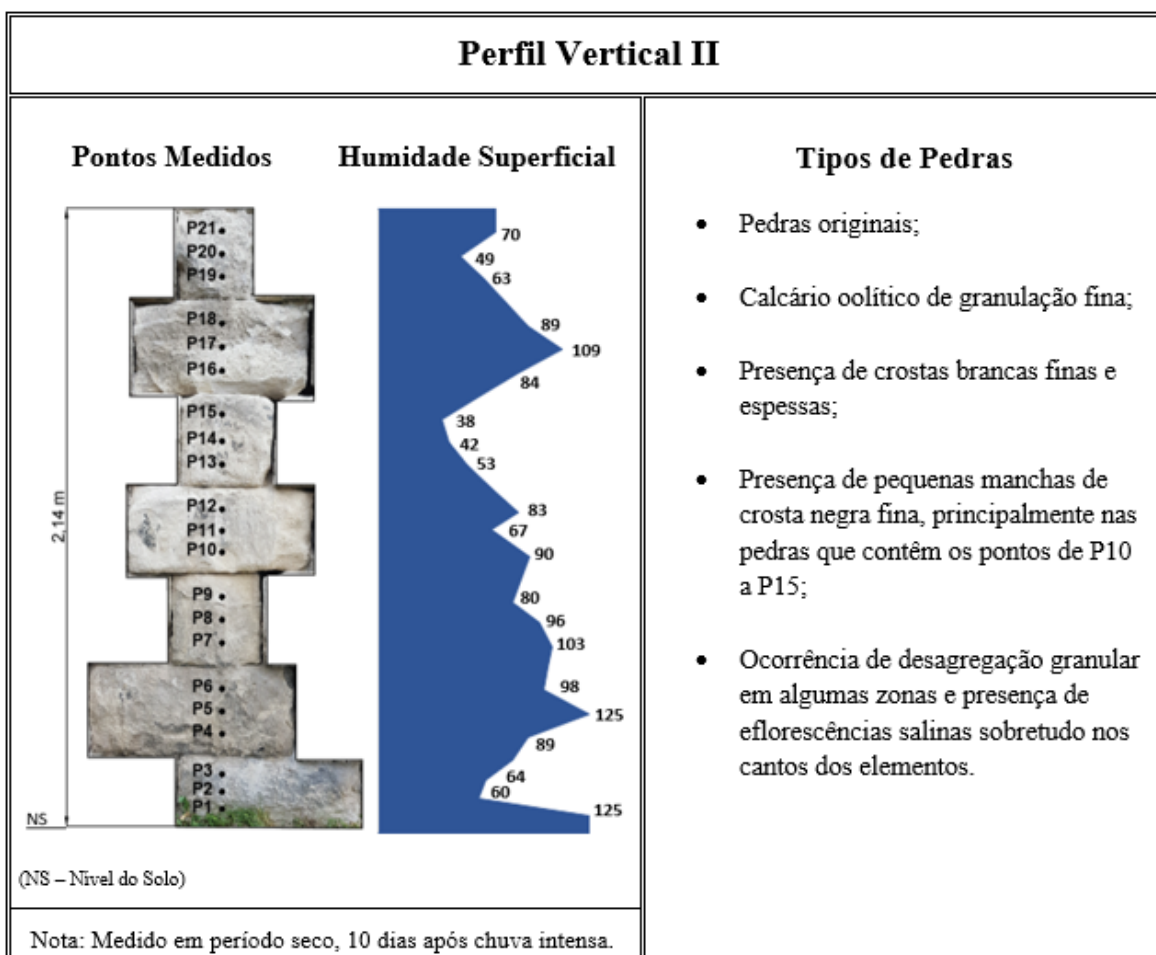


Figura 4.22 - Análise e resultados do ensaio com Humidímetro no Perfil Vertical II.

#### 4.5.2. Comparação com ensaios realizados por outros autores no mesmo paramento

Um estudo feito anteriormente por outros autores à quantidade de humidade superficial presente no mesmo paramento que se analisa neste trabalho, mostra a evolução da mesma, nas primeiras 5 fiadas de pedras a contar do nível do solo. A metodologia adotada por Tamás & Cebula (2016) difere da metodologia adotada neste trabalho, apesar de nos fornecer informações idênticas à metodologia dos perfis verticais. Tamás & Cebula (2016), medem a quantidade de humidade superficial igualmente com o Humidímetro portátil, mas apenas em elementos de pedra recente nas primeiras 5 fiadas de elementos do paramento em questão. Estes autores resumiram os valores de humidade medidos e calcularam a sua média nos blocos situados à mesma altura do solo, determinando a evolução da quantidade de água absorvida por capilaridade nos primeiros 1,5 metros a contar do nível do solo (Figura 4.23).

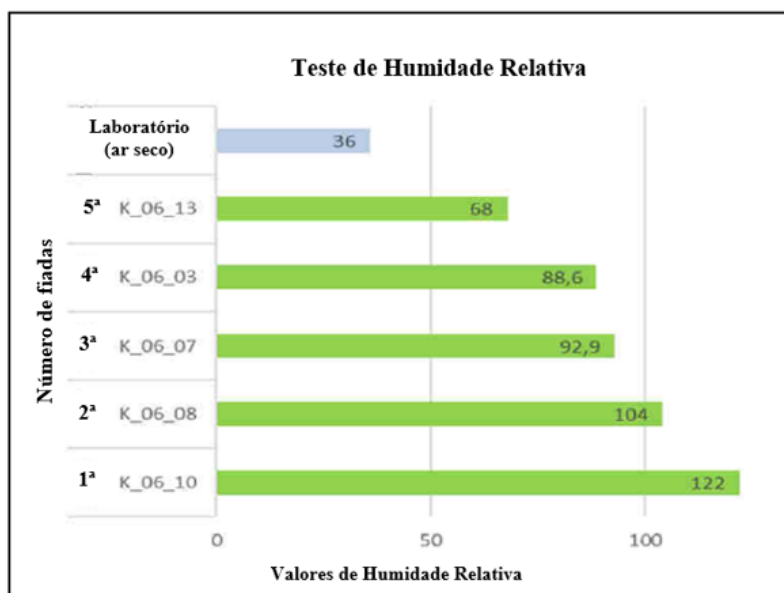


Figura 4.23 - Valores dos testes de Humidade Relativa de estudos anteriores, adaptado de (Tamás & Cebula, 2016).

Os valores obtidos por Tamás & Cebula (2016) não mostram uma correspondência direta com os valores medidos nos Perfis Verticais I e II (Figura 4.21 e Figura 4.22), principalmente porque os valores dos Perfis Verticais I e II são apresentados com mais pormenor e de uma forma mais pontual e localizada. No entanto, pode-se ver claramente na Figura 4.23 que nas pedras localizadas mais próximo do solo a quantidade de água é maior, diminuindo gradualmente em altura, tal como previsto.

Além dos valores de humidade medidos no local, os autores também analisaram em laboratório a quantidade de humidade presente em amostras de pedras calcárias idênticas e provenientes do mesmo local (Sóskút) das pedras presentes no paramento. Num estado seco ao ar, as pedras examinadas em laboratório apresentaram uma média de valores de humidade de 36. Com este valor pode-se reforçar as conclusões retiradas dos testes realizados neste trabalho, com a metodologia dos perfis verticais, de que a ascensão de água por capilaridade vai até aos 1,5 metros, uma vez que os elementos situados acima dessa altura apresentam uma gama de valores entre os 40 e os 50, que por sua vez são mais próximos do valor médio obtido em laboratório. No entanto, como se pode observar no Perfil vertical II da Figura 4.22, e nos ensaios apresentados por Tamás & Cebula (2016) na Figura 4.23, também se verificam valores duplamente superiores aos obtidos em laboratório em zonas do paramento acima dos 1,5 metros que indicam quantidades de humidade significativas.

#### **4.6. Ensaios de resistência mecânica à compressão uniaxial**

A metodologia de ensaio adotada para os testes de resistência mecânica à compressão uniaxial feitos com o Martelo de Schmidt N-34 e com o Duroscópio consiste na realização de 10 medições em cada um dos 7 elementos de pedra escolhidos. As medições foram feitas em zonas onde a superfície é menos irregular e em pontos afastados entre si à mesma distância, procurando assim abranger toda a superfície a ser testada, de modo a tornar a média dos valores medidos mais precisa e rigorosa. Como se pretende avaliar a resistência à compressão uniaxial, ambos os testes foram feitos posicionando o êmbolo de cada equipamento perpendicularmente à superfície a analisar.

O objetivo destes testes é estimar a resistência à compressão das pedras, de acordo com a sua litologia, bem como avaliar a influência que as crostas de intempérie têm na resistência mecânica das mesmas. No Gráfico 4.1 são apresentadas as médias dos valores de resalto medidos em cada pedra da parede P1 com o Martelo de Schmidt N-34 e com o Duroscópio. As barras mais grossas indicam os valores médios de resalto obtidos para cada pedra e as barras de erro representam a dispersão de dados em torno da média amostral através dos valores do desvio padrão. São ainda identificados os tipos de crostas de intempérie presentes nas várias superfícies medidas para facilitar a perceção de como estas crostas influenciam o nível de resistência mecânica das pedras.

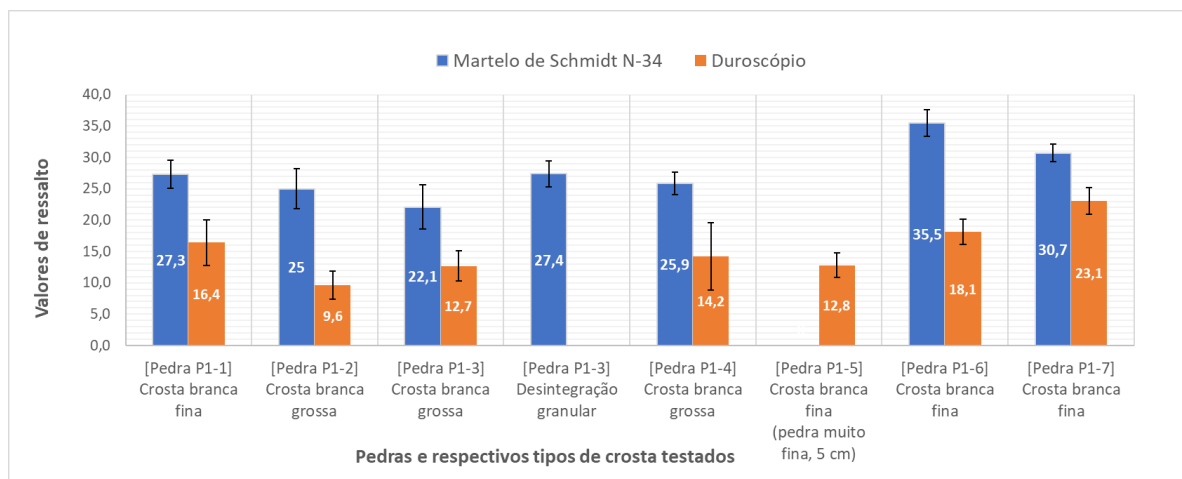


Gráfico 4.1 - Valores médios de ressalto dos testes com o Martelo de Schmidt e com o Duroscópio na parede P1.

Como se pode observar através dos valores apresentados no Gráfico 4.1, o elemento de pedra P1-3 foi medido nos dois tipos de superfície que apresenta, na superfície de crosta branca grossa e na zona de desintegração granular. Na superfície com crosta branca espessa foram possíveis de realizar os dois ensaios, Martelo de Schmidt e Duroscópio, mas na superfície com desintegração granular apenas foi possível realizar o ensaio com o Martelo de Schmidt devido ao facto de o Duroscópio ser um equipamento muito mais sensível a irregularidades na superfície. Os resultados nas diferentes zonas são apresentados separadamente no Gráfico 4.1 para que se tenha uma perceção de como o tipo de superfície afeta os valores de ressalto medidos. Já no elemento de pedra P1-5 apenas se procedeu à medição com o Duroscópio devido à espessura demasiado reduzida desta pedra. O facto de este ser um elemento de pedra de espessura muito reduzida (5 cm) faz com que os valores de ressalto medidos com o Martelo de Schmidt não sejam fiáveis, uma vez que representam a resistência mecânica do elemento de pedra que está imediatamente por trás do elemento testado. Desta forma o único equipamento capaz de medir a resistência mecânica da pedra P1-5 é o Duroscópio por ser inicialmente concebido para detetar a resistência mecânica em superfícies metálicas de pouca espessura, o que o torna mais sensível, e capaz de detetar valores de resistência mecânica numa escala menor.

Foram registados valores de ressalto entre 9,6 e 23,1 com o Duroscópio, enquanto que com o Martelo de Schmidt registaram-se valores de ressalto entre 22,1 e 35,5.

Relativamente às patologias por intemperismo, os valores de ressalto mais elevados medidos com o Martelo de Schmidt são verificados nas crostas brancas e finas e os valores mais

baixos são registados nas crostas brancas espessas, apesar de ser nas crostas brancas e espessas que se registaram maiores valores de desvio padrão como podemos ver nas tabelas em anexo. Os valores mais altos de desvio padrão podem ser explicados pela probabilidade de terem sido feitas medições em zonas onde a crosta já iniciou um processo de destacamento não visível reduzindo assim os valores de ressalto, ou em zonas em que a crosta se encontra em perfeita simbiose com o elemento de pedra provocando valores de ressalto mais altos.

Surpreendentemente, na pedra P1-3, os valores de ressalto medidos com o martelo de Schmidt na zona de desintegração granular mostram-se mais elevados do que na zona encrostada quando se deveria verificar precisamente o contrário. Esta ocorrência pode ser explicada pelo facto de as crostas já se encontrarem num processo de destacamento e também pela possibilidade de na zona onde se verifica a desintegração granular já ter começado um processo de cimentação secundária.

Os valores medidos com o Duroscópio não mostram uma tendência tão clara como os do Martelo de Schmidt, apesar de também indicarem maiores valores de ressalto nas crostas finas do que nas crostas grossas.

Assim sendo, concluímos que os valores de recuperação do martelo de Schmidt e do Duroscópio, apresentados no Gráfico 4.1, mostram que os valores de recuperação da crosta branca e fina são muito mais altos do que nos outros tipos de superfície e respetivas patologias de intempérie. Isso pode ser explicado pelo fenómeno de cristalização da calcite que em contacto com a água e sujeita a oscilações de temperatura significativas acaba por se diluir e voltar a cristalizar, desta vez dentro dos poros das pedras, obstruindo-os e criando assim uma camada densa e dura que acaba por aumentar a sua densidade e por consequência a sua resistência mecânica.

#### **4.6.1. Estimativa da resistência mecânica à compressão**

Neste ponto procede-se à estimativa da resistência à compressão uniaxial das pedras testadas, a partir dos valores de ressalto obtidos nas medições com o martelo de Schmidt, utilizando os dois métodos diferentes apresentados no capítulo 3, a fórmula (3.4) de (Török Á. , 2004) e o Ábaco de Gálos (Gálos, 2003).

Os valores de resistência à compressão uniaxial de cada elemento de pedra, obtidos com ambos os métodos, são apresentados na Tabela 4.3, podendo ser comparados com vista a observar as suas disparidades. Desta forma pretende-se também constatar a influência que

as características litológicas e respectivas patologias por intempérie têm na resistência mecânica dos elementos de alvenaria de pedra do monumento, bem como comparar a resistência mecânica das pedras presentes na parede da Citadella, com testes realizados a pedras de calcário oolítico grosso, de diferentes granulações, provenientes da mesma pedreira, mas extraídas num período recente, mais propriamente em 2006.

De acordo com a Tabela 4.2, publicada por Fodor & Kleb (1986), pode-se ver que o valor da resistência à compressão do calcário grosso de Sósokút costuma variar entre 4 e 97 MPa.

Tabela 4.2 - Características físicas do calcário grosso em várias regiões da Hungria, traduzido de (Fodor & Kleb, 1986).

<b>Propriedades físicas do calcário grosso</b>				
Pedreira	Densidade g/cm <sup>3</sup>	Absorção de água v%	Resistência à compressão	
			Ar seco MPa	Saturado com água MPa
<b>Budafok</b>	1.62	12.0 – 18.0	2 – 9	3 – 5
<b>Nagytétény</b>	2.16	13.5 – 18.7	48 – 57	39 – 45
<b>Köbánya</b>	2.07	5.5 – 14.8	8 – 28	5 – 19
<b>Sósokút</b>	2.05	10.8 – 19.1	4 – 97	5 – 14
<b>Tárnok</b>	1.72	11.2 – 22.6	5 – 19	3 – 12
<b>Etyek</b>	1.77	13.4 – 25.1	5 – 15	3 – 8
<b>Bicske</b>	1.93	2.8 – 21.6	5 – 8	3 – 41
<b>Bia</b>	2.15	1.3 – 25.7	5 – 73	6 – 51
<b>Tök</b>	1.65	8.8 – 34.6	3 – 31	2 – 11
<b>Zsámbék</b>	1.68	11.3 – 28.6	1 – 6	1 – 3
<b>Tapolca</b>	1.78	6.7 – 19.3	3 – 18	2 – 4
<b>Pécs</b>	1.76	8.5 – 21.1	4 – 24	3 – 6

Testes realizados por Török & Pápay (2006), igualmente em pedras de calcário grosso de Sósokút em condições de exposição ao ar seco, apresentam valores de resistência à compressão uniaxial de 2,64 MPa para grãos grossos, 11,63 MPa para grãos médios e 6,29 MPa para grãos finos.

Como se pode verificar na Tabela 4.3 os valores obtidos com ambos os métodos de transformação de valores de ressaltos em valores de resistência mecânica apresentados no capítulo 3 (vd. 3.4.3.3) são muito próximos, apresentando uma disparidade pouco significativa.

Com médias de 19 MPa para as pedras de granulação fina e 20,5 MPa para as pedras de granulação média, verificam-se valores de resistência mecânica à compressão uniaxial

bastante idênticos para ambos os tipos, apesar de uma ligeira superioridade nas pedras de granulação média. Os valores mais distantes das médias verificadas podem justificar-se, no caso da pedra P1-3 que apresenta um valor de 14,5 MPa, pelo facto de ser uma pedra onde observam fenómenos de desagregação granular que enfraquecem a sua resistência mecânica. E no caso da pedra P1-6 que apresenta um valor de 26,5 MPa, por possuir crostas brancas finas que, como já referido anteriormente, aumentam a resistência mecânica da superfície das pedras devido ao fenómeno de cristalização da calcite.

Estudos sobre a aplicação da ferramenta no teste de elementos de alvenaria de pedra antiga mostram que podem ser desenvolvidas formulas empíricas para cada tipo de pedra correlacionando os valores de ressalto ou índice esclerométrico (“R” ou “IE”) e a resistência à compressão, (Gálos, 2003), (Török Á. , 2004). Neste trabalho são apresentadas duas opções de efetuar essa correlação para o calcário grosso, que corresponde à litologia das pedras em estudo.

Tabela 4.3 - Valores de resistência mecânica à compressão uniaxial

Pedras	Litologia	Tipo de Crosta	Valor de Ressalto (R)	Desvio Padrão	$\sigma_c$ (MPa) [pela equação de Török, Á.]	$\sigma_c$ (MPa) [pelo ábaco de Gálos]
P1-1	Calcário bioclástico de granulação média	Crosta branca fina	27,3	2,2	19,4	19
P1-2	Calcário oolítico de granulação fina	Crosta branca grossa	25	3,2	17,4	17
P1-3 (crosta)	Calcário oolítico de granulação fina	Crosta branca grossa	22,1	3,5	14,8	14,5
P1-3 (Desintegração granular)	Calcário oolítico de granulação fina	Desintegração granular	27,4	2,1	19,5	19
P1-4	Calcário oolítico de granulação fina	Crosta branca grossa	25,9	1,8	18,2	18
P1-5	Calcário bioclástico de granulação média	Crosta branca fina	Pedra de espessura demasiado reduzida (5 cm) para se poder testar quanto á resistência mecânica com o Martelo de Schmidt.			
P1-6	Calcário oolítico de granulação fina	Crosta branca fina	35,5	2,1	26,7	26,5
P1-7	Calcário bioclástico de granulação média	Crosta branca fina	30,7	1,4	22,4	22

Pode-se concluir também que os valores de resistência à compressão uniaxial das pedras examinadas são bastante superiores aos das pedras de Sóskút examinadas por Török & Pápay (2006), sendo que apenas os blocos de granulação média chegam a valores mais perto dos obtidos neste trabalho, ainda que algo distantes. Isto sugere que a resistência das camadas de calcário extraídas num período recente nem sempre atingem a resistência das pedras utilizadas na construção original e reabilitações do século XX da Citadella.

## **5. MAPEAMENTO DIGITAL E ANÁLISE DE DADOS**

### **5.1. Considerações Gerais**

Os mapeamentos de danos e patologias são documentos gráficos que têm como objetivo a sintetização de informações acerca do estado de conservação geral de um edifício representando as alterações sofridas pela sua estrutura e materiais construtivos ao longo do seu tempo de vida. A sua conceção compreende um registo criterioso das patologias presentes no objeto de estudo, através de grafismos que representam as diversas categorias e níveis de degradação identificados. Como tal, estes mapeamentos representam uma ferramenta de grande utilidade no diagnóstico de bens culturais, (BARTHEL, LINS, & PESTANA, 2009).

No caso dos monumentos, os mapas de danos e patologias são documentos ilustrativos de elevada importância, que permitem agrupar um grande número de informações relativas à quantidade, qualidade e intensidade dos problemas existentes na estrutura e nos materiais construtivos dessas edificações. Do ponto de vista operativo, estes mapeamentos são instrumentos eficazes de auxílio a projetos de reabilitação e/ou conservação, bem como a previsões orçamentais e ações de monitorização preventiva na conservação dos materiais, (BARTHEL, LINS, & PESTANA, 2009).

Neste capítulo é apresentada uma comparação estatística das proporções das manifestações patológicas identificadas na superfície do paramento em estudo (parede P1), bem como um mapeamento digital em 2D que tem como objetivo ilustrar e sintetizar as informações relacionadas com as características do material e respetivas manifestações patológicas sinalizando a sua localização com recurso à sobreposição de elementos gráficos, como cores, pontos e números em fotografias do paramento.

### **5.2. Metodologia**

A metodologia digital de levantamento, mapeamento e análise, de patologias construtivas incidentes na secção de parede do monumento em estudo aqui abordada, pretende inter-relacionar essas informações, por intermédio do software “AutoCAD”, utilizando os seus recursos de multimídia e computação gráfica para as evidenciar.

Assim sendo, começou por se proceder à digitalização do levantamento fotográfico da parede em análise. Sobre essa base digital e após a devida identificação dos danos e patologias existentes, foram acrescentados os desenhos do mapeamento dos tipos de pedras, se originais ou de substituição, respetivas manifestações patológicas e estados de conservação das mesmas, tais como, fraturas, fendas e fissuras, erosão por desintegração granular, presença de eflorescências salinas, presença de crostas de intempérie, entre outros. De forma a facilitar a distinção das diferentes patologias que a parede apresenta, e por se verificar mais do que uma patologia na mesma área, são apresentados mais do que um mapa, que por sua vez apresenta apenas um tipo de patologia e respetiva cor.

Em seguida foi medida a superfície da parede e as proporções de cada manifestação patológica presente na mesma, de forma a elaborar diagramas de proporção que exibem a percentagem da área da parede que apresenta essa patologia.

### **5.3. Resultados dos mapeamentos e análise**

Após a identificação do material original, material substituído e as manifestações patológicas mais evidentes na parede P1, procede-se à quantificação das áreas e respetivas percentagens, tal como se apresenta na Tabela 5.1 e nos Gráficos 5.1 e 5.2.

No que diz respeito à proporção de material original e material substituído da parede P1, verifica-se que 62,2 % da superfície é composta por pedras pertencentes à construção original e 37,8 % corresponde à proporção de pedras aplicadas em processos de reabilitação da Citadella.

Relativamente às patologias identificadas, 30,1 % da superfície da parede apresenta crostas negras, sem contar com fenómenos de descoloração da superfície que são notados sobretudo no material substituído. Quanto às crostas brancas, esta releva-se a patologia mais predominante com 76,7 % da área de superfície afetada. As crostas brancas, como já foi referido no capítulo anterior, trazem com elas fenómenos de escamação e destacamento da superfície, fato que torna estas patologias diretamente proporcionais e daí serem assumidas as mesmas proporções.

Os fenómenos de desagregação granular são a patologia menos existente nesta parede com 12,5 % do material afetado, ainda que noutras paredes a presença desta patologia seja mais abundante, principalmente as sujeitas a uma exposição direta do vento e da chuva. É precisamente nestas zonas que se verifica a presença de eflorescências salinas, que apesar

de não serem visíveis em toda a área de desagregação, foram consideradas as mesmas proporções devido à correlação entre as duas patologias.

Por fim, a presença de material fraturado, fendilhado e fissurado ocupa 27,3 % da área de superfície da parede. Esta é, sem dúvida, uma patologia a ter em conta, principalmente por alterar significativamente as características mecânicas do paramento, considerando-se que valores acima de 20% já justificam uma intervenção de reabilitação.

Tabela 5.1 - Materiais e patologias presentes na parede analisada.

		Área (m <sup>2</sup> )	%	Área total do paramento (m <sup>2</sup> )
<b>Tipo de Material</b>	Material Original	45,36	62,2	120
	Material Substituído	74,64	37,8	
<b>Manifestações Patológicas</b>	Escurecimento da superfície (Crostras negras)	36,12	30,1	
	Escamação e Destacamento (Crostras brancas)	92,04	76,7	
	Desintegração granular (Eflorescências salinas)	15	12,5	
	Fraturas Fendas e Fissuras	32,76	27,3	

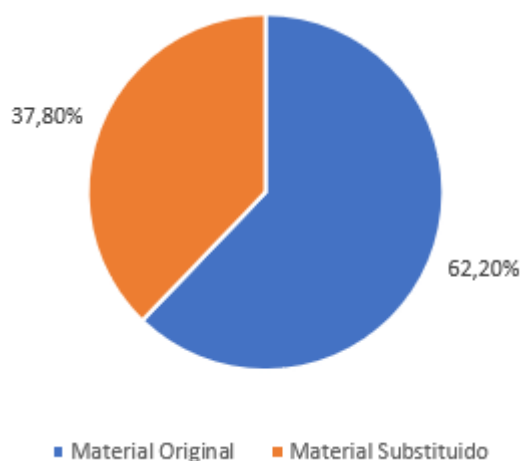


Gráfico 5.1 - Caracterização dos materiais da parede P1.

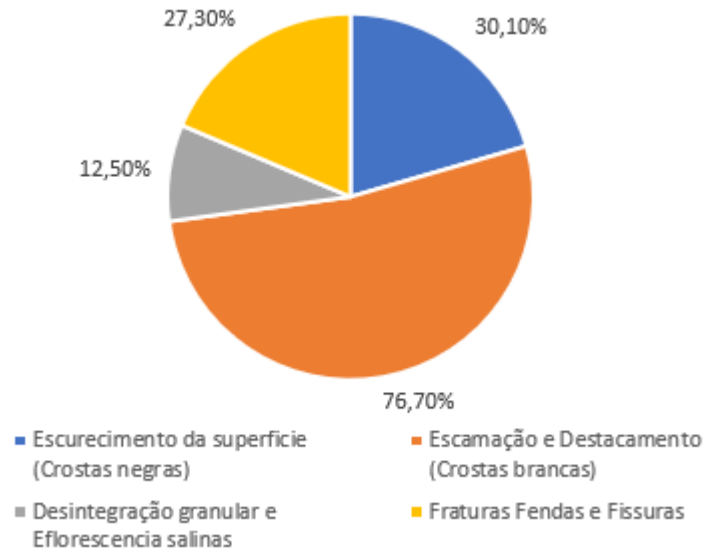


Gráfico 5.2 – Caracterização das patologias na parede P1.



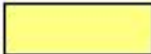
 **Material Substituído**

Figura 5.1 - Mapa de material original e material substituído do paramento P1.



Escurecimento da superfície, Crostas Negras

Figura 5.2 - Mapa de Crostas Negras presentes na superfície do paramento P1.



Escamação e Destacamento, Crostas Brancas

Figura 5.3 - Mapa de Crostas Brancas presentes na superfície do paramento P1.



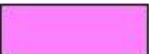
 Desintegração granular, Eflorescências Salinas

Figura 5.4 - Mapa de desintegração granular presente na superfície do paramento P1.



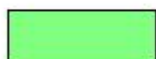
 Fraturas, Fendas e Fissuras

Figura 5.5 - Mapa de fraturas, fendas e fissuras presente na superfície do paramento P1.



Figura 5.6 - Mapa Litológico e de resultados dos ensaios realizados no paramento P1.

#### **5.4. Propostas de intervenção e reabilitação futuras**

Na perspectiva de reabilitar e preservar a condição natural das pedras e das próprias paredes de alvenaria da Citadella perante os fenómenos de degradação e patologias documentadas neste trabalho, poderão ser sugeridos alguns dos processos de intervenção mais adequados, recorrendo a técnicas de consolidação, com o objetivo de repor a capacidade resistente inicial, técnicas de reforço com a finalidade de limitar a deformação da estrutura, e técnicas de proteção contra a humidade prevenindo a manifestação de anomalias relacionadas com a mesma.

Neste sentido, como solução de consolidação pode ser sugerida a substituição do material mais degradado, nomeadamente elementos de pedra fraturados, fissurados e/ou que apresentem estados avançados de formação de crostas e conseqüente destacamento, por elementos de pedra provenientes do mesmo local de mineração dos originais. Nos casos em que os elementos de pedra não atingem um nível de degradação que justifique a sua substituição, sugere-se a aplicação de aditivos adequados com propriedades semelhantes às do calcário oolítico grosso, como por exemplo argamassas restauradoras com propriedades desumidificantes e resistentes aos sais.

Como técnicas de reforço sugere-se o refechamento das juntas, em zonas onde se verifique a falta ou uma degradação significativa das juntas de argamassa, através da remoção parcial e substituição da argamassa degradada por outra de melhores propriedades mecânicas e de maior durabilidade. Tal como as argamassas restauradoras dos elementos de pedra, esta argamassa de restauração das juntas também deve ter propriedades idênticas às da argamassa original e igualmente resistente aos sais.

Finalmente, e pelo fato de a humidade ser uma das grandes preocupações nos edifícios antigos, as medidas de proteção contra a mesma tornam-se indispensáveis quando se pretende prevenir a manifestação das anomalias a si associadas. Como tal, a técnica de proteção sugerida, tendo em conta a porosidade do material, é a execução de barreiras químicas contra a humidade ascensional por injeção. Esta técnica consiste na injeção, sob pressão, de uma calda de um produto químico hidrófobo, à base de resinas, silicones e estearato de alumínio, numa faixa de alvenaria localizada a um nível conveniente, constituindo uma barreira à passagem de água proveniente do solo por capilaridade.

## **5.5. Conclusões**

Após analisar os mapeamentos e as proporções de material substituído e das manifestações patológicas abordadas neste capítulo, pode-se concluir que o paramento em estudo apresenta uma quantidade significativa de pedras substituídas, crostas brancas e danos na sua superfície, como é o caso da queda de material, fraturas e fissuras, quando comparado com os restantes paramentos do monumento. O fato de estar orientado a Sudeste faz com que este seja um dos paramentos com maior exposição, e por mais tempo, à incidência solar, fazendo com que a sua superfície esteja sujeita a grandes oscilações de temperatura no período de inverno e temperaturas extremamente elevadas no período de verão. Tanto a expansão como a oscilação térmica são das maiores causas de deterioramento das superfícies das alvenarias de pedra antigas, e estão diretamente relacionadas com o aparecimento das patologias de maior proporção verificadas.

Podemos também concluir, através da comparação do material substituído e o original, que a degradação das pedras começa com uma descoloração das mesmas, que progride para a formação de crostas brancas ou negras, dependendo da orientação do paramento, e da localização e características litológicas das pedras no paramento. Com o passar do tempo, os desenvolvimentos destas crostas dão origem a fenómenos de escamação e/ou destacamento que poderão evoluir para a fissuração, fracturação e conseqüente queda do material.

## 6. CONCLUSÕES

### 6.1. Considerações finais

O trabalho desenvolvido incidu num estudo acerca do estado de degradação de uma secção da parede de alvenaria de pedra de um monumento histórico situado na cidade de Budapeste, Hungria, denominado de Citadella.

O estudo realizado reflete-se na identificação das manifestações patológicas de presença mais comum no paramento analisado, bem como na utilização de ensaios *in-situ* para avaliar alguns aspetos da condição física e desempenho mecânico dos elementos de pedra e da própria alvenaria. Como tal, foram realizados o ensaio de teor de humidade superficial com o Humidímetro Portátil e os ensaios de resistência mecânica à compressão uniaxial através do Martelo de Schmidt e do Duroscópio.

Foram também desenvolvidos aspetos como a metodologia de avaliação e classificação dos ensaios *in-situ* e os campos de aplicação, vantagens e desvantagens, procedimento experimental e parâmetros de medição dos ensaios realizados, com as devidas adaptações ao caso de estudo de paredes de alvenaria de pedra antiga de monumentos históricos.

O estudo realizado inclui ainda uma análise e apresentação das proporções das patologias existentes no paramento através do mapeamento digital das mesmas.

### 6.2. Conclusões finais

O tipo predominante do material de pedra constituinte das paredes de alvenaria da Citadella é o calcário oolítico grosso, o que está de acordo com seu uso geralmente amplo em construções históricas na região, podendo ser encontrado em pedreiras húngaras muito próximas da localização do local de estudo, como a pedreira de Sóskút.

As inspeções feitas no local revelam que a maior parte da superfície dos paramentos apresenta danos e manifestações patológicas significativas. Entre as patologias existentes, as mais comuns na secção de parede estudada são as crostas de intemperismo brancas e negras e fenómenos de desagregação granular, que como consequência provocam o destacamento do material, bem como fraturas, fendas, fissuras e a queda de argamassa das juntas e das próprias pedras. Esta grande suscetibilidade ao intemperismo está relacionada com a elevada porosidade do tecido litológico que o calcário oolítico apresenta.

Na secção de parede mapeada, as fiadas de pedras inferiores mostram um grau de intemperismo significativamente maior que as outras, verificando-se um maior desgaste da superfície e consequente destruição das pedras localizadas mais perto do solo, bem como uma menor proporção de crostas de intempérie não destacadas. Isto pode significar uma possível diferença nos fatores microclimáticos ao longo da superfície do paramento, bem como a alta capacidade de absorção de água por capilaridade das pedras de calcário grosseiro.

Com base nos ensaios de resistência mecânica, verificou-se que os valores de ressaltos medidos em superfícies de crostas branca fina são geralmente superiores aos da superfície de crosta branca espessa e aos das restantes superfícies e respetivas patologias de intempérie. Constatou-se ainda, através de estudos recentes, que os valores de resistência à compressão uniaxial de pedras recentemente extraídas da pedreira de Sóskút, de onde também são provenientes as pedras originais da Citadella, são bastante inferiores aos valores registados pelos ensaios realizados neste trabalho, tanto nas pedras pertencentes à construção original como em pedras substituídas no século XX.

O método de mapeamento apresentado neste trabalho mostrou-se muito útil para a identificação e documentação de vários aspetos do objeto em estudo, tais como os diferentes tipos de pedras utilizadas nos períodos de construção e reabilitação da Citadella, as patologias mais predominantes e o registo e interpretação dos valores medidos nos ensaios *in-situ* relativamente às condições climáticas existentes e à sua correlação com as formas de intemperismo verificadas.

Todos os resultados dos testes *in-situ* foram coerentes com o estado físico dos elementos de pedra e com as patologias identificadas na sua superfície. Assim, constata-se que os testes *in-situ* não destrutivos podem contribuir significativamente para a análise e diagnóstico da condição dos materiais construtivos e respetivas patologias em monumentos e outros locais considerados património protegido, promovendo ações de reabilitação adequadas e impedindo o agravamento das deteriorações

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Apps, C. (Outubro de 2011). Avaliação da variabilidade da técnica de ensaio do tubo de Karsten na medição da permeabilidade à água líquida em revestimentos de ladrilhos cerâmicos e argamassas. *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil*. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- ASTM D5873. (2014). Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method. West Conshohocken, USA: ASTM International.
- BARTHEL, C., LINS, M., & PESTANA, F. (2009). O papel do mapa de danos na conservação do património arquitetónico. *Ier. Congreso Iberoamericano y VIII Jornada “Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio”*. La Plata, Buenos Aires, Argentina .
- Begonha, A. S. (1997). Meteorização do granito e deterioração da pedra em monumentos e edifícios da Cidade do Porto. Porto: FEUP Edições.
- Binda, L., & Penazzi. (2002). Classification of masonry cross sections and typologies oh historic buildings.
- Brito, J. (1987). *Ensaio in-situ em estruturas de betão armado*. Lisboa: Instituto Superior Técnico, Relatório CMEST nº73.
- Caiado, C. (2014). Determinação da resistência in-situ do betão. *Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Construções*, 39. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Camuffo, D., & Bertolin, C. (2012). Towards Standartisation of Moisture Content Measurment in Cultural Heritage Materials. Italia.
- Casella, G. (2003). *Gramáticas de Pedra - Levantamento de tipologias de construção murária*. Porto: Centro Regional de Artes Tradicionais.
- Cedar Lake Ventures, Inc. (2019). *Weather Spark*. Obtido de Weather Spark: <https://pt.weatherspark.com/>

- Civertan Bt. (s.d.). *Szép Magyarország*. Obtido de Szép Magyarország: <https://www.szepmagyarorszag.hu/>
- EN 12504-2. (2012). Testing Concrete in Structures - Part 2: Non-Destructive Testing - Determination of Rebound Number.
- Építészforum, Kft. (2019). *Építészforum*. Obtido de Építészforum: <https://epiteszforum.hu/>
- Farinha, B. (2018). *Patologias e Durabilidade de Construções*. LISBOA: DEC, ISEL.
- Flores-Colen, I. (Junho de 2009). Metodologia de avaliação do desempenho em serviço de fachadas rebocadas na óptica da manutenção predictiva. *Tese de Doutoramento em Engenharia Civil*. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Flores-Colen, I., Brito, J. d., & Freitas, V. (2006). Técnicas de ensaio in-situ para apoio à manutenção predictiva de rebocos de fachada. *PATORREB 2006 – 2º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios* (pp. 701-710). Porto: FEUP.
- Fodor, T., & Kleb, B. (1986). *Magyarország mérnökgeológiai áttekintése*. Budapest.
- Gálos, M. (2003). Kőzetzilárdási tulajdonságok meghatározása roncsolásmentes vizsgálati. *Építőanyag 55. évf./2*. Budapest.
- GNDT, s.d. (s.d.). Grupo Nazionale per la Difesa sai Terramoti - Danno sismico e vulnerabilità delle chiese dell'Umbria. Itália: CD-ROM.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., & Ortuño, L. &. (2002). *INGENIERIA GEOLÓGICA*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN.
- Google Maps*. (2020). Obtido de Google Maps: <https://www.google.com/maps>
- Haas, J. (2012). *Geology of Hungary*. Budapest, Hungary: Springer.
- Hungary Starts Here. (2 de Outubro de 2011). *Citadella*. Obtido de Internet Archive Waybackmachine: <https://web.archive.org/web/20111002054356/http://hungarystartshere.com/Citadel-Citadella-Budapest>
- ICOMOS. (Outubro de 2003). Principles for the analysis, conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage. Victoria Falls, Zimbabwe: Ratified by the ICOMOS 14th General Assembly.

## Referências Bibliográficas

- ICOMOS Scientific Council. (2007-2008). Recommendations from the Scientific Council Symposium Cultural Heritage and Global Climate Change (GCC). *Recommendations from the Scientific Council Symposium Cultural Heritage and Global Climate Change (GCC)*.
- Jones, T. D. (2020). *MinimeGeology*. Obtido de <https://www.minimegeology.com/oolitic-limestone-sedimentary-rock>
- LNEC. (2002a). Ensaaios in-situ sobre revestimentos de paredes para edificios antigos. *Ensaaios perleminares com tubos de Karsten. Relatório 238/02 - NCCt*. Lisboa: LNEC.
- LNEC. (Março de 2008). Metodologia de diagnóstico de anomalias devias à humidade em paredes antigas. I&D EDIFÍCIOS.
- Magalhães, A., Veiga, M., & Costa, D. (Maio de 2005). Caracterização do estado de Conservação de revestimentos de paredes antigas através de ensaios "in-situ". Dois casos de estudo. *VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas*. Florianópolis: ANTAC.
- Mezey, A. D. (2016). *Előzetes szempontvázlatok a Gellérthegy értékleltárához*. Obtido de Epiteszforum: <https://epiteszforum.hu/elozetes-szempontvazlatok-a-gellerthegy-ertekleltarahoz>
- Miller, R. (1965). Engineering classification and index properties for intact rock. *PhD Thesis*. Illinois: University of Illinois.
- MTVA Archivum. (2019). Obtido de MTVA Archivum: <https://archivum.mtva.hu/>
- Nepomuceno, M. C. (1999). Ensaaios Destrutivos em Betão. *Provas de aptidão Pedagógica e Capacidade Científica. Trabalho de Síntese*. Covilhã.
- Oz-diagnostico. (2020). *Ensaaios Esclerométricos - I F 001*. Obtido de <http://www.oz-diagnostico.pt/>
- Phillipson, M., Baker, P., Davies, M., Ye, Z., McNaughtan, A., Galbraith, G., & McLean, R. (1998). An Overview of Principles and Techniques of Moisture Properties Measurement for Building Materials and Components.

- Pinho, F. F. (1997). Sistematização do estudo sobre paredes de edifícios antigos: Paredes resistentes e de compartimentação de edifícios antigos. *Revista Ingenium - Ordem dos Engenheiros*. 2ª Serie, Nº19.
- RILEM. (1980). Réunion internationale des laboratoires d'essais et de recherche sur les matériaux et les constructions. *Comission 25 - PEM - protection et érosion des monuments - Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement. Matériaux et Constructions, volume 3, nº 55*. Paris.
- Said, M., & P.Eng., D. (2004). Moisture measurement guide for building envelope applications. Canada.
- Tamás, A., & Cebula, Á. (2016). Kőzetkárosodási formák térképezése a Citadella kőzetein. Budapest: BME.
- Tavares, M. et al. (2005). Métodos de diagnóstico para revestimientos de edificios antiguos. Importancia y aplicabilidad de los ensayos in situ. *Boletín PH nº 53. Sevilla: Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*.
- Török, Á. (s.d.).
- Török, Á. (2002). Oolitic limestone in polluted atmospheric environment in Budapest: weathering phenomena and alterations in physical properties. Em S. Siegesmund, T. Weiss, & A. Vollbrecht, *Natural stones, weathering phenomena, conservation strategies and case studies, vol 208* (pp. 363-379). London: Geological Society.
- Török, Á. (2004). Műemlékek kőzeteinek anyagvizsgálata. *Anyagvizsgáló lapja, 2004/1, pp 3-4*.
- Török, Á. (2006). *Az országház homlokzatát és a citadellát alkotó durva mészkövek szövetének hatása idő állóságukra*. Budapest: BME, Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék.
- Török, Á. (2011). Mészkő műemlékek kőanyagának mállása. *MTA doktori értekezés*. Budapest.
- Török, Á. (2019). Non-destructive Surface Strength Test - Duroskep a Forgotten Tool; Comparison to Schmidt Hammer Rebound Values of Rocks. Em A. Shakoor, & K.

## Referências Bibliográficas

- Cato, *IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings* (Vol. 6). San Francisco, California: Springer, Cham.
- Török, Á., & Rozgonyi, N. (2004). *Morphology and mineralogy of weathering crusts on highly porous oolitic limestones, a case study from Budapest*. Environmental Geology.
- Török, Á., & Pápay, Z. (2006). Durva mészkövek vízfelvételi tulajdonságai. *Mérnökgeológia-Kőzetmechanika*. Budapest.
- Török, Á., Bostenaru Dan, M., & Pøikryl, R. (2010). Materials Technologies and Practice in Historic Heritage Structures. Em *Chap.10 - In situ Methods of Testing Stone Monuments* (pp. 177-190).
- UNESCO. (1992-2020). *UNESCO World Heritage Centre*. Obtido de <http://whc.unesco.org/en/list/400>
- UNESCO. (2007). Policy Document on the Impacts of Climate Change on World Heritage Properties. . *Document WHC-07/16.GA/10 adopted by the 16th General Assembly of States Parties to the World Heritage Convention*. .



# **ANEXOS**



## A1. Resultados obtidos no ensaio de humidade relativa com o Humidímetro Portátil no paramento P1

- Valores medidos nas pedras de forma isolada.

Pedra 1				Pedra 2				Pedra 3				Pedra 4				Pedra 5				Pedra 6				Pedra 7																																			
Lado Esq.		Lado Dir.		Lado Esq.		Lado Dir.		Lado Esq.		Meio		Lado Dir.		Lado Esq.		Lado Dir.		Lado Esq.		Lado Dir.		Lado Esq.		Lado Dir.		Lado Esq.		Lado Dir.																															
P1	65	P6	51	P1	38	P6	36	P1	69	P6	40	P11	56	P1	46	P6	54	P1	49	P6	45	P1	59	P6	51	P1	75	P6	80	P2	70	P7	45	P2	40	P7	41	P2	66	P7	40	P12	47	P2	48	P7	56	P2	53	P7	46	P2	64	P7	65	P2	79	P7	112
P3	74	P8	74	P3	37	P8	46	P3	63	P8	43	P13	58	P3	42	P8	56	P3	52	P8	46	P3	61	P8	72	P8	102	P8	90	P4	75	P9	72	P4	50	P9	47	P4	68	P9	41	P14	53	P4	52	P9	44	P4	50	P9	51	P4	63	P9	61	P9	94	P9	90
P5	91	P10	86	P5	52	P10	55	P5	90	P10	51	P15	62	P5	43	P10	52	P5	46	P10	47	P5	57	P10	61	P10	86	P10	86																														



- Valores medidos nos perfis verticais.

Pontos Medidos	Perfil Vertical I		Perfil Vertical II	
	Valores medidos	Altura (cm)	Valores medidos	Altura (cm)
P21	43	206,1	70	206,1
P20	42	198,3	49	198,3
P19	40	190,4	63	190,4
P18	44	174,5	89	174,5
P17	48	166,5	109	166,5
P16	51	158,5	84	158,5
P15	106	142,5	38	142,5
P14	104	134,5	42	134,5
P13	87	126,5	53	126,5
P12	82	110,8	83	110,8
P11	145	104	67	104
P10	80	95,3	90	95,3
P9	66	79,9	80	79,9
P8	104	72,3	96	72,3
P7	86	64,6	103	64,6
P6	95	49	98	49
P5	79	41	125	41
P4	117	33	89	33
P3	65	18,8	64	18,8
P2	57	12,5	60	12,5
P1	81	6,25	125	6,25



## A2. Resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica à compressão uniaxial com o Martelo de Schmidt e com o Duroscópio no paramento P1

	[Pedra P1-1] Crosta branca fina		[Pedra P1-2] Crosta branca grossa		[Pedra P1-3] Crosta branca grossa			[Pedra P1-4] Crosta branca grossa		[Pedra P1-5] Crosta branca fina		[Pedra P1-6] Crosta branca fina		[Pedra P1-7] Crosta branca fina	
Equipamento	Martelo de Schmidt N-34	Duroscópio	Martelo de Schmidt N-34	Duroscópio	Martelo de Schmidt N-34		Duroscópio	Martelo de Schmidt N-34	Duroscópio	Pedra de espessura muito reduzida (≈ 5 cm)		Martelo de Schmidt N-34	Duroscópio	Martelo de Schmidt N-34	Duroscópio
					Na zona encrostada	Na zona de desintegração granular				Na zona encrostada	Martelo de Schmidt N-34				
Valores de ressalto	29	25	27	9	15	28	14	26	9	15	37	18	30	24	
	27	12	27	7	19	30	9	22	9	10	38	19	31	25	
	22	16	27	10	23	26	11	27	26	12	33	21	34	22	
	30	16	22	11	23	27	13	27	13	12	36	17	31	27	
	27	17	27	9	19	29	13	25	20	12	35	18	30	25	
	28	17	29	6	26	29	15	25	13	17	33	16	30	23	
	29	13	25	12	26	29	9	29	13	13	35	17	30	22	
	26	18	20	11	25	23	16	26	12	13	33	22	32	20	
	27	17	20	8	23	27	14	26	10	12	39	17	29	21	
Média	27,3	16,4	25	9,6	22,1	27,4	12,7	25,9	14,2	12,8	35,5	18,1	30,7	23,1	
Desvio Padrão	2,2	3,7	3,2	2,2	3,5	2,1	2,4	1,8	5,4	1,9	2,1	2,0	1,4	2,1	
Notas:	Pedra de Substituição		Pedra Original		Pedra Original			Pedra Original		Pedra de Substituição		Pedra Original		Pedra de Substituição	

