

Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Geológica

Dissertação

**Avaliação da representatividade dos ensaios de
envelhecimento acelerado face à exposição real: caso de
estudo do Calcário Branco Estremenho**

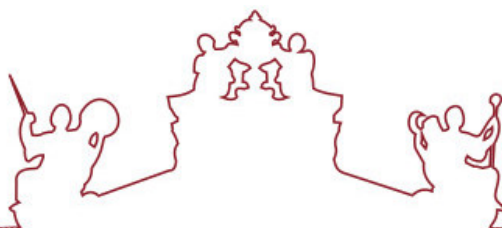
Vânia Amâncio Chihepe

Orientador(es) | Fabio Sitzia

José Mirão

Évora 2026





Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Geológica

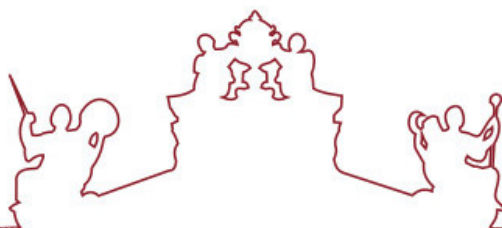
Dissertação

**Avaliação da representatividade dos ensaios de
envelhecimento acelerado face à exposição real: caso de
estudo do Calcário Branco Estremenho**

Vânia Amâncio Chihepe

Orientador(es) | Fabio Sitzia
José Mirão

Évora 2026



A dissertação foi objeto de apreciação e discussão pública pelo seguinte júri nomeado pelo Diretor da Escola de Ciências e Tecnologia:

Presidente | António Bastos de Pinho (Universidade de Évora)

Vogais | Fabio Sitzia (Universidade de Évora) (Orientador)
Vera Lúcia Cordeiro Pires de Almeida Ribeiro () (Arguente)

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Dedicatória

À minha família, por ser a base de tudo o que sou e a força motriz de cada conquista.

Agradecimentos

Alcançar esta etapa não foi um percurso linear. Ao longo do caminho, enfrentei inúmeras dificuldades, dúvidas e incertezas. Felizmente, tive o privilégio de estar rodeada por pessoas extraordinárias que me apoiaram incondicionalmente, impedindo-me de desistir mesmo quando os desafios pareciam insolúveis. Poder expressar a minha gratidão profunda por todo suporte que me foi concedido, direta ou indiretamente, é, para mim motivo de imensa alegria e satisfação. Deixo, por isso, os meus sinceros agradecimentos:

A Deus, nosso Criador, pelo dom da vida, pela saúde, pela sabedoria e pela Sua constante presença e proteção. Acima de tudo, por nunca ter permitido que as incertezas do caminho abalassem a minha fé, concedendo-me o dom da Fortaleza e a convicção de que nenhuma meta é impossível.

Aos meus amados pais Amâncio Chihepe e Valdimira Nhacudime e aos meus queridos irmãos, pelo amor e apoio incondicionais. Mesmo perante a distância física, fizeram-se sempre presentes e ensinaram-me que, com resiliência e fé, todos os sonhos são alcançáveis.

Ao meu companheiro e melhor amigo, Augusto Mazezo, por ter sido o grande motor desta jornada. O seu incentivo foi o motivo pelo qual decidi enfrentar todas as adversidades e vir a Portugal para realizar este mestrado. Num momento inicial repleto de incertezas e sem plenas condições materiais, o seu suporte foi a minha âncora.

Ao Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), no âmbito do Projeto “Agenda Mobilizadora: Valorização da pedra natural para um futuro digital, sustentável e qualificado”, pela atribuição da bolsa de investigação. Esta oportunidade concedeu-me uma experiência profissional e científica de elevado valor e profundamente enriquecedora. Graças a esta investigação, foi possível consolidar competências técnicas fundamentais e viabilizar a execução rigorosa da componente experimental que sustenta este trabalho.

Aos meus orientadores, Doutor Fábio Sitzia e Professor Doutor José Mirão, pelo acolhimento excecional e por me terem aberto as portas ao vasto e fascinante mundo da preservação do património material, uma área inteiramente nova para mim. O vosso profissionalismo e entrega viva à investigação e à ciência serviram de bússolas determinantes para o meu crescimento. Os ensinamentos que colhi sob a vossa tutela constituem uma valia incomensurável para o meu tenro percurso académico e profissional.

Ao Laboratório HERCULES, pelo acolhimento durante a investigação e pela cedência da sua infraestrutura científica, em particular da câmara climática, cuja tecnologia foi indispensável para a simulação rigorosa e o sucesso de todo o programa de envelhecimento acelerado.

Ao Jorge Velez, técnico de laboratório da Universidade de Évora, à professora Paula Faria e à Carla Lisci, pela total disponibilidade e facilitação no acesso aos instrumentos e equipamentos laboratoriais, bem como pelo apoio prestado durante a realização dos ensaios físico-mecânicos.

A todos os professores do Mestrado em Engenharia Geológica da Universidade de Évora, com um agradecimento muito particular aos professores Isabel Duarte e António Pinho, pelo excelente aprendizado, pelo direcionamento e por cada apoio que ultrapassou largamente o âmbito puramente académico.

Ao tio Joaquim Bié e à sua família, por todo apoio, pelo acolhimento único e caloroso aquando da minha chegada a Portugal e pela prestação de toda assistência necessária para a uma integração segura no novo país.

Ao tio Alfredo Dique, pelo carinho, apoio e força que me deu para realizar este sonho.

Aos meus amigos, Néusia Pelembe, Erlanda Massingue e José Vuma, que sempre compreenderam o significado e a importância que este mestrado tinha para mim. Ser-vos-ei eternamente grata pelo suporte emocional, pelas palavras certas nos momentos de cansaço e por partilharem comigo esta vitória.

A todos amigos não mencionados e a todos aqueles que tive a felicidade de ganhar durante este trajeto, cuja amizade me permitiu carregar este fardo de forma mais leve.

A todos, o meu muito Kxanimambo!

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Resumo

A durabilidade das rochas ornamentais é fundamental para a reabilitação sustentável do edificado. Este estudo avalia a representatividade de ensaios de envelhecimento acelerado face à exposição real, tendo como caso de estudo o Calcário Branco Estremenho.

Propõe-se um modelo de ensaio que estabeleça uma equivalência temporal entre a câmara climática e o ambiente natural, comprimindo ciclos diários de temperatura e humidade através de fatores de compressão (CF) variáveis. É sugerido um CF limite, visando salvaguardar a validade científica do ensaio e a fiabilidade dos mecanismos de degradação. A validação envolveu a recolha de dados microclimáticos durante 127 dias de exposição natural na Serra da Estrela e sua posterior simulação em câmara climática. O impacto da degradação foi avaliado por: velocidade de propagação de ultrassons, determinação da resistência à compressão uniaxial, determinação da resistência à flexão sob carga centrada e determinação da carga de rotura ao nível do orifício de ancoragem.

Palavras-chave: Materiais de construção; Calcário Branco Estremenho; Durabilidade; Envelhecimento acelerado; Ensaio físico-mecânicos.

Abstract

Evaluation of the representativeness of accelerated ageing tests compared to real exposure: a case study of Estremadura White Limestone

The durability of natural stones is essential for the sustainable rehabilitation of buildings. This study evaluates the representativeness of accelerated aging tests compared to real-world exposure, using Estremadura White Limestone as a case study.

A testing model is proposed that establishes a temporal equivalence between the climatic chamber and the natural environment by compressing daily temperature and humidity cycles using variable compression factors (CF). A limit CF is suggested to safeguard the scientific validity of the test and the reliability of degradation mechanisms. Validation involved collecting microclimatic data during 127 days of natural exposure in the Serra da Estrela region and its subsequent simulating in a climatic chamber. The degradation impact was assessed by: ultrasonic pulse velocity, determination of uniaxial compressive strength, determination of flexural strength under concentrated load and determination of the breaking load at dowel hole.

Keywords: Construction materials; Estremadura White Limestone; Durability; Accelerated ageing test; Physical-mechanical tests.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Índice

Dedicatória.....	v
Agradecimentos	vi
Resumo	ix
Abstract	x
Índice de figuras.....	xiv
Índice de tabelas.....	xvi
Simbologia	xvii
Abreviaturas.....	xvii
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Introdução.....	1
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Geral.....	4
1.2.2. Específicos	4
1.3. Estrutura da dissertação.....	5
CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE.....	6
CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS	13
3.1. Materiais.....	15
3.1.1. Proveniência das amostras.....	15
3.1.2. Critérios de seleção das amostras	16
3.1.3. Enquadramento geológico do Maciço Calcário Estremenho	19
3.1.3.1. Geomorfologia e hidrogeologia	20
3.1.4. Caracterização petrográfica e mineralógica do calcário selecionado	21
3.1.5. Preparação e geometria dos provetes.....	27
3.2. Métodos	29
3.2.1. Caracterização inicial das amostras	29
3.2.2. Exposição real – envelhecimento natural	29

3.2.3. Ensaio de envelhecimento acelerado – câmara climática	33
3.2.4. Caracterização física e mecânica	39
CAPÍTULO 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	44
4.1. Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassônicas	45
4.2. Resistência à compressão uniaxial	48
4.3. Resistência à flexão sob carga centrada	51
4.4. Carga de ruptura ao nível do orifício de ancoragem	55
CAPÍTULO 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
Referências bibliográficas.....	65
Referências normativas	72

Índice de figuras

Figura 1: Principais normas internacionais e nacionais (EN, ISO, ASTM e DIN) para ensaios de envelhecimento acelerado aplicadas a diferentes materiais de construção e engenharia (figura de autoria própria com imagens licenciadas).	8
Figura 2: Enquadramento geográfico do Maciço Calcário Estremenho (extraído de Lopes, 2010, p. 9).	15
Figura 3: Amostras representativas do Calcário Branco Estremenho selecionado para o estudo.	17
Figura 4: Enquadramento geológico do MCE (adaptado do LNEG, 2010).	19
Figura 5: Análise macroscópica da superfície do provete do calcário: detalhe de microfóssil alongado e segmentado.	23
Figura 6: Análise microscópica da amostra: detalhe da textura esparítica com oólitos e peloides.	25
Figura 7: Difrátograma de Raios-X da amostra de calcário, com identificação dos picos experimentais e sobreposição do padrão de referência da calcite.	27
Figura 8: Conjuntos de amostras de calcário utilizadas no estudo.	28
Figura 9: Ensaio de envelhecimento natural na Serra da Estrela: exposição das amostras aos agentes atmosféricos reais para recolha de dados meteorológicos.	30
Figura 10: Evolução diária dos parâmetros meteorológicos registados durante os 127 dia de exposição natural no Parque Natural da Serra da Estrela: (a) temperatura máxima ($T_{\max}$) e mínima ($T_{\min}$) do ar; (b) humidade relativa máxima ($RH_{\max}$) e mínima ($RH_{\min}$) do ar; (c) quantidade de precipitação.	32
Figura 11: Câmara climática utilizada nos ensaios de envelhecimento acelerado.	33
Figura 12: Perfis térmicos diários em função da aceleração do ensaio: (a) ciclo de exposição natural ($CF = 1$); (b) ciclo comprimido em câmara climática com $CF = 2$; e (c) aproximação linear do ciclo comprimido para programação na câmara climática.	36
Figura 13: Evolução acoplada da temperatura e da humidade relativa sob diferentes fatores de compressão: (a) estabelece a linha de base em ambiente real (ciclo de 24 h); (b), (c) e (d) demonstram a compactação progressiva do perfil higrotérmico para períodos de 12 h, 6 h e 4 h, respetivamente, preservando as amplitudes de temperatura e humidade relativa.	38
Figura 14: Ensaio não destrutivo de caracterização de materiais: (A) equipamento Proceq utilizado para a medição da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas; (B) operação manual do ensaio em ambiente laboratorial.	40

Figura 15: Etapas de realização do ensaio de resistência à compressão uniaxial em provetes cúbicos de calcário: (A) provetes devidamente identificados e preparados antes do ensaio; (B) posicionamento e alinhamento do provete na prensa Pegasil; (C) controlo instrumental e registo de parâmetros operacionais; (D) modo de falha e fratura dos provetes, após atingirem a carga de rotura.	41
Figura 16: Sequência experimental do ensaio de resistência à flexão sob carga centrada: (A) provetes prismáticos de calcário preparados para o ensaio; (B) posicionamento do provete sobre os cutelos inferiores de suporte e alinhamento com o cutelo superior de aplicação de carga; (C) perfil de fratura característico por flexão.....	42
Figura 17: Ensaio de fixação mecânica por ancoragem: (A) placas de calcário preparadas com as cavilhas metálicas de fixação inseridas nos orifícios; (B) detalhe do modo de falha macroscópico na zona envolvente do orifício, evidenciando o lascamento troncocónico da pedra após a rotura; (C) montagem do ensaio na prensa, com dispositivo mecânico posicionado para aplicar a carga perpendicular ao eixo da cavilha.	43
Figura 18: (A) Valores médios e respetivos desvios-padrão da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas em função do fator de compressão (CF), evidenciando a taxa de degradação face ao estado de referência (pré-teste); (B) taxa de variação relativa ($\Delta\%$) da velocidade ultrassónica calculada para cada fator de compressão, com a linha horizontal a indicar o limiar basal de degradação obtido por exposição natural na Serra da Estrela. Δ	47
Figura 19: (A) Valores médios e respetivos desvios-padrão da resistência à compressão em função do fator de compressão (CF), evidenciando a taxa de degradação face ao estado de referência (pré-teste); (B) taxa de variação relativa ($\Delta\%$) da resistência à compressão uniaxial média calculada para cada fator de compressão, com a linha horizontal a indicar o limiar basal de degradação obtido por exposição natural na Serra da Estrela. Δ	50
Figura 20: (A) Valores médios e respetivos desvios-padrão da resistência à flexão em função do fator de compressão (CF), evidenciando a taxa de degradação face ao estado de referência (pré-teste); (B) taxa de variação relativa ($\Delta\%$) da resistência à flexão média calculada para cada fator de compressão, com a linha horizontal a indicar o limiar basal de degradação obtido por exposição natural na Serra da Estrela. Δ	54
Figura 21: (A) Valores médios e respetivos desvios-padrão da rotura por ancoragem em função do fator de compressão (CF), evidenciando a taxa de degradação face ao estado de referência (pré-teste); (B) taxa de variação relativa ($\Delta\%$) da resistência de rotura ao nível de orifício por ancoragem média calculada para cada fator de compressão, com a linha horizontal a indicar o limiar basal de degradação obtido por exposição natural na Serra da Estrela. Δ	57

Índice de tabelas

Tabela 1: Parâmetros operacionais definidos para os regimes de ensaio natural e acelerado.	37
Tabela 2: Valores médios da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, respectivos desvios-padrão e variação absoluta (ΔX) e percentual (taxa de degradação - $\Delta\%$) face ao estado de referência (pré-teste) para cada fator de compressão (CF).	46
Tabela 3: Valores médios da resistência à compressão uniaxial, respectivos desvios-padrão e variação absoluta (ΔX) e percentual (taxa de degradação - $\Delta\%$) face ao estado de referência (pré-teste) para cada fator de compressão (CF).	49
Tabela 4: Valores médios da resistência à flexão, respectivos desvios-padrão e variação absoluta (ΔX) e percentual (taxa de degradação - $\Delta\%$) face ao estado de referência (pré-teste) para cada fator de compressão (CF).	53
Tabela 5: Valores médios da rotura por ancoragem, respectivos desvios-padrão e variação absoluta (ΔX) e percentual (taxa de degradação - $\Delta\%$) face ao estado de referência (pré-teste) para cada fator de compressão (CF).	56
Tabela 6: <i>Matriz de variação absoluta das taxas de degradação (%) entre o envelhecimento acelerado e o envelhecimento natural.</i>	59

Simbologia

ARL – “Anchorage Rupture Load” – Carga de rotura ao nível do orifício de ancoragem (N)

C_F – Fator de compressão (número inteiro)

D – Tamanho de grão (mm)

RH_{max} – Humidade relativa máxima (%)

RH_{min} – Humidade relativa mínima (%)

T_A – Exposição teórica (horas, dias, meses)

TAN – Tempo de exposição em ambiente real (horas, dias, meses)

T_{max} – Temperatura máxima (° C)

T_{min} – Temperatura mínima (° C)

T_T – Tempo de ensaio na câmara climática (horas, dias, meses)

UPV – “Ultrasonic Pulse Velocity” – Velocidade de propagação das ondas ultrassónicas (m/s)

V_f – Valor final da propriedade físico-mecânica

V_i – Valor inicial da propriedade físico-mecânica

$\Delta\%$ – Variação relativa da propriedade físico-mecânica (taxa de degradação) (%)

σ_C – Resistência à compressão uniaxial (MPa)

σ_F – Resistência à flexão sob carga centrada (MPa)

Abreviaturas

ASTM – “American Society for Testing Materials”

“Marcação CE” – “Conformité Européenne”

DIN – Instituto Alemão de Normalização

DoP – Declaração de Desempenho

DRX – Difração de Raios-X

EN – Norma Europeia

ESE – Este-Sudeste

IEC – “International Electrotechnical Commission”

IR – Radiação Infravermelha

ISO – “International Organization for Standardization”

LGM – Laboratório de Geologia e Minas

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

MCE – Maciço Calcário Estremenho;

NE – Nordeste

NNE – Norte-Nordeste

pH – potencial de Hidrogénio

RPC – Regulamento dos Produtos de Construção

SSW – Sul-Sudoeste

SW – Sudoeste

TDS – “Total Dissolved Solids”

TEAGE – “TEcnico Accelerated AGEing”

UV – Radiação Ultravioleta

WNW – Oeste-Noroeste

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1. Introdução

A necessidade de mitigar degradação de materiais pétreos, quer em edificado contemporâneo, quer no património histórico, tem assumido importância crescente nos critérios atuais de projeto e construção. Esta preocupação é particularmente evidente quando os materiais são expostos a ambientes agressivos (por exemplo, baixas temperaturas, atmosfera poluída, chuvas contínuas). A durabilidade a longo prazo das rochas ornamentais e a eficácia dos sistemas de proteção aplicados (produtos consolidantes e hidrófugos) assumem uma particular relevância devido às suas implicações económicas e sociais, tornando a sua avaliação uma necessidade técnica relevante.

A compreensão do comportamento destes materiais ao longo do tempo, bem como da eficácia dos sistemas de proteção, é fundamental uma vez que influencia diretamente os custos de manutenção, conservação e a própria segurança das estruturas.

Para prevenir estes riscos, a indústria e a academia recorrem a ensaios de envelhecimento acelerado que permitem replicar, em ambiente laboratorial, a degradação natural da pedra através da utilização de câmaras climáticas. Estes equipamentos são concebidos para o controlo artificial de variáveis ambientais críticas, tais como flutuações de temperatura, humidade relativa, precipitação, poluentes atmosféricos e radiação solar (UV e IR). Este dispositivo é amplamente utilizado na investigação científica e no setor industrial para simular diferentes cenários de exposição, de forma a viabilizar o estudo do comportamento de organismos, materiais ou produtos expostos a agressões ambientais (Alves et al., 2020).

Os ensaios de degradação acelerada visam reproduzir, num intervalo de tempo reduzido, as patologias e o desgaste que a rocha sofreria ao longo de uma vida útil extensa. Adicionalmente, estes testes procuram estabelecer correlações e tendências aproximadas entre o envelhecimento natural e o envelhecimento acelerado em laboratório. Em suma, o núcleo desta abordagem metodológica reside na procura de previsibilidade, assegurando que os modelos preditivos laboratoriais reflitam adequadamente a realidade do comportamento dos materiais em obra.

Tal articulação permite uma previsão mais fiável do desempenho dos elementos construtivos (Jelle, 2012), auxiliando na seleção adequada dos materiais e na estimativa da sua longevidade em obra.

A crescente exigência na aplicação de pedra natural tem colocado desafios significativos à indústria de extração e transformação. Frequentemente, estes materiais são aplicados em paramentos exteriores sujeitos a solicitações climáticas severas, ou em espaços interiores, onde determinadas patologias podem manifestar-se de forma precoce e acelerar os processos de degradação das obras. Em muitos casos, as anomalias apenas se tornam evidentes após a instalação do material. Esta discrepância entre a expectativa de durabilidade e o desempenho real é uma fonte comum de litígios entre os diversos agentes do setor.

Estudos focados em pavimentos calcários demonstram que mecanismos de degradação, como a fissuração, o destacamento superficial e a perda da integridade de arestas ou de juntas, impactam severamente o ciclo de vida do projeto. Em cenários de seleção inadequada ou execução deficiente, os custos extraordinários de manutenção podem representar entre 69% e 73% do investimento inicial (Wasserman & Shohet, 2024).

Nos ensaios de envelhecimento acelerado convencionais, regulados por procedimentos padronizadas (como a EN 12371:2010, EN 14066:2011, EN 12370:2020, EN 14147:2003, entre outras), a degradação da pedra é induzida num curto espaço de tempo através da intensificação artificial dos parâmetros ambientais. Contudo, esta abordagem levanta dois problemas fundamentais:

- (i) os mecanismos de alteração resultantes podem diferir significativamente daqueles que ocorrem em condições de exposição real;
- (ii) subsiste a impossibilidade de estabelecer uma correlação cronológica direta e fiável entre o tempo de permanência na câmara climática e a respetiva duração da exposição natural.

Em virtude destas limitações, a aplicação generalizada destes ensaios enfrenta um obstáculo técnico: a dificuldade em replicar fielmente a cinética dos processos naturais. A exacerbação artificial das variáveis climáticas induz, frequentemente, fenómenos de choque térmico ou hídrico extremos que podem distorcer a resposta real do material. Perante estas condicionantes, surge a necessidade de desenvolver abordagens experimentais que melhor representem as condições reais de exposição e, ao mesmo tempo, estabeleçam uma correspondência direta e fiável da cinética dos processos naturais.

Face a este problema, o presente trabalho baseia-se numa metodologia que propõe a simulação, em câmara climática, de ciclos ambientais realistas com base nos principais parâmetros

atmosféricos, utilizando a compressão temporal em detrimento da simples intensificação dos agentes de degradação. Esta técnica consiste na reprodução de um ciclo climático real diário de 24 horas num intervalo de tempo reduzido, definido por um fator de compressão (CF). Em suma, a aceleração da degradação não ocorre devido ao incremento das variáveis ambientais aplicadas, mas sim da compressão temporal dos ciclos naturais reais.

Apesar de este método já ter sido aplicado em diversos contextos, como em climas mediterrâneos (Csa) (Sitzia et al., 2021a, 2021b) e subpolares (Sitzia et al., 2023), a procura por metodologias que adaptem dados meteorológicos reais a programas de envelhecimento acelerado em rochas tem sido alvo de crescente interesse. Investigações focadas na durabilidade e longevidade de pedras de construção procuram estabelecer análises comparativas sistemáticas entre a meteorização natural e a artificial (Lisci et al., 2023). Estes contributos evidenciam o esforço metodológico em aproximar os ciclos laboratoriais às agressões atmosféricas reais, embora permaneça em aberto a questão de saber com que precisão diferentes taxas de compressão reproduzem a exposição real.

Se considerarmos as tendências de temperatura e humidade de um ciclo diário de 24 horas e replicarmos estas mesmas flutuações numa câmara climática durante um período equivalente de 24 horas, ou seja, com $CF = 1$ (sem compressão temporal), o teste de degradação deverá reproduzir com elevada fiabilidade a degradação a que a pedra foi sujeita em ambiente natural. Contudo, projeta-se que esta correlação decline proporcionalmente com o aumento da aceleração dos ciclos, isto é, para coeficientes de compressão progressivamente superiores à unidade ($CF > 1$). Este fenómeno é fortemente condicionado por fatores, como a inércia térmica e hídrica do material: a imposição de ciclos excessivamente céleres (CF superior a 1) impede que o fluxo de calor e a frente de humidade atinjam o equilíbrio no núcleo das amostras. Esta limitação restringe as alterações físico-químicas às camadas superficiais, comprometendo a representatividade global do ensaio e inviabilizando a transposição direta dos resultados para a escala da obra.

Diante do exposto, emerge a seguinte questão de investigação: ***existirá um valor ideal para o fator de compressão que permita acelerar o ensaio sem comprometer a fiabilidade dos mecanismos de degradação que ocorrem durante a exposição natural da rocha?***

1.2. Objetivos

1.2.1. Geral

O objetivo principal deste estudo é avaliar a representatividade e a fiabilidade dos ensaios de envelhecimento acelerado por compressão temporal, determinando em que medida os diferentes fatores de compressão replicam os mecanismos de degradação higrotérmica do Calcário Branco Estremenho, observados ao longo de 127 dias de exposição natural na Serra da Estrela.

Atendendo a que os fenómenos de degradação da pedra surgem, frequentemente, após a sua aplicação em obra, os intervenientes no setor enfrentam desafios no apoio técnico e na garantia de durabilidade das soluções aplicadas. Sob esta perspetiva, o desenvolvimento de um ensaio laboratorial capaz de simular, com fidelidade e num intervalo de tempo reduzido, a deterioração que o material sofrerá em condições reais de serviço representa uma ferramenta estratégica para o setor extrativo e transformador.

1.2.2. Específicos

Para a concretização do objetivo geral, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- Quantificar o impacto da exposição natural nas propriedades físico-mecânicas das amostras de Calcário Branco Estremenho, após os 127 dias na Serra da Estrela, estabelecendo uma linha de base para a avaliação da representatividade;
- Simular em câmara climática os fatores de compressão temporal definidos ($CF = 2, 4$ e 6), procurando replicar o perfil e a variação das variáveis ambientais higrotérmicas registadas *in situ*;
- Avaliar a influência da taxa de aceleração temporal na resposta térmica e hídrica do material, verificando se a compressão temporal induz desvios na dinâmica dos mecanismos de degradação higrotérmica.

1.3. Estrutura da dissertação

O presente trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos principais, dispostos sequencialmente da seguinte maneira:

Capítulo 1 – Introdução: estabelece o enquadramento geral do tema e a relevância do estudo da durabilidade de rochas ornamentais face à exposição natural. Define igualmente os objetivos gerais e específicos que direcionaram o desenvolvimento desta investigação.

Capítulo 2 – Estado da arte: compila a fundamentação teórica sobre o envelhecimento acelerado em diversos materiais de construção; discute as adaptações metodológicas recentes e o desafio científico em correlacionar os dados de laboratório com o comportamento em ambiente real.

Capítulo 3 – Materiais e métodos: faz uma descrição detalhada do material estudado, que corresponde ao Calcário Branco Estremenho. Especifica igualmente a metodologia implementada na concretização do trabalho experimental, com a devida fundamentação nas normas técnicas e especificações aplicáveis.

Capítulo 4 – Apresentação e discussão dos resultados: faz a exposição e análise crítica dos dados obtidos e apresenta a argumentação teórica e/ou prática necessária para sustentar as interpretações e conclusões retiradas dos ensaios.

Capítulo 5 – Considerações finais: sintetiza as principais conclusões retiradas ao longo do estudo, aponta as principais limitações e propõe recomendações e linhas de investigação para o desenvolvimento de trabalhos futuros nesta área.

CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE

A meteorização constitui um processo complexo e multifatorial que atua predominantemente na superfície dos materiais. Este fenómeno dita a degradação progressiva das suas propriedades estéticas, físicas e mecânicas. A ação combinada de fatores termo-higrométricos, precipitação, radiação solar, poluentes atmosféricos e solicitações mecânicas promove diversos mecanismos de deterioração em diferentes materiais de construção. Entre estes, destacam-se a fragilização de polímeros, o acinzentamento e aumento da rugosidade da madeira, a corrosão de metais e o enfraquecimento de rochas e outras matérias-primas de construção (Brimblecombe, 2003; Grossi et al., 2007).

Neste contexto, os ensaios de envelhecimento, quer naturais, quer acelerados, assumem um papel fundamental na avaliação da durabilidade dos materiais aplicados em ambiente exterior. A durabilidade a longo prazo dos materiais de construção e a eficiência dos revestimentos de proteção apresentam importantes repercussões económicas e sociais, tornando essencial a compreensão da sua resistência aos agentes de meteorização ao longo do tempo. Assim, a comparação entre o envelhecimento natural e o envelhecimento artificial constitui uma ferramenta indispensável para prever o comportamento dos materiais em serviço e apoiar a seleção de soluções construtivas mais duráveis (Jelle, 2012).

Os ensaios acelerados permitem simular, em condições controladas, os efeitos da exposição prolongada aos agentes de meteorização, reduzindo significativamente o tempo necessário para a obtenção de resultados representativos (Fitzner & Heinrichs, 2002). Estes métodos baseiam-se na reprodução de variáveis ambientais críticas, como temperatura, humidade relativa, precipitação, radiação solar e presença de agentes químicos agressivos (Alves et al., 2020). Contudo, a correlação entre envelhecimento natural e artificial não é universal, uma vez que os mecanismos de deterioração dependem da natureza dos materiais, sua heterogeneidade e das condições climáticas e microclimáticas a que estão sujeitos (Jelle, 2012).

A aplicação dos ensaios de envelhecimento estende-se a uma ampla variedade de materiais de engenharia. Nos materiais metálicos, os estudos concentram-se frequentemente na simulação de ambientes corrosivos; nos polímeros e plásticos privilegia-se a exposição à radiação ultravioleta e a ciclos térmicos (Maraveas et al., 2024; Starkova et al., 2022), sendo frequentemente necessário validar os resultados destes ensaios acelerados através de ensaios de exposição ao ar livre (Crewdson, 2011). Em materiais à base de argamassa e betão, os

estudos focam-se sobretudo na ação combinada de humidade, temperatura e agentes químicos (Song et al., 2024). Já na madeira e nos materiais vítreos, a degradação está fortemente associada à radiação e à humidade, sendo comum a avaliação de alterações de cor, textura e resistência mecânica (Kampragkou et al., 2024).

No domínio da pedra natural e artificial, os ensaios de envelhecimento visam reproduzir os principais mecanismos de meteorização responsáveis pela degradação em ambiente exterior (Song et al., 2024; Kampragkou et al., 2024). A durabilidade da pedra natural relaciona-se diretamente com a capacidade de resistência aos agentes de alteração ao longo do tempo, sob a manutenção das suas propriedades físicas, mecânicas e estéticas. Esta necessidade conduziu ao desenvolvimento de metodologias de envelhecimento acelerado em câmara climática, capazes de reproduzir, em períodos reduzidos, processos de degradação que naturalmente ocorreriam ao longo de meses ou de anos (Benavente et al., 2004).

Foram desenvolvidas diversas normas destinadas à simulação artificial do envelhecimento natural das pedras, incluindo ensaios de resistência ao gelo-degelo (EN 12371:2010), nos quais a expansão da água nos poros gera tensões internas responsáveis pela microfissuração do material; ensaios de choque térmico (EN 14066:2011) que permitem avaliar a resposta da rocha a variações bruscas de temperatura, induzindo fenómenos de fadiga térmica; ensaios de cristalização de sais (EN 12370:2020), particularmente relevantes em materiais porosos, uma vez que a pressão exercida pelo crescimento de cristais no interior da rede porosa pode ultrapassar a resistência à tração da rocha e causar a sua rotura; ensaios de exposição à névoa salina (EN 14147:2003), que simulam ambientes costeiros agressivos, bem como ensaios de ação de gases poluentes (EN 13919:2002), relevantes em contextos urbanos e industriais. Por fim, os ensaios de intempéries artificiais com radiação ultravioleta (ISO EN 16474-3:2021) permitem avaliar alterações superficiais e a durabilidade de eventuais tratamentos e revestimentos protetores aplicados sobre a pedra natural. Estes procedimentos encontram-se enquadrados por normas técnicas internacionais e nacionais (EN, ISO, ASTM e DIN) que estabelecem metodologias e procedimentos específicos adaptados ao comportamento de diferentes materiais e aos seus mecanismos de degradação **(Figura 1)**.

Accelerated weathering testing		
Metals		Saline fog chlorides corrosion - ASTM B117: 2019;* Corrosive gasses - ISO 6988: 1985; Humidity, condensation resistance - ISO 6270: 2018; Thermal oxidation - ASTM G54: 1996; SCC (Corrosion + Stress) - ISO 7539: 2005; *Resistance to chemical agents ISO 9227: 2017 1) NSS, Neutral Salt Spray 2) AASS, Acetic Acid Salt Spray 3) CASS, Copper Acetic Acid Salt Spray
Polimers and Plastics		UV exposure - ASTM G154: 2023; ASTM G155: 2021; ISO 4892-1: 2016; Thermal degradation - ASTM D3045: 2018; Thermal shock - IEC 60068-2-14: 2009; Resistance to chemical reagents - ASTM D543: 2021; Humidity resistance - ISO 291: 2008; ISO 1110: 1991.
Natural Stones		Freeze - Thaw - EN 12371: 2010; Salt crystallization resistance - EN 12370: 2020; Thermal shock - EN 14066: 2011; Corrosive gasses - DIN 50018: 2013; EN 13919: 2002; Saline fog chlorides corrosion - EN 14147: 2003; UV exposure - EN 16474-3: 2021.
Ceramics		Freeze - Thaw - ISO 10545-12: 1995; UV exposure - ISO 105-B02: 2014; Thermal shock - ISO 10545-9: 2013; Resistance to chemical reagents - ISO 10545-13: 2016; Saline fog chlorides corrosion - ASTM B117: 2019; Salt crystallization resistance - EN 12370: 2020.
Cements		Freeze - Thaw - EN 12390-9: 2016; ASTM C666: 2015; Resistance to carbonatation EN 13295: 2002; Salt crystallization - ASTM C1012: 2018; Resistance to chemical reagents - ASTM C267: 2020; EN 13529: 2003; Saline fog chlorides corrosion - ASTM B117: 2019; Salt crystallization resistance - EN 12370: 2020 Thermal shock - EN 13687-3: 2002;
Coatings		UV exposure - ASTM G154: 2023; ASTM G155: 2021; UV exposure + Saline fog - ASTM D5894: 2021; Saline fog chlorides corrosion - ASTM B117: 2019; Humidity, condensation resistance - ISO 6270: 2017; ASTM D2247: 2015; Thermal shock - EN 13687-3: 2002; Resistance to chemical reagents - ASTM D1308: 2020.
Woods		UV exposure - ASTM G154: 2023; ASTM G155: 2021; Wet & Dry - EN 927 (serie): 2012; Freeze - Thaw - EN 12371: 2010 Biodegradation by Insects - EN 117: 2012; EN 49-1: 2016.

Figura 1: Principais normas internacionais e nacionais (EN, ISO, ASTM e DIN) para ensaios de envelhecimento acelerado aplicadas a diferentes materiais de construção e engenharia (figura de autoria própria com imagens licenciadas).

Apesar do elevado grau de desenvolvimento e normalização, subsiste uma limitação significativa nestes ensaios: a dificuldade em estabelecer uma correspondência direta entre os resultados obtidos em laboratório e o comportamento em condições reais. Esta lacuna decorre, em grande parte, da intensificação dos parâmetros ambientais nos ensaios acelerados, ao contrário do que sucede em ambiente natural, onde os materiais estão sujeitos a condições variáveis e a interações complexas entre múltiplos fatores, que incluem variações térmicas, precipitação, vento, sais, colonização biológica e poluentes atmosféricos como CO₂, SO_x e NO_x (Grossi et al., 2007). Em laboratório, apenas alguns parâmetros ambientais podem ser controlados, nomeadamente a temperatura, humidade, precipitação simulada e radiação UV (Jelle, 2012). Esta discrepância é particularmente relevante no caso da pedra natural, cujo comportamento depende fortemente da interação entre as suas propriedades intrínsecas e o ambiente de exposição (Siegesmund & Snethlage, 2014).

Com o objetivo de aumentar a representatividade dos ensaios acelerados, diversos investigadores têm proposto adaptações metodológicas baseadas em dados climáticos reais. Recomenda-se que os valores registados por estações meteorológicas sejam utilizados na programação das câmaras climáticas, permitindo reproduzir com maior fidelidade as condições ambientais locais. Esta abordagem tem sido aplicada em diferentes áreas da engenharia (Sitzia et al., 2023). Nos sistemas fotovoltaicos, por exemplo, foram desenvolvidos perfis climáticos regionais (climas áridos, temperados, tropicais e alpinos), ajustados aos protocolos experimentais com base na norma para a qualificação de projeto e homologação de sistemas fotovoltaicos terrestres IEC 61215:2016 (Eder et al., 2019), entretanto atualizada na revisão IEC 61215:2021, de forma a reproduzir com maior fiabilidade os mecanismos de degradação reais. De forma semelhante, em materiais utilizados na envolvente de edifícios, têm sido propostos ciclos de meteorização artificial que integram a ação combinada de radiação UV, humedecimento com soluções ácidas e ciclos térmicos de congelação e aquecimento baseados em dados climáticos reais (Šveikauskaitė et al., 2024).

Outros estudos em materiais para telhados e paredes focam-se na adaptação de normas como a ASTM D7897-18:2018, com o ajuste de parâmetros experimentais para estabelecer a correspondência entre o envelhecimento laboratorial e períodos de exposição natural em ambientes urbanos específicos (Paolini et al., 2020). No domínio da conservação do património, surgiram novas formulações de soluções de envelhecimento baseadas em dados atualizados de deposição atmosférica em massa (1997-2019), o que permite uma representação

mais rigorosa da composição química da precipitação contemporânea (Timoncini et al., 2023). Na área dos materiais betuminosos, metodologias como o ensaio TEAGE (TEcnico Accelerated AGEing) integram ciclos de radiação UV e humedecimento/secagem ajustados a condições reais de forma a reproduzir padrões de degradação mais próximos dos observados em campo (Crucho et al., 2020).

No caso particular da pedra natural, continuam a existir lacunas relativamente à correlação entre envelhecimento natural e artificial. Existem sugestões de modificações a ensaios normalizados, como o de cristalização de sais (EN 12370:2020), para simular condições ambientais e microclimáticas mais representativas dos contextos reais de aplicação (Lisci et al., 2022a). Alguns estudos demonstraram que os métodos laboratoriais podem subestimar determinados mecanismos de degradação observados em ambiente real. Por exemplo, a resposta de mármore de Carrara sujeitos a dez anos de meteorização natural em Turim (Itália) foi comparada com o envelhecimento artificial por ciclos térmicos e de humidade, segundo o ensaio de empeno da norma EN 16306:2013 (Bellope et al., 2016). Os autores verificaram que a porosidade e o empeno em certas amostras eram mais severos após a exposição natural do que as alterações registadas no ensaio acelerado padrão. Como resultado, os dados acelerados levaram a uma interpretação errónea da durabilidade real da pedra, sendo que os resultados da absorção de água não foram interpretados de forma consistente, embora as propriedades mecânicas tenham apresentado a mesma variação após 30, 60 e 90 ciclos térmicos no método acelerado (Bellope et al., 2016).

Em contrapartida, a literatura demonstra maior eficácia no estabelecimento desta correlação quando aplicada à validação de tratamentos protetores sobre o substrato pétreo. Na avaliação de um revestimento acrílico aplicado em dolomito, verificou-se que as alterações na distribuição do peso molecular após 500 horas de irradiação de xénon equivaleram a 30 meses de meteorização natural em Florença, sendo que a eficácia protetora após este período ao ar livre correspondeu a um intervalo de 2500 a 3000 horas de envelhecimento artificial (Bracci & Melo, 2003). De igual modo, o comportamento de revestimentos híbridos orgânico-inorgânicos em pedra de Lecce foi correlacionado com sucesso através de ensaios em câmara QUV (com ciclos alternados de radiação UV e condensação). Através da monitorização do ângulo de contato e da variação global da cor, estimou-se uma durabilidade do tratamento de até doze anos em condições naturais (Striani et al., 2016).

Diversos trabalhos demonstraram igualmente a importância da avaliação da durabilidade de tratamentos hidrófugos. Estudos realizados em arenitos utilizados em monumentos históricos, expostos a um clima temperado frio (Dfb), monitorizaram o comportamento de revestimentos durante períodos de exposição natural até 545 dias (Tokarský et al., 2022) e até 30 anos (Orlowsky et al., 2020), verificando-se, em geral, uma manutenção satisfatória da capacidade hidrófuga, embora acompanhada por alterações cromáticas associadas à formação de crostas negras e à colonização biológica (Orlowsky et al., 2020). Apesar destes avanços, continua a não existir uma norma especificamente dedicada ao envelhecimento artificial da pedra natural tratada com produtos hidrófugos ou outros revestimentos protetores, permanecendo os protocolos de ensaio em fase de desenvolvimento e validação (Jelle, 2012).

No contexto português, a investigação nesta área permanece relativamente limitada. Estudos recentes compararam o envelhecimento acelerado por QUV-spray durante catorze dias com seis meses de exposição natural em Évora, procurando estabelecer relações entre os dois processos e contribuir para o desenvolvimento de metodologias adaptadas à pedra portuguesa (Sitzia et al., 2021a; Lisci et al., 2022b). Os autores salientam que ainda escasseiam trabalhos dedicados especificamente à comparação sistemática entre meteorização natural e artificial em rochas ornamentais portuguesas, identificando esta temática como uma lacuna relevante a preencher.

A influência do acabamento superficial constitui igualmente um fator determinante no comportamento da pedra. Superfícies mais rugosas favorecem a retenção de água e a degradação física e mecânica, enquanto superfícies polidas tendem a ser mais suscetíveis a alterações estéticas (Urosevic et al., 2013; Sitzia et al., 2022). Por outro lado, acabamentos rugosos favorecem a penetração de tratamentos protetores, ao passo que superfícies polidas podem limitar essa penetração, promovendo a formação de películas superficiais menos duráveis (Sitzia et al., 2022).

Esta questão assume particular relevância no caso dos calcários ornamentais, cuja porosidade aberta e a natureza carbonatada os tornam particularmente sensíveis à variabilidade climática. Os calcários ornamentais claros, entre os quais se destaca o Calcário Branco Estremenho, possuem elevada importância económica e patrimonial devido às suas características estéticas, facilidade de processamento e versatilidade de aplicação (Carvalho et al., 2018). Contudo, a sua durabilidade em serviço é condicionada pela exposição ambiental, tornando este material

suscetível a processos de meteorização física e química, como dissolução, cristalização de sais e ação de poluentes atmosféricos (Siegesmund & Snethlage, 2014).

Neste enquadramento, os ensaios de envelhecimento acelerado, quando devidamente calibrados com base na caracterização petrográfica, física e mecânica de materiais, podem constituir uma metodologia relevante na previsão do comportamento em serviço e na avaliação da eficácia de tratamentos de conservação antes da sua aplicação em obra. O presente estudo procura contribuir para esta área de conhecimento, articulando aspetos da geologia e da engenharia de materiais através da avaliação da representatividade dos fatores de compressão temporal. Deste modo, ao confrontar os ensaios acelerados com a exposição ambiental real, pretende-se disponibilizar dados de durabilidade que apoiem a valorização e a utilização sustentável do Calcário Branco Estremenho.

CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo descreve detalhadamente a metodologia experimental delineada para avaliar a durabilidade do Calcário Branco Estremenho e aferir a representatividade dos ensaios de envelhecimento acelerado em câmara climática face à exposição ambiental real.

Para alcançar este objetivo, o estudo adotou uma abordagem integrada em relação aos ensaios padronizados de durabilidade. Em vez de começar diretamente com simulações laboratoriais, a investigação priorizou, inicialmente, uma fase de exposição natural, na qual um conjunto de amostras foi submetido a condições exteriores ao longo de 127 dias, seguida de uma caracterização rigorosa das alterações físicas e mecânicas observadas.

Posteriormente, as variáveis higrotérmicas registadas *in situ* foram replicadas em câmara climática sob diferentes fatores de compressão (CF = 2, 4 e 6). Após cada série de simulação, o impacto induzido artificialmente foi comparado com o verificado em ambiente natural, permitindo avaliar a representatividade e a fiabilidade dos ensaios acelerados face ao comportamento real do material. A otimização destas metodologias é determinante para uma estimativa robusta da durabilidade em serviço, fornecendo dados essenciais para o planeamento de manutenção e para a seleção adequada de materiais de construção.

O fator de compressão (CF) traduz a relação entre a duração real de um ciclo ambiental e o tempo necessário para a sua reprodução em laboratório. Por exemplo, um CF = 2 corresponde à simulação laboratorial de um ciclo de 24 horas num período de 12 horas, duplicando a frequência dos ciclos climáticos aplicados ao material. O fator de compressão foi definido pela razão entre o tempo de exposição natural e o tempo de ensaio:

$$CF = \frac{TAN}{TT} \quad (3.1)$$

Em que:

CF – Fator de compressão;

TAN – Tempo de exposição em ambiente natural;

TT – Tempo de ensaio em câmara climática.

Esta grandeza permite quantificar o grau de aceleração temporal imposto aos diferentes regimes experimentais.

O ensaio de envelhecimento é definido pelos seguintes variáveis fundamentais:

- **Tempo de Exposição Natural (TAN):** período real necessário, em ambiente natural, para atingir o mesmo nível de degradação observado no laboratório. Este valor depende diretamente das condições climáticas reais, tipo de material e mecanismos de degradação. No presente estudo, o TAN foi estabelecido em 127 dias, correspondentes ao período de exposição em meio real no Parque Natural da Serra da Estrela. Este valor serviu de referência absoluta para a avaliação da representatividade dos ensaios de acelerados.
- **Tempo de Ensaio (TT):** duração efetiva da exposição em câmara climática, cujos níveis de degradação induzidos são posteriormente comparados com o TAN.
- **Exposição Teórica ao ar livre (TA):** estimativa do tempo que o material levaria a atingir o nível de degradação laboratorial sob as condições microclimáticas médias da zona de exposição ambiental de referência. Funciona como uma métrica de validação da eficácia do ensaio face à exposição real, embora a sua fiabilidade, como já referido, seja limitada devido às diferenças entre o intemperismo acelerado e o natural. Para o seu cálculo, utiliza-se a expressão:

$$TA = TT \times CF \quad (3.2)$$

Em que:

TA – Tempo de exposição teórica ao ar livre;

TT – Tempo de ensaio em câmara climática;

CF – Fator de compressão.

A validade desta metodologia visa assegurar a precisão dos protocolos laboratoriais através do confronto direto com o meio físico, ancorando-se na estratégia concetual, designada por "testar o teste" (test the test), abordagem consolidada na literatura científica (Crewdson, 2011). Desta forma, a análise comparativa dos níveis de degradação obtidos permite avaliar o impacto do fator de compressão na fiabilidade da simulação laboratorial.

3.1. Materiais

3.1.1. Proveniência das amostras

O material utilizado neste estudo é designado por Calcário Branco Estremenho, uma pedra ornamental amplamente aplicada em fachadas, revestimentos interiores, elementos de coroamento (como cimalkas e cornijas) e em pavimentos interiores em áreas com tráfego pedonal limitado. Este tipo de calcário caracteriza-se por uma tonalidade clara e uma textura relativamente homogênea, propriedades que sustentam a sua valorização estética e mecânica.

As amostras provêm da região do Maciço Calcário Estremenho (MCE), situado no Setor Central da Bacia Lusitânica (Kullberg et al., 2013), no centro-oeste de Portugal, a sul do distrito de Leiria (**Figura 2**).

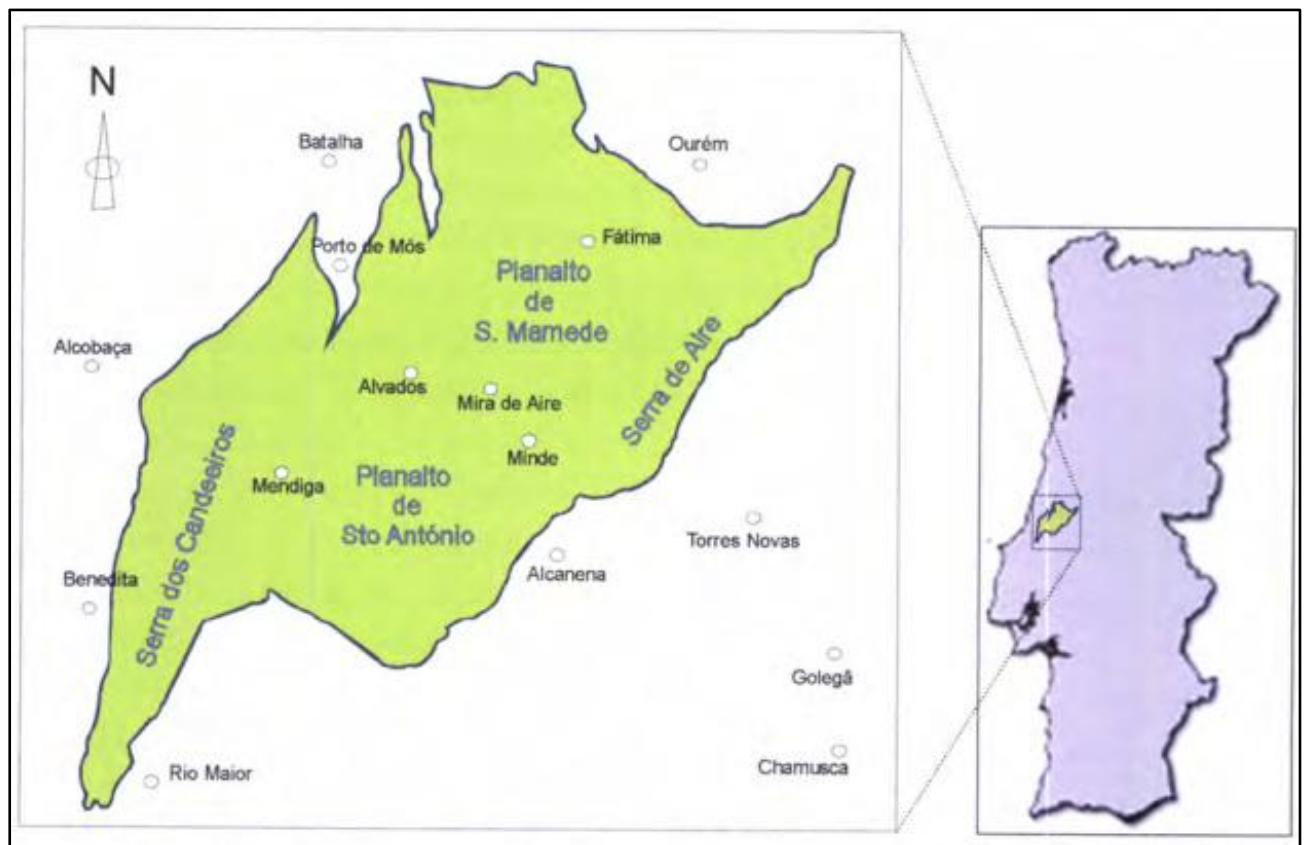


Figura 2: Enquadramento geográfico do Maciço Calcário Estremenho (extraído de Lopes, 2010, p. 9).

A extração da pedra natural no Maciço Calcário Estremenho constitui uma atividade secular intrínseca à história da região. A partir do final da década de 1980, este setor adquiriu uma nova dinâmica e afirmou-se como uma atividade económica de grande expressão, com forte relevo nos mercados nacional e internacional (Duarte, 2019-2020). Atualmente, o MCE representa uma das áreas de exploração de calcário ornamental mais importantes a nível mundial (Carvalho & Lisboa, 2018), com um reconhecimento consolidado pela qualidade e diversidade dos materiais produzidos e pela intensidade da sua atividade extrativa.

As pedreiras desta região desenvolvem-se maioritariamente em encostas, organizadas em socacos, que podem atingir profundidades da ordem dos 50 m, refletindo a adaptação das técnicas de exploração às características geomorfológicas do maciço (Carvalho & Lisboa, 2018).

3.1.2. Critérios de seleção das amostras

O calcário constitui um dos recursos geológicos mais relevantes e de importância estratégica em Portugal, com um papel relevante na economia nacional e no património arquitetónico. O elevado valor estético e a longevidade das diversas variedades de mármore, calcários e brechas calcárias favorecem a sua utilização em diferentes âmbitos. Dada a sua abundância no território português, estas continuam a ser a matéria-prima essencial para as obras mais emblemáticas da arquitetura e construção civil (Moura et al., 2007). Todavia, enquanto material estrutural e ornamental, a durabilidade do calcário é condicionada pela vulnerabilidade a agentes externos, como a poluição atmosférica, a ação biológica e a exposição a ciclos térmicos. Esta suscetibilidade torna imperativa a sua conservação sustentável.



Figura 3: Amostras representativas do Calcário Branco Estremenho selecionado para o estudo.

As recomendações técnicas para a aplicação deste material variam consoante o elemento construtivo e a sua exposição ambiental. No caso de fachadas ventiladas, as lajes de pedra devem cumprir os requisitos de desempenho e controlo de qualidade definidos na norma EN 1469:2015, a qual remete o dimensionamento da espessura para o cálculo estrutural com base nas cargas do vento e no peso próprio. Neste âmbito, a prática de engenharia sugere habitualmente espessuras entre 30 mm e 40 mm para rochas calcárias, variando consoante se trate de variedades mais compactas ou mais porosas, assegurando a margem de segurança necessária nos pontos de ancoragem mecânica, quer através de sistemas visíveis ou de fixação oculta pelo tardo (tipo *undercut*). A subestrutura metálica intermédia deve garantir uma câmara de ar contínua para a secagem rápida do revestimento, devendo o pormenor construtivo prever ainda pingadeiras para afastar a água pluvial e minimizar a acumulação de partículas e agentes degradadores. No caso de pavimentos, a norma EN 12058:2015 estabelece as especificações para lajes com espessura mínima de 20 mm, sendo desaconselhada a aplicação

de variedades porosas em superfícies horizontais exteriores, devido ao risco de gelividade inerente à porosidade da pedra.

Neste contexto, a seleção dos provetes obedeceu a critérios rigorosos de controlo de variáveis, em conformidade com as exigências de *Marcação CE* para pedra natural. De acordo com o Regulamento (UE) n.º 305/2011 do Parlamento Europeu (Regulamento dos Produtos de Construção - RPC), a *Marcação CE* assegura que o material cumpre os requisitos de desempenho declarados pelo fabricante, baseados em ensaios apropriados que garantem a segurança e a durabilidade da rocha em contexto de construção (Pires, 2021). Assim, para assegurar a representatividade dos resultados da variedade litológica estudada, cuja designação e origem geográfica seguem os critérios de denominação da norma EN 12440:2017, todas as amostras foram extraídas do mesmo bloco de pedreira. Este procedimento permitiu manter a homogeneidade litoestratigráfica e minimizar flutuações na porosidade ou na composição mineralógica durante os processos de envelhecimento.

Durante a fase de amostragem, realizou-se uma inspeção macroscópica detalhada em cada peça, aplicando a terminologia e as definições de defeitos estruturais estabelecidas pela norma EN 12670:2019. Esta abordagem científica serviu para fundamentar a exclusão de provetes que apresentassem microfissuras, veios argilosos, zonas de oxidação prévia ou quaisquer descontinuidades estruturais que pudessem constituir pontos de fragilidade artificial. Além da integridade física, o processo de corte respeitou rigorosamente a orientação face os planos de estratificação da pedra. Este rigor geométrico é fundamental para garantir a estabilidade e a reprodutibilidade das propriedades mecânicas avaliadas, como a resistência à flexão sob carga centrada e a resistência à compressão uniaxial, aspeto essencial para a conformidade com as Declarações de Desempenho (DoP) associadas às exigências técnicas da *Marcação CE*. Por fim, a padronização do processo de corte e a manutenção do acabamento natural de serragem permitiram uniformizar a rugosidade superficial entre todos os provetes, isolando a resposta intrínseca do calcário perante os ciclos térmicos e hídricos impostos.

3.1.3. Enquadramento geológico do Maciço Calcário Estremenho

O MCE insere-se no setor principal da Bacia Lusitânica, integrada na Orla Meso-Cenozóica Ocidental portuguesa. Corresponde a uma unidade geológica de idade jurássica constituída predominantemente por formações carbonatadas. Esta unidade apresenta uma área aproximada de 800 km² (Carvalho, 2018). Como se ilustra no enquadramento geológico da **Figura 4**, a região caracteriza-se por uma morfologia compartimentada, resultante de processos tectónicos que originaram blocos levantados, atingindo altitudes moderadas na ordem dos 600–700 metros.

Estruturalmente, o MCE apresenta-se como um bloco elevado resultante de esforços tectónicos compressivos de idade Cenozóica, que reativaram acidentes tectónicos preexistentes. Estes processos originaram a segmentação do maciço segundo direções preferenciais NNE-SSW, NE-SW e WNW-ESE (Ribeiro, 2002). Para além destas estruturas, observam-se dobramentos suaves de fraca amplitude e uma rede de fraturas e diáclases que condicionam fortemente os processos geomorfológicos e a evolução do relevo.

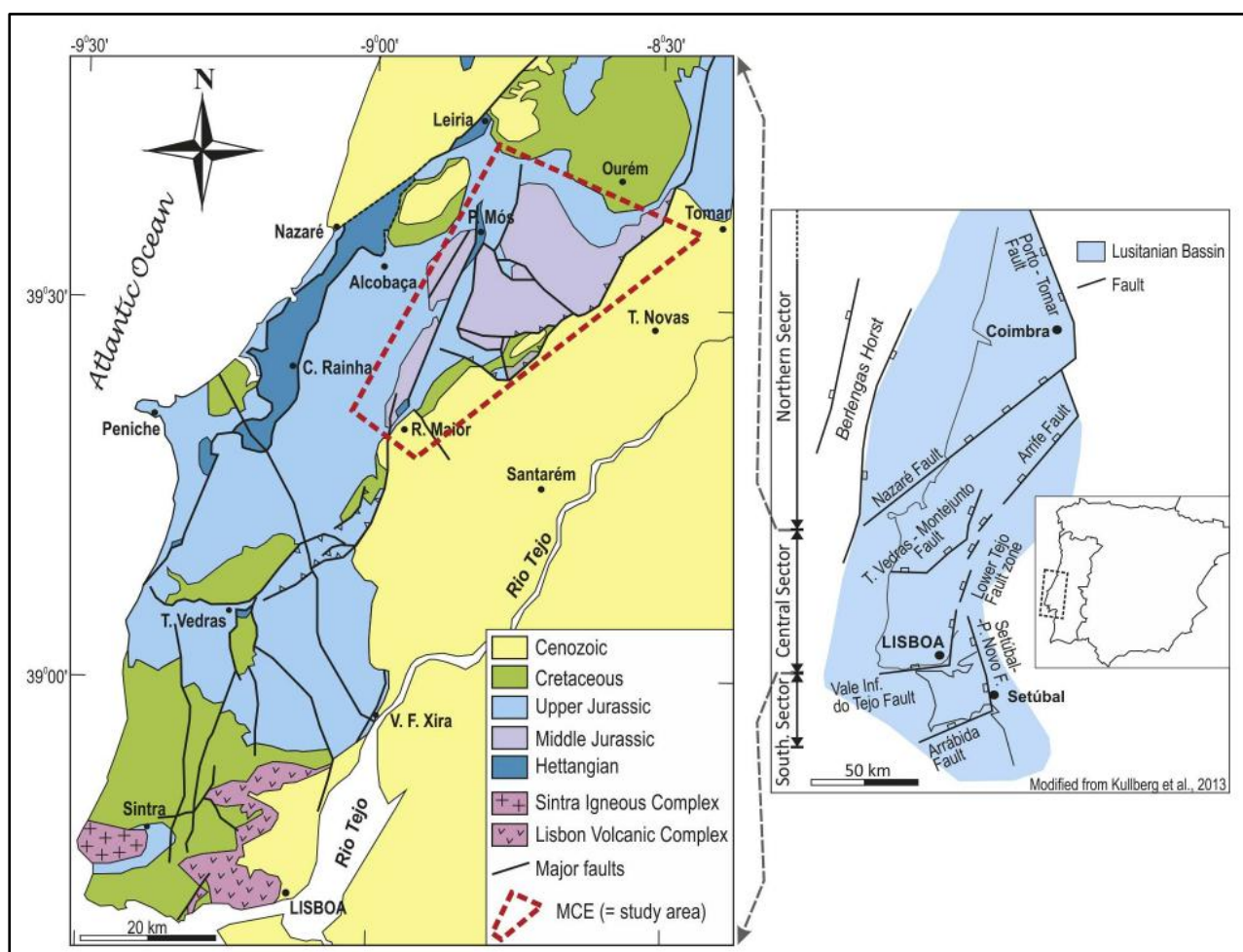


Figura 4: Enquadramento geológico do MCE (adaptado do LNEG, 2010).

Do ponto de vista estratigráfico, o MCE é constituído por rochas expostas do Jurássico Inferior (Hetangiano) ao Plioceno, sendo a maioria das formações constituídas por calcários do Jurássico Médio (Dogger) e do Jurássico superior (Malm) (Manuppella et al., 1998, 1999; Azerêdo, 2007). Estão igualmente presentes retalhos de areias pliocênicas, formações detríticas modernas e calcários compactos no seu flanco Noroeste e formações detríticas com intercalações miocénicas, rochas básicas e diapíricas no flanco Sudeste.

As formações do Dogger compreendem calcários margosos, argilosos, dolomíticos e detríticos, formados num sistema deposicional de rampa carbonatada (Azerêdo, 1998, 2007). As principais unidades litoestratigráficas predominantes correspondem ao Bajociano, Batoniano e Caloviano, sendo o Batoniano constituído por calcários micríticos muito puros, passando lateralmente para corpos maciços de calcários oolíticos e bioclásticos (Carvalho, 2018). As formações do Malm incluem calcários continentais marinhos pouco profundos de cor castanho-claro a cinzento, argilas, margas e xistos depositados sob condições moderadas de subsidência controlada por falhas, relacionadas com a terceira fase do rifteamento da Bacia Lusitânica (Alves et al., 2003).

Os calcários apresentam grande variabilidade, podendo ser cascalhentos, de granularidade fina e grosseira, oolíticos, com estruturas recifais, compactos ou de natureza calciclástica e bioclástica. Esta diversidade reflete os diferentes ambientes deposicionais associados a plataformas carbonatadas marinhas pouco profundas, que favorecem a acumulação de sedimentos ricos em carbonato de cálcio.

Deste maciço extraem-se diversas unidades litoestratigráficas que dão origem a uma ampla variedade de materiais ornamentais. Entre as principais variedades comerciais destacam-se: Alpinina, Ataíja Azul, Ataíja Creme, Semi-rijo Codaçal, Lioz, Semi-rijo do Arrimal, Moca Creme, Branco Real, entre outros (Sousa et al., 2021).

3.1.3.1. Geomorfologia e hidrogeologia

A estrutura e a composição do MCE condicionam o desenvolvimento de uma paisagem cársica diversificada, caracterizada por formas como megalapiás, dolinas e, mais raramente, uvalas, poljes e algares, bem como uma vasta rede de cavidades subterrâneas (Manuppella et al., 1985). As dolinas resultam de processos de dissolução ou de erosão flúvio-cársica e apresentam morfologias variadas, com ocorrências até aos 600 m de altitude. O endocarso é representado

por algares, galerias e condutas, que atingem profundidades variáveis, podendo chegar aos 80 metros abaixo do nível das nascentes (Almeida et al., 2000). Os algares, estruturas particularmente antigas e abundantes no MCE, possuem profundidades que variam entre os 100 e 150 metros, intersetando zonas com vestígios de circulação hídrica fóssil ou ativa.

Uma característica peculiar do MCE é a ausência ou reduzida expressão de drenagem superficial organizada, contrastando com um sistema aquífero cársico muito desenvolvido. Este sistema possui um número reduzido de nascentes perenes e várias nascentes temporárias com caudais elevados e elevada variabilidade. Todas as nascentes perenes localizam-se preferencialmente nos bordos do maciço, como é o caso da nascente dos Olhos de Água do Alviela, de grande importância no abastecimento de água na região de Lisboa. Apesar da ausência de cursos de água superficiais organizados nesta região, o subsolo alberga um dos maiores reservatórios de água doce de Portugal (LNEG, 2009).

Enquanto unidade geomorfológica, o MCE integra unidades como a Serra de Aire (a Este), a Serra de Candeeiros (a Oeste) e os planaltos de São Mamede (a Norte) e de Santo António (a Sul e centro). Estas áreas são separadas por duas grandes depressões principais: a depressão da Mendiga e a depressão de Minde – Alvados (Martins, 1949).

Este território destaca-se das regiões envolventes não só pela sua topografia, mas também pelas suas características litológicas e tectónicas, que condicionam a paisagem nos seus aspetos morfológicos, hidrológicos e botânicos, influenciando, por sua vez, a ocupação humana e as atividades desenvolvidas.

3.1.4. Caracterização petrográfica e mineralógica do calcário selecionado

3.1.4.1. Análise macroscópica

A amostra de calcário analisada apresenta uma coloração esbranquiçada a bege claro, aspeto compacto e granularidade média a grossa, com relativa homogeneidade e porosidade visível. Trata-se de uma rocha sedimentar carbonatada de natureza clástica, identificada macroscopicamente como um calcário bioclástico com uma textura granular do tipo grão-suportado (grainstone), segundo a classificação de Dunham (Dunham, 1962).

A matriz é constituída por uma densa acumulação de componentes aloquímicos, nomeadamente peloides e oólitos subesféricos, facilmente observáveis a olho nu. Estes componentes apresentam uma estrutura interna radial, característica de ambientes deposicionais de elevada energia, onde o movimento contínuo induzido pela agitação das águas promove a sua formação. Além dos oólitos, observam-se bioclastos sob forma de fragmentos fósseis arredondados ou alongados, dispersos na matriz.

A rocha possui uma porosidade intergranular significativa, evidenciada pela presença de espaços vazios entre os grãos e por uma cimentação parcial dos mesmos. Em zonas específicas, especialmente nas superfícies serradas, verificam-se poros abertos e sinais localizados de ligeira desagregação de componentes carbonatados. Destaca-se ainda, na superfície do provete, a presença de um macrofóssil alongado e segmentado, com aproximadamente 12 mm de comprimento e coloração cinzento-escura, que contrasta com a matriz envolvente (**Figura 5**), cujas características morfológicas e padrão de mineralização sugerem tratar-se de um fragmento de *Nerinea*, um género extinto de gastrópodes marinhos rádiola que viveu desde o Jurássico até ao Cretáceo. Esta inclusão bioclástica introduz uma heterogeneidade estrutural relevante, uma vez que cria interfaces entre materiais com diferentes propriedades físicas e composições mineralógicas.

Do ponto de vista da durabilidade, a organização textural da rocha indica a existência de uma rede porosa interligada, característica de formações do Jurássico Médio do Maciço Calcário Estremenho. Estas condições conferem ao material uma suscetibilidade particular a processos de degradação associados à cristalização de sais e à ação de ciclos higrotérmicos. As interfaces entre os fósseis e matriz constituem zonas preferenciais para a concentração de tensões mecânicas e para a percolação de fluidos durante os ensaios de exposição.



Figura 5: Análise macroscópica da superfície do provete do calcário: detalhe de microfóssil alongado e segmentado.

3.1.4.2. Análise microscópica

A análise petrográfica da amostra foi realizada no Laboratório HERCULES, utilizando o microscópio polarizado Leica DM2500P e o microscópio digital Hirox-01. Prepararam-se secções delgadas com espessura aproximada de 30 μm , destinadas à identificação da composição mineralógica, da textura da rocha e da presença de componentes bioclásticos, de acordo com a norma EN 12407 – Estudo petrográfico.

O calcário estudado apresenta uma textura grain-supported (Dunham, 1962), caracterizada pela predominância de partículas em contato entre si e pela reduzida presença de matriz micrítica. Observa-se uma elevada abundância de oólitos e peloides ($\approx 80\%$). Os oólitos distinguem-se pela presença de estruturas concêntricas, enquanto os peloides apresentam morfologia elíptica e arredondada, sem estrutura interna discernível. Estes grãos apresentam um grau de arredondamento elevado, classificando-se maioritariamente, segundo a escala de Powers (1953), como arredondados a muito arredondados, com dimensões compreendidas aproximadamente entre 0,1 mm e 1 mm ($0,1 \text{ mm} < D < 1 \text{ mm}$).

Os espaços intergranulares encontram-se preenchidos por cimento carbonatado cristalino, correspondente a espartite intersticial, o que indica a precipitação de calcite durante os processos diagenéticos posteriores à deposição. Apesar desta cimentação, subsistem poros intergranulares que justificam a porosidade observada à escala macroscópica.

De acordo com a classificação proposta por Robert L. Folk (1959), a rocha classifica-se como um bio-ool-pelspartite, nomenclatura que reflete a presença combinada de componentes biogénicos e não biogénicos, nomeadamente fragmentos bioclásticos, oolíticos e peloides, sendo o espaço intergranular preenchido por cimento esparítico (**Figura 6**).

Este tipo de textura e composição é típico de ambientes deposicionais carbonatados de elevada energia, nos quais a agitação da água favorece a formação de oólitos e a cumulação de partículas carbonatadas. Observam-se ainda concentrações pontuais de óxidos de ferro hidratados, visíveis como pequenas manchas escuras em alguns oólitos e bioclastos. Alguns bioclastos apresentam morfologia alongada e arredondada encontram-se total ou parcialmente recristalizados em calcite, o que evidencia processos de alteração diagenética. Estas observações microscópicas corroboram a descrição macroscópica previamente apresentada, confirmando a natureza oolítica e bioclástica do material.

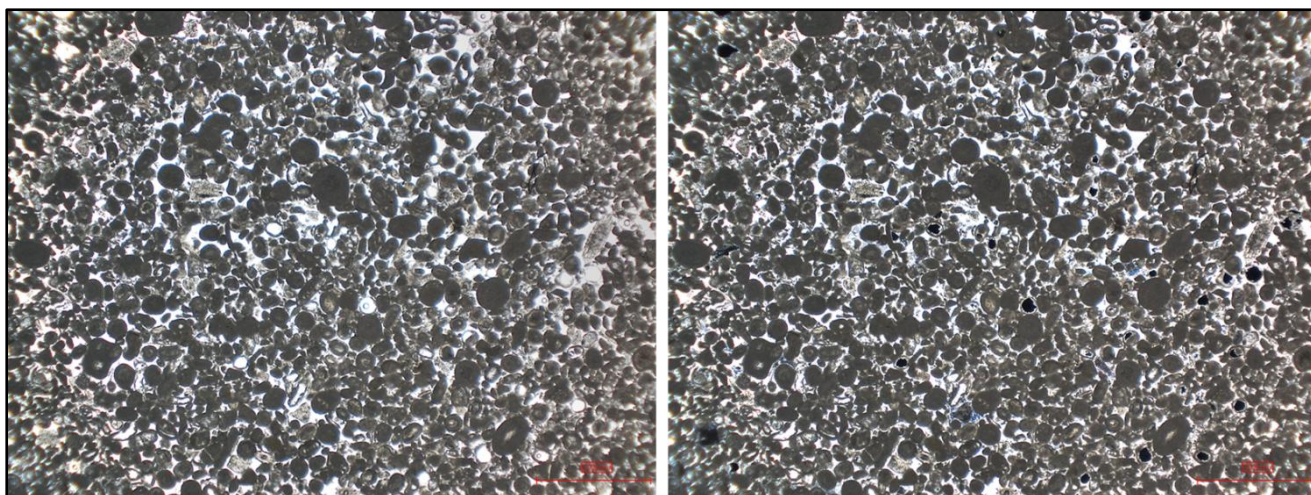


Figura 6: Análise microscópica da amostra: detalhe da textura esparítica com oólitos e peloides.

3.1.4.3. Análise mineralógica

A caracterização mineralógica da amostra foi realizada através da técnica de Difração de Raios-X (DRX), utilizando um difratômetro Bruker AXS D8 Discover XRD, equipado com uma fonte de radiação Cu-K α ($\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$), a operar a 40 kV e 40 mA, e um detetor unidimensional Lynxeye. Os varrimentos foram efetuados no intervalo de 3° a $75^\circ 2\theta$, com um passo de $0,05^\circ 2\theta$ e tempo de medição de 1 segundo por ponto. A identificação das fases mineralógicas foi efetuada através do software DIFFRAC.EVA 5.0, com suporte na base de dados mineralógicos PDF-2 do ICDD (International Center for Diffraction Data).

O difratograma obtido (**Figura 7**) apresenta os picos experimentais (representados pela linha preta), enquanto as barras verticais a vermelho correspondem ao padrão de referência da fase calcite (CaCO_3), correspondente à ficha PDF 83-0578.

A análise do difratograma evidencia uma correspondência significativa entre as posições dos picos experimentais e os picos característicos da calcite, indicando que esta é a fase cristalina predominante na amostra. A reflexão de maior intensidade é observada em aproximadamente $2\theta \approx 29,4^\circ$, correspondente à reflexão do plano cristalográfico (104), considerada o reflexo mais intenso da estrutura romboédrica da calcite. A elevada intensidade e definição deste pico sugerem um elevado grau de cristalinidade do material analisado.

Adicionalmente, identificaram-se outros picos característicos em 23°, 36°, 39°, 43°, 47° – 49°, 57° (2θ), os quais correspondem a reflexões associadas a diferentes planos cristalográficos da estrutura da calcite. A presença destes picos confirma a estrutura cristalina típica do carbonato de cálcio na forma de calcite, pertencente ao sistema cristalino trigonal.

A posição angular das reflexões está relacionada com os espaçamentos interplanares da rede cristalina segundo a lei de Bragg (1912):

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (3.3)$$

Em que:

n – Número inteiro que representa a ordem de difração;

λ – Comprimento de onda da radiação de raios X incidente;

d – Distância interplanar da rede cristalina;

θ – Ângulo de difração de Bragg.

Esta lei estabelece a condição de interferência construtiva da radiação difratada pelos planos cristalinos do material. Desta forma, cada pico observado no difratograma corresponde à difração da radiação incidente por um conjunto específico de planos da rede cristalina.

A baixa intensidade do fundo e a ausência de picos adicionais relevantes sugerem que não existem quantidades significativas de fases cristalinas secundárias detetáveis pelo método, indicando uma elevada pureza mineralógica da amostra. Pequenas diferenças na intensidade relativa entre os picos experimentais e os valores de referência podem ser atribuídas a fatores como orientação preferencial dos cristalitos, variações no seu tamanho ou microtensões estruturais presentes no material.

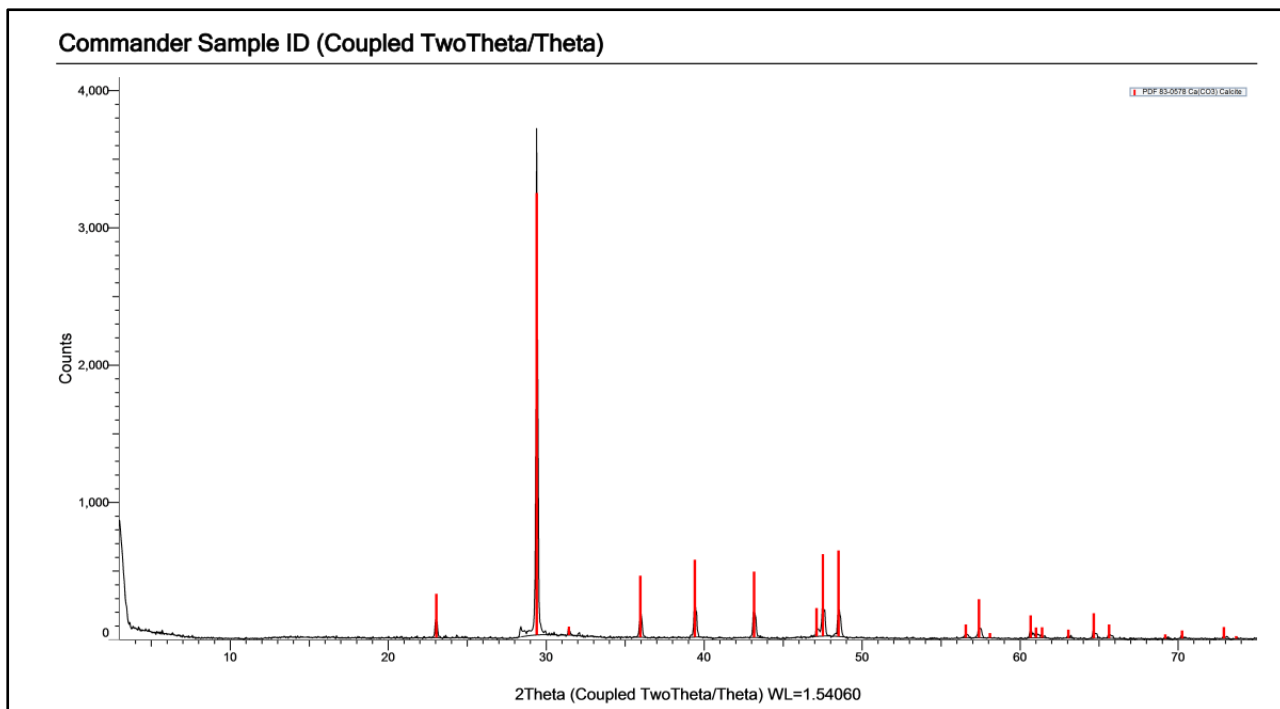


Figura 7: Difratoograma de Raios-X da amostra de calcário, com identificação dos picos experimentais e sobreposição do padrão de referência da calcite.

3.1.5. Preparação e geometria dos provetes

As amostras utilizadas foram selecionadas de forma a garantir a representatividade do bloco de pedra a testar, sendo extraídas de blocos isentos de fraturas visíveis ou discontinuidades macroscópicas, minimizando a variabilidade associada às heterogeneidades naturais da pedra. Todos os provetes foram cortados com recurso a uma serra circular diamantada.

De modo a assegurar a homogeneidade das propriedades físicas e mecânicas entre as diferentes séries de ensaio, utilizaram-se cinco conjuntos de provetes provenientes do mesmo bloco de extração, apresentando características petro-físicas semelhantes.

Durante a realização dos ensaios, a distribuição das amostras foi organizada da seguinte forma (**Figura 8**):

- Um conjunto (reference set) foi submetido à caracterização físico-mecânica inicial e utilizado como referência de degradação;
- Um conjunto (first set) foi sujeito a envelhecimento natural na Serra da Estrela (TAN);

- Três conjuntos (second, third, fourth set) foram submetidos a ensaios acelerados em câmara climática (TT) com os fatores de compressão previamente definidos.

Cada conjunto de amostras é constituído por diferentes tipos de provetes, cujas dimensões foram definidas em função dos ensaios físico-mecânicos realizados após os processos de envelhecimento.

Assim, cada conjunto inclui:

- 6 cubos com dimensões de $50 \times 50 \times 50$ mm, utilizados na determinação da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas (UPV) e no ensaio de resistência à compressão uniaxial (σ_C);
- 7 prismas com dimensões de $300 \times 50 \times 50$ mm, destinadas ao ensaio de resistência à flexão sob carga centrada (σ_F);
- 3 placas com dimensões de $200 \times 200 \times 30$ mm, equipadas com sistemas de ancoragem constituídos por cavilhas em aço inoxidável, destinadas ao ensaio de carga de rotura ao nível do orifício de ancoragem (ARL).

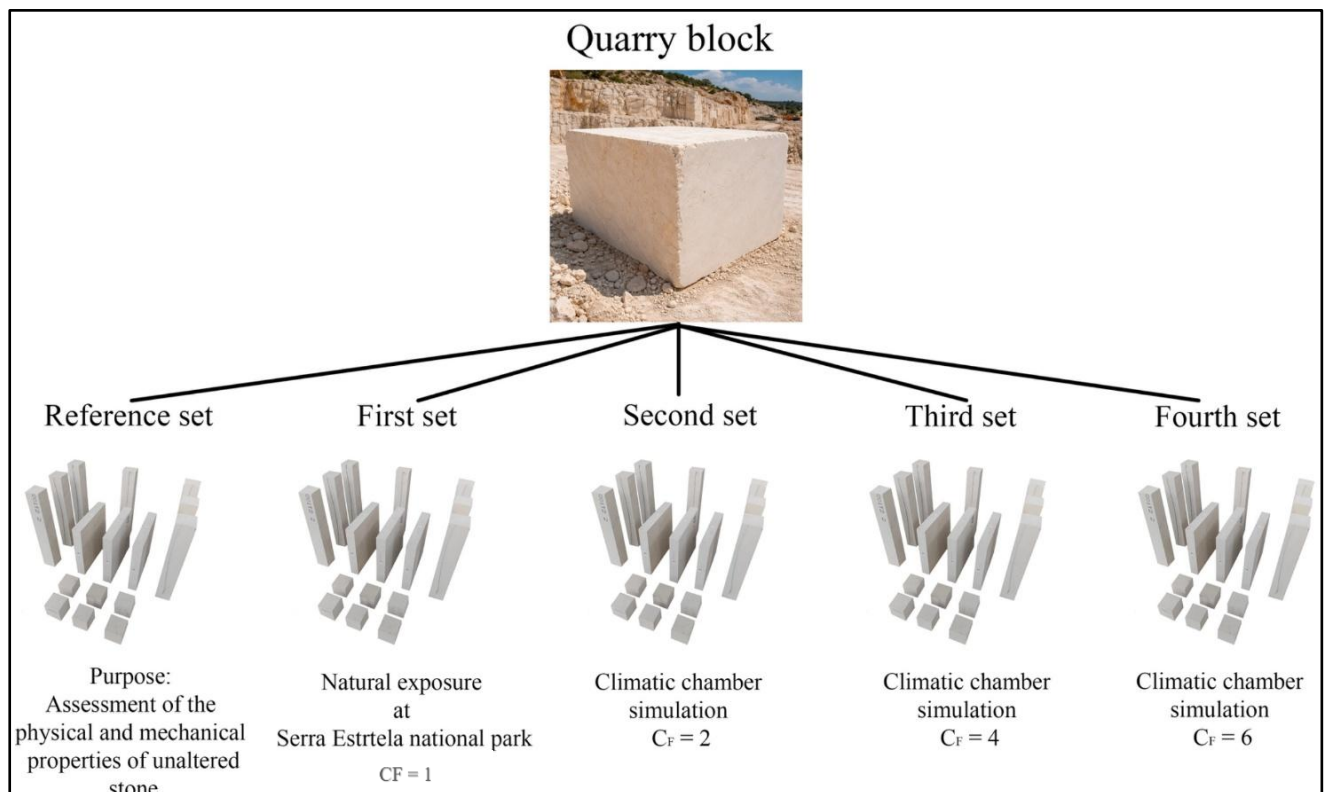


Figura 8: Conjuntos de amostras de calcário utilizadas no estudo.

3.2. Métodos

3.2.1. Caracterização inicial das amostras

Com o intuito de estabelecer uma linha de base referencial que permitisse quantificar com rigor a perda de propriedades decorrente dos processos de alteração, um conjunto de provetes de controlo (reference set, **Figura 8**) foi ensaiado logo após a sua preparação, sem ser submetido a qualquer programa de envelhecimento. Os resultados obtidos na caracterização física e mecânica destrutiva deste primeiro conjunto de amostras serviram de padrão comparativo absoluto (pré-teste) para todos os regimes experimentais subsequentes, seguindo os procedimentos e normas descritos na **Secção 3.2.4**.

3.2.2. Exposição real – envelhecimento natural

Com o objetivo de avaliar o comportamento e a durabilidade do Calcário Branco Estremenho, um conjunto de provetes foi sujeito à exposição real em ambiente natural. O local de ensaio situa-se numa zona de altitude média-alta (aproximadamente 1200 metros acima do nível do mar), no Parque Natural da Serra da Estrela, Distrito da Guarda, Portugal. O período de envelhecimento natural compreendeu aproximadamente quatro meses (127 dias), decorrendo entre meados de dezembro a abril.

A região da Serra da Estrela é influenciada por um clima mediterrâneo de verão fresco (Csb), segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (Beck et al., 2018). É historicamente conhecida pela severidade das suas condições meteorológicas, caracterizadas pela ocorrência frequente de temperaturas negativas, elevada humidade relativa e precipitação significativa. Este cenário é especialmente relevante para o estudo da degradação de materiais pétreos, uma vez que promove a atuação sinérgica de diversos agentes de alteração, cuja complexidade é dificilmente replicável na totalidade em ambiente laboratorial. Para o efeito, os provetes foram dispostos em suportes específicos de modo a maximizar a exposição direta à precipitação e às variações térmicas, eliminando quaisquer efeitos de sombreamento ou proteção indesejada (**Figura 9**). Adicionalmente, as amostras foram periodicamente rodadas para assegurar uma exposição uniforme de todo o volume do material às intempéries. Esta configuração permitiu assegurar condições de exposição comparáveis entre todos os provetes.



Figura 9: Ensaio de envelhecimento natural na Serra da Estrela: exposição das amostras aos agentes atmosféricos reais para recolha de dados meteorológicos.

Os parâmetros meteorológicos desempenham um papel decisivo na análise dos processos de deterioração, pois permitem caracterizar a exposição e explorar associações entre os fatores mecânicos-climáticos e o comportamento dos materiais. Em regiões com registo de temperaturas negativas, o fenómeno de gelividade constitui um dos principais mecanismos de degradação. A infiltração de água na rede porosa dos materiais, especialmente em calcários, seguida da sua expansão volumétrica ($\sim 9\%$) aquando da transição para o estado sólido (Mehta & Monteiro, 2008), gera tensões internas que resultam em microfissuração e perda progressiva da integridade estrutural da pedra.

Ao longo da exposição, os dados higrotérmicos foram registados continuamente através de uma estação meteorológica local, consolidando uma base de dados representativa das principais condições a que as amostras estiveram sujeitas. Na **Figura 10** apresenta-se a evolução diária dos parâmetros monitorizados ao longo dos 127 dias de exposição natural, detalhando as temperaturas máximas e mínimas, os valores máximos e mínimos de humidade relativa e os registos diários de precipitação.

Esta informação meteorológica foi crucial para posterior utilização na calibração dos ensaios de envelhecimento acelerado em câmara climática. A partir de dados reais, foi possível parametrizar a simulação laboratorial, garantindo a sua representatividade face às condições naturais. Concluído o período de exposição no campo, as amostras foram recolhidas e submetidas à mesma caracterização físico-mecânica realizada no conjunto de referência.

A comparação entre o estado inicial e o estado envelhecido naturalmente, expressa em termos de perda de desempenho físico-mecânico, permitiu quantificar a taxa de degradação natural. Obtidos estes dados de referência, iniciaram-se as simulações em laboratório, nas quais se procurou reproduzir na câmara climática as tendências térmicas e hídricas registadas na Serra da Estrela, mediante a aplicação de fatores de compressão progressivos ($CF = 2, 4$ e 6).

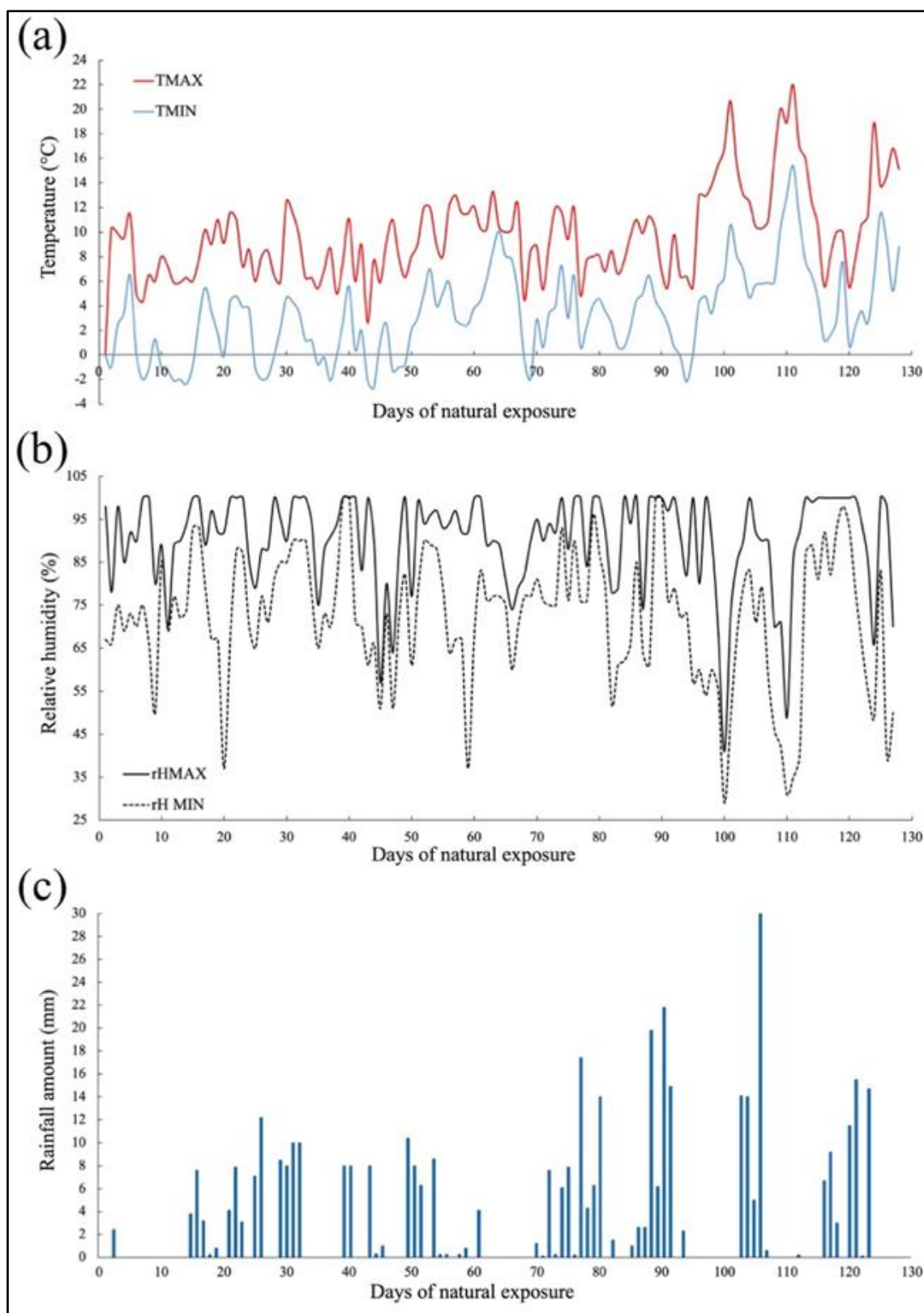


Figura 10: Evolução diária dos parâmetros meteorológicos registrados durante os 127 dias de exposição natural no Parque Natural da Serra da Estrela: (a) temperatura máxima (T_{max}) e mínima (T_{min}) do ar; (b) humidade relativa máxima (RH_{max}) e mínima (RH_{min}) do ar; (c) quantidade de precipitação.

3.2.3. Ensaio de envelhecimento acelerado – câmara climática

As amostras foram submetidas a ciclos de envelhecimento acelerado numa câmara climática ARALAB FITOCLIMA 500EC45, com capacidade para operar num intervalo de temperaturas entre -45°C e $+180^{\circ}\text{C}$, humidade relativa de 10% a 98% e precipitação máxima de 0,9 l/min. (Figura 11).



Figura 11: Câmara climática utilizada nos ensaios de envelhecimento acelerado.

Na ausência de protocolos normativos específicos para a simulação integrada das condições ambientais em estudo, o programa de envelhecimento acelerado foi concebido com base nos parâmetros climáticos registados durante a exposição natural na Serra da Estrela (**Figura 10**). Assim, os ciclos laboratoriais foram definidos de modo a reproduzir, de forma controlada, os principais agentes de degradação, nomeadamente temperatura, humidade relativa e precipitação, com recurso a coeficientes de aceleração progressivamente crescentes.

A simulação da precipitação durante os ciclos foi realizada através da aspersão de água desmineralizada, de forma a reproduzir o efeito de chuva e consequente humedecimento superficial das amostras. A água utilizada apresenta as seguintes características: sólidos dissolvidos totais (TDS) de 2 mg/l, condutividade elétrica de 4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e pH de 5,9 à temperatura de 15,2 °C. Estas condições permitiram minimizar a influência de sais dissolvidos, isolando o efeito da água enquanto agente físico de degradação. Importa referir que reprodução da precipitação, ao contrário dos ciclos de temperatura e humidade, não foi sujeita a compressão temporal. Assim, se durante um determinado ciclo natural de TAN = 24 horas forem registados, por exemplo, 10 mm de precipitação, esse valor deve ser reproduzido integralmente na câmara climática durante a simulação, independentemente do fator de compressão temporal aplicado ao ensaio.

Em termos operacionais, um ciclo climático natural de 24 horas (CF = 1, **Figura 12a**) foi simulado através de ciclos acelerados com durações de 12 (**Figura 12b**), 6 e 4 horas correspondentes aos fatores de compressão CF = 2, 4 e 6, respetivamente. Em todos os casos, foi mantido o número total de ciclos equivalente ao período de exposição natural, tendo-se variado apenas a duração de cada ciclo, de forma a permitir reduzir o tempo total de ensaio sem alterar a repetição dos processos, a intensidade dos agentes de alteração e a avaliação de seus impactos em diferentes escalas temporais. Embora as variáveis ambientais possuam um comportamento sinuoso e contínuo, a sua simulação pode ser modelada por aproximações lineares fragmentadas, designadas por segmentos. Assim, a fiabilidade do ciclo artificial em relação ao real depende diretamente do número de segmentos utilizados. Para a definição de cada ciclo diário, foram inseridos na câmara, pelo menos, quatro segmentos, distribuídos da seguinte maneira (**Figura 12c**):

- **Segmento 1 (S1):** compreendido entre a temperatura mínima ($T_{\min}$) e 1º valor intermédio de T;

- **Segmento 2 (S2):** compreendido entre 1º valor intermédio de T e a temperatura máxima ($T_{\max}$);
- **Segmento 3 (S3):** compreendido entre temperatura máxima ($T_{\max}$) e 2º valor intermédio de T;
- **Segmento 4 (S4):** compreendido entre 2º valor intermédio de T e a temperatura mínima ($T_{\min}$) do dia ou ciclo seguinte.

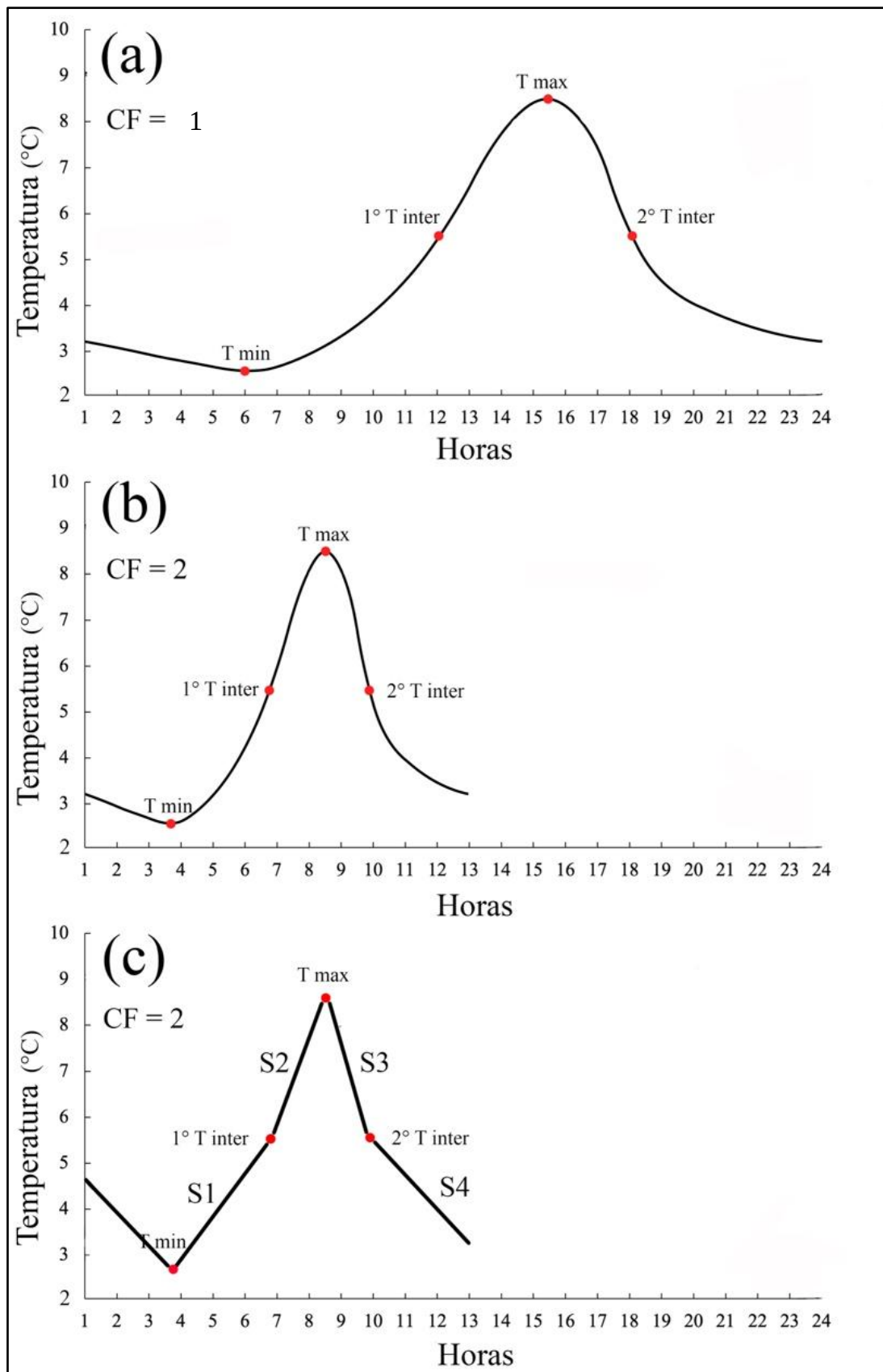


Figura 12: Perfis térmicos diários em função da aceleração do ensaio: (a) ciclo de exposição natural ($CF = 1$); (b) ciclo comprimido em câmara climática com $CF = 2$; e (c) aproximação linear do ciclo comprimido para programação na câmara climática.

Considerando a abordagem utilizada, a realização de 127 ciclos em regime natural (TAN) correspondeu, em termos de duração total de ensaio na câmara climática (TT), a aproximadamente 63 dias para ciclos de 12 horas, 31 dias para ciclos de 6 horas e cerca de 21 dias para ciclos de 4 horas (**Tabela 1**). Estes valores traduzem a compressão temporal do ensaio laboratorial, mantendo, no entanto, a repetição dos processos de meteorização associados às variações térmicas, de humidade e de precipitação. Esta metodologia permitiu analisar de forma sistemática a influência do grau de aceleração nos mecanismos de degradação do material, bem como avaliar a correspondência entre os resultados obtidos em laboratório e os observados em condições naturais.

***Tabela 1:** Parâmetros operacionais definidos para os regimes de ensaio natural e acelerado.*

Regime de ensaio	Nº de ciclos	Duração do ciclo (h)	TT (dias)	Equivalência (TAN)	CF
Natural	127	24	127	1 TAN	1
Acelerado	127	12	63	½ TAN	2
Acelerado	127	6	31	¼ TAN	4
Acelerado	127	4	21	1/6 TAN	6

A **Figura 13** detalha o princípio de compressão temporal em ensaios de durabilidade e demonstra como as câmaras climáticas mimetizam os agentes de degradação de forma acelerada. Do ponto de vista da física dos materiais e da sua degradação, o incremento do fator de compressão (CF = 1 a CF = 6) não altera os valores máximos de temperatura ou de humidade, mas eleva drasticamente a frequência com que ocorrem e a severidade dos gradientes. Ao forçar o material a transitar entre estados térmicos e higrométricos opostos a um ritmo até seis vezes superior ao real, poderá induzir-se uma severa tensão higrotérmica. Este fenómeno tenderá a acelerar os ciclos de expansão e contração volumétrica, propiciando potencialmente processos de microfissuração e perda de propriedades mecânicas. Desta forma, a metodologia poderá contribuir para uma estimativa indicativa da durabilidade do material num tempo laboratorial altamente otimizado.

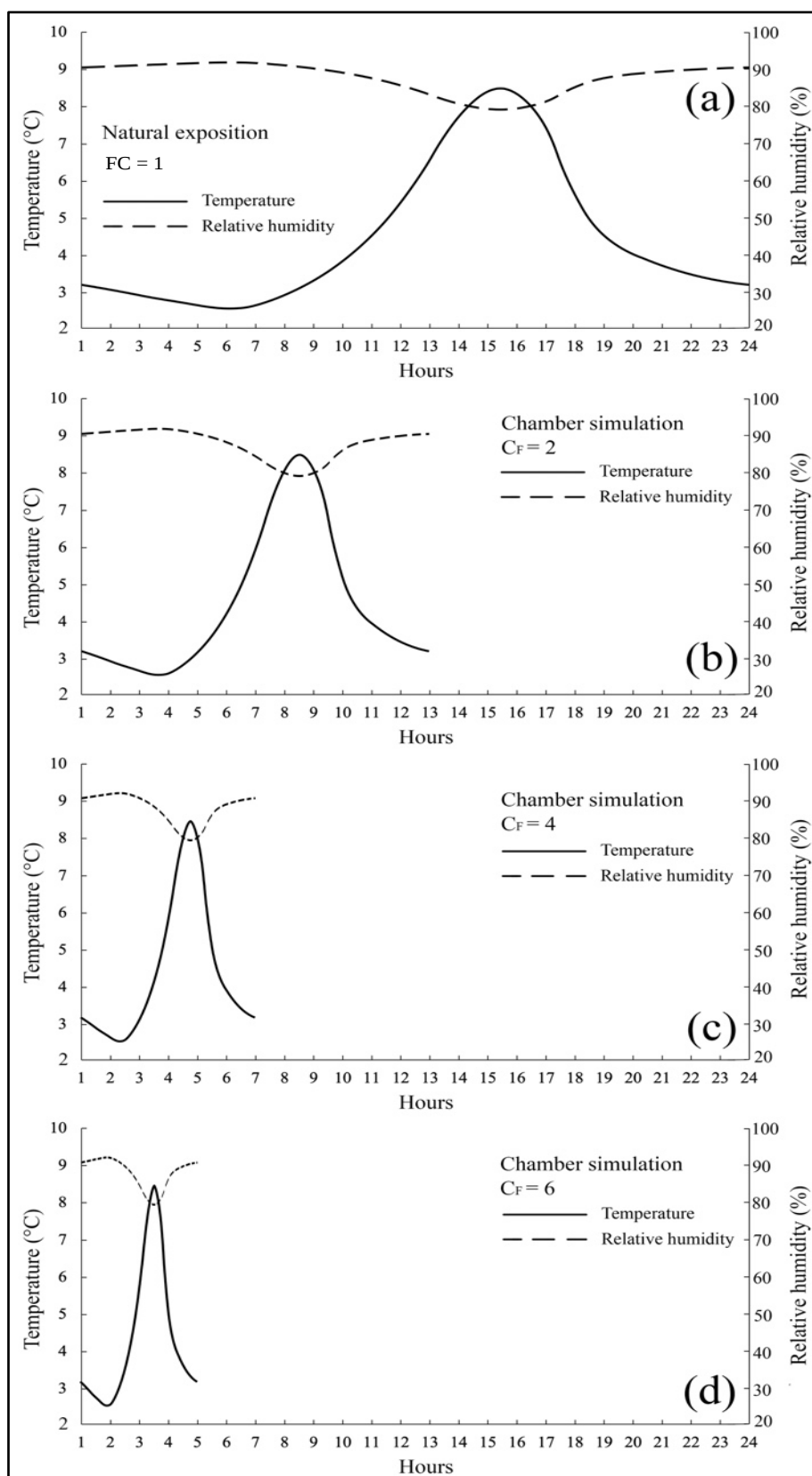


Figura 13: Evolução acoplada da temperatura e da humidade relativa sob diferentes fatores de compressão: (a) estabelece a linha de base em ambiente real (ciclo de 24 h); (b), (c) e (d) demonstram a compactação progressiva do perfil higrotérmico para períodos de 12 h, 6 h e 4 h, respetivamente, preservando as amplitudes de temperatura e humidade relativa.

3.2.4. Caracterização física e mecânica

A avaliação físico-mecânica das amostras foram realizada no Laboratório de Ensaio Mecânicos (LEM), da Universidade de Évora, no que concerne à velocidade de propagação das ondas ultrassónicas, resistência à compressão uniaxial, resistência à flexão e carga de rotura a nível de orifício de ancoragem.

A seleção das propriedades ensaiadas prende-se com a sua relevância direta para a integridade estrutural e segurança do material em contexto de aplicação construtiva, nomeadamente em sistemas de fachada ventilada e revestimentos (conforme exigido pelas normas EN 1469 e EN 12058 no âmbito do Regulamento dos Produtos de Construção). Embora as propriedades associadas ao transporte de água (tais como a porosidade aberta, absorção de água por capilaridade e absorção à pressão atmosférica) constituam indicadores fundamentais da rede porosa e da suscetibilidade à alteração hídrica, o presente programa experimental focou-se na resposta mecânica direta e na monitorização não destrutiva da degradação estrutural e da perda de capacidade de carga provocadas pelos ciclos térmicos e de congelamento-descongelamento.

Após a conclusão de cada campanha de exposição, avaliou-se a degradação sofrida pelas amostras. A perda de propriedades ou taxa de degradação ($\Delta\%$) das amostras foi determinada a partir da variação relativa entre os resultados médios obtidos no conjunto de referência (V_i) e os valores médios obtidos após o envelhecimento natural ou acelerado (V_f), calculada através da equação (3.4):

$$\Delta\% = \frac{V_f - V_i}{V_i} \times 100 \quad (3.4)$$

Em que:

$\Delta\%$ – Variação relativa da propriedade físico-mecânica (taxa de degradação);

V_i – Valor inicial da propriedade físico-mecânica;

V_f – Valor final da propriedade físico-mecânica.

Antes da realização de qualquer ensaio físico-mecânico, os provetes foram submetidos a um processo de secagem em estufa à temperatura de 40 ± 2 °C, até atingirem uma massa constante. Em seguida, as amostras foram armazenadas em ambiente controlado à temperatura de 20 ± 5 °C até atingirem o equilíbrio térmico, procedendo-se, de imediato, à execução dos ensaios.

3.2.4.1. Ensaio de determinação da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas

As medições da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas (UPV) foram realizadas com recurso ao equipamento PUNDIT PL200 PROCEQ, equipado com transdutores de 54 kHz e precisão de 0,1µs segundo a normativa EN 14579:2004 (**Figura 14A**). Trata-se de um ensaio não destrutivo que permite avaliar a integridade interna, homogeneidade e qualidade do material, sendo útil na deteção de fissuras e descontinuidades, bem como na estimativa indireta das propriedades mecânicas **Figura 14B**. Uma vez que se trata de um ensaio não destrutivo, foi possível efetuá-lo antes e após os ensaios realizados na câmara climática.

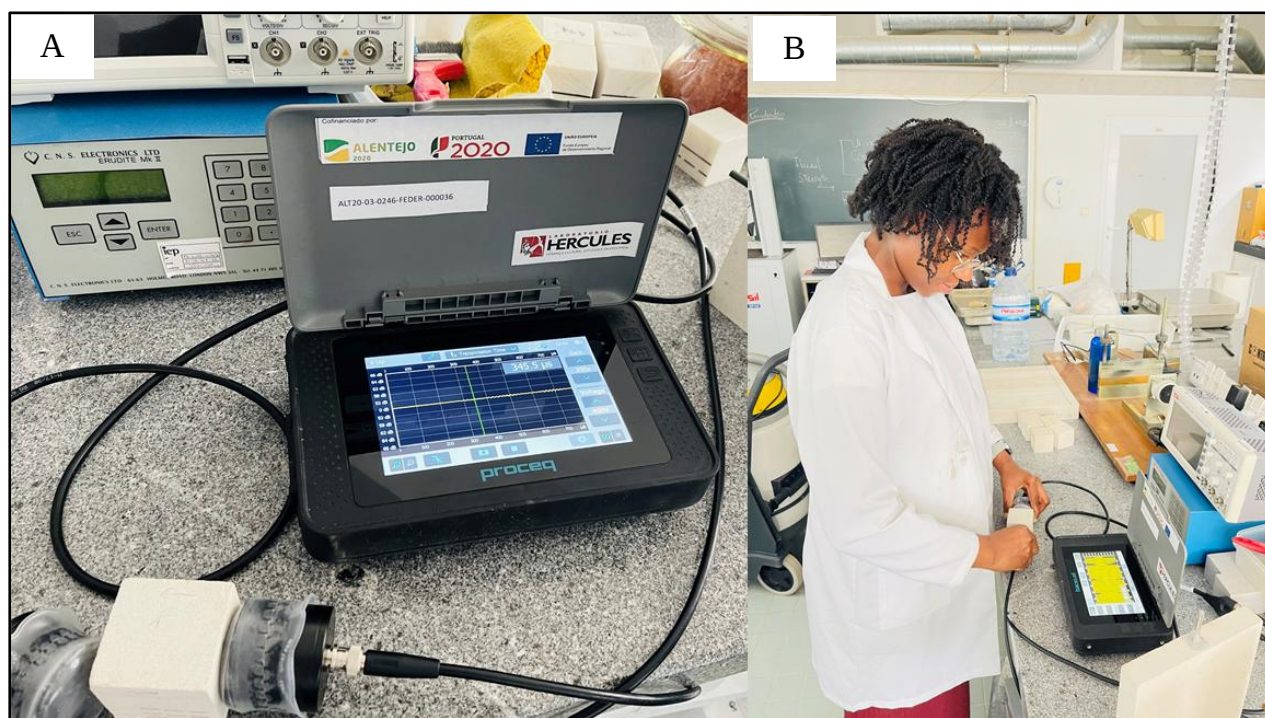


Figura 14: Ensaio não destrutivo de caracterização de materiais: (A) equipamento Proceq utilizado para a medição da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas; (B) operação manual do ensaio em ambiente laboratorial.

3.2.4.2. Ensaio de resistência à compressão uniaxial

A resistência à compressão uniaxial (σ_c) foi determinada de acordo com a norma EN 1926:2006. O equipamento utilizado foi uma prensa hidráulica EL200 da PEGASIL, com capacidade de 1200 kN, precisão de 0,01 kN e taxa de carregamento de $1 \pm 0,5$ MPa/s (**Figura 15B**). A carga foi aplicada perpendicularmente aos planos de estratificação (**Figura 15D**). Este

ensaio permite determinar a tensão máxima suportada pelo material em compressão, sendo essencial para aplicações estruturais sujeitas a cargas verticais, como colunas e pilares (Pires, 2021).

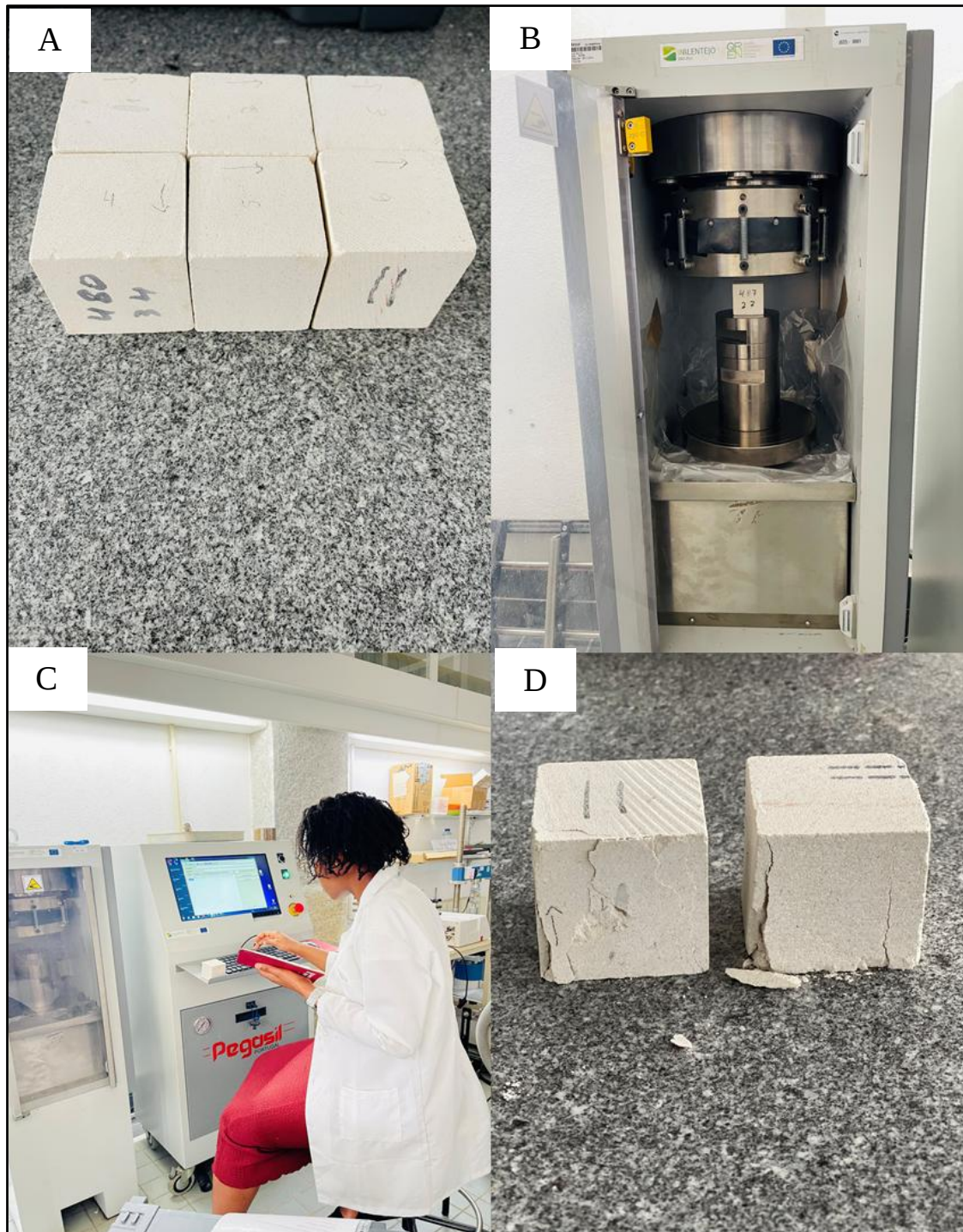


Figura 15: Etapas de realização do ensaio de resistência à compressão uniaxial em provetes cúbicos de calcário: (A) provetes devidamente identificados e preparados antes do ensaio; (B) posicionamento e alinhamento do provete na prensa Pegasil; (C) controlo instrumental e registo de parâmetros operacionais; (D) modo de falha e fratura dos provetes, após atingirem a carga de rotura.

3.2.4.3. Ensaio de resistência à flexão sob carga centrada

Os ensaios de resistência à flexão (σ_F), sob carga centrada, foram realizados de acordo com a norma EN 12372, utilizando uma prensa de flexão CEI-ZIPOR, equipada com célula de carga de 25 kN, resolução de leitura de 0,001 N e velocidade de carregamento constante de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s até à rotura. (EN 12372:2022 (**Figura 16**)). Tal como no ensaio anterior, a carga aplicada foi aplicada perpendicularmente aos planos de estratificação. Este ensaio permite avaliar a capacidade do material para resistir a esforços de flexão, sendo particularmente relevante em aplicações como revestimentos de fachadas, pavimentos, degraus de escadas e elementos estruturais delgados (Pires, 2021).

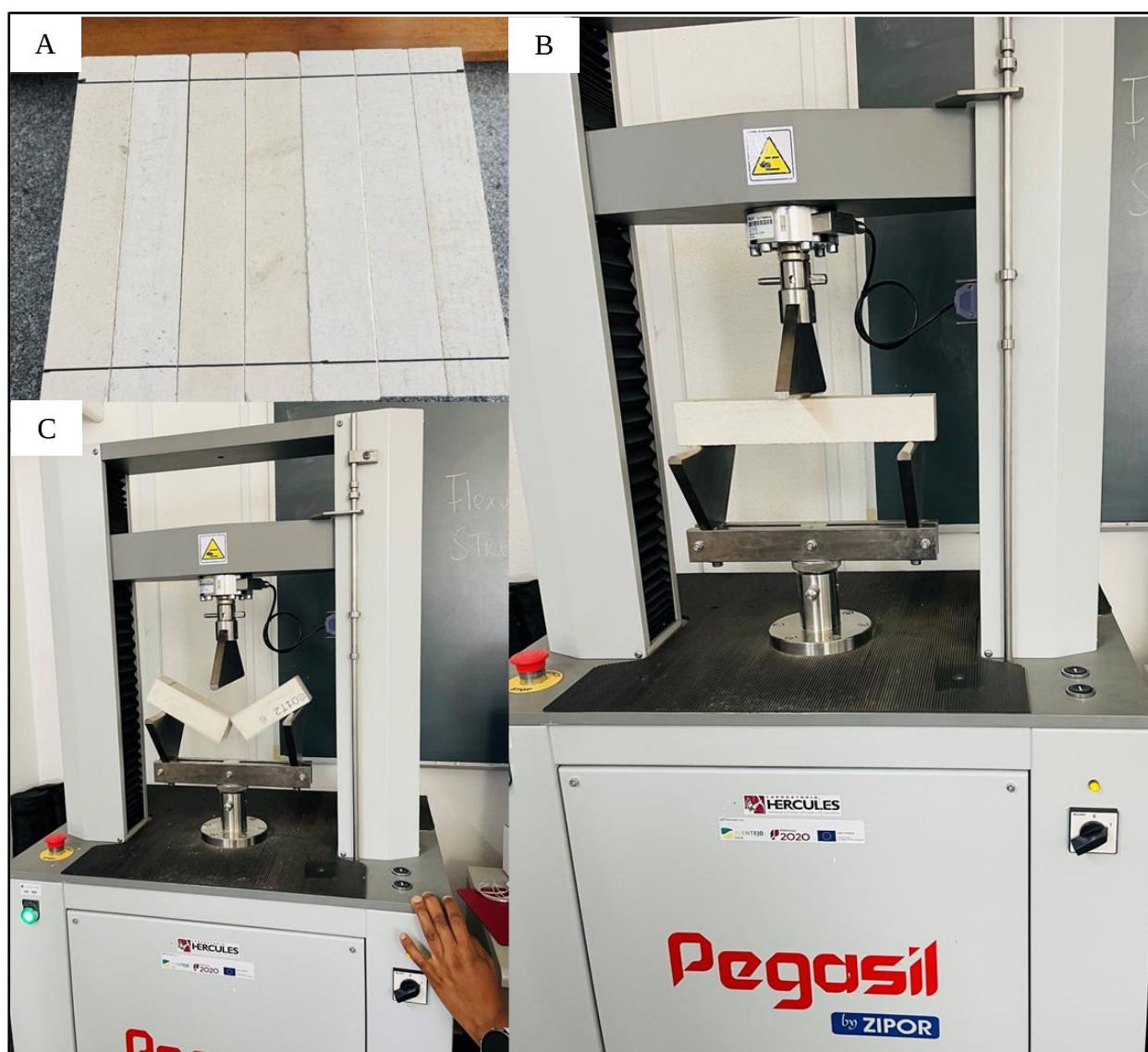


Figura 16: Sequência experimental do ensaio de resistência à flexão sob carga centrada: (A) provetes prismáticos de calcário preparados para o ensaio; (B) posicionamento do provete sobre os cutelos inferiores de suporte e alinhamento com o cutelo superior de aplicação de carga; (C) perfil de fratura característico por flexão.

3.2.4.4. Ensaio de carga de rotura ao nível do orifício de ancoragem

Os ensaios de carga de rotura em ancoragem foram conduzidos de acordo com a norma EN 13364, recorrendo a uma prensa CEI-ZIPOR, com célula de carga de 25 kN e resolução de leitura de 0,001 N. (EN 13364:2002). Para o efeito, foram executados 3 orifícios na lateral de cada placa de calcário, com recurso a broca diamantada sem impacto, com 10 mm de diâmetro e 30 mm de profundidade. Em cada orifício foram inseridas cavilhas de aço inoxidável, fixadas com cimento de elevada resistência CEM I 52,5 R (EN 197-1:2011) (**Figura 17**). Este ensaio permite avaliar a capacidade de fixação de sistemas de ancoragem, sendo particularmente relevante para aplicações em revestimentos de fachadas.



Figura 17: Ensaio de fixação mecânica por ancoragem: (A) placas de calcário preparadas com as cavilhas metálicas de fixação inseridas nos orifícios; (B) detalhe do modo de falha macroscópico na zona envolvente do orifício, evidenciando o lascamento troncocónico da pedra após a rotura; (C) montagem do ensaio na prensa, com dispositivo mecânico posicionado para aplicar a carga perpendicular ao eixo da cavilha.

CAPÍTULO 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, apresentam-se e discutem-se os resultados nos ensaios obtidos a partir da caracterização físico-mecânica das amostras de calcário branco. O principal objetivo consistiu em avaliar a eficácia do envelhecimento acelerado em câmara climática na simulação das alterações observadas em ambiente natural na Serra da Estrela. O programa experimental visou determinar o impacto dos ciclos térmicos e hídricos na integridade da rocha, desenhados com base na compressão temporal de dados meteorológicos reais colhidos *in situ*.

De forma a permitir uma análise clara, quantitativa e direta, os resultados obtidos são apresentados através de tabelas e gráficos comparativos estruturados por propriedade ensaiada. Para cada parâmetro avaliado (velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, resistência à compressão uniaxial, resistência à flexão e carga de rotura ao nível do orifício de ancoragem), cruzam-se diretamente os dados das amostras de referência (reference set/pré-teste) com os valores decorrentes do envelhecimento natural e os resultados obtidos nos ensaios acelerados, consoante o fator de compressão aplicado. Como critério metodológico de adequação científica para determinar o regime ideal de envelhecimento acelerado, estipulou-se uma margem de tolerância de até 10 % em relação à taxa de degradação real observada entre o estado de referência e o ensaio natural da Serra da Estrela ($CF = 1$). Esta abordagem permite determinar, de forma imediata, qual o fator de compressão que mais se aproxima da variação final observada no terreno.

Importa referir que a análise macroscópica visual (a olho nú) dos provetes, efetuada após o envelhecimento natural e acelerado, não revelou alterações evidentes nas características cromáticas e físicas do material. Registou-se, deste modo, a ausência macroscópica de descolorações induzidas pela oxidação de minerais metálicos ou degradação de inclusões endógenas.

4.1. Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassônicas

A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas constitui um indicador não destrutivo amplamente utilizado na avaliação qualitativa de alterações na integridade interna da pedra, sendo sensível ao desenvolvimento de microfissuras, aumento da porosidade e à degradação da ligação entre os minerais. De um modo geral, uma diminuição da velocidade traduz uma perda de continuidade do material e, conseqüentemente, um aumento do seu nível deterioração. Como já referido na **Secção 3.2.4.1**, por se tratar de um teste não destrutivo, foi possível monitorizar este parâmetro de forma sequencial ao longo de todas as etapas, desde o envelhecimento natural de campo e os respetivos fatores de compressão aplicados no envelhecimento acelerado.

Os resultados experimentais, sintetizados na **Tabela 2** e ilustrados na **Figura 18**, evidenciam uma redução generalizada da velocidade ultrassônica em todos os conjuntos de amostras após a submissão aos ensaios de envelhecimento. No entanto, a magnitude e a taxa percentual dessa quebra variam de forma distinta em função do regime cinético aplicado.

No estado inicial, o conjunto de referência exibiu uma velocidade média de 3927,00 m/s. Após a exposição ambiental real na Serra da Estrela ($CF = 1$), sem qualquer compressão temporal, registou-se um decréscimo absoluto de -224 m/s, o que representa uma taxa de degradação intrínseca de aproximadamente -6 %. Este comportamento traduz o efeito deletério dos ciclos térmicos e hídricos na integridade da matriz pétreia, induzindo tensões diferenciais entre os minerais constituintes que culminam na abertura de microfissuras intergranulares. Este desvio de -6 % constitui referência de comparação para com os restantes fatores de compressão.

Para o fator de compressão $CF = 2$, o material acusou a maior quebra percentual da velocidade, decrescendo de 4167,75 m/s para 3810,34 m/s. Este valor corresponde a uma redução de cerca de 9 %, o que representa uma taxa de degradação de 3,00 % superior à registada no ambiente natural. Estes dados sugerem que o ciclo de 12 horas conseguiu acelerar a cinética de alteração mecânica interna mantendo uma excelente proximidade com o padrão de dano de campo.

No ensaio correspondente ao $CF = 4$, observa-se uma atenuação na taxa de quebra. A velocidade média inicial de 4182,27 m/s decresce para 4014,06 m/s. Isto equivale a uma perda interna de -4 %. Quando confrontada com a taxa de campo, esta variação traduz um desvio absoluto de apenas 2,00 % em relação ao envelhecimento natural, denotando que o estreitamento do ciclo para 6 horas começou a impor limitações à propagação homogénea do dano hídrico no núcleo da rocha.

Relativamente ao CF = 6, verificou-se uma redução de -6 %, com a velocidade média a passar de 4050,19 m/s para 3813,22 m/s. Sob o ponto de vista comparativo direto, a taxa de degradação deste conjunto mimetizou perfeitamente a variação de -6 % obtida *in situ*, resultando num desvio estatístico nulo (0,00 %) na matriz de validação.

No que respeita à dispersão dos resultados, a análise estatística revela um aumento generalizado dos valores de desvio-padrão após a sujeição ao envelhecimento para todos os fatores de compressão analisados. Este incremento na dispersão reflete a heterogeneidade induzida pelo desenvolvimento assimétrico da microfissuração na matriz porosa do calcário. Apesar desta variabilidade ser expectável em materiais geológicos, a tendência de declínio da velocidade ultrassónica é estatisticamente consistente em todos os grupos amostrais.

Em suma, a monitorização por velocidade de ondas ultrassónicas confirma que todas as etapas de envelhecimento acelerado conduziram a uma perda de integridade interna do Calcário Branco. Entre as condições estudadas, o CF = 4 apresentou a menor taxa de degradação interna (-4 %), ao passo que o CF = 2 evidenciou o maior índice de degradação induzida (-9 %), posicionando-se como o regime mais dinâmico na simulação acelerada da fadiga estrutural da rocha.

Tabela 2: Valores médios da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, respetivos desvios-padrão e variação absoluta (ΔX) e percentual (taxa de degradação - $\Delta\%$) face ao estado de referência (pré-teste) para cada fator de compressão (CF).

Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassónicas (m/s)						
Estado das amostras	Resultado (pré-teste)	Desv. Padrão	Resultado (pós-teste)	Desv. Padrão	ΔX	$\Delta\%$
CF = 1 (Serra da Estrela)	3927,00	103,48	3703,00	154,70	-224	-6
CF = 2 (12 horas)	4167,75	91,33	3810,34	248,97	-357	-9
CF = 4 (6 horas)	4182,27	173,24	4014,06	218,61	-168	-4
CF = 6 (4 horas)	4050,19	75,00	3813,22	147,30	-237	-6

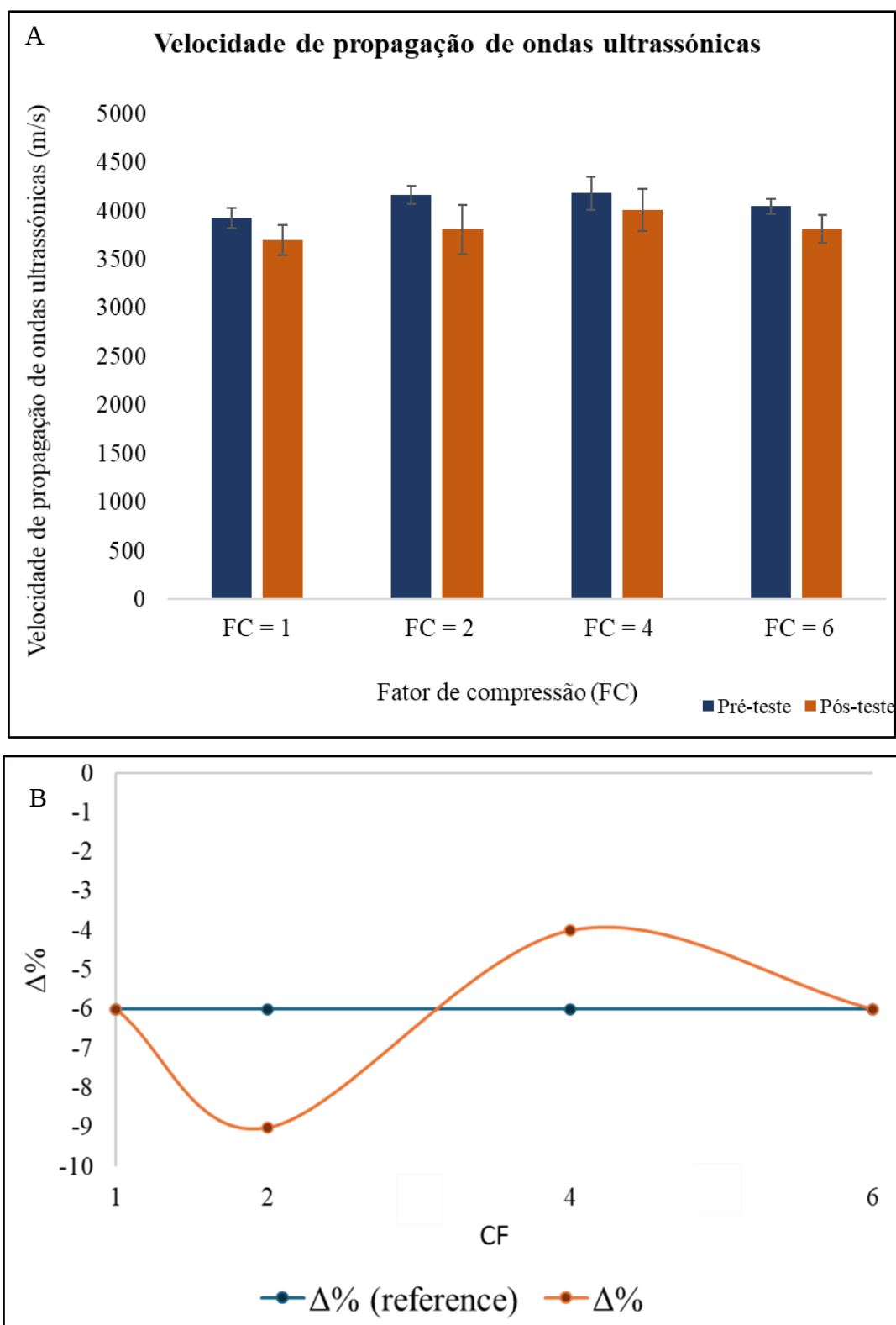


Figura 18: (A) Valores médios e respectivos desvios-padrão da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em função do fator de compressão (CF), evidenciando a taxa de degradação face ao estado de referência (pré-teste); (B) taxa de variação relativa ($\Delta\%$) da velocidade ultrassônica calculada para cada fator de compressão, com a linha horizontal a indicar o limiar basal de degradação obtido por exposição natural na Serra da Estrela.

4.2. Resistência à compressão uniaxial

A resistência à compressão uniaxial constitui uma das principais propriedades mecânicas utilizadas na avaliação do desempenho de materiais pétreos, permitindo quantificar diretamente a sua capacidade para suportar esforços compressivos e avaliar a estabilidade estrutural da rocha. A comparação sistemática entre os resultados obtidos (**Tabela 3 e Figura 19**) antes e após a sujeição aos ciclos de alteração permitiu avaliar com rigor a influência do envelhecimento na mecânica das amostras.

As amostras de referência (CF = 1), correspondentes ao envelhecimento na Serra da Estrela, apresentam uma diminuição da resistência média de 49,92 MPa para 43,46 MPa, o que corresponde a decréscimo de aproximadamente -13 %. Estes dados confirmam que a ação combinada dos agentes climáticos em ambiente natural induziu uma quebra efetiva na coesão intergranular da matriz mineralógica da rocha, estabelecendo a linha de base para o confronto com os ensaios acelerados.

Para o fator de compressão CF = 2, verifica-se uma redução mecânica ligeiramente mais pronunciada, com a resistência média a passar para 42,05 MPa após o ensaio, equivalente a uma perda de cerca de -16 %, comportamento que evidencia uma maior sensibilidade destas amostras ao processo de envelhecimento quando comparado com a condição natural. Quando correlacionada com a taxa de campo, esta variação traduz um desvio absoluto de apenas 3,00 % em relação ao envelhecimento natural na Serra da Estrela, comprovando a elevada fidelidade cinética deste fator de compressão na réplica do desgaste mecânico real.

O conjunto de amostras submetido ao CF = 4 registou a perda de desempenho mecânico mais acentuada. A resistência à compressão uniaxial média caiu de 49,92 MPa para 39,93 MPa, o que equivale a um decréscimo absoluto de -9,99 MPa e a uma taxa de degradação de cerca de -20 %. Face ao envelhecimento natural, este parâmetro acusou um desvio estatístico de 7,00 %. Este pico de degradação indica que a contração do ciclo para 6 horas gerou choques higrotérmicos excessivos, superando o limiar de fadiga elástica do material e induzindo a uma microfissuração sobreposta que distorce o padrão natural de alteração.

Em contrapartida, as amostras submetidas ao CF = 6 exibem um comportamento aparentemente mais favorável, com uma resistência média de 47,67 MPa. A perda mecânica observada foi de apenas -2,25 MPa, correspondente a uma redução da taxa de degradação de -5 % e resultando num desvio de 8,00 % face à taxa de campo.

Relativamente à variabilidade dos resultados, observa-se um aumento generalizado do desvio-padrão após o envelhecimento acelerado em todos os grupos analisados, refletindo uma perda de homogeneidade na resposta mecânica dos provetes provocada pela distribuição assimétrica das fendas de alteração. Este incremento da dispersão estatística é mais pronunciado nos conjuntos submetidos aos fatores de compressão $CF = 2$ e $CF = 6$.

Considerando exclusivamente a resistência à compressão uniaxial, verifica-se que o fator de compressão condiciona a magnitude da degradação mecânica do material. Entre os fatores estudados, o $CF = 4$ evidenciou o cenário de degradação artificial mais acentuada, enquanto o $CF = 6$ registou a menor perda de resistência.

Esta discrepância fundamenta-se na cinética de transferência de calor e de humidade no interior da pedra. No $CF = 4$, a duração dos ciclos permitiu a saturação hídrica completa e o desenvolvimento de gradientes térmicos profundos em toda a secção do provete, promovendo microfissuração intergranular difusa e severa por tensão diferencial entre grãos de calcite. Por sua vez, no $CF = 6$, a excessiva redução do tempo de cada patamar pode ter impedido o material de atingir o equilíbrio higrotérmico no seu núcleo. Devido à inércia térmica e à difusividade hídrica reduzida da matriz calcária, a alteração limitou-se às camadas superficiais, preservando a integridade estrutural do núcleo do provete e resultando numa perda mecânica global aparentemente menor.

Tabela 3: Valores médios da resistência à compressão uniaxial, respetivos desvios-padrão e variação absoluta (ΔX) e percentual (taxa de degradação - $\Delta\%$) face ao estado de referência (pré-teste) para cada fator de compressão (CF).

Resistência à compressão uniaxial (MPa)						
Estado das amostras	Resultado (pré-teste)	Desv. Padrão	Resultado (pós-teste)	Desv. Padrão	ΔX	$\Delta\%$
CF = 1 (Serra da Estrela)	49,92	3,42	43,46	3,93	-6,46	-13
CF = 2 (12 horas)	49,92	3,42	42,05	7,43	-7,87	-16
CF = 4 (6 horas)	49,92	3,42	39,93	4,94	-9,99	-20
CF = 6 (4 horas)	49,92	3,42	47,67	7,98	-2,25	-5

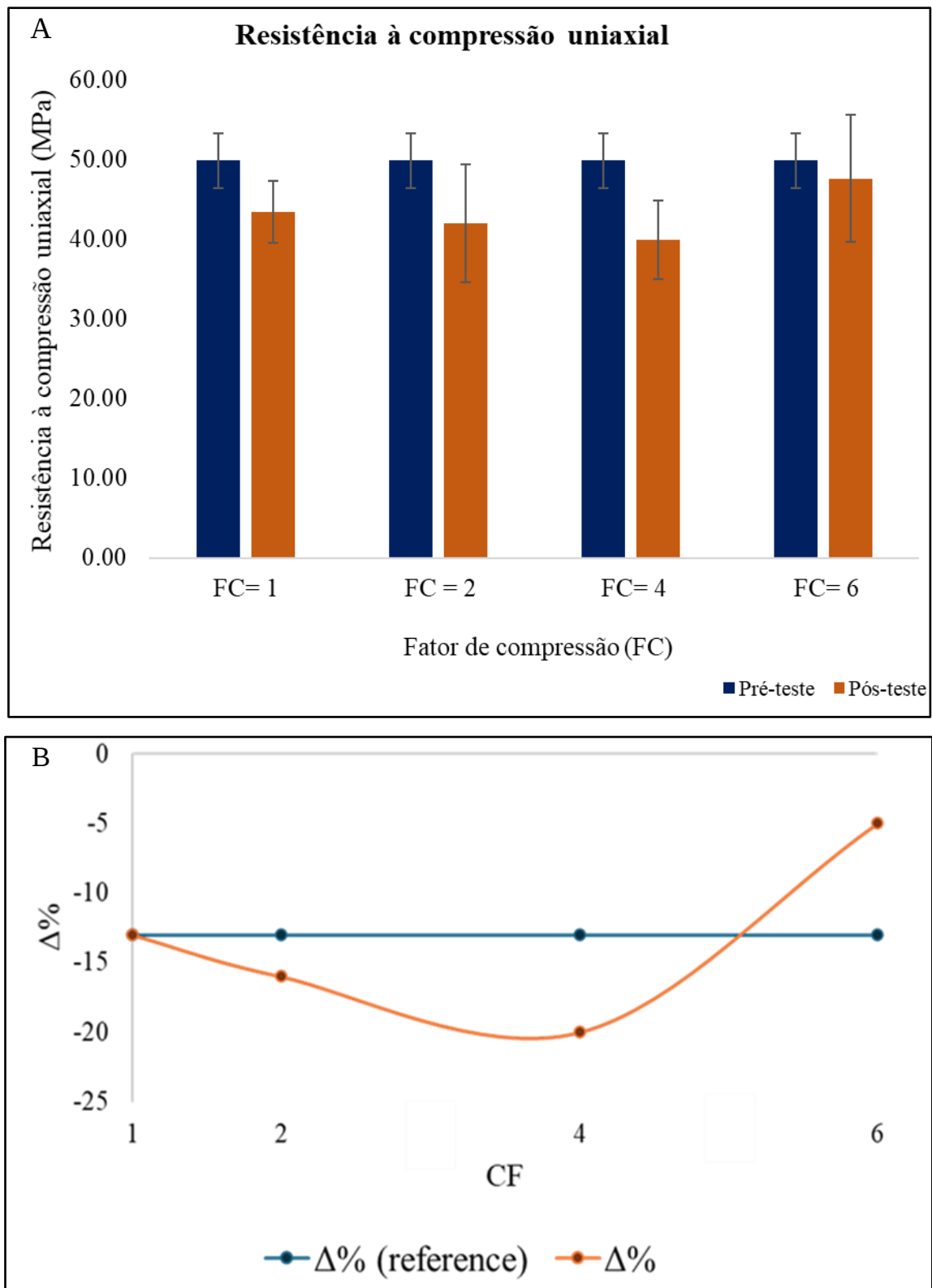


Figura 19: (A) Valores médios e respectivos desvios-padrão da resistência à compressão em função do fator de compressão (CF), evidenciando a taxa de degradação face ao estado de referência (pré-teste); (B) taxa de variação relativa ($\Delta\%$) da resistência à compressão uniaxial média calculada para cada fator de compressão, com a linha horizontal a indicar o limiar basal de degradação obtido por exposição natural na Serra da Estrela.

4.3. Resistência à flexão sob carga centrada

A resistência à flexão sob carga centrada constitui um importante indicador na caracterização do comportamento mecânico dos materiais pétreos de construção, uma vez que traduz a sua capacidade para resistir a esforços de tração indireta. Esta propriedade é particularmente sensível ao desenvolvimento de defeitos internos e à degradação da matriz coesiva intergranular do material, pelo que a sua avaliação permite analisar com rigor o impacto do envelhecimento acelerado no desempenho mecânico estrutural das amostras.

Os resultados apresentados na **Tabela 4** e ilustrados na **Figura 20** evidenciam uma redução da resistência à flexão em todos os conjuntos de amostras após envelhecimento. No entanto, a magnitude da degradação varia consoante o fator de compressão aplicado.

As amostras com o $CF = 1$, correspondentes ao envelhecimento natural, apresentam uma diminuição da resistência média de 9,15 MPa para 7,27 MPa, o que representa um decréscimo absoluto de -1,88 MPa, equivalente a uma taxa de degradação intrínseca de -21 %. Este resultado confirma que as solicitações climáticas de campo induziram um dano efetivo na coesão do calcário em estudo, estabelecendo o limiar basal para a validação dos ensaios em câmara climática.

Para o fator de compressão $CF = 2$, verifica-se a maior perda de resistência à flexão entre todos os grupos analisados. A resistência média diminuiu para 7,03 MPa, correspondendo a uma redução de -23 %. Quando confrontada com a taxa do envelhecimento natural (-21 %), esta variação traduz um desvio absoluto de apenas 2,00 % na matriz de convergência global. É crucial salientar que, apesar de acusar a maior degradação percentual, este conjunto revelou uma atenuação drástica na dispersão dos resultados, com o desvio-padrão a contrair de 1,10 MPa para 0,52 MPa. Esta estabilização estatística demonstra que a compressão temporal para 12 horas induziu um padrão de fissuração homogéneo e altamente replicável na pedra.

As amostras submetidas ao envelhecimento com o $CF = 4$ apresentam o comportamento mais favorável. Após o envelhecimento acelerado, a resistência média fixou-se em 8,12 MPa, correspondendo a uma redução de apenas -1,03 MPa e uma taxa de -11 %, sendo a menor perda registada entre todos os fatores de compressão. Contudo, ao cruzar este dado com a referência de campo (-21 %), estas amostras acusam um desvio absoluto excessivo de 10,00 %. Do ponto de vista físico-mecânico, este desvio sugere que o ciclo de 6 horas poderá ter sido insuficiente

no que respeita ao tempo de permanência térmica e hídrica. Põe-se a hipótese de que este intervalo não tenha permitido a penetração e saturação completas do núcleo dos provetes pelas frentes de alteração, o que resultaria num eventual sub-envelhecimento artificial passível de mascarar a degradação do material.

Relativamente ao fator de compressão $CF = 6$, observa-se uma resistência média final de 7,64 MPa, traduzindo-se numa quebra de aproximadamente -17 %. Este desempenho posiciona-se num patamar intermédio entre os fatores de compressão analisados, exibindo uma taxa de degradação inferior à observada para o $CF = 1$ e $CF = 2$, mas superior à registada para o $CF = 4$. Face ao ambiente natural, o desvio absoluto fixou-se em -4,00 % (indicando uma subestimação da quebra real). Paralelamente, verificou-se uma contração do desvio-padrão pós-teste para 0,61 MPa, sugerindo uma homogeneização induzida pela elevada frequência cíclica.

De uma forma geral, os dados confirmam que o envelhecimento acelerado debilita a resistência à flexão em todos os cenários. Contudo, a intensidade do dano é fortemente dependente do fator de compressão aplicado. O $CF = 4$ foi o que preservou a maior fração da propriedade mecânica (-11 %), enquanto o $CF = 2$ evidenciou a resposta de desgaste mais acentuada e rigorosa (-23 %)

O comportamento registado na resistência à flexão sob carga centrada demonstra que as tendências observadas na compressão uniaxial não se replicam de forma linear entre ensaios destrutivos. Enquanto na caracterização por resistência à compressão uniaxial o $CF = 6$ acusou a menor taxa de quebra (-5 %), na resistência à flexão sob carga centrada essa estabilidade aparente transferiu-se para o conjunto submetido ao $CF = 4$ (-11 %). Esta divergência no comportamento mecânico indica que a respostas do calcário aos ciclos de envelhecimento varia consoante o estado de tensão induzido. A resistência à flexão, ao avaliar a resposta à tração indireta na fibra inferior do provete, revela-se significativamente mais sensível ao aparecimento de microfissuração superficial e ao enfraquecimento das ligações intergranulares na periferia do material do que a resistência à compressão uniaxial, a qual reflete o comportamento do volume global do provete. Este fenómeno reforça a necessidade de realizar uma avaliação integrada e conjunta de todas as propriedades físico-mecânicas antes de validar qual o fator de compressão temporal mais representativo para modelos preditivos de durabilidade.

Tabela 4: Valores médios da resistência à flexão, respectivos desvios-padrão e variação absoluta (ΔX) e percentual (taxa de degradação - $\Delta\%$) face ao estado de referência (pré-teste) para cada fator de compressão (CF).

Resistência à flexão sob carga centrada (MPa)						
Estado das amostras	Resultado (pré-teste)	Desv. Padrão	Resultado (pós-teste)	Desv. Padrão	ΔX	$\Delta\%$
CF = 1 (Serra da Estrela)	9,15	1,10	7,27	1,33	-1,88	-21
CF = 2 (12 horas)	9,15	1,10	7,03	0,52	-2,12	-23
CF = 4 (6 horas)	9,15	1,10	8,12	1,29	-1,03	-11
CF = 6 (4 horas)	9,15	1,10	7,64	0,61	-1,51	-17

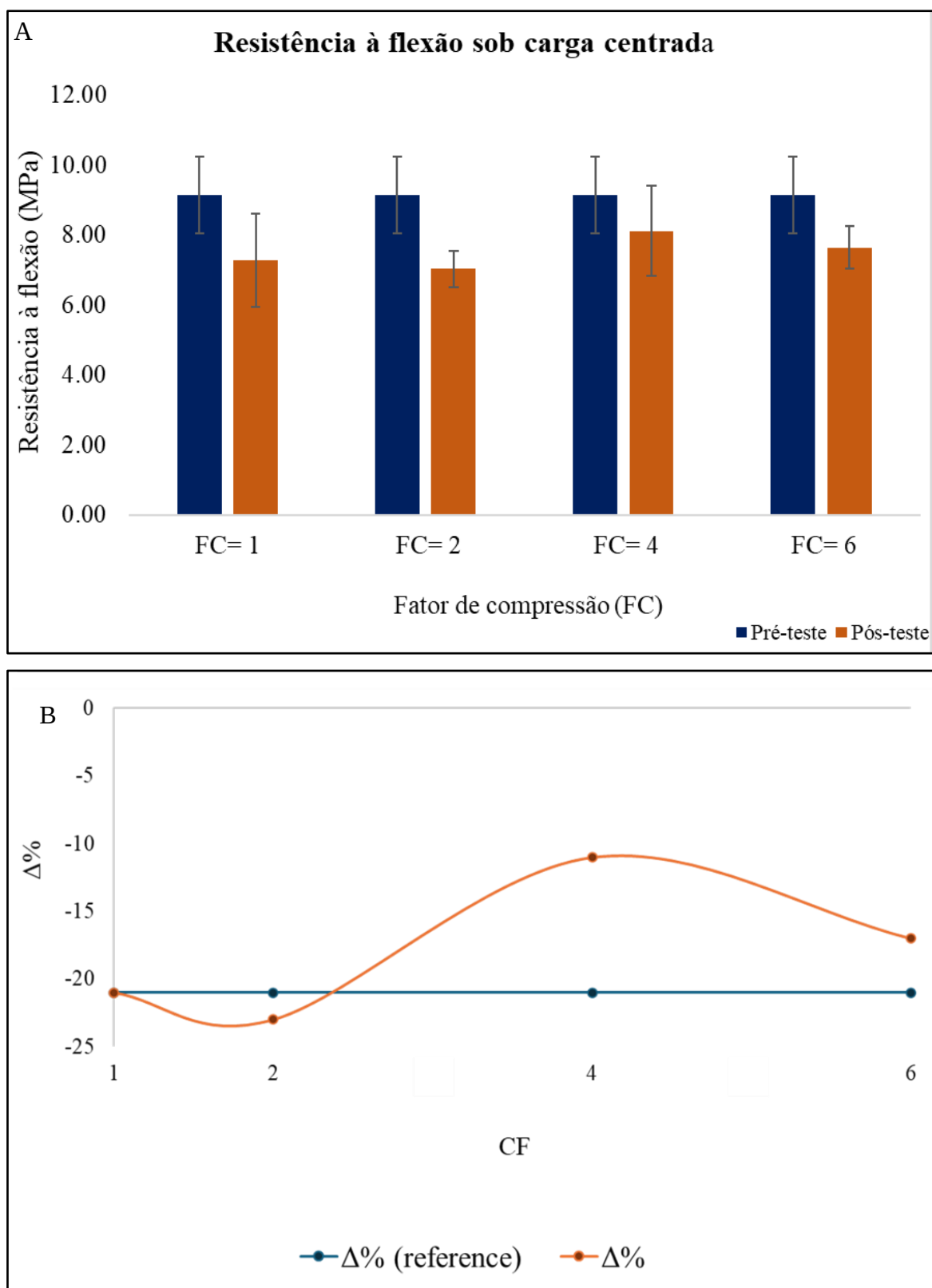


Figura 20: (A) Valores médios e respectivos desvios-padrão da resistência à flexão em função do fator de compressão (CF), evidenciando a taxa de degradação face ao estado de referência (pré-teste); (B) taxa de variação relativa ($\Delta\%$) da resistência à flexão média calculada para cada fator de compressão, com a linha horizontal a indicar o limiar basal de degradação obtido por exposição natural na Serra da Estrela.

4.4. Carga de rotura ao nível do orifício de ancoragem

A carga de rotura ao nível do orifício de ancoragem constitui um parâmetro crítico na avaliação de rochas aplicadas em fachadas ventiladas ou revestimentos fixos, uma vez que avalia a capacidade do material para resistir e transferir as solicitações pontuais transmitidas pelos elementos de fixação. Esta propriedade está estritamente ligada à tenacidade à fratura e à coesão da matriz porosa do calcário em zonas periféricas perfuradas, locais onde a concentração de tensões é intrinsecamente superior. A comparação dos resultados obtidos antes e após o envelhecimento acelerado (**Tabela 5 e na Figura 21**) permite determinar o impacto real dos ciclos de envelhecimento no desempenho estrutural do material.

No estado de referência, o calcário branco exibiu uma carga de rotura média de 1571,20 N. Após o período de exposição natural de campo na Serra da Estrela ($CF = 1$), sem compressão temporal, a capacidade resistente média decresceu para 1221,11 N, o que se traduz num decréscimo absoluto de -350,09 N e numa taxa de degradação de -22 %. Este decréscimo confirma que a dinâmica climática em ambiente real gerou fadiga mecânica localizada em torno da perfuração, servindo este valor de limiar de base natural para aferir a exatidão dos fatores de compressão aplicados na câmara climática.

Nos ensaios subsequentes com o $CF = 2$, observou-se uma intensificação controlada do dano, com a carga de rotura média a fixar-se em 1165,80 N no pós-teste. Esta quebra representa uma perda relativa de -26 %. Quando confrontada com a taxa natural de referência (-22 %), esta variação resulta num desvio absoluto de apenas 4,00 % na matriz de validação. Paralelamente à perda mecânica, registou-se uma contração expressiva do desvio-padrão, que passou de 349,40 N para 237,78 N. Esta redução da dispersão estatística indica que o ciclo de 12 horas induziu uma frente de alteração higrotérmica uniforme na vizinhança do orifício, validando a estabilidade preditiva do modelo.

O conjunto de provetes submetido ao $CF = 4$ acusou a maior degradação da ancoragem de todo o programa experimental. A carga média de rotura decresceu de forma acentuada para 1085,27 N, o que equivale a uma perda absoluta de -485,93 N e a uma taxa de quebra de -31 %. Face ao envelhecimento natural, nota-se um desvio absoluto de 9,00 %. Apesar de este fator de compressão apresentar o menor desvio-padrão pós-teste (130,59 N), denotando uma elevada homogeneidade na resposta, a magnitude da perda confirma que a aceleração temporal para ciclos de 6 horas gerou tensões diferenciais excessivas e sobrepostas, induzindo microfissuras localizadas que ultrapassam o regime de desgaste real do terreno.

Em contrapartida, as amostras submetidas ao CF = 6 registam o comportamento teoricamente menos gravoso, fixando uma carga de rotura média final de 1251,62 N, o que equivale a uma taxa de degradação de apenas -20 %. Quando comparado com o desgaste de campo, observa-se um desvio absoluto de 2,00 %. O desvio-padrão pós-teste fixou-se em 382,59 N, indicando que a variabilidade intrínseca do material se manteve praticamente inalterada.

De forma geral, o envelhecimento acelerado debilita a integridade do calcário branco em torno das fixações para todos os cenários laboratoriais. Contudo, a taxa de perda de desempenho é diretamente governada pelo fator de compressão aplicado. O regime CF = 6 exibiu a menor taxa de quebra isolada (-20 %), ao passo que o regime CF = 4 induziu o cenário de dano local mais severo (-31 %).

***Tabela 5:** Valores médios da rotura por ancoragem, respetivos desvios-padrão e variação absoluta (ΔX) e percentual (taxa de degradação - $\Delta\%$) face ao estado de referência (pré-teste) para cada fator de compressão (CF).*

Rotura ao nível do orifício de Ancoragem (N)						
Estado das amostras	Resultado (pré-teste)	Desv. Padrão	Resultado (pós-teste)	Desv. Padrão	ΔX	$\Delta\%$
CF = 1 (Serra da Estrela)	1571,20	349,40	1221,11	390,96	-350,09	-22
CF = 2 (12 horas)	1571,20	349,40	1165,80	237,78	-405,40	-26
CF = 4 (6 horas)	1571,20	349,40	1085,27	130,59	-485,93	-31
CF = 6 (4 horas)	1571,20	349,40	1251,62	382,59	-319,58	-20

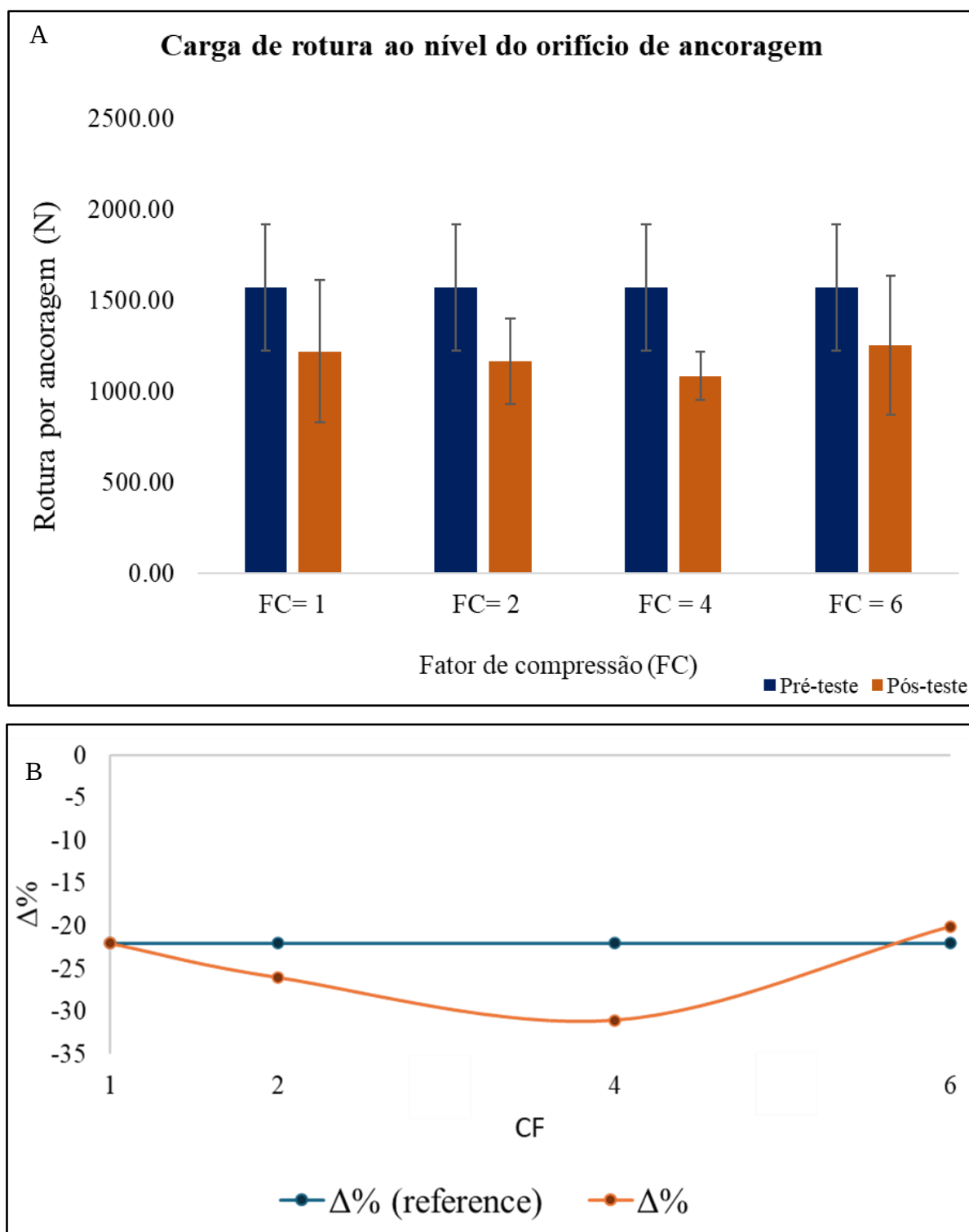


Figura 21: (A) Valores médios e respetivos desvios-padrão da rotura por ancoragem em função do fator de compressão (CF), evidenciando a taxa de degradação face ao estado de referência (pré-teste); (B) taxa de variação relativa ($\Delta\%$) da resistência de rotura ao nível de orifício por ancoragem média calculada para cada fator de compressão, com a linha horizontal a indicar o limiar basal de degradação obtido por exposição natural na Serra da Estrela.

Após a caracterização e discussão individualizada do impacto dos processos de alteração em cada vetor físico-mecânico do Calcário Branco, procedeu-se a uma abordagem analítica integrada de forma a correlacionar a cinética de degradação dos ensaios laboratoriais acelerados com a assinatura real de campo registada na Serra da Estrela. Para operacionalizar esta síntese e permitir uma avaliação comparativa direta do desempenho dos regimes higrotérmicos, estruturou-se uma matriz de variação absoluta das taxas de degradação, calculada através da diferença algébrica direta entre os desvios percentuais do envelhecimento artificial e do envelhecimento natural ($\Delta\%_{\text{Acelerado}} - \Delta\%_{\text{Natural}}$). Esta matriz de síntese (**Tabela 6**) condensa a variabilidade dos dados através do cálculo de médias por propriedade ensaiada (análise vertical) e médias por fator de compressão aplicado (análise horizontal).

A avaliação das médias obtidas por propriedade demonstra comportamentos marcadamente distintos entre os métodos de caracterização elástica e mecânica. A velocidade de propagação de ondas ultrassónicas consolidou-se como o parâmetro de maior fidelidade preditiva e menor dispersão estatística de todo o programa experimental, acusando uma variação média global de apenas 1,67 % face à realidade de campo. Este facto reitera a eficácia da monitorização elástica não destrutiva em refletir, com elevada estabilidade, o desenvolvimento progressivo da microfissuração interna da rocha. Em contrapartida, os resultados obtidos através de ensaios mecânicos de carácter destrutivo exibiram variações médias acumuladas superiores, fixando-se em 6,00 % para a resistência à compressão uniaxial, 5,33 % para a resistência à flexão sob carga centrada e 5,00 % para a carga de rotura ao nível do orifício de ancoragem. Esta forte proximidade dimensional nos desvios mecânicos valida a consistência macroestrutural do material quando sujeito a tensões severas de fadiga por stress térmico e hídrico.

Sob a perspetiva vetorial dos regimes cinéticos impostos na câmara climática, a análise horizontal das linhas dita a determinação do regime ideal sobre a viabilidade de cada fator de compressão:

- **CF = 2 (ciclos de 12 horas):** revelou a maior aderência matemática e equivalência metodológica em relação ao envelhecimento natural, apresentando a menor variação média global (3,00 %). Os seus desvios sectoriais mantiveram-se confinados numa faixa estreita entre 2,00 % (na resistência à flexão) e 4,00 % (na ancoragem), o que comprova que a compressão temporal para ciclos de 12 horas consegue acelerar

eficazmente o desgaste sem desvirtuar os mecanismos físicos de alteração natural da pedra.

- **CF = 4 (ciclos de 6 horas):** evidenciou um afastamento acentuado face aos dados da Serra da Estrela, com a variação média global a fixar-se nos 7,00 %. Neste cenário, registaram-se desvios críticos de 10,00 % na resistência à flexão e de 9,00 % na ancoragem. Estes picos demonstram que a redução do ciclo para 6 horas induziu gradientes térmicos e higrométricos severos, gerando um dano mecânico incremental sobreposto que ultrapassa o padrão do ambiente real.
- **CF = 6 (ciclos de 4 horas):** apresentou uma variação média global aparente de 3,50 %. Contudo, o cruzamento horizontal dos dados revela uma resposta instável e assimétrica, oscilando entre um desvio nulo (0,00 %) na velocidade de propagação de ondas ultrassónicas e uma variação de 8,00 % na resistência à compressão uniaxial. Como verificado nas discussões precedentes, este comportamento decorre da inércia térmica e reduzida difusidade hídrica da matriz, onde a excessiva frequência dos ciclos impediu a saturação e o equilíbrio higrotérmico do núcleo dos provetes, mascarando a degradação real e inviabilizando a sua aplicação como modelo preditivo linear.

Tabela 6: Matriz de variação absoluta das taxas de degradação (%) entre o envelhecimento acelerado e o envelhecimento natural.

Variação da degradação artificial em relação à degradação natural					
Fator de compressão (CF)	Ultrassom	Compressão	Flexão	Ancoragem	Média por CF
CF = 2 (12 horas)	3,00 %	3,00 %	2,00 %	4,00 %	3,00 %
CF = 4 (6 horas)	2,00 %	7,00 %	10,00 %	9,00 %	7,00%
CF = 6 (4 horas)	0,00 %	8,00 %	4,00 %	2,00 %	3,50 %
Média por propriedade mecânica	1,67 %	6,00 %	5,33 %	5,00 %	-

No entanto, a determinação do regime ideal de envelhecimento para a criação de um modelo preditivo em engenharia de materiais não se esgota na sua precisão matemática, exigindo uma análise ponderada entre a equivalência técnica e a viabilidade económica da sua aplicação industrial. Sob este prisma, embora o regime $CF = 2$ (ciclos de 12 horas) apresente a maior aderência aos dados de campo (3,00 % de desvio médio), a sua transposição para o contexto empresarial revela-se menos vantajosa sob o ponto de vista operacional. Atendendo a que este fator comprime o tempo real em apenas metade (fator de aceleração de 2x), o seu uso continuado na indústria poderá acarretar custos operacionais proibitivos, consumo energético excessivo e prazos de resposta pouco compatíveis com a dinâmica do mercado da pedra natural. Perante esta limitação logística, o regime $CF = 4$ (ciclos de 6 horas), apesar de induzir desvios mecânicos superiores (7,00 % de média global), surge como um candidato de elevado interesse comercial para o setor produtivo, uma vez que quadruplica a velocidade do ensaio em até 4 vezes, reduzindo para metade a duração e os custos do processo de caracterização face ao $CF = 2$. Deste modo, a escolha do fator de compressão definitivo em ambiente industrial configura um clássico problema de otimização em engenharia (*trade-off*): sacrifica-se uma margem controlada de precisão micromecânica em prol de um ganho drástico na eficiência temporal e financeira do ensaio.

Em suma, os resultados demonstram que não existe um fator de compressão universal capaz de replicar de forma perfeita o comportamento de todas as propriedades estudadas. Pelo contrário, a resposta do Calcário Branco ao envelhecimento acelerado revelou-se dependente da propriedade física ou mecânica analisada, evidenciando assinaturas de degradação distintas consoante o estado de tensão e o método de ensaio considerado.

CAPÍTULO 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O comportamento de materiais pétreos quando sujeitos a processos de alteração ambiental está intrinsecamente ligado à sua natureza mineralógica e características texturais de base. O Calcário Branco Estremenho, material estudado neste trabalho, é amplamente valorizado no setor da pedra natural pelas suas qualidades estéticas e versatilidade construtiva. Esta pedra apresenta uma matriz predominantemente carbonatada e uma porosidade aberta média de $12,7 \pm 0,76$ % (Lisci et al., 2024), o que lhe confere uma sensibilidade aos gradientes termo-higrométricos. A presença desta rede porosa, aliada aos fenómenos de dilatação e contração térmica diferencial entre os grãos minerais de calcite da matriz (Lisci et al., 2024), promove o desenvolvimento de micro-tensões internas quando o material é exposto a ciclos de choque térmico e hídrico.

Deste modo, compreender a cinética de degradação deste calcário sob condições reais e laboratoriais revela-se crucial para fundamentar a sua seleção técnica e prever a sua durabilidade em aplicações da engenharia civil, tais como revestimentos de fachadas ventiladas.

A presente dissertação teve como propósito fundamental avaliar a durabilidade do Calcário Branco Estremenho, contribuindo para a sua futura modelação, através do confronto sistemático entre o envelhecimento natural de campo, decorrido no ambiente de montanha da Serra da Estrela, e diferentes regimes cinéticos de envelhecimento acelerado em câmara climática. Os parâmetros de configuração para a simulação na câmara climática foram obtidos a partir de dados reais de uma estação meteorológica local, sendo os ciclos comprimidos através de fatores de aceleração temporal previamente definidos ($CF = 2, 4$ e 6). A parametrização de câmaras climáticas a partir de séries temporais meteorológicas reais é uma abordagem ainda pouco frequente na literatura, constituindo um contributo metodológico relevante para a simulação de ciclos de aquecimento-arrefecimento e congelamento-descongelamento.

Os resultados integrados obtidos ao longo deste programa experimental permitem extrair as seguintes conclusões:

- **Previsão da degradação da pedra:** os resultados obtidos sugerem que os ensaios de degradação acelerada, concebidos segundo a metodologia de compressão temporal, apresentam um elevado potencial para refletir as tendências de perda de desempenho físico e mecânico no Calcário Branco Estremenho, nas condições estudadas. Esta

equivalência comportamental foi observada nos quatro parâmetros avaliados: velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, resistência à compressão uniaxial, resistência à flexão sob carga centrada e carga de rotura ao nível do orifício de ancoragem.

- **Eficiência do teste e aceleração temporal:** o modelo baseado na compressão temporal evidenciou uma elevada eficiência temporal e cinemática. A simulação laboratorial em câmara climática permitiu projetar um regime de envelhecimento acelerado com uma redução na duração dos ciclos de até 83 % no fator de compressão máximo ($CF = 6$, onde o ciclo de 24 horas foi comprimido para 4 horas). Este regime permitiu obter reduções no desempenho mecânico aproximadas às registadas na exposição ambiental real de campo, comprimindo a resposta a 127 dias de meteorização natural na Serra da Estrela para menos de um mês de ensaios em câmara climática.
- **Precisão variável e dependência do estado de tensão:** a exatidão da estimativa demonstrou uma dependência direta em relação à propriedade em análise, confirmando a inexistência de um fator de compressão universal. A metodologia mostrou-se altamente precisa e com reduzida dispersão para a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (caracterização elástica não destrutiva, com desvio médio global de apenas 1,67 %), registando, em contrapartida, variações ligeiramente superiores nos ensaios destrutivos, nomeadamente na resistência à compressão uniaxial (6,00 % de desvio). Este comportamento confirma que a sensibilidade do material varia consoante o estado de tensão induzido (tração indireta vs. compressão pura).
- **Controlo da variação e limiar de aceitação:** apesar da variabilidade intrínseca das propriedades mecânicas e da precisão flutuante entre parâmetros, a simulação acelerada comprovou a adequação do modelo para a determinação de tendências. A variação absoluta máxima registada entre a exposição natural de campo e a simulação artificial acelerada não ultrapassou o limiar crítico dos 10,00 % em nenhuma das propriedades analisadas, fixando-se o pico em 10,00 % de desvio na resistência à flexão sob carga centrada e em 9,00 % na rotura do orifício no nível de ancoragem.
- **O Compromisso e trade-off de engenharia:** Sob uma perspetiva estritamente metodológica, o regime $CF = 2$ (ciclos de 12 horas) foi o que apresentou a menor variação face aos dados de campo (3,00 % de desvio médio). Contudo, a sua aplicação prática revela-se pouco viável para o setor produtivo, uma vez que exigiria prazos e custos muito elevados para simular ciclos de vida longos. Perante esta limitação

logística, o regime $CF = 4$ (ciclos de 6 horas) estabelece o compromisso ideal para a indústria da pedra ornamental; embora induza desvios ligeiramente superiores (7,00 %), otimiza drasticamente a eficiência financeira e temporal do ensaio, tornando comercialmente viável a estimativa da durabilidade desde que ponderados os devidos coeficientes de segurança.

Trabalhos futuros

Com o intuito de dar continuidade à investigação desenvolvida e suprir as limitações inerentes ao horizonte temporal e analítico deste trabalho, desenham-se algumas linhas estratégicas fundamentais para investigações subsequentes.

Revela-se fundamental assegurar a continuidade da monitorização das amostras expostas em ambiente natural na Serra da Estrela por um período mais prolongado, idealmente compreendido entre um a dois anos, cobrindo ciclos sazonais completos de primavera e verão de forma a consolidar a robustez dos modelos preditivos e aferir a estabilidade da convergência linear a longo prazo.

Para fundamentar diretamente os mecanismos físicos de degradação sugeridos neste estudo, importa incorporar caracterizações microestruturais de microscopia eletrónica de varredura (MEB/SEM), porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) e medições de absorção de água por capilaridade pós-ensaio, permitindo correlacionar as perdas mecânicas macroscópicas com a evolução da microfissuração intergranular na matriz do calcário.

Recomenda-se igualmente a instrumentação dos provetes com sensores internos de temperatura e humidade durante os ciclos em câmara climática para mapear a frente de alteração e os tempos de permanência térmica no núcleo, aliada à aplicação de ferramentas de estatística inferencial sobre amostragens alargadas, isolando a degradação induzida da variabilidade natural inerente ao material.

Considera-se ainda relevante a incorporação de modelos de previsão da degradação dos materiais com base nas projeções atuais de alterações climáticas. Ajustar as configurações da câmara climática para simular cenários meteorológicos futuros, tais como o aumento da frequência de amplitudes térmicas extremas, novos padrões de humidade relativa do ar ou a alteração na recorrência dos ciclos de gelo-degelo em zonas de altitude, será crucial para antecipar o impacto do aquecimento global na perda de desempenho físico e mecânico do edificado a longo prazo.

Por fim, propõe-se o alargamento desta metodologia de fatores de compressão a múltiplos provetes da mesma variedade e a outras litologias ornamentais, como granitos, basaltos, xistos, de modo a testar a aplicabilidade, a reprodutibilidade e a universalidade do modelo preditivo em matrizes com diferentes características: textura, porosidade e coeficientes de expansão térmica mineralógica.

Referências bibliográficas

- Almeida, C., Mendonça, J. J. L., Jesus, M. R., & Gomes, A. J. (2000). *Sistemas aquíferos de Portugal Continental*. Instituto da água.
- Alves, C., Figueiredo, C., & Sanjurjo-Sánchez, J. (2020). Rock features and alteration of stone materials used for the built environment: A review of recent publications on ageing tests. *Geosciences*, 10(3), 91. <https://doi.org/10.3390/geosciences10030091>
- Alves, T. M., Manuppella, G., Gawthorpe, R. L., Hunt, D. W., & Monteiro, J. H. (2003). The depositional evolution of diapir- and fault-bounded rift basins: examples from the Lusitanian Basin of West Iberia. *Sedimentary Geology* 162(3), 273-303. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(03\)00155-6](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(03)00155-6)
- Azerêdo, A. C. (1998). Geometry and facies dynamics of Middle Jurassic Carbonate ramp sandbodies, West-Central Portugal. In V. P. Wright & T. P. Burchette (Eds.), *Carbonate ramps* 149, (pp. 281-314). Geological Society Special Publication of London. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1999.149.01.14>
- Azerêdo, A. C. (2007). Formalização da litostratigrafia do Jurássico Inferior e Médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica). *Comunicações Geológicas*, 94, 29-51.
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5, 1–12. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Bellopede, R., Castelletto, E., & Marini, P. (2016). Ten years of natural ageing of calcareous stones. *Engineering Geology*, 211, 19-26. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.06.015>
- Benavente, D., García del Cura, M. A., Fort, R., & Ordóñez, S. (2004). Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *Engineering Geology*, 74(1-2), 113-127. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.03.005>
- Bracci, S., & Melo, M. J. (2003). Correlating natural ageing and Xenon irradiation of paraloid B72 applied on stone. *Polymer Degradation and Stability*, 80, 533-541. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(03\)00037-5](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(03)00037-5)
- Bragg, W.L. 1913. The structure of some crystals as indicated by their diffraction of X-rays. *In Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 17, 43–57.

- Brimblecombe, P. (Ed.). (2003). *The effects of air pollution on the built environment* (Vol. 2). Imperial College Press.
- Carvalho C., Silva, Z., & Simão, J. (2018). Alterações superficiais em calcários expostos a nevoeiro salino. *Comunicações Geológicas*, 105(1), 91-99. https://www.lneg.pt/wp-content/uploads/2020/03/09_CG16-11-1111_Cristina-Carvalho.pdf
- Carvalho, J. M. F. (2018). Jointing patterns and tectonic evolution of the Maciço Calcário Estremenho, Lusitanian Basin, Portugal. *Journal of Structural Geology*, 110, 155-171. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.03.004>
- Carvalho, J. M. F., & Lisboa, J. V. (2018). Ornamental stone potential areas for land use planning: A case study in a limestone massif from Portugal. *Environmental Earth Sciences*, 77, 206. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7382-x>
- Crewdson, M., (2011). Outdoor weathering must verify accelerated testing. *Society of Plastics Engineers*.
- Crucho J., Picado-Santos, L., Neves, J., Capitão, S., & Al-Qadi, I. L. (2020). Técnico accelerated ageing (TEAGE) – A new laboratory approach for bituminous mixture ageing simulation. *International Journal of Pavement Engineering*, 21, 753-765. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1508845>
- Duarte, M. (2019-2020). Gestão sustentável da indústria extrativa no Parque Natural das Serras de Aire e Candeeiros. Rochas ornamentais. *Boletim de Minas*, 54, 51-57. Direção-Geral de Energia e Geologia. <https://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/29310>
- Dunham, R. J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In W. E. Ham (Ed.), *Classification of carbonate rocks* (Memoir 1, pp. 108-121). American Association of Petroleum Geologists.
- Eder, G. C., Voronko, Y., Dimitriadis, S., Knöbl, K., Újvári, G., Berger, K. A., Halwachs, M., Neumaier, L., & Hirschl, C. (2019). Climate specific accelerated ageing tests and evaluation of ageing induced electrical, physical, and chemical changes. *Progress in Photovoltaics: Research and applications*, 27, 934–949. <https://doi.org/10.1002/pip.3090>
- Fitzner, B., & Heinrichs, K. (2002). Damage diagnosis on stone monuments – Weathering forms, damage categories and damage indices. In R. Prikryl & H. A. Viles (Eds.), *Understanding and Managing of Stone Decay* (pp. 11-56). Karolinum Press.

- Folk, R. L. (1959). Practical petrographic classification of limestones. *AAPG Bulletin*, 43(1), 1-38.
- Grossi, C. M., Brimblecombe, P., & Harris, I. (2007). Predicting long term freeze–thaw risks on Europe built heritage and archaeological sites in a changing climate. *Science of the Total Environment*, 377, 273-281. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.02.014>
- Jelle, B. P. (2012). Accelerated climate ageing of building materials, components and structures in the laboratory. *Journal of Materials Science*, 47, 6475-6496. <http://doi.org/10.1007/s10853-012-6349-7>
- Kampragkou, P., Kamperidou, V., & Stefanidou, M. (2024). Evaluation of hydrothermally treated wood fibre performance in cement mortars. *Fibers*, 12(3) 21. <https://doi.org/10.3390/fib12030021>
- Kullberg, J. C., Rocha, R. B., Soares, A. F., Rey, J., Terrinha, P., Azerêdo, A. C., Callapez, P., Duarte, L. V., Kullberg, M. C., Martins, L., Miranda, J. R., Alves, C., Mata, J., Madeira, J., Mateus, O., Moreira, M., & Nogueira, C. R. (2013). A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. Em R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha & J. C. Kullberg (Eds.). *Geologia de Portugal (Vol. 2). Geologia Meso-cenozóica de Portugal* (pp. 195- 348). Escolar Editora.
- Laboratório Nacional de Energia e Geologia. (2009). *Dia Europeu dos Recursos Minerais - 15 de maio: Geodiversidade, biodiversidade e pedreiras no parque Natural das Serras de Aire e Candeeiros*. LNEG.
- Laboratório Nacional de Energia e Geologia. (2010). *Carta Geológica de Portugal à escala 1:1 000 000*. LNEG.
- Lisci, C., Pires, V., Sitzia, F., & Mirão, J., (2022a). Limestones durability study on salt crystallisation: An integrated approach. *Case Studies on Construction Material*, 17, e01572. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01572>
- Lisci, C., Sitzia, F., Pires, V., & Mirao, J. (2022b). Building stones durability by UVA radioation, moisture and spray accelerated weathering. *Journal of Building Pathology Rehabilitation*, 7, 60. <https://doi.org/10.1007/s41024-022-00196-9>
- Lisci, C., Sitzia, F., Pires, V., & Mirão, J. (2024). Aging of limestones and silane–siloxane-based protective hydrophobics: The impact of heating–cooling and freeze–thaw cycles. *Heritage*, 7(12), 6657–6682. <https://doi.org/10.3390/heritage7120308>

- Lisci, C., Sitzia, F., Pires, V., Aniceto, M. & Mirão, J. (2023). Stone endurance: A comparative analysis of natural and artificial weathering on stone longevity. *Heritage*, 6(6), 4593-4617. <https://doi.org/10.3390/heritage6060244>
- Lopes, C. F. S. (2010). *Evolução Geológica da Região Peniche - Torres Novas, no contexto do Ensino da Biologia e Geologia*. [Dissertação de mestrado, Universidade de Évora]. Repositório Institucional da Universidade de Évora. <http://hdl.handle.net/10174/20030>
- Manuppella, G., Balacó Moreira, J. C., Graça e Costa, J. R., & Crispim, J. A. (1985). Calcários e dolomitos do Maciço Calcário Estremenho. *Estudo, Notas e Trabalhos do Serviço de Fomento Mineiro*, 27, 3-48.
- Manuppella, G., Barbosa, B., Azerêdo, A. C., Carvalho, J., Crispim, J., Machado, S., & Sampaio, J. (1999). *Carta Geológica de Portugal: Folha 27-C Torres Novas (Escala 1:50 000) (2ª ed.)*. Instituto Geológico e Mineiro.
- Manuppella, G., Barbosa, B., Machado, S., & Carvalho, J. (1998). *Carta Geológica de Portugal: Folha 27-A Vila Nova de Ourém (Escala 1:50 000) (2ª ed.)*. Instituto Geológico e Mineiro.
- Maraveas, C., Kyrtopoulos, I. V., Arvanitis, K. G., & Bartzanas, T. (2024). The Aging of Polymers under Electromagnetic Radiation. *Polymers*, 16(5), 689. <https://doi.org/10.3390/polym16050689>.
- Martins, A. F. (1949). *Maciço Calcário Estremenho: Contribuição para um estudo de geografia física*. Coimbra Editora.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2008). *Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais*. IBRACON.
- Moura, A. C., Carvalho, C., Almeida, I. A., Saúde, J. G., Ramos, J. M. F., Augusto, J. P., Rodrigues, J. D., Carvalho, J., Martins, L., Matos, M. J., Machado, M. J. C., Sobreiro, M. J., Peres, M., Martins, N. A., Bonito, N., Henriques, P., & Sobreiro, S. (2007). *Mármore e calcários ornamentais de Portugal*. Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação.
- Orlowsky, J., Braun, F., & Groh, M. (2020). The influence of 30 years outdoor weathering on the durability of hydrophobic agents applied on obernkirchener sandstones. *Buildings*, 10(1), 18. <https://doi.org/10.3390/buildings10010018>
- Paolini, R., Terraneo, G., Ferrari, C., Sleiman, M., Muscio, A., Metrangolo, P., Poli, T., Destailats, H., Zinzi, M., & Levinson, R. (2020). Effects of soiling and weathering on the albedo of

building envelope materials: Lessons learned from natural exposure in two european cities and tuning of a laboratory simulation practice. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 205, 110264. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2019.110264>.

Pires, V. (2021, 19 de junho). *Pedra natural: Caracterização tecnológica de rochas ornamentais [Apresentação de slides]*. Laboratório de Ensaaios Mecânicos, Universidade de Évora. <https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/31565/1/MG%2019062021.pdf>

Powers, M. C. (1953). A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, 23(2), 117–119.

Ribeiro, A. (2002). *Soft plate and impact tectonics*. Springer-Verlag.

Siegesmund, S. & Snethlage, R. (2014). *Stone in architecture: Properties, durability* (5th ed.). Springer. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-45155-3>

Sitzia, F., Lisci, C., & Mirão, J. (2021a). Accelerate ageing on building stone materials by simulating daily, seasonal thermo-hygrometric conditions and solar radiation of Csa Mediterranean climate. *Construction and Building Materials*, 266, 121009. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121009>

Sitzia, F., Lisci, C., & Mirão, J. (2021b). Building pathology and environment: Weathering and decay of stone construction materials subjected to a Csa mediterranean climate laboratory simulation. *Construction and Building Materials*, 300, 124311. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124311>

Sitzia, F., Lisci, C., & Mirão, J. (2022). The interaction between rainwater and polished building stones for flooring and cladding - Implications in architecture. *Journal of Building Engineering*, 52, 104495. <http://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104495>

Sitzia, F., Lisci, C., Pires, V., Alves, T., & Mirão, J. (2023). Laboratorial simulation for assessing the performance of slates as construction materials in cold climates. *Applied Sciences*, 13(5), 2761. <https://doi.org/10.3390/app13052761>

Song, H., Liu, T., Gauvin, F., & Brouwers, H. J. H. (2024). Evaluation of zirconia modification on the durability of natural fiber-reinforced cement composites using accelerated aging. *Journal of Building Engineering*, 84, 108632. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.108632>

- Sousa, L., Menningen, J., López-Doncel, R., & Siegesmund, S. (2021). Petrophysical properties of limestones: Influence on behaviour under different environmental conditions and applications. *Environmental Earth Sciences*, 80, 814. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-10064-3>
- Starkova, O., Gagani, A. I., Karl, C. W., Rocha, I. B. C. M., Burlakovs, J., & Krauklis, A. E. (2022). Modelling of environmental ageing of polymers and polymer composites - Durability prediction methods. *Polymers*, 14(5), 907. <https://doi.org/10.3390/polym14050907>
- Striani, R., Esposito Corcione, C., Dell'Anna Muia, G., & Frigione, M. (2016). Progress in organic coatings durability of a sunlight-curable organic-inorganic hybrid protective coating for porous stones in natural and artificial weathering conditions. *Proress in Organic Coatings* 101, 1-14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2016.07.018>
- Šveikauskaitė, L., Dobilaitė, V., & Jucienė, M. (2024). Artificial aging test method for the assessment of changes in properties of architectural membranes and membrane connections. *The Journal of the Textile Institute*, 115, 419-432. <https://doi.org/10.1080/00405000.2023.2201994>
- Timoncini, A., Brattich, E., Bernardi, E., Chiavari, C., & Tositti L. (2023). Safeguarding outdoor cultural heritage materials in an ever-changing troposphere: Challenges and new guidelines for artificial ageing test. *Journal of Cultural Heritage*, 59, 190-201. <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2022.12.003>
- Tokarský, J., Ščučka, J., Martinec, P., Mamulová Kutláková, K., Peikertová, P., & Lipina, P. (2022). Long-term effect of weather in Dfb climate subtype on properties of hydrophobic coatings on sandstone. *Journal of Building Engineering*, 52, 104383. <http://doi.org/104383.10.1016/j.job.2022.104383>
- União Europeia. (2011). Regulamento (UE) n.º 305/2011 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 9 de março de 2011, que estabelece condições harmonizadas para a comercialização dos produtos de construção e que revoga a Diretiva 89/106/CEE do Conselho Texto relevante para efeitos do EEE. *Jornal Oficial da União Europeia*, L 88, 5–43. <http://data.europa.eu/eli/reg/2011/305/oj>
- Urosevic, M., Sebastián, E., & Cardell, C. (2013). An experimental study on the influence of surface finishing on the weathering of a building low-porous limestone in coastal environments. *Engeneering Geology*, 154, 131-141. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.12.013>

Wasserman, I. R., & Shohet, I. M. (2024). Life cycle cost analysis and deterioration patterns of limestone paving. *Applied Sciences*, 14(22), 10415. <https://doi.org/10.3390/app142210415>

Referências normativas

- American Society for Testing Materials. (2018). ASTM D7897-18: Standard practice for laboratory soiling and weathering of roofing materials to simulate effects of natural exposure on solar reflectance and thermal emittance.
- Comité Europeu de Normalização. (2002). EN 13364: Métodos de ensaios para pedra natural – Determinação de carga de rutura no furo da cavilha.
- Comité Europeu de Normalização. (2002). EN 13919: Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação da resistência ao envelhecimento pela ação do SO₂ em presença de humidade.
- Comité Europeu de Normalização. (2003). EN 14147: Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação da resistência ao envelhecimento por nevoeiro salino.
- Comité Europeu de Normalização. (2004). EN 14579: Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação da velocidade de propagação do som.
- Comité Europeu de Normalização. (2006). EN 1926: Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação da resistência à compressão uniaxial.
- Comité Europeu de Normalização. (2010). EN 12371: Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação da resistência ao gelo.
- Comité Europeu de Normalização. (2011). EN 14066: Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação da resistência ao envelhecimento por choque térmico.
- Comité Europeu de Normalização. (2011). EN 197-1: Cimento – Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes.
- Comité Europeu de Normalização. (2013). EN 16306: Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação da resistência do mármore a ciclos de calor e humidade.
- Comité Europeu de Normalização. (2015). EN 12058: Produtos em pedra natural. Placas para pavimentos e degraus – requisitos.
- Comité Europeu de Normalização. (2015). EN 1469: Produtos em pedra natural. Placas para revestimento de paredes – requisitos.

- Comité Européu de Normalização. (2017). EN 12440: Pedra natural – Critérios de denominação.
- Comité Européu de Normalização. (2019). EN 12407: Métodos de ensaio para pedra natural – Estudo petrográfico.
- Comité Européu de Normalização. (2019). EN 12670: Pedra natural – Terminologia.
- Comité Européu de Normalização. (2020). EN 12370: Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação da resistência à cristalização de sais.
- Comité Européu de Normalização. (2021). EN ISO 16474-3: Tintas e vernizes – Exposição de revestimentos ao envelhecimento artificial – Exposição a lâmpadas fluorescentes UV e à água.
- Comité Européu de Normalização. (2022). EN 12372: Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação da resistência à flexão sob carga concentrada.
- International Electrotechnical Commission. (2016). IEC 61215:2016: Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval.