

INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA E DE GESTÃO

ENGENHARIA CIVIL

VINICIUS MARCONI MARTINS

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O ENVELHECIMENTO
ACELERADO E NATURAL DE ARGAMASSAS DE
CIMENTO VISANDO A CORRELAÇÃO ENTRE
MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE DURABILIDADE**

Bragança

2025-2026

VINICIUS MARCONI MARTINS

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O ENVELHECIMENTO
ACELERADO E NATURAL DE ARGAMASSAS DE CIMENTO
VISANDO A CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE AVALIAÇÃO
DE DURABILIDADE**

Dissertação de mestrado submetida à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança como requisito para obter o Grau de Mestre em Engenharia Civil do programa de Dupla Diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Eduarda Cristina Pires Luso. (IPB)

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes De Góes. (UTFPR)

Bragança

2025-2026

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me fortalecer e iluminar durante todo este caminho, bem como meu agradecimento especial ao Instituto Politécnico de Bragança por proporcionar em conjunto com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná esta rica oportunidade de dupla diplomação no âmbito da dissertação de Mestrado.

À minha orientadora, Prof. Dr. Eduarda Cristina Pires Luso, meu muito obrigado pelo acompanhamento direto durante todo esse processo, corrigindo, orientando e aconselhando da melhor maneira, assim como meu orientador Prof. Dr. Jorge Luís Nunes De Góes, agradeço pelas reuniões, dúvidas sanadas e o devido direcionamento nos momentos de dúvida.

Meu agradecimento aos Técnicos do Laboratório de Materiais da Construção no Ipb, Sr. João e Sr. Octávio por todo o auxílio durante os ensaios e testes realizados.

Aos amigos, os quais fiz neste novo caminho, e aos que ficaram, agradeço por todo apoio prestado.

Meu sincero agradecimento à toda minha família, em específico meu pai Edilson, minha mãe, Rosimeire e meu irmão, Guilherme, os quais foram pilares fundamentais para minha vinda à Portugal, realizar este sonho. Aos meus pais, agradeço por todo apoio financeiro e pessoal que exerceram desde o primeiro dia.

Por fim, quero agradecer a minha parceira de vida e namorada Ana Beatriz, a qual foi fundamental em todas as decisões que tomei, aconselhando, indicando os melhores caminhos e ajudando sempre que necessário, sendo pilar fundamental para que tudo isso fosse possível.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contextualização e Justificativa	1
1.2 Objetivos do trabalho	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Argamassas	3
2.1.1 Contextualização histórica.....	3
2.1.2 Definição geral	4
2.1.3 Argamassas alternativas e a problemática da durabilidade	6
2.1.4 Função e propriedades	7
2.2 Durabilidade e tempo de vida útil	7
2.2.1 Agentes ou fatores potencializadores da degradação em materiais..	8
2.2.2 Indicadores de degradação.....	10
2.2.3 Mecanismos de estimativa de degradação ou vida útil.....	11
2.3 Envelhecimento acelerado e natural de materiais.....	15
2.3.1 Envelhecimento acelerado e natural	15
2.3.2 Estudos de envelhecimento presentes na literatura	16
2.3.3 Modelos de previsão de envelhecimento acelerado	17
2.3.4 Ciclos e autores analisados	21
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	28
3.1 Metodologia experimental.....	28
3.2 Composição das argamassas.....	31

3.3	Produção e cura	32
3.4	Envelhecimento acelerado	33
3.4.1	Equipamento e ciclos utilizados	34
3.5	Envelhecimento natural	38
3.6	Critério de retirada das amostras	39
3.7	Ensaaios mecânicos e físicos.....	40
3.7.1	Determinação da variação de massa.....	41
3.7.2	Ensaaios de Flexão	41
3.7.3	Ensaaios de Compressão	42
3.8	Procedimentos para estimativa de durabilidade	43
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	Análise climática de Bragança	46
4.2	Análise visual evolutiva dos corpos de prova	47
4.3	Resultados da variação de massa.....	51
4.4	Resultados da resistência à flexão	53
4.5	Resultados da resistência a compressão	56
4.6	Análise comparativa entre o envelhecimento acelerado e natural.....	58
4.6.1	Análise comparativa entre CE e AR – variação de massa.....	59
4.6.2	Análise comparativa entre CE e AR – resistência à Flexão	61
4.6.3	Análise comparativa entre CE e AR – resistência à Compressão ..	63
4.6.4	Análise comparativa entre CE e AR – Segundo a metodologia de Coffin-Manson	65

5. CONCLUSÕES.....	70
5.1 Considerações finais e recomendações.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS

CEN - Comité Européen de Normalização

AR – Envelhecimento natural

CE – Envelhecimento acelerado

ISO – Organização Internacional de Padronização

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

PET - Polietileno Tereftalato

UV - Radiação ultravioleta

RH/UR – Umidade Relativa

CP – Corpo de prova

NP EN - Norma Portuguesa Enquadrada com a Norma Europeia

LMC – Laboratório de Materiais da Construção

ESTiG – Escola Superior de Tecnologia e de Gestão

IPB – Instituto Politécnico de Bragança

BTHC – Controle balanceado de temperatura e umidade

ATD – Argamassa Técnica Decorativa

IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES DE MEDIDA

°C – Graus Celsius

% – Porcentagem

a/c – Relação água/cimento

AF Fm – Fator de aceleração por fadiga

CO₂ – Dióxido de carbono

g – Gramas

h – Horas

L – Litros

m – Expoente de fadiga

mm – Milímetros

MPa – Megapascal

R² – Coeficiente de determinação

Tacc – Tempo de exposição acelerado

Teq – Idade Equivalente / Tempo equivalente

ΔT_{acc} – Amplitude térmica total do ciclo acelerado

ΔT_{nat} – Amplitude média diária característica da região

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Ação de agentes de degradação dos materiais	9
Figura 2 - Principais abordagens para a previsão da vida útil dos materiais.....	11
Figura 3 - Método para previsão da vida útil.	13
Figura 4 - Fluxograma experimental	29
Figura 5 - Moldagem do corpo de prova.	33
Figura 6 - Câmara climática.	34
Figura 7 – Gráfico do regime higrotérmico (ciclo) adotado.....	36
Figura 8 - Diagrama psicrométrico de Bragança do ano de 2021.	37
Figura 9 - Disposição dos corpos de prova em ambiente externo.	38
Figura 10 - Fluxograma dos critérios de retirada dos corpos de prova para os ensaios.	39
Figura 11 - Corpos de prova retirados no terceiro ciclo de envelhecimento acelerado (CE) e exposição natural (AR).	40
Figura 12 - Determinação da massa dos corpos de prova utilizando balança digital.	41
Figura 13 - Corpo de prova submetido ao ensaio de resistência à flexão.	42
Figura 14 - Corpo de prova submetido ao ensaio de resistência à compressão.....	43
Figura 15 - Variação de temperatura do período e o índice de chuvas da região.....	46
Figura 16 - Corpos de prova da 2º etapa.	48
Figura 17 - Corpos de prova da 4º etapa.	48
Figura 18 - Corpos de prova da 7º etapa.	49
Figura 19 - Corpos de prova da 11º etapa.	49

Figura 20 - Corpos de prova da 13 ^o etapa.	49
Figura 21 - Corpo de prova da 16 ^o etapa.....	50
Figura 22 – Gráfico dos resultados da variação de massa dos corpos de prova.....	52
Figura 23 - Gráfico comparativo das resistências à flexão obtidas.	54
Figura 24 - Gráfico comparativo das resistências à compressão obtidas.	57
Figura 25 – Gráfico da variação de massa pelo regime AR.	59
Figura 26 – Gráfico da variação de massa pelo regime CE.....	60
Figura 27 - Gráfico comparativo da resistência à flexão pelo regime AR.	61
Figura 28 - Gráfico comparativo da resistência à flexão pelo regime CE.....	62
Figura 29 - Gráfico comparativo da resistência à compressão pelo regime AR.	63
Figura 30 - Gráfico comparativo da resistência à compressão pelo regime CE.....	64
Figura 31 - Gráfico comparativo da variação de massa entre o regime AR e CE.....	66
Figura 32 - Gráfico comparativo da resistência à flexão entre o regime AR e CE.	67
Figura 33 - Gráfico comparativo da resistência à compressão entre o regime AR e CE.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido.	7
Tabela 2 - Principais ensaios de degradação acelerada e materiais utilizados.	17
Tabela 3 - Síntese das investigações analisadas: propriedades avaliadas e conclusões sobre o envelhecimento dos materiais.	22
Tabela 4 - Síntese das investigações analisadas: propriedades avaliadas e conclusões sobre o envelhecimento dos materiais (Continuação).	23
Tabela 5 - Síntese das investigações analisadas: configurações dos ciclos de envelhecimento e equipamentos utilizados.	24
Tabela 6 - Composição granulométrica da areia CEN.	32
Tabela 7 - Dados do regime higrotérmico adotado.	35
Tabela 8 - Parâmetros climáticos adotados.	44
Tabela 9 - Resultados da variação de massa.	51
Tabela 10 – Resultados da resistência à flexão em MPa.	54
Tabela 11 – Resultados da resistência à compressão em MPa.	56

RESUMO

Esta dissertação apresenta uma análise comparativa do comportamento de argamassas cimentícias submetidas a dois regimes de envelhecimento: um acelerado, em câmara climática (CE), e um natural (AR), exposto às condições do clima de Bragança, Portugal. O estudo visa estabelecer uma correlação técnica entre os métodos de avaliação de durabilidade, investigando a evolução de propriedades físicas e mecânicas (variação de massa, resistência à flexão e à compressão) em amostras normalizadas.

O programa experimental baseou-se na produção de 99 corpos de prova seguindo o traço 1:3 e areia de referência CEN. O grupo CE foi submetido a 16 etapas semanais de ciclos higrotérmicos cíclicos (35°C/40% UR e -10°C/90% UR), enquanto o grupo AR permaneceu em exposição externa de fevereiro a junho de 2026. A metodologia de análise utiliza o modelo de Coffin-Manson para estimativa de dano por fadiga térmica, confrontando as respostas do material com as variações climáticas reais da região.

Os resultados demonstram que, enquanto o envelhecimento acelerado induz uma estabilização da massa e um processo progressivo de fadiga estrutural, evidenciado pela redução da resistência à flexão devido a microfissurações, o ambiente natural impõe uma dinâmica complexa. Observou-se que as amostras expostas ao ambiente externo apresentaram variações de massa erráticas, correlacionadas aos eventos de precipitação e dessecação sazonal, além de um ganho de resistência à compressão atribuído à cura contínua pelas condições ambientais. A análise comparativa confirma que não existe uma correlação linear universal, evidenciando que a agressividade dos choques térmicos controlados difere da degradação multifatorial observada na natureza. O trabalho conclui com recomendações técnicas para futuros protocolos de ensaio, ressaltando a importância do uso de modelos preditivos calibrados especificamente para as condições climáticas de exposição.

Palavras-chave: Argamassas cimentícias; Durabilidade; Envelhecimento acelerado; Envelhecimento natural; Modelo de Coffin-Manson.

ABSTRACT

This dissertation presents a comparative analysis of the behavior of cementitious mortars subjected to two aging regimes: an accelerated one, in a climatic chamber (CE), and a natural one (AR), exposed to the conditions of the climate of Bragança, Portugal. The study aims to establish a technical correlation between durability assessment methods, investigating the evolution of physical and mechanical properties (mass variation, flexural strength, and compressive strength) in standardized samples.

The experimental program was based on the production of 99 specimens following a 1:3 mix design and CEN reference sand. The CE group was subjected to 16 weekly stages of cyclic hygrothermal cycles (35°C/40% RH and -10°C/90% RH), while the AR group remained in external exposure from February to June 2026. The analysis methodology uses the Coffin-Manson model for thermal fatigue damage estimation, comparing the material's responses with the actual climatic variations of the region.

The results demonstrate that, while accelerated aging induces mass stabilization and a progressive process of structural fatigue, evidenced by the reduction in flexural strength due to micro-cracking, the natural environment imposes a complex dynamic. It was observed that samples exposed to the external environment showed erratic mass variations, correlated to precipitation and seasonal drying events, as well as a gain in compressive strength attributed to continuous curing by environmental conditions. The comparative analysis confirms that there is no universal linear correlation, evidencing that the aggressiveness of controlled thermal shocks differs from the multifactorial degradation observed in nature. The work concludes with technical recommendations for future test protocols, highlighting the importance of using predictive models calibrated specifically for the climatic conditions of exposure.

Keywords: Cementitious mortars; Durability; Accelerated aging; Natural aging; Coffin-Manson model.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e Justificativa

A durabilidade das argamassas cimentícias constitui um dos pilares fundamentais para a garantia da integridade, funcionalidade e vida útil das edificações. Historicamente, a evolução técnica da construção civil, desde a cal romana até os atuais cimentos Portland, tem sido norteadada pela busca constante por materiais capazes de resistir à degradação ao longo do tempo. Contudo, a complexidade inerente aos fenômenos de envelhecimento influenciados por fatores exógenos como variações climáticas, choques térmicos e ciclos de umidade impõe desafios contínuos aos projetistas e pesquisadores.

A necessidade de prever o desempenho dessas matrizes em serviço motivou o desenvolvimento de ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório, que buscam mimetizar, em períodos reduzidos, os efeitos do intemperismo natural. No entanto, a literatura técnica aponta que a transposição de dados de ensaios acelerados para condições reais não é linear, carecendo frequentemente de validação empírica robusta. A falta de protocolos de correlação universais, somada à natureza multifatorial dos agentes de degradação, torna a avaliação da durabilidade um processo irregular e complexo.

Este trabalho justifica-se pela necessidade de preencher esta lacuna de conhecimento, propondo um estudo comparativo entre o envelhecimento acelerado em câmara climática e a exposição natural. Ao investigar a resposta mecânica e física de argamassas padronizadas, a pesquisa não apenas contribui para o avanço da engenharia de durabilidade, mas também fornece subsídios fundamentais para a calibração de modelos preditivos, como o de Coffin-Manson, permitindo uma tomada de decisão mais consciente e segura nas fases de projeto e manutenção, contribuindo para a sustentabilidade e a viabilidade das soluções construtivas adotadas.

1.2 Objetivos do trabalho

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise comparativa entre os métodos de envelhecimento acelerado e natural de argamassas de cimento normalizadas, visando estabelecer a correlação entre as respostas mecânicas e físicas observadas em condições controladas de laboratório e o desempenho real frente ao intemperismo do clima de Bragança.

Para alcançar este objetivo central, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver e configurar um regime de ciclos higrotérmicos em câmara climática (modelo LHU-114) capaz de representar os extremos sazonais (quente/seco e frio/úmido) característicos da região de Bragança, assegurando a reprodutibilidade dos ensaios;
- Quantificar a evolução de propriedades fundamentais, tais como variação de massa, resistência à flexão e resistência à compressão, ao longo de 16 etapas semanais de exposição em ambos os regimes (acelerado e natural), estabelecendo uma base de dados comparativa;
- Investigar a viabilidade da aplicação do modelo de Coffin-Manson para a estimativa da vida útil, avaliando a eficácia do fator de aceleração na predição do dano por fadiga térmica;
- Identificar os pontos de convergência e divergência entre os métodos, provendo recomendações técnicas para futuros protocolos de ensaio.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Argamassas

2.1.1 *Contextualização histórica*

As primeiras argamassas conhecidas foram datadas a mais de 10000 anos atrás em Yaftah'el, galileia, onde hoje seria o Estado de Israel. A produção da época era estritamente familiar, através de fornos antigos à base de lenha, a fim de calcinar a pedra de cal desejada (Alvarez, 2005).

Algum tempo depois, estudos indicam que os gregos foram provavelmente os pioneiros no uso da cal em argamassas de revestimento. O desenvolvimento da arquitetura monumental e o desejo de erguer construções duradouras impulsionaram o aprimoramento dos materiais e das técnicas construtivas da época. Inicialmente, a cal era combinada apenas com areia, mas, posteriormente, passou-se a adicionar pedra de Santorini, uma pozolana rica em sílica, originando um ligante hidráulico cuja principal característica era a capacidade de endurecer mesmo em meio aquoso (Margalha, 2011).

Além disso, registros históricos mostram que os etruscos deixaram evidências do uso da cal nas alvenarias de cisternas e túmulos. No entanto, foram os romanos que, ao realizarem grandes obras em todo o seu vasto império como anfiteatros, aquedutos, basílicas e outras edificações monumentais aplicaram as argamassas de forma mais eficaz (Margalha, 1997). A necessidade de atender às exigências estruturais dessas construções levou-os a desenvolver e aperfeiçoar diversas soluções técnicas, como o arco de volta perfeita, as abóbadas e as cúpulas com a utilização de argamassas. Embora os romanos não conhecessem a composição química e mineralógica dos materiais que empregavam em suas construções, as argamassas que produziram demonstraram excelente desempenho ao longo dos séculos. Tal foi a sua eficácia que, no século XVIII, quando surgiu um novo tipo de ligante de alta qualidade, este recebeu o nome de “cimento romano”, uma cal aprimorada que antecedeu o atual cimento Portland (Margalha, 2011).

O uso da cal como revestimento de paredes no sul de Portugal, tem origem provável no período de ocupação muçulmana, que perdurou por cerca de cinco séculos.

Nessa região, a cal foi amplamente empregada tanto nas paredes brancas quanto naquelas coloridas, obtidas pela adição de pigmentos, além de compor diversas argamassas tradicionais (Margalha, 2011).

Contudo, com a descoberta do cimento no início do século XIX, seu uso passou gradualmente a substituir o da cal. A principal razão para a rápida difusão do cimento foi sua elevada resistência mecânica obtida em poucos dias. Inicialmente, devido ao custo mais elevado, ele foi utilizado sobretudo em obras que exigiam propriedades hidráulicas, como fossas sépticas e infraestruturas de águas e esgotos (Margalha, 2011). Posteriormente, passou a ser combinado com cal e areia na produção das chamadas argamassas mistas, até consolidar-se, a partir dos anos 1950, como o principal ligante empregado em rebocos (Veiga, 2009).

Atualmente, o mercado mundial de argamassas apresenta um crescimento acelerado, impulsionado pelo avanço da infraestrutura, pelo processo contínuo de urbanização e pela crescente demanda por materiais construtivos com maior durabilidade. Em 2025, o volume global consumido ultrapassou 640 milhões de toneladas métricas, representando um aumento significativo em relação às aproximadamente 590 milhões de toneladas registradas em 2023. Aproximadamente 71% dessa procura está associada a empreendimentos residenciais e comerciais (Industry Research Biz, 2024).

2.1.2 Definição geral

A argamassa, de forma prática, é uma mistura simples que contém um ou mais ligantes, podendo ser eles orgânicos ou inorgânicos, além de agregados, água, e em alguns casos específicos, adições, em que, de forma resumida (Ferreira Pinto, Gomes & Bessa Pinto, 2006):

- O ligante é quem, em associação com a água, endurece, aglutina os agregados e confere a resistência e coesão;
- O agregado é um material granular, como a areia;
- As adições são um material inorgânico, moído, adicionado ao produto da argamassa para melhorar algumas propriedades específicas.

Ao seguir este raciocínio, uma argamassa pode ser considerada como uma rocha artificial, ou seja, trata-se de um material formado por fragmentos de rocha unidos por um ligante, o qual confere rigidez e estabilidade ao conjunto. É importante destacar que os espaços vazios entre os agregados, que podem representar de 25% a 40% do volume total da argamassa, são preenchidos pela pasta ligante, responsável por garantir a coesão entre as partículas (Lima, 2010).

Tais ligantes têm a função de promover a ligação entre os grãos dos agregados que compõem as argamassas, além de gerar pega e endurecer (Coutinho, 2002). Entre os tipos mais utilizados destacam-se o cimento e a cal, cujas propriedades químicas, grau de finura e capacidade de endurecimento são fundamentais para o desempenho do material, conferindo à argamassa características como aderência e resistência (Dubaj, 2000).

A norma segundo o European Committee for Standardization (CEN, 2001), p.10 define que “o cimento é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com a água, forma uma pasta que ganha presa e endurece devido a reações e processos de hidratação e que, depois de endurecida, conserva a sua resistência mecânica e estabilidade mesmo debaixo de água.” Margalha (2011), ainda complementa esta ideia ao citar que o termo cimento tem origem na palavra latina *cimentum*, que originalmente designava qualquer material capaz de promover ligação.

O cimento é amplamente utilizado nas argamassas por sua capacidade de endurecer em contato com a água. Ele proporciona resistência e aderência ao material, sendo que sua composição química e grau de finura influenciam diretamente no desempenho. Cimentos mais finos apresentam maior poder aglutinante, resultando em maior resistência e melhor retenção de água. O tipo ideal para argamassas deve possuir pega e ganho de resistência progressivos, evitando fissuras decorrentes da retração e da secagem (Dubaj, 2000).

Já os agregados, que compõem parte da argamassa, podem ser caracterizados por serem incoesivos e apresentarem uma atividade química praticamente nula, além de serem compostos por uma mistura de partículas que abrangem uma ampla faixa de dimensões (Lima, 2010). Podem, ainda, ser considerados como o esqueleto das

argamassas, e assumir uma influência direta em diversas propriedades das mesmas, como: a retração, módulo de deformação, resistência mecânica, dentre diversas outras (Bauer, 2005).

2.1.3 Argamassas alternativas e a problemática da durabilidade

As argamassas, importantes componentes da construção civil, possuem dentre suas principais características a possibilidade de substituição do aglomerante ou agregado por materiais alternativos (Campos et al., 2020).

O crescente interesse pela preservação dos recursos naturais e pela promoção do desenvolvimento sustentável tem motivado um número significativo de pesquisadores a aprofundar o estudo de materiais não convencionais (Farias Filho, 2007).

Neste contexto, inúmeras maneiras de se produzir uma argamassa são descobertas diariamente, como é o caso de Ribeiro et al. (2022) que investigou os efeitos da substituição parcial do cimento Portland por grafite e verificou que pode ser utilizado como um substituto parcial do cimento sem comprometer de forma significativa a resistência, promovendo assim, uma redução na poluição do meio ambiente, diminuindo a emissão de CO₂.

Assim como, Laurentino (2019) que avaliou a substituição parcial do cimento em argamassas estabilizadas por metacaulim, com o intuito de melhorar as propriedades dessas argamassas, podendo, inclusive, acarretar na diminuição do custo, o mesmo obteve resultados satisfatórios ao longo do tempo quanto à estabilidade e trabalhabilidade da argamassa.

Além disso, Brandão et al. (2022) analisaram o comportamento de argamassas produzidas com substituição parcial do cimento Portland por cinzas provenientes da queima de eucalipto e grevêlea em caldeiras, chegando a resultados positivos quanto à resistência à compressão.

Portanto, o mercado busca por novas soluções constantemente, o principal entrave para a ampla utilização desses materiais está associado ao seu comportamento ao longo do tempo. Para que haja confiabilidade nas suas propriedades tecnológicas e viabilidade

de aplicação como nova tecnologia no mercado, torna-se essencial o conhecimento de suas condições de uso e, sobretudo, de sua durabilidade (Farias Filho, 2007).

2.1.4 Função e propriedades

Para que as argamassas desempenhem corretamente suas funções, é essencial que apresentem propriedades adequadas tanto no estado fresco quanto após o endurecimento. A compreensão dessas propriedades e dos fatores que as influenciam permite avaliar o desempenho e o comportamento das argamassas sob diferentes condições de aplicação e exposição (Baía & Sabbatini, 2008).

Deste modo, Baía e Sabbatini (2008), apresentam, na Tabela 1, as propriedades das argamassas, sendo a durabilidade um dos principais objetivos do estudo.

Tabela 1 - Propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido.

Estado Fresco	Estado endurecido
Massa específica e teor de ar	Aderência
Trabalhabilidade	Capacidade de absorver deformações
Retenção de água	Resistência Mecânica
Aderência inicial	Resistência ao desgaste
Retração na secagem	Durabilidade

Nota: adaptado de Baia e Sabbatini, pg. 15 (2008).

2.2 Durabilidade e tempo de vida útil

A durabilidade, corresponde à capacidade de um elemento manter o seu desempenho ao longo do tempo quando submetido às condições ambientais previstas. Trata-se, portanto, de um conceito associado à manutenção das propriedades essenciais do material e não apenas ao seu valor inicial de resistência (GCCA, 2021).

De acordo com a International Organization for Standardization (ISO, 2011), a durabilidade está diretamente ligada ao planejamento da vida útil, definida como o

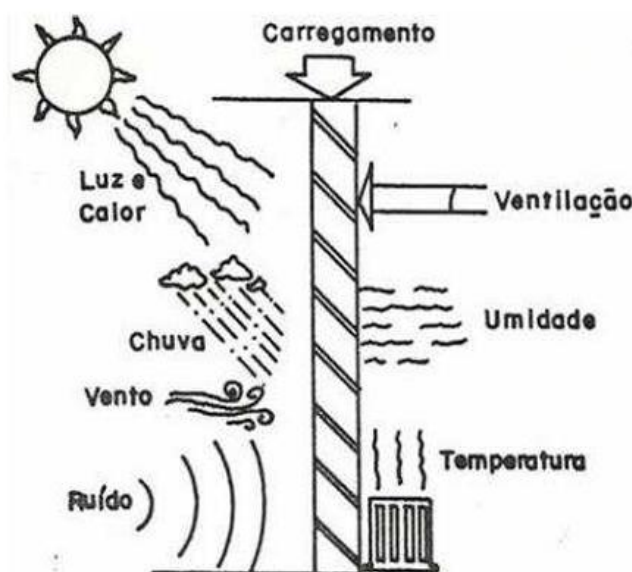
intervalo no qual um elemento construtivo apresenta desempenho aceitável considerando a exposição e os mecanismos naturais de deterioração. Esta norma introduz conceitos como vida útil de referência, vida útil projetada e fatores de previsão, estabelecendo princípios para estimar o tempo durante o qual um componente deve manter funcionalidade adequada. Assim, a durabilidade deixa de ser apenas uma propriedade intrínseca do material e passa a ser compreendida como um resultado da interação entre composição, ambiente, execução e manutenção. Para além disso, entender durabilidade, significa compreender os conceitos abaixo.

2.2.1 Agentes ou fatores potencializadores da degradação em materiais

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2013), agente de degradação é “tudo aquilo que, agindo sobre um sistema, contribui para reduzir seu desempenho”. No processo de degradação de um elemento construtivo, é essencial considerar os agentes de degradação que atuam de forma isolada ou combinada, influenciando diretamente a durabilidade do material. Além disso, Silva (2002) complementa a ideia ao afirmar que agentes de degradação podem ser provenientes de ações físicas, químicas, ambientais e até mesmo biológicas.

No desenvolvimento de soluções duráveis, torna-se fundamental identificar os agentes de degradação mais relevantes fisicamente, tais como temperatura, radiação solar, chuva, umidade e vento, uma vez que os diferentes materiais apresentam comportamentos distintos face às condições ambientais a que estão expostos (Maia, 2016). A Figura 1 indica uma ilustração acerca dos principais agentes físicos que costumam atuar sobre os materiais da construção civil.

Figura 1- Ação de agentes de degradação dos materiais



Nota: Adaptado de Bauer (1987, p. 02).

As variações térmicas representam um dos agentes físicos mais agressivos para a durabilidade de fachadas ou materiais que compõe as mesmas, atuando como um carregamento variável que impõe solicitações mecânicas contínuas (Sabbatini, 1998). Este fenômeno ocorre porque os materiais, ao serem submetidos a mudanças de temperatura, sofrem movimentações dimensionais de dilatação e contração (Sokoloski, 2021), durante o dia, pois a radiação solar promove o aquecimento da superfície, enquanto o resfriamento ocorre à noite por emissão térmica, estabelecendo um ciclo diário de movimentação (Temoche, 2009).

Ainda, segundo, Gaspar, Flores-Colen e Brito (2006) a rapidez das variações de temperatura também é um fator crítico, pois taxas de carregamento altas exigem uma resposta de deformação rápida do material, no caso de uma argamassa, pode ocorrer que por ser excessivamente rígida, não consiga acompanhar esse movimento, causando uma ruptura da interface de forma prematura. Por fim, adicionalmente, o calor pode atuar de forma sinérgica com a umidade, a água retida nos poros da argamassa, ao ser aquecida, pode evaporar e criar pressões internas de vapor que forcem o desprendimento do revestimento ou degradação mecânica (Longhi, 2012).

Adicionalmente às altas temperaturas, a exposição a climas rigorosos introduz uma ciclagem térmica em temperaturas negativas como um agente de degradação primário. A transição abrupta para temperaturas abaixo de zero induz tensões internas de tração críticas que, frequentemente, superam a capacidade de deformação da matriz, promovendo uma microfissuração generalizada que fragiliza o material de forma silenciosa e reduz significativamente o seu módulo de elasticidade interno, antes mesmo do surgimento de anomalias visuais (Kazmierczak et al., 2025).

Em contrapartida, os agentes químicos, tendem a atacar argamassas em geral por meio da carbonatação, ácido sulfúrico, ambientes fortemente enriquecidos com sulfatos ou cloretos, alterando drasticamente a durabilidade e vida útil desses materiais, tais ataques tendem a ser mais localizados em ambientes específicos (El Inaty et al., 2023).

No que se refere à durabilidade, os ataques químicos provocados por sulfatos e ácidos são os mais recorrentes e comprometem o desempenho de materiais cimentícios ao longo do tempo. O ataque por sulfatos pode provocar expansão, fissuração e deterioração de diversas estruturas de expostas a ambientes agressivos, como cais, pontes, fundações e tubulações de concreto. Por sua vez, a ação de ácidos promove a lixiviação dos compostos da matriz cimentícia, resultando na degradação progressiva do material (Mauri et al., 2009).

2.2.2 Indicadores de degradação

Segundo Silva (2002), os indicadores de degradação, são parâmetros ou propriedades críticas que devem permanecer preservados pelo material avaliado. Além disso, são necessários para quantificar os mecanismos de degradação correspondentes às propriedades mensuráveis que refletem as variações nas características ou no desempenho do material ao longo de sua utilização ou durante o processo de avaliação (Farias Filho, 2007).

No contexto de argamassas, Farias Filho (2007), considera que no estudo da durabilidade, a resistência à compressão é uma das propriedades utilizadas como parâmetro para quantificar e analisar possíveis variações ao longo da vida útil de um material quando exposto a determinado ambiente. Por fim, Silva (2002) conduz as

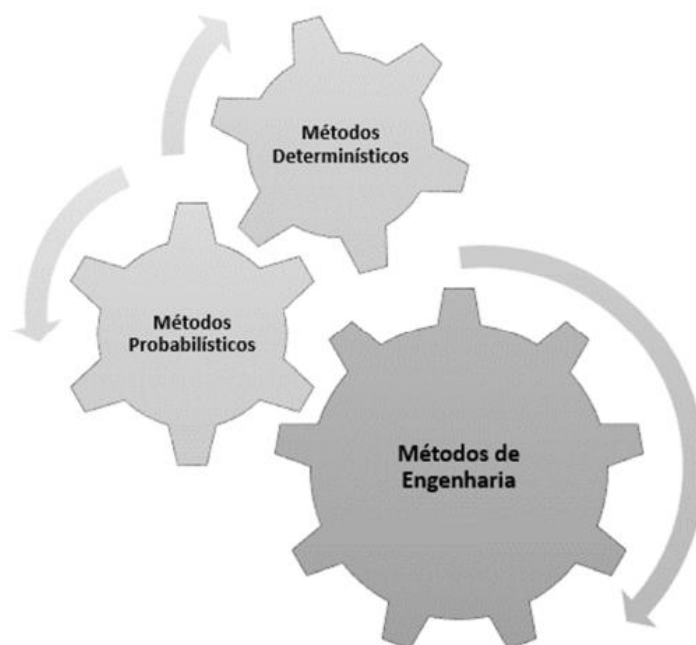
pesquisas direcionando de forma a expressar que a utilização da resistência à flexão também tende a ser uma das formas de avaliar o desempenho e a degradação de um material.

Diversos outros indicadores podem ser levados em consideração, como as propriedades químicas, biológicas, dentre diversas outras, contudo não são objeto de estudo deste trabalho.

2.2.3 Mecanismos de estimativa de degradação ou vida útil

De acordo com a International Organization for Standardization (ISO, 2001), os principais métodos utilizados para estimativa geral de vida útil de materiais em geral podem ser distinguidos em três abordagens diferentes: métodos determinísticos, métodos probabilísticos (ou estocásticos) e métodos de engenharia, conforme a Figura 2, adaptada de Hoyde (2004).

Figura 2 - Principais abordagens para a previsão da vida útil dos materiais.



Nota: Adaptado de Hoyde (2004).

Neste contexto, os métodos determinísticos, fundamentam-se na análise dos fatores de degradação, na compreensão de seus mecanismos de atuação e na sua quantificação. São considerados de fácil entendimento e rápida aplicação; contudo, em muitos casos, as informações obtidas não são suficientes para avaliar o risco de não se atingir a vida útil prevista (Hovde, 2004). Ainda assim, destacam-se por gerar resultados práticos relevantes, servindo de base para a norma (ISO, 2001).

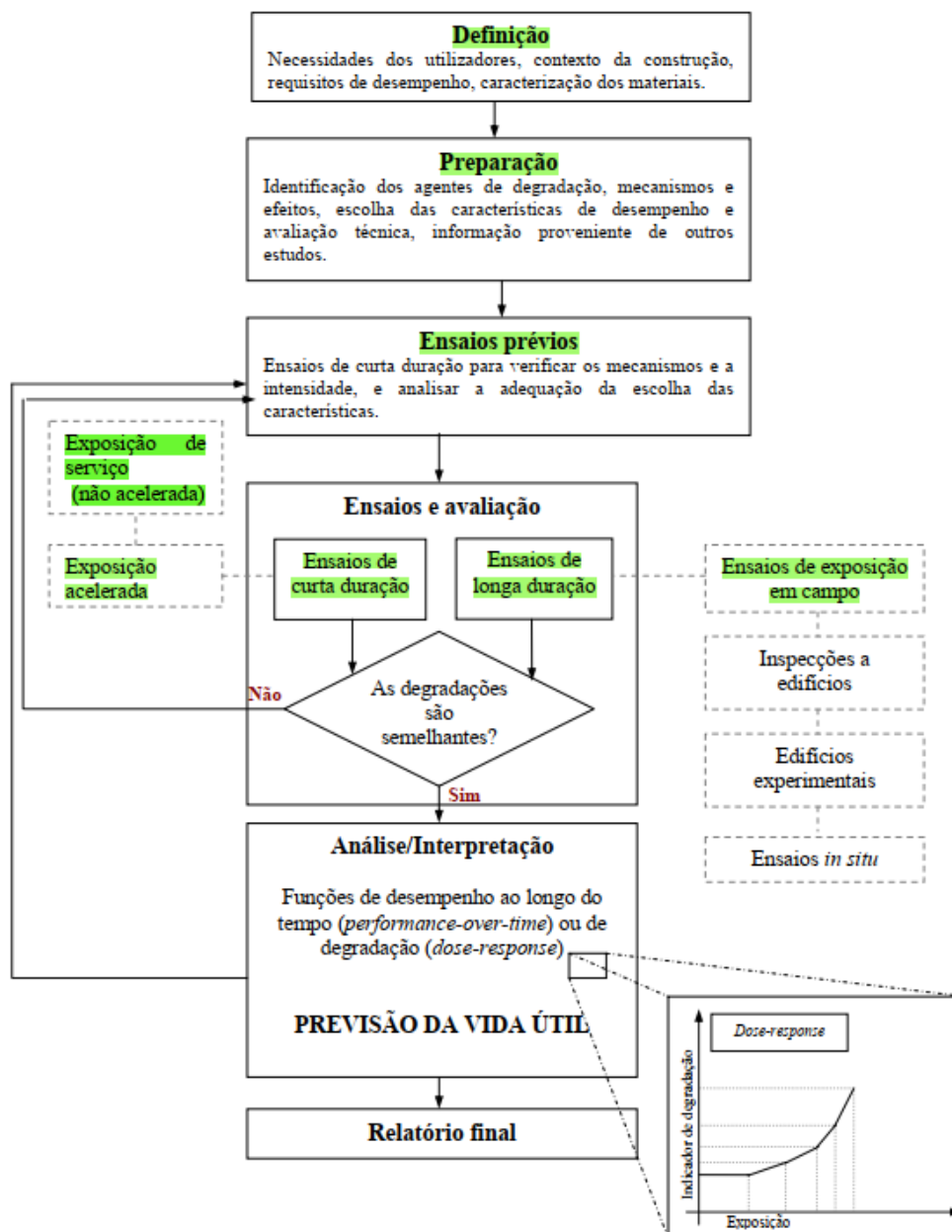
Já os métodos probabilísticos, baseiam-se, em geral, em abordagens matriciais ou probabilísticas, permitindo a construção de modelos que descrevem a evolução da degradação ao longo do tempo. Diferenciam-se dos modelos determinísticos por estimarem a vida útil em termos de intervalos de valores associados a probabilidades de ocorrência (Garrido, 2010).

Para sua aplicação, é necessária a obtenção de um grande volume de dados provenientes de campanhas de campo realizadas ao longo de extensos períodos. Essa forte dependência de informações empíricas, aliada à complexidade dos modelos, limita sua aplicabilidade prática (Hovde, 2004).

Por fim, os métodos de engenharia, segundo Santos (2018), combinam a simplicidade das abordagens determinísticas com a incorporação de dados probabilísticos. A estimativa da vida útil é obtida a partir da integração dessas duas vertentes, permitindo uma aplicação mais prática, com menor exigência de volume de dados em comparação aos modelos puramente probabilísticos, como vantagem, os métodos de engenharia possibilitam a identificação mais detalhada dos fenômenos de degradação, favorecendo uma análise mais criteriosa e permitindo maior controle sobre o desempenho do material, além de subsidiar ajustes no projeto e eventuais revisões nos planos de manutenção.

Neste sentido, surge o método factorial, advindo da classe dos métodos determinísticos, que serviu de base para o desenvolvimento da norma ISO (2001), (Quintela, 2006), indicado na Figura 3.

Figura 3 - Método para previsão da vida útil.



Nota: Adaptado de método para previsão da vida útil segundo (International Organization for Standardization [ISO], 2001)

Portanto, a partir da interpretação desta norma e das correlações indicadas pela mesma, surge a necessidade de aprofundar ainda mais esses métodos e convergir para uma quantificação mais assertiva no que diz respeito às argamassas e aos materiais da construção civil em geral. Por isso, autores como Farias Filho (2007) e Silva (2002),

classificam alguns métodos que podem ser úteis para avaliar a durabilidade destes materiais, sendo eles:

- Ensaios de envelhecimento natural (em estações de exposição) consistem na exposição de amostras isoladas (corpos de prova) à ação direta das intempéries em ambientes externos. Sua principal vantagem é a representatividade climática real. No entanto, por dependerem exclusivamente da agressividade natural do ambiente, demandam longos períodos de monitoramento para que a degradação atinja níveis mensuráveis, além de não contemplarem as tensões mecânicas do material em serviço.
- Ensaios de envelhecimento natural em uso (em serviço) diferenciam-se por avaliar o material já aplicado em sua configuração final dentro de um sistema construtivo real (como um revestimento em uma edificação habitada). A vantagem é a fidelidade absoluta do cenário, pois contempla não apenas o clima, mas também a interação do material com o substrato, as movimentações estruturais e os efeitos práticos da sua execução. Como limitação, além da extrema lentidão intrínseca à exposição natural, este método apresenta alta complexidade de monitoramento e pouco controle sobre as variáveis isoladas.
- Ensaios acelerados que consistem em simular as condições de exposição do material o mais próximo possível das suas situações de uso no dia a dia, provocando variações cíclicas que podem ser de temperatura, umidade, raios UV, agentes químicos, dentre outras situações recorrentes, na tentativa de reproduzir o ambiente externo, intensificando os agentes de degradação sob o material. Tem como principal vantagem a rapidez, possibilitando a obtenção de resposta em curto espaço de tempo sobre o comportamento do material, contudo podem oferecer respostas imprecisas em função de mecanismos paralelos, sendo assim é importante que seja acompanhado por outro método para fim de comparação.

Neste contexto, a adoção de ensaios acelerados e ensaios naturais, tende a ser extremamente importante para uma devida avaliação do comportamento dos materiais ao longo do tempo..

2.3 Envelhecimento acelerado e natural de materiais

2.3.1 *Envelhecimento acelerado e natural*

O ensaio de envelhecimento acelerado tem como objetivo submeter materiais a solicitações cíclicas e condições extremas, permitindo avaliar sua durabilidade e o modo como se comportam diante de situações mais severas do que as encontradas em uso normal, por conta disto é muito importante para avaliar a durabilidade de argamassas, uma vez que os agentes climáticos são os principais causadores de degradação das mesmas (Morgado, 2017).

Além disso, o ensaio de envelhecimento acelerado é amplamente utilizado para a estimativa da vida útil dos materiais, desde que sejam estabelecidos parâmetros confiáveis capazes de simular adequadamente as condições reais de exposição. Para que seus resultados sejam representativos, é fundamental que os ensaios não induzam mecanismos de degradação que não ocorreriam em condições naturais (Sentena, 2015).

Contudo, é válido ressaltar que não há ensaios de envelhecimento acelerado universais, para cada mecanismo (ou combinação de agente de degradação com material) é imprescindível um ensaio completamente diferente, normalmente, esses ensaios sugerem a exposição de pequenas amostras a um ou mais agentes concomitantemente, enquanto que em condições naturais, outros agentes de degradação certamente estão presentes (Silva, 2014).

Segundo John e Sato (2006), diversos equipamentos podem ser utilizados em ensaios de envelhecimento acelerado. Entre eles, destacam-se aqueles que submetem as amostras a ciclos combinados de temperatura e umidade podendo conter até mesmo radiação ultravioleta, bem como as câmaras ou máquinas do tipo C-UV, amplamente empregadas em estudos com polímeros por associarem condensação e radiação UV. Além disso, as câmaras de carbonatação acelerada constituem uma alternativa relevante, nas quais são controladas variáveis como umidade e concentração de CO_2 , frequentemente superior à encontrada na atmosfera, podendo atingir valores significativamente elevados, além de operar sob pressão atmosférica ou até condições de alta pressão. Esses dispositivos permitem intensificar as reações de carbonatação em

materiais cimentícios, reduzindo o tempo necessário para a avaliação de seu comportamento.

Já os ensaios de envelhecimento natural correspondem à exposição prolongada do material às condições ambientais locais, nas quais radiação solar, vento, precipitação, temperatura e umidade atuam sobre a estrutura (Camuffo, 2016).

Para argamassas e a grande gama de materiais da construção civil, os estudos costumam acompanhar esse processo por medidas de massa, massa específica aparente, resistência à flexão, resistência à compressão e absorção de água, porque são essas variáveis que mudam quando a matriz começa a se degradar (Fernandez et al, 2020), na prática, o envelhecimento natural é a resposta do material à ação conjunta de chuva, umidade, secagem, variações térmicas e agentes atmosféricos.

Com base neste aspecto, a simulação de condições extremas torna-se ainda mais relevante frente às mudanças climáticas contemporâneas, que submetem os elementos cimentícios a variações térmicas bruscas e eventos de saturação mais severos do que os previstos em décadas passadas (Romero-Gómez et al., 2025).

Em concordância Farias Filho et al. (2011) destacam que os materiais empregados na construção civil estão sujeitos à atuação de diversos agentes que promovem seu envelhecimento. Esse fenômeno pode ser entendido, de forma geral, como qualquer processo de degradação decorrente da interação entre o material e o meio em que se encontra, provocando alterações em sua estrutura e em propriedades como dimensões, resistência mecânica, comportamento químico e térmico. As variações constantes nas condições de exposição, como umidade, temperatura e outros fatores ambientais, acabam, em muitos casos, dificultando a compreensão e o domínio do processo de envelhecimento e da durabilidade dos materiais de construção.

2.3.2 Estudos de envelhecimento presentes na literatura

Diversas metodologias têm sido propostas na literatura para a simulação dos mecanismos de degradação em materiais, diferenciando-se principalmente quanto aos agentes envolvidos e à forma como são aplicados ao longo do tempo. Essas abordagens

buscam reproduzir, de maneira controlada, condições específicas de exposição, de acordo com o tipo de solicitação predominante e com os objetivos de cada estudo.

A seleção da metodologia mais adequada depende, portanto, da representatividade das condições impostas e da coerência entre o mecanismo simulado e o comportamento esperado em campo. Nesse sentido, diferentes tipos de simulações vêm sendo empregados, cada um com características próprias e aplicações específicas.

Assim, apresentam-se na Tabela 2, as principais simulações utilizadas, organizadas de forma a facilitar a compreensão de suas particularidades e campos de aplicação.

Tabela 2 - Principais ensaios de degradação acelerada e materiais utilizados.

Simulação	Materiais costumeiramente aplicados
Simulação de condições atmosféricas poluídas e exposição à radiação UV	Argamassas de cal e pedras
Ciclos de intemperismo com variações	Argamassas de cal e cimento, pedras e concreto
Ciclos de congelamento e descongelamento	Argamassas de cal e cimento, concreto e reboco de gesso
Ciclos de molhagem e secagem	Argamassas de cimento, concreto e rebocos de gesso
Ciclos de chuva e calor	Argamassas de cal e cimento, concreto
Ciclos de ciclagem térmica	Argamassas de cimento e concreto
Ciclos de aquecimento e congelamento	Argamassas de cimento e concreto

Nota: Adaptado de Romero Gomez (2025)

2.3.3 Modelos de previsão de envelhecimento acelerado

A estimativa da durabilidade de componentes construtivos apresenta desafios metodológicos significativos. Segundo De Freitas et al. (2014), a previsão da vida útil de qualquer material de construção não é uma tarefa simples, uma vez que os investigadores devem optar por diferentes abordagens, cada uma apresentando desvantagens e limitações

inerentes ao processo de simulação. Enquanto em edifícios reais os materiais estão sujeitos a ações climáticas mutáveis e incontroláveis, no ambiente laboratorial busca-se a exposição a condições artificiais e controladas através de câmaras de envelhecimento (De Freitas et al., 2014).

Em adição a este pensamento, Obrzut et al. (2020) afirma que diversos fatores e inúmeras combinações podem ser considerados para avaliar como os materiais irão se comportar ao longo do tempo. A própria caracterização rotineiramente, por meio de ensaios mecânicos, já permite identificar certos comportamentos associados a causas endógenas de degradação. Contudo, quando se busca determinar os parâmetros relacionados às causas exógenas, surgem maiores dificuldades. A avaliação desses agentes externos tende a ser mais empírica e, muitas vezes, limitada a situações específicas, o que torna sua quantificação e reprodução mais complexas (Obrzut et al., 2020).

Segundo Quintela (2006), o ideal seria a utilização de uma combinação entre os ensaios de longa duração e de curta duração, uma vez que os ensaios de longa duração (envelhecimento natural) permite aferir o realismo dos resultados do envelhecimento acelerado.

Nesse sentido, a literatura aponta algumas discrepâncias fundamentais entre os ensaios de campo e de laboratório. De acordo com Ye et al. (2022), os testes de envelhecimento natural demandam períodos extensos e os fatores ambientais não podem ser estritamente controlados, o que frequentemente resulta em diferenças marcantes quando comparados aos procedimentos artificiais. Complementarmente, Frigione e Rodríguez-Prieto (2021) advertem que um limite crítico do envelhecimento acelerado reside na aplicação de agentes de degradação em níveis excessivamente elevados, o que pode desencadear mecanismos de falha e processos irrealistas que jamais ocorreriam sob condições naturais de exposição.

A complexidade da correlação é agravada pela interação dos agentes climáticos. Conforme exposto por De Freitas et al. (2014), em condições reais de serviço, múltiplos agentes ambientais atuam simultaneamente, promovendo ações sinérgicas sobre os

materiais que são de difícil reprodução em ambiente laboratorial, onde os mecanismos de degradação tendem a ser analisados de forma isolada ou sequencial. Sob a ótica da análise de desempenho, Ye et al. (2022) observaram que, embora a tendência de variação de certas propriedades físicas possa seguir padrões similares em ambos os métodos, a velocidade de deterioração é marcadamente distinta, impossibilitando a aplicação direta das taxas de degradação artificial às condições naturais.

Atualmente, a literatura técnica estabelece que não há um fator de correlação universal para esses métodos. Segundo Frigione e Rodríguez-Prieto (2021), procedimentos de envelhecimento acelerado não podem ser correlacionados de forma exata com a exposição natural, a menos que um grau de correlação quantitativa tenha sido previamente calculado e validado para o material específico em análise. Por fim, como sugerem os estudos de Pinchard et al. (2024) e Parracha et al. (2024), o estabelecimento de tais tempos de correlação depende intrinsecamente de variáveis como o tipo de material, as especificações do equipamento de teste e, crucialmente, as particularidades climáticas do local de exposição externa utilizado como referência.

Apesar das complexidades inerentes à simulação do intemperismo natural em ambiente laboratorial, a literatura técnico-científica propõe metodologias robustas para viabilizar a estimativa da vida útil dos materiais. Segundo De Freitas et al. (2014), o desenvolvimento de modelos matemáticos e empíricos surge como uma necessidade para estabelecer uma ponte quantitativa entre os danos observados em condições aceleradas e o desempenho real esperado em serviço.

De acordo com Frigione e Rodríguez-Prieto (2021), estas soluções visam transformar o tempo de ensaio em uma estimativa confiável, utilizando fatores de ajuste que consideram as particularidades químicas dos materiais e as variáveis climáticas locais. Complementarmente, Ye et al. (2022) afirmam que a aplicação de ferramentas analíticas permite que a degradação acelerada forneça dados numéricos confiáveis sobre a durabilidade, reduzindo a subjetividade na interpretação dos resultados obtidos em câmaras de envelhecimento. Por fim, conforme defendido por Farias Filho (2007), a utilização destes modelos de previsão é fundamental para fundamentar a tomada de

decisão ainda na fase de projeto, garantindo a segurança e a economia das edificações ao longo do tempo.

Neste contexto, uma das formas de avaliação seria a partir da cinética de degradação térmica avaliada pelo modelo de Arrhenius (Pinchard et al. 2024), considerado a abordagem pioneira para prever a durabilidade de materiais expostos a temperaturas constantes. Segundo Frigione e Rodríguez-Prieto (2021), este modelo fundamenta-se na premissa de que a degradação se comporta como uma reação química acelerada exponencialmente pelo calor. Ao identificar a energia de ativação do material, o modelo estabelece um fator de aceleração que correlaciona diretamente o tempo de exposição laboratorial ao tempo na natureza.

Em contrapartida, quando a simulação exige a representação de flutuações ambientais e não apenas de temperaturas contínuas, o modelo de Coffin-Manson apresenta-se como uma formulação mais adequada (Parracha et al. 2024). Esta abordagem foca na fadiga térmica gerada por ciclos alternados de aquecimento e resfriamento, correlacionando a amplitude térmica do ensaio com a indução de microfissurações e o desgaste mecânico. Conforme explorado nas metodologias de Ye et al. (2022), o acúmulo de deformações plásticas a cada ciclo permite calcular a equivalência temporal frente às variações sazonais reais.

Adicionalmente, para materiais de matriz porosa, onde a água atua como um potente catalisador das reações de deterioração, o modelo de Peck introduz a umidade relativa como variável independente. Esta expansão da lei de Arrhenius quantifica o efeito sinérgico entre a temperatura e a saturação, configurando-se como uma ferramenta essencial para fundamentar ensaios de degradação higrotérmica severa (Frigione e Rodríguez-Prieto, 2021).

Já no escopo do tratamento e da extrapolação dos dados experimentais extraídos das câmaras climáticas, ferramentas matemáticas assumem um papel central. O método de ajuste linear por mínimos quadrados, por exemplo, é amplamente aplicado para traçar retas de tendência a partir da quantificação da perda de desempenho ao longo de sucessivos ciclos. Essa extrapolação permite projetar o exato ponto no tempo em que

propriedades fundamentais do revestimento decairão abaixo dos limites exigidos por norma ou ensaios previamente executados (Frigione e Rodríguez-Prieto, 2021).

Em paralelo para análises de longuíssimo prazo, Frigione e Rodríguez-Prieto (2021) destacam o Princípio de Superposição Tempo-Temperatura para a construção de Curvas Mestras. Esta técnica analítica baseia-se na premissa de que os danos gerados por longos períodos em baixas temperaturas podem ser equivalentes aos causados por curtos períodos em altas temperaturas, permitindo transladar dados pontuais de laboratório para simular o comportamento de degradação ao longo de décadas.

Por fim, sob a ótica da patologia das construções e do desempenho em campo, a correlação apoia-se na análise empírica e na classificação de formas de curvas de degradação. Consoante os estudos de durabilidade e inspeção de fachadas discutidos por De Freitas et al. (2014), a evolução das anomalias raramente obedece a uma linearidade estrita na realidade. A categorização visual destas curvas em côncavas ou convexas facilita a identificação da fase do ciclo de vida em que o sistema se encontra. Essa metodologia empírica torna possível validar as predições teóricas ao cruzar o padrão de queda de resistência verificado nos corpos de prova com os índices de severidade de danos mapeados em edificações reais, fechando o ciclo entre a simulação e o comportamento efetivo em serviço.

2.3.4 Ciclos e autores analisados

A definição de um ciclo de envelhecimento acelerado consiste na combinação programada e sequencial de diferentes agentes de degradação, tais como variações de temperatura, regimes de umidade e radiação, dentre outros aspectos, aplicados de forma repetitiva para simular a dinâmica climática real de forma condensada.

A avaliação da vida útil de sistemas de revestimento exige a compreensão de como diferentes matrizes reagem a agentes degradadores externos ao longo do tempo. Devido à morosidade dos processos de degradação natural, a comunidade científica tem recorrido a diversos protocolos de envelhecimento acelerado para simular, em períodos reduzidos, os efeitos de anos de exposição climática.

Neste contexto, foi realizada uma revisão abrangendo estudos que utilizam desde argamassas tradicionais de cal e cimento até sistemas complexos de isolamento térmico e argamassas com incorporação de resíduos. A Tabela 3 e 4 sintetiza as principais investigações analisadas, destacando as propriedades avaliadas e as conclusões fundamentais sobre o comportamento dos materiais face ao envelhecimento.

Complementarmente, a eficácia de cada estudo depende das condições de contorno estabelecidas. A Tabela 5 detalha os aspetos operacionais, apresentando os equipamentos e a configuração dos ciclos adotados por cada autor. Esta distinção técnica é essencial para entender como a intensidade dos agentes climáticos influencia a severidade da degradação em laboratório.

Esta compilação revela que, embora existam tendências comuns, como a redução generalizada da resistência mecânica e o surgimento de microfissuras, os resultados podem divergir significativamente dependendo da composição da mistura e do protocolo de ensaio utilizado.

Tabela 3 - Síntese das investigações analisadas: propriedades avaliadas e conclusões sobre o envelhecimento dos materiais.

Autor	Objeto de estudo	Propriedades avaliadas	Conclusões
Carvalho & Luso (2025)	Argamassas com adição de metacaulim	Químicas e mecânicas	Ciclos térmicos extremos reduziram resistências
Silva et al. (2021)	Argamassa Técnica Decorativa (ATD)	Tração e estanqueidade	Houve uma redução da resistência a tração após o envelhecimento
Quintela (2006)	Reboco monocamada	Físicas, mecânicas e estéticas	Redução progressiva da aderência com o envelhecimento e estabilidade estética
Parracha et al., 2024	Sistemas de isolamento térmico multilayer	Físicas, microestruturais, mecânicas, estéticas	Envelhecimento acelerado gerou microfissuras extensas em todos os sistemas
Farias Filho (2007)	Argamassas alternativas com resíduos	Mecânica	Envelhecimento natural reduziu a resistência à compressão, enquanto o envelhecimento acelerado aumentou

Tabela 4 - Síntese das investigações analisadas: propriedades avaliadas e conclusões sobre o envelhecimento dos materiais (Continuação).

Autor	Objeto de estudo	Propriedades avaliadas	Conclusões
Longhi (2012)	Argamassa técnica decorativa	Mecânicas, físicas, visuais	Houve redução da resistência após o envelhecimento
Romero-Gómez et al., 2025	Argamassa de cal hidráulica natural	Físicas, mecânicas e dinâmicas	Teste 1: Redução na flexão e compressão; Teste 2: Aumento da compressão após ciclos; Teste 3: Forte queda inicial e posterior perda de massa.
Obrzut et al. (2020)	Argamassas de cal	Visuais, físicas e mecânicas	O envelhecimento artificial foi mais agressivo que o natural
Morgado (2017)	Argamassa de referência e térmicas	Mecânicas, físicas e visuais	Perda de resistência à compressão após ciclos; pequenas perdas de massa
Kazmierczak et al., (2025)	Argamassa de revestimento cimentícia	Tração e microfissurações	A carbonatação melhora a argamassa, mas o envelhecimento reabre poros, reduz módulo, gera microfissuras e reduz aderência
Lima et al. (2016)	Microbetões laminados	Mecânicas e microestruturais	Envelhecimento acelerado degrada fortemente compósitos com matriz de cimento puro
Silva (2014)	Sistema de revestimento cerâmico	Mecânica, físicas, térmicas e microestruturais	Envelhecimento acelerado simulou bem a degradação real do sistema
Pinchard et al. (2024)	Argamassas térmicas	Térmicas, físicas, visuais e biológicas	Cada mecanismo de envelhecimento afetou de forma distinta as argamassas, ou seja, cada ciclo e material tende a ser específico
Ye et al. (2022)	Argamassa leve com agregado de perlita expandida	Físicas, mecânicas e microestruturais	Massa: ciclos acelerados reduzem; naturais aumentam e depois reduzem. Resistência: comportamento variável
Maia, Ramos & Veiga (2019)	Sistema completo de revestimentos térmicos	Físicas, mecânicas e visuais	Metodologia permite adaptação dos ciclos a diferentes climas
Botas (2009)	Diferentes composições de argamassas	Mecânicas e físicas	Perda progressiva de massa e resistência com ciclos
Lemos (2025)	Argamassas com resíduos PET	Mecânicas e físicas	Resistência diminui com aumento da incorporação de PET; envelhecimento acelerado intensificou a perda

Nota: Autoria Própria, 2026.

Tabela 5 - Síntese das investigações analisadas: configurações dos ciclos de envelhecimento e equipamentos utilizados.

Autor	Ciclo	Equipamento
Carvalho & Luso (2025)	6 ciclos com 4 etapas: 35 °C (8h) → resfriamento até -10 °C (4h) → -10 °C (8h) → aquecimento até 35 °C (4h); UR 90%	Câmara ESPEC LHU-114
Silva et al. (2021)	20 ciclos (600h): 80 °C ±4°C e 56% UR (90 min) → transição (60 min) → 5 °C ±4°C e 80% UR (90 min)	Câmara Feltron (Climatic Test Chamber)
Quintela (2006)	Ciclo A: estufa + repouso + frio; Ciclo B: variação T + umidade; Ciclo C: T + umidade + chuva + radiação	Câmara Vötsch VC 4034 e Fitoclima 600 EDTU
Parracha et al., 2024	80 ciclos calor/chuva (70 °C + chuva) + 5 ciclos calor/frio (50 °C ↔ 20 °C)	Câmara FitoClima 700 EDTU
Farias Filho (2007)	Molhagem → secagem → resfriamento → repetição	Sem máquina específica
Longhi (2012)	20 ciclos (600h): 80 °C → transição → 5 °C	Câmara Feltron
Romero-Gómez et al., 2025	Teste 1: calor + chuva; Teste 2: enchente + calor; Teste 3: choque térmico	Estufas, câmaras frias e controle térmico
Obrzut et al. (2020)	6 ciclos (168h cada): condensação + UV + spray de água (1008h total)	QUV Weathering Tester
Morgado (2017)	8 ciclos calor → gelo + 8 gelo → degelo	Infravermelho, tanques e arca frigorífica
Kazmierczak et al., (2025)	Aquecimento a 80 °C + resfriamento por molhagem (20 ciclos)	Sistema térmico + molhagem
Lima et al. (2016)	Ciclo 48h: 17h imersão (22 °C) + 30h estufa (70 °C) + 1h ambiente	Estufas e tanques
Silva (2014)	Ciclo 65 min: saturação + variação térmica	Máquina específica
Pinchard et al. (2024)	Ciclos de alta T, umidade e gelo-degelo	Câmara ARALAB FC700EDTU
Ye et al. (2022)	80 ciclos (6h): aquecimento (70 °C) + manutenção + chuva + drenagem	Câmara desenvolvida pelos autores
Maia, Ramos & Veiga (2019)	Ciclo 1: variação térmica Ciclo 2: choque térmico por chuva	Câmara Aralab Fitoclima 700 EDTU
Botas (2009)	40 ciclos gelo-degelo (congelamento → degelo contínuo)	Câmara climática
Lemos (2025)	Imersão → secagem → choque térmico (3 ciclos)	Estufas e sistemas de imersão

Nota: Autoria Própria, 2026.

A análise interpretativa dos estudos apresentados permite identificar pontos de convergência e divergência relevantes entre os autores no que se refere ao uso de ensaios de envelhecimento acelerado aplicados a materiais.

De forma convergente, observa-se que diversos trabalhos indicam que os ciclos de envelhecimento acelerado afetam prioritariamente a integridade estrutural interna e as zonas de transição do material. Essa degradação está frequentemente associada ao surgimento de microfissuras na matriz cimentícia, provocadas pelas severas solicitações de expansão e contração impostas pelos ciclos térmicos, o que penaliza diretamente propriedades como a resistência à flexão e o módulo de elasticidade interno (Farias Filho, 2007; Kazmierczak et al., 2025). Embora falhas de aderência também sejam recorrentemente citadas na literatura, a perda de coesão interna surge como um indicador primário de fadiga estrutural.

Os autores também convergem ao apontar que a degradação dos materiais não está associada exclusivamente à ação isolada do calor. A combinação entre variações térmicas abruptas (ciclagem térmica) e a presença de umidade é reconhecida como o fator mais agressivo para as matrizes cimentícias. Pesquisas recentes destacam que ensaios que simulam "eventos extremos", como congelamento seguido de calor e saturação, são essenciais frente às atuais mudanças climáticas, pois promovem a introdução de tensões internas drásticas que facilitam a lixiviação e a penetração de agentes degradantes (Romero-Gómez et al., 2025).

Já com relação às argamassas cimentícias, em específico, diferentemente das de cal, apresentam um comportamento marcado por uma elevada rigidez inicial e um rápido ganho de resistência mecânica, mas tornam-se susceptíveis a processos de degradação específicos à medida que o tempo passa (Longhi, 2012). Segundo Botas (2009), no início da vida útil, o cimento Portland reage rapidamente com a água, conferindo alta coesão e resistência mecânica em idades precoces, em ambientes controlados ou estáveis, as argamassas cimentícias podem continuar a ganhar resistência ao longo do tempo devido à hidratação residual dos grãos de cimento ainda não reagidos (Longhi, 2012).

Contudo, Longhi (2012), ainda complementa citando que, sob a ação de envelhecimento acelerado, a argamassa costuma apresentar um ganho inicial de resistência seguido por uma queda gradual, isso ocorre porque, após a hidratação completa e a carbonatação da cal livre, os agentes externos começam a degradar a matriz cimentícia, gerando tensões internas que enfraquecem as ligações.

Também, segundo Temoche (2009), ao longo dos anos, a exposição diária à radiação solar e ao resfriamento noturno gera ciclos de expansão e contração. Como os materiais cimentícios têm dificuldade em absorver essas deformações sem romper, o material sofre um processo de fadiga que resulta em degradações internas. Este processo de fadiga térmica reflete-se na alteração das propriedades físicas e mecânicas latentes da argamassa. Ao longo dos ciclos de exposição, observa-se uma contínua variação de massa volumétrica associada tanto à lixiviação de compostos solúveis do cimento (perda de massa) quanto à progressiva entrada de água em novos poros gerados pela microfissuração (ganho de massa) (Farias Filho, 2007). Consequentemente, a degradação estrutural manifesta-se inicialmente por uma queda acentuada na resistência à tração na flexão muito mais sensível aos microdanos da matriz do que à compressão, constituindo o primeiro indicador físico da perda de durabilidade do material.

Neste contexto, um ponto recorrente na literatura refere-se à dificuldade de previsão do comportamento futuro dos materiais. Uma vez que, estes estudos relatam essa "falsa" sensação de melhoria nos primeiros ciclos de envelhecimento.

Em contrapartida, observa-se divergência entre os autores quanto aos métodos de ensaio mais adequados para aferir esse dano. Enquanto alguns defendem o uso crescente de métodos não destrutivos, como velocidade de pulso ultrassônico, para detectar fissuras em microescala, outros priorizam os ensaios destrutivos tradicionais (flexão e compressão), argumentando que estes traduzem de forma mais fiel a perda de capacidade de suporte de carga que o material sofrerá em serviço.

Adicionalmente, embora publicações extremamente recentes busquem estabelecer modelos matemáticos preditivos (Parracha et al., 2024), ainda não há consenso quanto à existência de um protocolo ou fator de conversão universal. É comum

que cada autor proponha equivalências próprias com base na agressividade do equipamento utilizado e nas condições climáticas da região estudada.

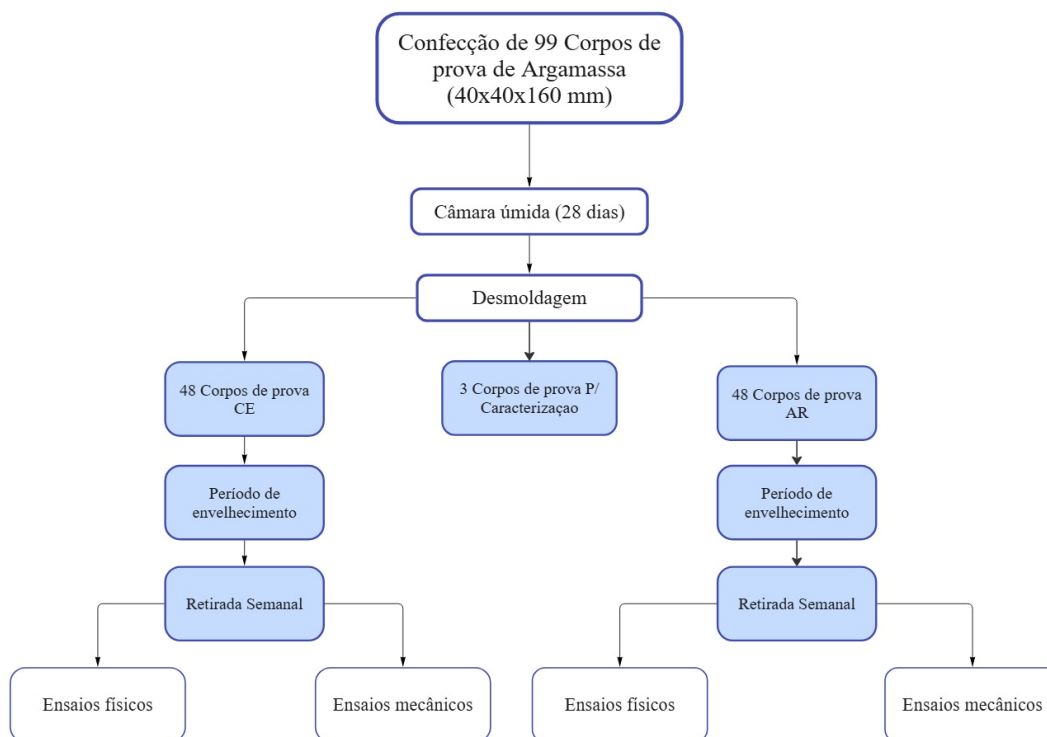
De modo geral, os ensaios em câmara climática, objeto de estudo deste trabalho, mostram-se como uma ferramenta eficaz e cientificamente validada para acelerar processos de degradação. Contudo, como a literatura ainda carece de padronizações que estabeleçam de forma inquestionável a relação matemática entre envelhecimento acelerado e natural para todas as matrizes, o caráter empírico dessas correlações justifica plenamente a abordagem experimental comparativa e o desenho metodológico adotados nesta pesquisa.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente trabalho adota uma abordagem experimental com caráter comparativo, visando analisar a relação entre o envelhecimento acelerado e o envelhecimento natural de argamassas de cimento normalizadas. O estudo baseia-se na produção de corpos de prova submetidos a diferentes condições de exposição, incluindo ciclos de envelhecimento em câmara climática e em exposição natural ao ambiente externo, com posterior avaliação de propriedades mecânicas e físicas. A metodologia foi estruturada de modo a permitir a comparação dos efeitos dos dois tipos de envelhecimento, buscando identificar tendências de degradação e possíveis correlações entre os métodos de avaliação da durabilidade.

3.1 Metodologia experimental

O estudo foi estruturado a partir de um desenho experimental comparativo indicado na Figura 4, no qual 99 corpos de prova de argamassa com as dimensões 40x40x160 mm foram produzidos sob condições controladas e posteriormente submetidos a dois regimes distintos de exposição: envelhecimento acelerado em câmara de envelhecimento (CE) e envelhecimento natural (AR) por exposição ao tempo. A partir dessa abordagem, buscou-se avaliar de forma paralela a evolução do comportamento mecânico das argamassas ao longo do tempo, analisando uma possível comparação direta entre os dois métodos de envelhecimento. O estudo concentra-se na avaliação do desempenho mecânico e físico das argamassas, não abrangendo análises microestruturais ou químicas, as quais fogem ao escopo desta pesquisa.

Figura 4 - Fluxograma experimental

Nota: Autoria Própria, 2026.

Após a moldagem e cura inicial em câmara úmida, os corpos de prova foram desmoldados e divididos em dois grupos experimentais. O primeiro grupo foi submetido a ciclos de envelhecimento acelerado (CE) em câmara de envelhecimento, enquanto o segundo grupo foi exposto às condições ambientais naturais (AR).

Ao todo, foram produzidos 99 corpos de prova prismáticos. Desses, 3 foram destinados à caracterização inicial (Etapa 0), servindo como referência experimental. Os 96 restantes foram distribuídos em 16 subgrupos, contendo 6 corpos de prova cada.

Essa divisão permitiu a aplicação de procedimentos experimentais distintos sobre amostras equivalentes, assegurando que as diferenças observadas nos resultados fossem atribuídas predominantemente ao tipo de envelhecimento imposto, uma vez que a

comparabilidade entre os grupos experimentais foi garantida pela adoção do mesmo traço, materiais, processo de moldagem, cura inicial, procedimentos de ensaio, água e temperatura diferenciando-se apenas quanto às condições de envelhecimento impostas.

Em ambos os grupos experimentais, os corpos de prova foram submetidos aos mesmos métodos de ensaio, incluindo ensaios de flexão e compressão, de modo a garantir a comparabilidade dos resultados obtidos. Os dados provenientes dos dois regimes de envelhecimento foram então analisados de forma conjunta, permitindo a avaliação das tendências de ganho ou perda de desempenho e a investigação de possíveis correlações entre o envelhecimento acelerado e o envelhecimento natural.

Para fins de organização e rastreabilidade, adotou-se um sistema de nomenclatura que considera o regime de envelhecimento aplicado e o tempo de exposição correspondente, seguindo o exemplo:

- Sigla-Numeração-Etapa-Estado
- CP-(1 à 3)-(0 à 16)-(AR ou CE)

Onde:

- Sigla – Refere-se a sigla abreviada CP, a qual significa Corpo de prova;
- Numeração – identifica o corpo de prova dentro do subgrupo experimental;
- Etapa – indica o tempo de exposição pelos ciclos de envelhecimento, sendo que cada etapa equivale a 7 dias (7 ciclos), com exceção da etapa 0, a qual como já explicado serviu como referência;
- Estado – refere-se ao regime de envelhecimento aplicado, sendo CE para envelhecimento acelerado em câmara de envelhecimento e AR para envelhecimento natural ao ar livre.

Esse sistema permitiu a identificação inequívoca dos corpos de prova, bem como a associação direta entre grupo experimental e idade de ensaio, facilitando a análise comparativa dos resultados.

Para cada etapa experimental (excetuando-se a etapa 0), foram destinados 6 corpos de prova, sendo 3 submetidos ao envelhecimento acelerado (CE) e 3 ao envelhecimento natural (AR) para avaliação mecânica e física.

A partir do desenho experimental definido, a etapa seguinte consistiu na seleção e caracterização dos materiais utilizados na produção das argamassas, de modo a garantir condições controladas e reproduzíveis ao longo do estudo.

3.2 Composição das argamassas

Os materiais utilizados neste estudo foram selecionados de modo a garantir condições controladas e representativas para a produção das argamassas. A escolha dos constituintes levou em consideração a sua ampla aplicação em sistemas cimentícios, bem como a conformidade com normas técnicas vigentes, visando assegurar a reprodutibilidade dos resultados e a comparabilidade entre os grupos experimentais definidos no desenho experimental.

O cimento utilizado foi o cimento Portland de calcário CEM II/B-L 32,5 N conforme a norma European Committee for Standardization (CEN, 2001), amplamente empregado em argamassas de uso geral. A escolha desse cimento deve-se à sua disponibilidade no mercado e à sua aplicação recorrente.

A areia utilizada para a moldagem dos corpos de prova possui natureza fluvial proveniente da Espanha e com módulo de finura de 3,38.

Contudo, a fim de obter uma maior homogeneização de resultados e variáveis, optou-se por peneirar a areia conforme descrito na norma European Committee for Standardization (CEN, 1996), simulando a areia de referência (CEN, 1996) que possui como uma das características a composição granulométrica da Tabela 6.

Tabela 6 - Composição granulométrica da areia CEN.

Abertura dos peneiros com malha quadrada (mm)	Resíduos acumulados (%)
2	0
1,6	7 ± 5
1	33 ± 5
0,5	67 ± 5
0,16	87 ± 5
0,08	99 ± 5

Nota: (CEN, 1996), pg. 18 (1996) .

A água de amassamento utilizada na mistura das argamassas, foi proveniente da rede pública de abastecimento e teve sua temperatura devidamente controlada por meio de banho maria, sempre mantida a 20°C com variações mínimas de mais ou menos 0,2°C, a fim de evitar toda e qualquer variação.

3.3 Produção e cura

A produção dos corpos de prova foi realizada em ambiente controlado, utilizando os materiais descritos na seção 3.2, de modo a garantir uniformidade no preparo das argamassas e minimizar variações associadas ao processo de mistura. O procedimento adotado seguiu as recomendações da norma NP EN 196-1:1996, com adaptações pontuais, assegurando, contudo, a reprodutibilidade experimental.

As argamassas foram produzidas segundo a norma (CEN, 1996) com um traço de 1:3 (cimento:areia), correspondente a 450 ± 2 g de cimento e 1350 ± 5 g de areia, adotando-se inicialmente uma relação água/cimento (a/c) de 0,50, equivalente a 225 ± 1 g de água.

No entanto, verificou-se a necessidade de ajuste na quantidade de água de amassamento, que foi elevada para 260 g, adicionando 35 g de água à mistura, após inspeção visual e tátil do corpo de prova piloto, que evidenciou coesão inadequada para moldagem. Tal adaptação justifica-se pelo fato de a norma prever a utilização da areia de

referência CEN, fornecida com características controladas e certificadas, enquanto neste trabalho foi empregada areia natural com granulometria compatível, porém sem padronização integral segundo o material de referência normativo.

As argamassas foram moldadas em prismas com dimensões de $40 \times 40 \times 160$ mm, conforme especificado na (CEN, 1996), como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Moldagem do corpo de prova.



Nota: Autoria Própria, 2026.

A desmoldagem ocorreu 24 horas após a moldagem, sendo os corpos de prova posteriormente acondicionados em câmara úmida, com umidade relativa superior a 95% e temperatura de (20 ± 2) °C, onde permaneceram por 28 dias, correspondentes ao período de cura adotado.

3.4 Envelhecimento acelerado

No presente estudo, o envelhecimento acelerado foi adotado como ferramenta para antecipar processos relevantes e possibilitar a comparação direta com amostras submetidas ao envelhecimento natural.

Ao todo o valor acumulado entre o somatório individual de todos os corpos de prova resulta em 22480 horas de ensaio, sendo que o primeiro conjunto de corpos de

prova (CP-1-CE e CP-1-AR) foi submetido a 7 dias de ensaio, já o último grupo (CP-16-CE e CP-16-AR) ficou sob a ação do envelhecimento por 112 dias.

3.4.1 Equipamento e ciclos utilizados

Para realização dos ensaios de envelhecimento acelerado foi utilizada uma câmara climática modelo LHU-114 (ESPEC Corp.), conforme Figura 6a e 6b, equipada com sistema de controle balanceado de temperatura e umidade (BTHC – Balanced Temperature and Humidity Control), localizada no Laboratório de Materiais da Construção (LMC) no andar inferior da ESTiG, IPB em Bragança, Portugal.

Figura 6 - Câmara climática.



Nota: Autoria Própria, 2026.

O equipamento permite controle simultâneo e independente das variáveis ambientais, operando na faixa de temperatura de -20°C a $+85^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa entre 40% e 95%. A estabilidade operacional declarada pelo fabricante é de $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ para temperatura e $\pm 5\%$ para umidade relativa, com gradiente térmico espacial de até 5°C .

A câmara possui volume interno de 105 L ($500 \times 600 \times 390$ mm), sendo adequada para a disposição simultânea dos corpos de prova prismáticos sem interferência significativa na circulação interna do ar.

A partir das características climáticas da região de Bragança, Portugal e das premissas analisadas na revisão bibliográfica foram definidos os ciclos de envelhecimento acelerado, estruturados de modo a submeter as argamassas a variações

controladas de temperatura e umidade relativa. A concepção do ciclo buscou reproduzir, de forma representativa, as condições climáticas reais da cidade de Bragança, conforme detalhado no item 3.5, além de simular fadigas térmicas com variações de temperatura e umidade que ocorrem, de fato, na realidade, bem como incluir cenários extremos, uma vez que a severidade destes é essencial frente às mudanças climáticas atuais.

Neste sentido, o objetivo foi estabelecer um regime higrotérmico que se aproximasse das solicitações ambientais naturais, preservando, contudo, o controle experimental necessário à reprodutibilidade e à comparação dos resultados.

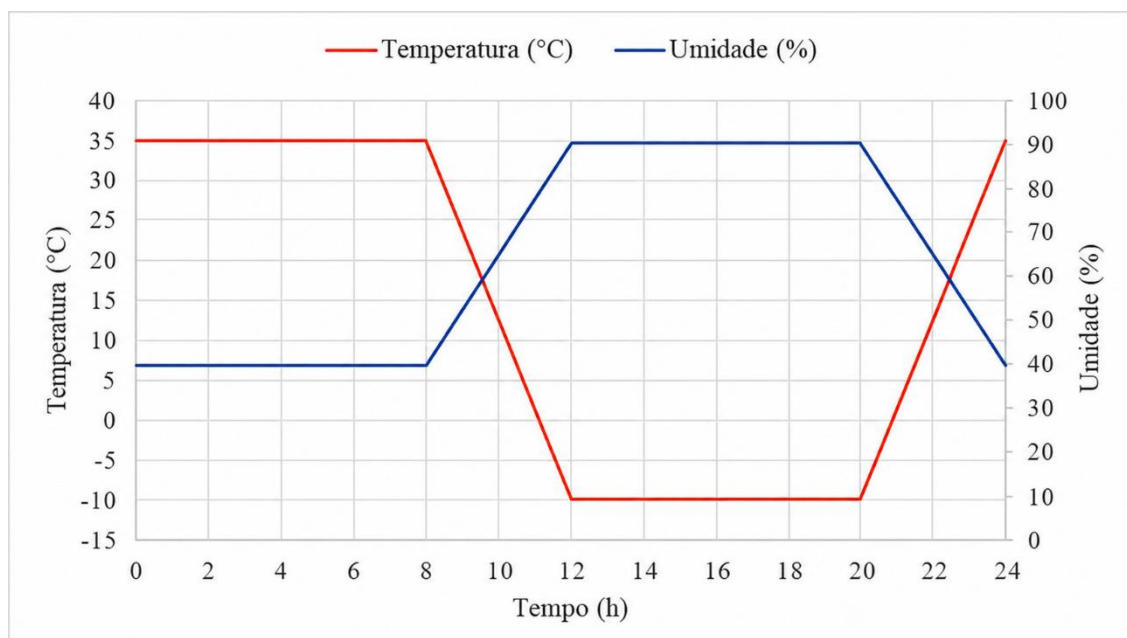
Dessa forma, o ciclo adotado neste estudo foi estruturado conforme descrito a seguir e ilustrado na Tabela 7 e Figura 7:

Tabela 7 - Dados do regime higrotérmico adotado.

Tempo (h)	Temperatura (°C)	Umidade (%)
0	35	40%
8	35	40%
12	-10	90%
20	-10	90%
24	35	40%

Nota: Autoria Própria, 2026.

Figura 7 – Gráfico do regime higrotérmico (ciclo) adotado.



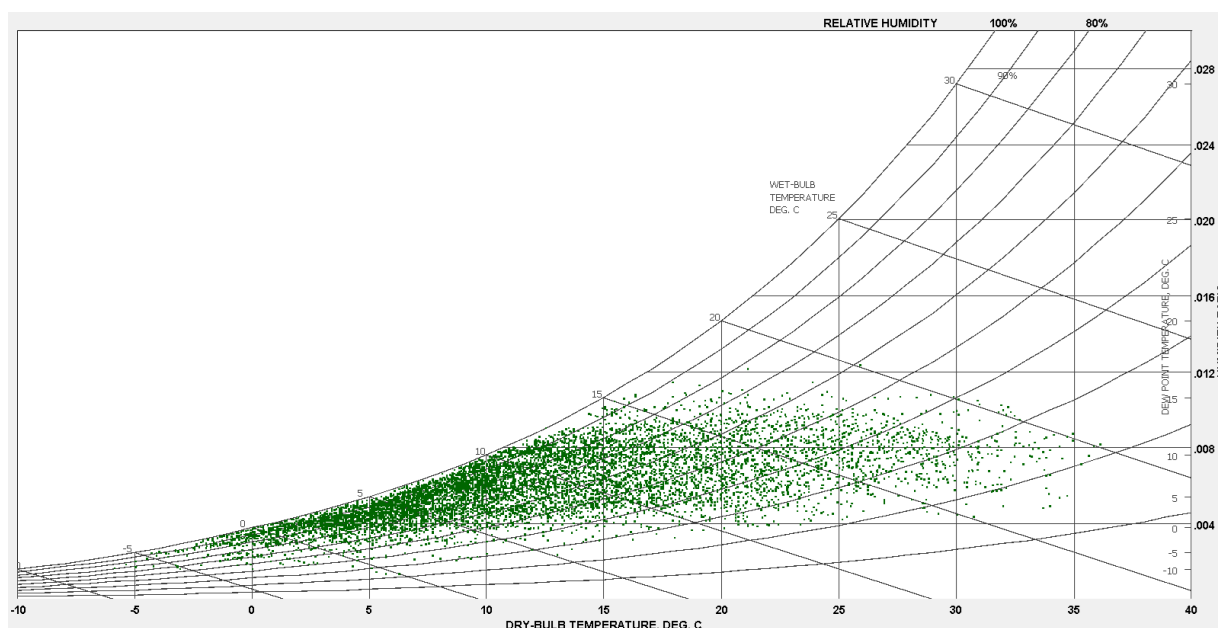
Nota: Autoria Própria, 2026.

- O ciclo inicia-se com temperatura de 35°C e umidade relativa de 40%, permanecendo nessas condições por 8 horas;
- Em seguida, ocorre uma transição, com duração de 4 horas, caracterizada pela redução da temperatura até -10°C e elevação da umidade relativa até 90%;
- Uma vez atingidos esses valores, as amostras permanecem sob tais condições por 8 horas;
- Posteriormente, realiza-se nova transição, também com duração de 4 horas, retornando às condições iniciais de 35°C e 40% de umidade relativa, totalizando um ciclo completo de 24 horas.

A avaliação das temperaturas e umidades baseou-se em estudo climático prévio realizado através da análise do diagrama psicrométrico de Bragança do ano de 2021 através da estação número 085750, com auxílio do software Consultant Climate 6.0, por meio do qual foi possível analisar, ao longo de um ano completo, as variações

predominantes dessas variáveis na cidade de Bragança, Portugal, conforme apresentado pela Figura 8.

Figura 8 - Diagrama psicrométrico de Bragança do ano de 2021.



Nota: Autoria Própria, 2026.

A análise da distribuição anual das condições psicrométricas evidencia ampla variação sazonal, com ocorrência de temperaturas negativas (-5°C) durante o período de inverno e temperaturas superiores a 30°C no verão, associadas a diferentes níveis de umidade relativa variando entre 20% e 100%. Observa-se ainda predominância de condições com umidade relativa elevada em temperaturas mais baixas, característica típica do clima da região.

Sendo assim, o ciclo experimental adotado para a CE contempla dois extremos representativos das condições climáticas locais: uma fase quente e relativamente seca (35°C e 40% UR), compatível com períodos de verão, e uma fase fria e úmida (-10°C e 90% UR), representativa de condições de inverno.

Destaca-se ainda que as etapas de transição, com duração de 4 horas, foram definidas de forma progressiva, evitando variações abruptas de temperatura e umidade. Essa decisão, com base nos estudos analisados, buscou manter maior representatividade

em relação às condições naturais, nas quais as alterações ambientais ocorrem de maneira mais lenta, além de minimizar a indução de solicitações térmicas excessivamente severas que poderiam comprometer a integridade microestrutural das argamassas de forma não representativa.

3.5 Envelhecimento natural

O envelhecimento natural foi realizado com a finalidade de representar as condições reais de exposição ambiental, servindo como referência para a avaliação da representatividade e da eficácia do método de envelhecimento acelerado adotado neste estudo.

Os corpos de prova foram posicionados em ambiente externo, na cobertura da ESTiG IPB, dispostos sobre suporte de madeira elevado em relação ao solo, conforme a Figura 9a e 9b, garantindo ventilação adequada e exposição às variações naturais de temperatura, umidade relativa, precipitação e radiação solar. A disposição das amostras buscou evitar interferências locais, como sombreamento permanente ou contato direto com superfícies que pudessem alterar as condições de umidade.

Figura 9 - Disposição dos corpos de prova em ambiente externo.



Nota: Autoria Própria, 2026.

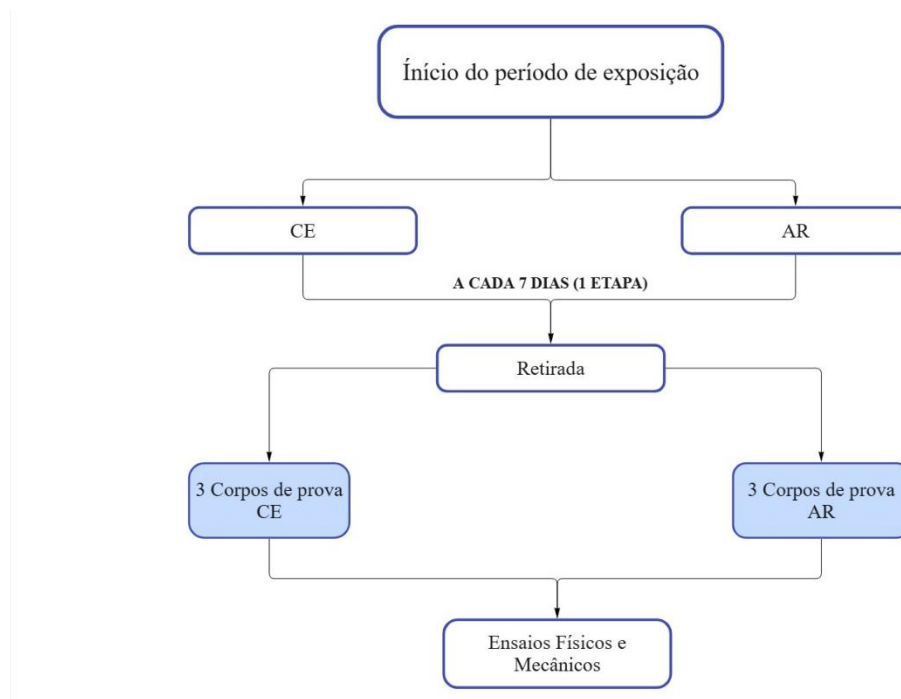
As amostras foram submetidas a um período climático na cidade de Bragança, Portugal, do dia 09/02/2026 ao dia 10/06/2026, o qual compreendeu parte do inverno,

caracterizado pelo frio, chuva constante, umidade elevada e neve em alguns momentos e a primavera com temperaturas mais amenas, estáveis e umidade inferior.

3.6 Critério de retirada das amostras

Os critérios de retirada dos corpos de prova foram previamente definidos conforme a Figura 10, com o objetivo de estabelecer marcos temporais equivalentes entre o envelhecimento acelerado e o envelhecimento natural, possibilitando análise comparativa consistente dos resultados obtidos.

Figura 10 - Fluxograma dos critérios de retirada dos corpos de prova para os ensaios.



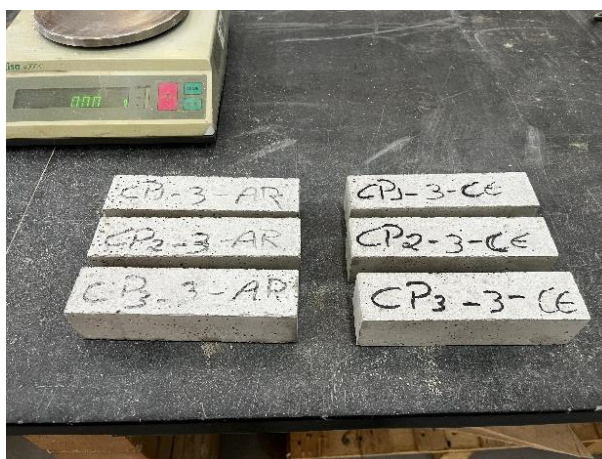
Nota: Autoria Própria, 2026.

Considerando que cada ciclo de envelhecimento corresponde a 24 horas, definiu-se que a cada 7 ciclos completos, equivalentes a 7 dias e 1 etapa, seriam retirados três corpos de prova de cada método de exposição, destinados à realização das avaliações físicas descritas no item 3.7. Dessa forma, ao término de cada etapa semanal, foram removidos três corpos de prova submetidos ao envelhecimento acelerado (CE) e três submetidos ao envelhecimento natural (AR).

O sistema de identificação das amostras incorporou, após a sigla correspondente ao tipo de exposição, um marco temporal numérico variando de 1 a 16, indicando o momento da retirada. Assim, um corpo de prova identificado como CPxx-1-AR ou CPxx-1-CE corresponde ao conjunto removido após 1 semana de exposição, enquanto a nomenclatura CPxx-16-AR ou CPxx-16-CE refere-se às amostras submetidas a 16 semanas de ensaio, tanto em condições naturais quanto aceleradas.

A retirada progressiva e simultânea dos conjuntos experimentais conforme exemplificado na Figura 11, respeitando a equivalência temporal entre os métodos, permite avaliar de forma objetiva a evolução do comportamento das argamassas ao longo do tempo, possibilitando uma possível comparação direta entre os mecanismos de degradação induzidos em ambiente controlado e aqueles decorrentes da exposição natural.

Figura 11 - Corpos de prova retirados no terceiro ciclo de envelhecimento acelerado (CE) e exposição natural (AR).



Nota: Autoria Própria, 2026.

3.7 Ensaios mecânicos e físicos

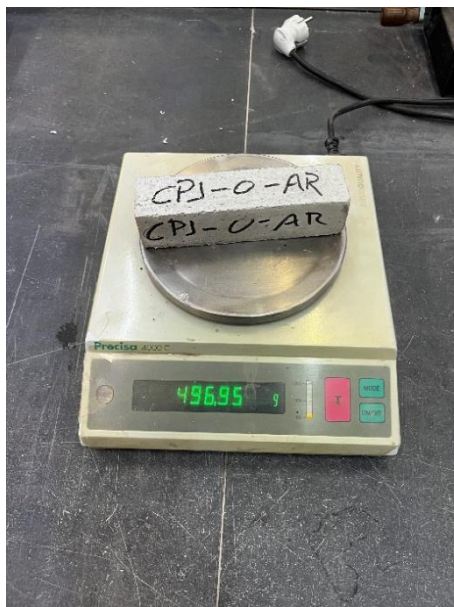
A fim de analisar os efeitos dos diferentes métodos de envelhecimento na durabilidade das argamassas, foram executados ensaios mecânicos (compressão e flexão), bem como determinação da massa volumétrica, nos marcos temporais previamente definidos, permitindo a quantificação das alterações de desempenho ao longo do tempo.

Para cada marco temporal e condição de envelhecimento, foram considerados os valores médios obtidos a partir dos três corpos de prova ensaiados.

3.7.1 Determinação da variação de massa

A massa dos corpos de prova foi determinada imediatamente antes do início dos ciclos de envelhecimento e novamente após cada marco de retirada, utilizando balança digital de precisão, indicada na Figura 12. A comparação entre os valores obtidos permitiu avaliar possíveis ganhos ou perdas de massa associados a processos de absorção, evaporação ou degradação superficial decorrentes da exposição ambiental.

Figura 12 - Determinação da massa dos corpos de prova utilizando balança digital.



Nota: Autoria Própria, 2026.

3.7.2 Ensaios de Flexão

A resistência à flexão foi determinada conforme os procedimentos estabelecidos na norma (CEN, 1996), utilizando corpos de prova prismáticos. O ensaio foi realizado nos marcos temporais definidos no planejamento experimental, permitindo avaliar a evolução da capacidade resistente do material frente às solicitações de tração indireta induzidas pelo envelhecimento.

O ensaio de resistência à flexão foi realizado no equipamento Prensa Marshall/C.B.R de modelo Mod S212 Multi-Speed Tester, (Figura 13)

Figura 13 - Corpo de prova submetido ao ensaio de resistência à flexão.



Nota: Autoria Própria, 2026.

3.7.3 Ensaios de Compressão

Após a realização do ensaio de flexão, as metades resultantes foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão, também em conformidade com a (CEN, 1996). Esse procedimento permitiu a obtenção da resistência à compressão axial das argamassas em diferentes idades de exposição, possibilitando a análise comparativa entre os regimes de envelhecimento acelerado e natural.

Já o ensaio de resistência à compressão foi realizado em uma máquina universal para ensaios de compressão da marca Matest, conforme a Figura 14.

Figura 14 - Corpo de prova submetido ao ensaio de resistência à compressão.



Nota: Autoria Própria, 2026.

3.8 Procedimentos para estimativa de durabilidade

Nesta etapa, descreve-se o roteiro matemático utilizado para correlacionar os dados experimentais obtidos sob condições aceleradas na câmara de envelhecimento com o tempo de exposição natural.

Para quantificar a durabilidade da argamassa, considerando que a mesma é submetida a choques térmicos cíclicos (transição entre 35 °C e -10 °C), aplicou-se o modelo de Coffin-Manson para quantificar o dano por fadiga decorrente da expansão e contração térmica diferencial. O fator de aceleração por fadiga (AF_{Fm}) foi calculado conforme a Equação 1:

$$AF_{Fm} = \left(\frac{\Delta T_{acc}}{\Delta T_{nat}} \right)^m \quad (1)$$

Onde (ΔT_{acc}) representa a amplitude térmica total do ciclo acelerado e (ΔT_{nat}) a amplitude média diária característica da região de estudo.

A partir deste índice, cada conjunto de amostras retirado da câmara climática foi convertido para uma "Idade Equivalente" (T_{eq}), permitindo a construção das curvas de degradação temporal através da Equação 2:

$$T_{eq} = T_{acc} * AF * Fm \quad (2)$$

Para a execução dos cálculos, foram adotados parâmetros climáticos locais (Bragança) e constantes físico-químicas consolidadas na literatura técnica para matrizes cimentícias porosas, conforme detalhado na Tabela 8:

Tabela 8 - Parâmetros climáticos adotados.

Parâmetro	Símbolo	Valor Adotado	Fonte / Justificativa
Amplitude Térmica (Bragança)	ΔT_{nat}	17,2 °C	Diferença média diária Máx/Mín no ano - IPMA
Amplitude Térmica (Ensaio)	ΔT_{acc}	45 °C	Gradiente entre 35 °C e -10 °C
Expoente de Fadiga	m	3	Parracha et al. (2024)

Nota: Autoria Própria, 2026.

A validação do modelo matemático será realizada através da comparação direta entre a taxa de degradação das amostras da CE e as amostras submetidas ao AR. A correlação final será estabelecida via ajuste linear por mínimos quadrados (R^2), plotando-se a perda de desempenho em função do tempo equivalente em anos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, apresentam-se e analisam-se os dados obtidos durante a fase experimental da pesquisa, compreendendo as propriedades físicas e mecânicas das argamassas submetidas aos processos de envelhecimento natural e acelerado. A discussão dos resultados é fundamentada no confronto entre as evidências laboratoriais e o referencial teórico, buscando identificar os mecanismos de degradação predominantes em cada cenário de exposição, bem como analisar o nível de degradação das argamassas.

Para garantir a clareza na interpretação dos fenômenos, os resultados serão apresentados de forma comparativa e evolutiva. Inicialmente, estabelece-se a caracterização do clima de Bragança e das condições operacionais da câmara climática, servindo de base para a compreensão das solicitações impostas ao material. Na sequência, os dados são discutidos através de três eixos principais: a estabilidade física (análise visual e variação de massa), a integridade estrutural (resistência à tração na flexão) e a capacidade portante (resistência à compressão). Por fim, uma análise gráfica da degradação das argamassas, visando entender a correlação entre os métodos e ensaios propostos.

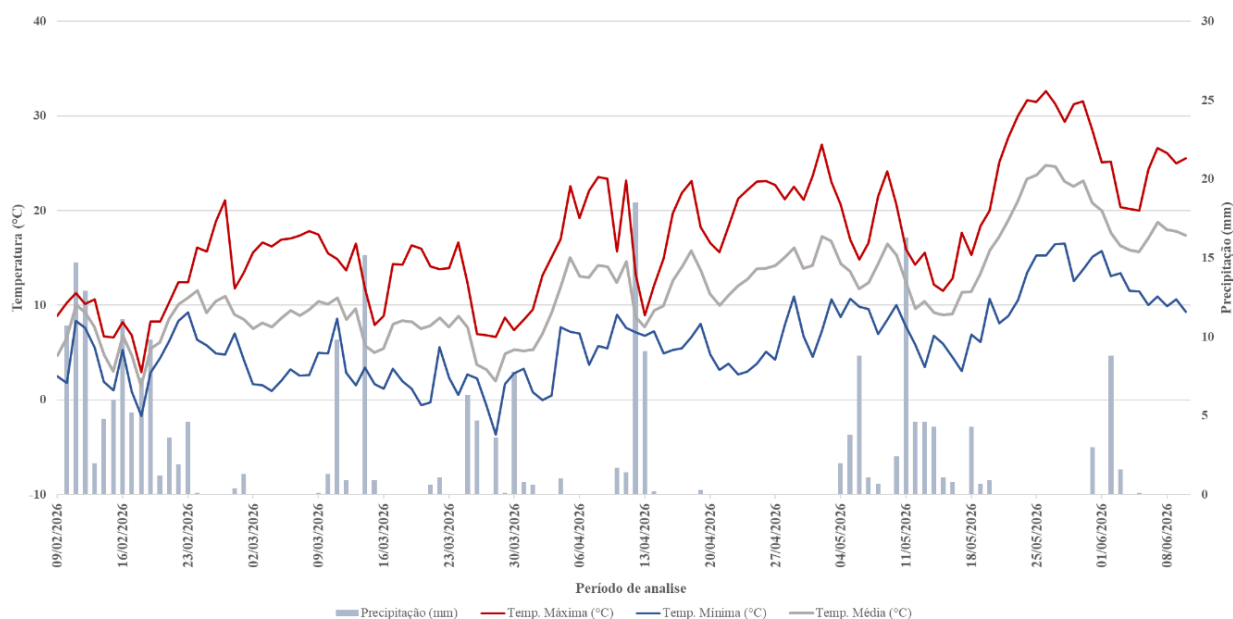
É imperativo ressaltar a natureza cumulativa do processo de envelhecimento; o Ciclo 16, por exemplo, representa o somatório das solicitações higrotérmicas impostas ao material ao longo de todo o período de exposição (fev/2026 a jun/2026), tanto no ambiente real quanto na câmara de envelhecimento acelerado.

Como referência de controle, utilizou-se a 'Etapa 0', que corresponde à caracterização das propriedades mecânicas da argamassa imediatamente após o período de cura normalizada (28 dias). Este valor atua como linha de base, para a quantificação das variações de resistência à compressão e tração na flexão observadas nos ciclos subsequentes.

4.1 Análise climática de Bragança

Para a compreensão aprofundada do comportamento das argamassas expostas ao envelhecimento natural, torna-se imperativo entender que as variações de desempenho mecânico e físico estão interligadas com as solicitações climáticas reais do período. Bragança, situada em uma região de elevada severidade higrotérmica, impõe ao material ciclos complexos de degradação. Os dados meteorológicos apresentados na Figura 15 obtidos através da plataforma Meteoblue para o período de fevereiro de 2026 a junho de 2026, servem como base para a interpretação dos mecanismos de fadiga e saturação que atuaram sobre as amostras de Ar Livre (AR).

Figura 15 - Variação de temperatura do período e o índice de chuvas da região.



Nota: Autoria Própria, 2026.

A análise microclimática da região de Bragança durante o período experimental (09/02/2026 a 10/06/2026) revela um ambiente dinâmico, caracterizado por severas transições sazonais e por fenômenos físicos propícios à degradação acelerada de matrizes cimentícias expostas ao intemperismo natural. O primeiro subperíodo, correspondente ao término do inverno e ao início da primavera (fevereiro e março), foi marcado por elevada saturação higrométrica, decorrente de chuvas frequentes e volumosas. Sob o ponto de vista térmico, este intervalo apresentou o cenário mais crítico para a integridade estrutural

interna das amostras: no final de março (próximo ao dia 27/03), registrou-se o menor valor de temperatura mínima do período, atingindo marcas negativas (na ordem de -3.5°C). A ocorrência deste evento de gelicidade logo após dias de intensa precipitação configura um ciclo real de gelo-degelo, onde a água retida na rede porosa do material tende a congelar e a expandir, gerando tensões internas de tração.

Com o avanço da primavera, a partir de abril, o clima passou a ser ditado por uma forte instabilidade e pelo aumento expressivo da amplitude térmica diária. Um marco importante ocorreu logo após o dia 13/04, data em que se registrou o maior índice pluviométrico concentrado do período (superior a 20 mm). A subsequente dissipação da nebulosidade resultou em choques térmicos diários, com variações térmicas que superaram os 15 °C em um intervalo de 24 horas. Este padrão de elevada amplitude térmica intensificou-se drasticamente na transição para o verão, entre o final de maio e o início de junho.

Neste estágio final, a combinação de escassez de chuvas com a alta radiação solar elevou as temperaturas máximas a patamares acima dos 32°C, enquanto as madrugadas mantiveram-se amenas (próximas a 15°C). Essa oscilação diária recorrente de quase 18°C submeteu os materiais a ciclos sucessivos e severos de dilatação e contração térmica em ambiente seco, favorecendo fenômenos de fadiga térmica antes da data final de ensaio em 10/06.

4.2 Análise visual evolutiva dos corpos de prova

A caracterização visual dos corpos de prova ao longo das 16 etapas revelou padrões de degradação distintos entre o regime de envelhecimento acelerado em CE e a exposição natural AR. A evolução física superficial das amostras reflete diretamente o impacto dos parâmetros climáticos de controle e das ações meteorológicas externas.

Na etapa 2, tanto os corpos de prova do grupo CE quanto do grupo AR apresentam superfícies homogêneas, coloração cinza-claro uniforme, com poucos sinais de desgaste conforme a Figura 16. Nesta fase, as inscrições de identificação feitas com tinta escura permanecem perfeitamente nítidas e aderidas em ambos os grupos. No grupo AR, este

período inicial coincide com baixas temperaturas médias (fevereiro) e pluviosidade distribuída.

Figura 16 - Corpos de prova da 2ª etapa.



Nota: Autoria Própria, 2026.

Já na etapa 4, observa-se uma mudança visual drástica e imediata no grupo AR, no qual os corpos de prova exibiram uma coloração acentuadamente escura e aspecto saturado conforme a Figura 17. Ao cruzar este comportamento com o gráfico climático, verifica-se que o período correspondente (finais de fevereiro a início de março) foi marcado por severos e contínuos eventos de precipitação acumulada (com picos gráficos expressivos de chuva). A matriz cimentícia porosa absorveu a água pluvial por capilaridade, mantendo os poros saturados. Em contrapartida, os corpos de prova do grupo CE mantiveram a coloração clara e o aspecto seco, uma vez que os ciclos controlados na câmara alternavam umidade relativa e temperatura sem a incidência de água em estado líquido.

Figura 17 - Corpos de prova da 4ª etapa.



Nota: Autoria Própria, 2026.

Entre as etapas 7, 11 e 13, consolidam-se as diferenças nos mecanismos de degradação conforme Figuras 18, 19 e 20.

Figura 18 - Corpos de prova da 7ª etapa.



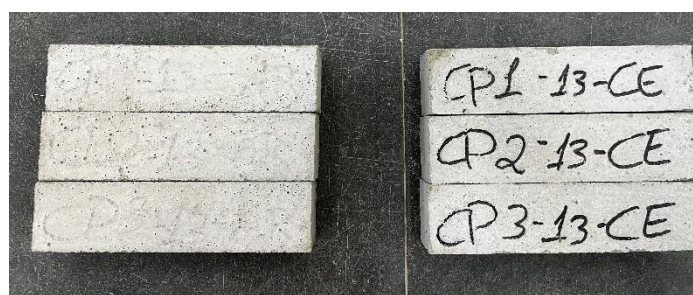
Nota: Autoria Própria, 2026.

Figura 19 - Corpos de prova da 11ª etapa.



Nota: Autoria Própria, 2026.

Figura 20 - Corpos de prova da 13ª etapa.



Nota: Autoria Própria, 2026.

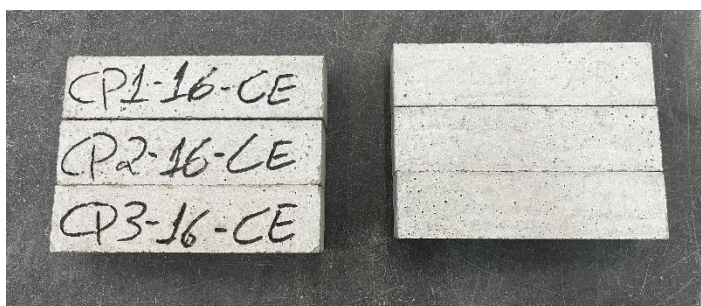
Com o avanço do calendário para a primavera (abril e maio), o gráfico climático aponta uma alternância agressiva entre picos de precipitação intensa e elevação repentina das temperaturas máximas (ultrapassando os 20°C a 25°C). Essa dinâmica acelerou o

processo de lavagem superficial, visualmente, o efeito mais evidente foi a progressiva perda de aderência e desbotamento da tinta de identificação nos corpos de prova externos (AR), que passaram a ficar quase ilegíveis ou completamente apagados. A ação combinada da radiação solar direta, vento e chuva removeu a camada superficial da tinta.

Já na câmara climática, protegidos da ação mecânica da chuva, as marcações da tinta nos corpos de prova mantiveram-se intactas e perfeitamente nítidas. Contudo, a nível de matriz, nota-se o início de uma textura ligeiramente mais pulverulenta devido aos choques térmicos cíclicos de amplitude extrema (35°C a -10°C).

Por fim, ao atingir a última etapa experimental (Etapa 16, correspondente a junho), o contraste visual entre as duas metodologias é evidente conforme a Figura 21.

Figura 21 - Corpo de prova da 16ª etapa.



Nota: Autoria Própria, 2026

As amostras AR exibiram superfícies totalmente limpas de qualquer marcação por tinta ("corpos de prova sem identificação"). O clima de Bragança causou um desgaste superficial abrasivo contínuo. A matriz de argamassa, embora sem fissuras visíveis a olho nu, passou por um processo de lavagem que expôs levemente a textura dos grãos de areia fina na superfície.

Já as amostras CE, foi possível verificar a integridade visual absoluta das marcações pretas texturizadas. No entanto, os poros da argamassa estavam mais desgastados em comparação com os estágios iniciais.

4.3 Resultados da variação de massa

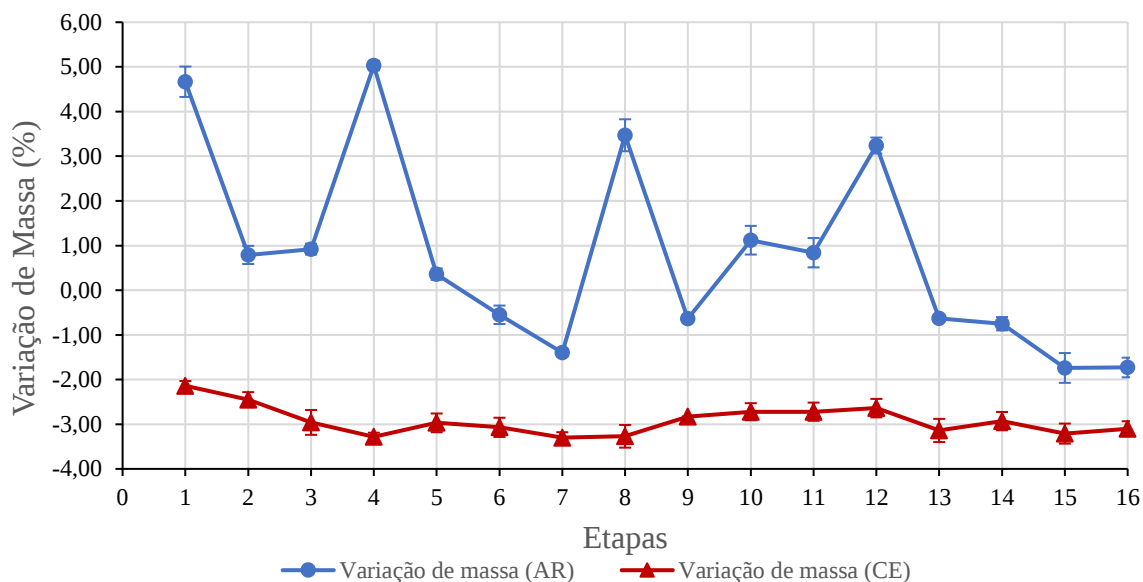
A variação de massa é um indicador físico direto do comportamento da argamassa frente aos diferentes métodos de envelhecimento e exposição ambiental. O monitoramento contínuo deste parâmetro permite avaliar as dinâmicas de absorção e dessorção de umidade pela rede porosa do material, bem como identificar indícios preliminares de lixiviação ou desprendimento superficial. A Tabela 9 e a Figura 22 apresentam os resultados comparativos de variação de massa ao longo das 16 etapas para as amostras submetidas ao envelhecimento acelerado em câmara (CE) e ao intemperismo natural (AR), os valores entre parênteses representam os desvios padrão das amostras.

Tabela 9 - Resultados da variação de massa.

Tabela de variação de massa (%)		
Etapa	AR	CE
0	-	-
1	4,66 ($\pm 0,34$)	-2,14 ($\pm 0,10$)
2	0,79 ($\pm 0,20$)	-2,45 ($\pm 0,16$)
3	0,92 ($\pm 0,12$)	-2,96 ($\pm 0,27$)
4	5,03 ($\pm 0,10$)	-3,28 ($\pm 0,09$)
5	0,36 ($\pm 0,12$)	-2,97 ($\pm 0,20$)
6	-0,55 ($\pm 0,20$)	-3,07 ($\pm 0,21$)
7	-1,4 ($\pm 0,09$)	-3,3 ($\pm 0,12$)
8	3,47 ($\pm 0,35$)	-3,27 ($\pm 0,25$)
9	-0,64 ($\pm 0,00$)	-2,83 ($\pm 0,00$)
10	1,12 ($\pm 0,32$)	-2,72 ($\pm 0,19$)
11	0,84 ($\pm 0,32$)	-2,72 ($\pm 0,20$)
12	3,24 ($\pm 0,17$)	-2,64 ($\pm 0,20$)
13	-0,63 ($\pm 0,06$)	-3,14 ($\pm 0,60$)
14	-0,75 ($\pm 0,14$)	-2,93 ($\pm 0,20$)
15	-1,74 ($\pm 0,33$)	-3,21 ($\pm 0,22$)
16	-1,73 ($\pm 0,22$)	-3,1 ($\pm 0,16$)

Nota: Autoria Própria, 2026.

Figura 22 – Gráfico dos resultados da variação de massa dos corpos de prova.



Nota: Autoria Própria, 2026.

Ao analisar a curva referente aos corpos de prova alocados na câmara de envelhecimento (CE), observa-se um comportamento muito mais estável e previsível, típico de ambientes controlados. Logo na etapa 1, ocorre uma perda de massa inicial de -2,14%, que continua a decair suavemente até estabilizar-se em um patamar próximo a -3% ao longo de grande parte do ensaio (atingindo o pico de -3,3% na etapa 7). Esta perda e subsequente estabilização estão primariamente associadas à evaporação da água livre (água de amassamento remanescente) e à retração por secagem da matriz cimentícia submetida aos ciclos térmicos da câmara LHU-114. Esse padrão corrobora com a literatura estabelecida por Longhi (2012), onde a exposição a ciclos de envelhecimento acelerado tende a induzir a secagem da amostra e estabilizar a massa em patamares negativos devido à ausência de reidratação prolongada.

Em contrapartida, as amostras expostas ao intemperismo natural (AR) apresentam um comportamento de variação de massa altamente errático, refletindo com exatidão a forte instabilidade do clima de Bragança durante o período de estudo. Os picos agudos de ganho de massa evidenciados nas etapas 1 (4,66%), 4 (5,03%), 8 (3,47%) e 12 (3,24%) demonstram a alta suscetibilidade da argamassa à absorção de água capilar. Estes saltos positivos estão em perfeita concordância com os eventos de precipitação volumosa e

frequentes que caracterizaram o final do inverno e a primavera, conforme mapeado na análise climática. A saturação higrométrica das amostras nestas etapas eleva substancialmente a massa global do sistema.

Por fim, o impacto da transição sazonal para o verão fica nitidamente registrado nas etapas finais do ensaio. A partir da etapa 13, a curva AR entra em um declínio acentuado e contínuo, cruzando a linha do zero e mantendo-se em valores negativos até o fim do monitoramento. Nas etapas 15 e 16, a variação de massa atinge saldos de -1,74% e -1,73%, respectivamente. Esta inversão de comportamento coincide exatamente com o final de maio e o mês de junho, período marcado pela drástica redução das chuvas e pela elevação das temperaturas máximas para a casa dos 30°C. O saldo negativo final indica a ocorrência de uma dessecação profunda impulsionada pela elevada radiação solar e baixa umidade relativa do ar. Além da perda de umidade, este resultado negativo final no ambiente externo levanta a hipótese de uma leve perda de material sólido (como o carreamento de finos pelas chuvas anteriores ou leve descamação superficial), potencializada pelos intensos choques térmicos diários enfrentados pelas amostras nas semanas anteriores.

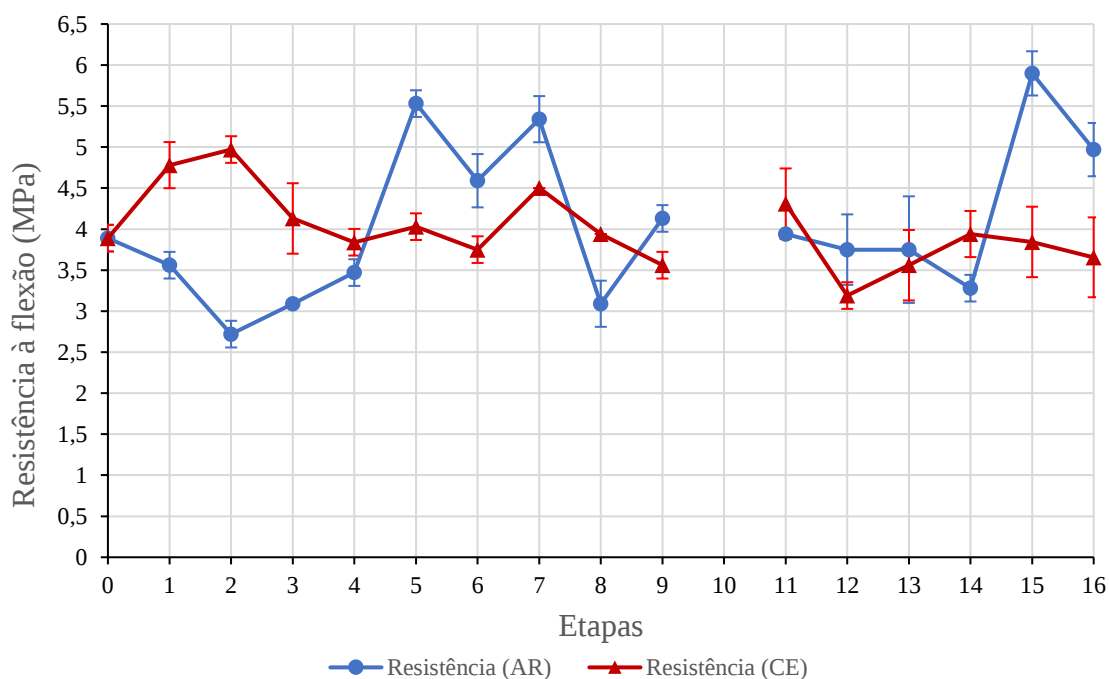
4.4 Resultados da resistência à flexão

A resistência à tração na flexão atua como um dos parâmetros mecânicos mais sensíveis para a avaliação das argamassas. Conforme já discutido na revisão bibliográfica deste trabalho, a degradação estrutural em matrizes cimentícias manifesta-se inicialmente por uma queda acentuada nesta propriedade, uma vez que ela responde de forma muito mais direta e rápida aos danos internos da matriz do que a resistência à compressão, constituindo o primeiro indicador físico da perda de durabilidade do material. A Tabela 10 e a Figura 23, ilustram a evolução do comportamento da resistência à flexão das amostras submetidas à câmara de envelhecimento (CE) e ao ambiente natural (AR) ao longo das etapas avaliadas, os valores entre parênteses representam os desvios padrão das amostras.

Tabela 10 – Resultados da resistência à flexão em MPa.

Etapa	AR	CE
0	3,89 ($\pm 0,16$)	3,89 ($\pm 0,16$)
1	3,56 ($\pm 0,16$)	4,78 ($\pm 0,28$)
2	2,72 ($\pm 0,16$)	4,97 ($\pm 0,42$)
3	3,09 ($\pm 0,00$)	4,13 ($\pm 0,16$)
4	3,47 ($\pm 0,16$)	3,84 ($\pm 0,16$)
5	5,53 ($\pm 0,16$)	4,03 ($\pm 0,16$)
6	4,59 ($\pm 0,32$)	3,75 ($\pm 0,16$)
7	5,34 ($\pm 0,28$)	4,5 ($\pm 0,00$)
8	3,09 ($\pm 0,28$)	3,94 ($\pm 0,00$)
9	4,13 ($\pm 0,16$)	3,56 ($\pm 0,16$)
10	-	-
11	3,94 ($\pm 0,00$)	4,31 ($\pm 0,42$)
12	3,75 ($\pm 0,42$)	3,19 ($\pm 0,16$)
13	3,75 ($\pm 0,64$)	3,56 ($\pm 0,42$)
14	3,28 ($\pm 0,16$)	3,94 ($\pm 0,28$)
15	5,89 ($\pm 0,26$)	3,84 ($\pm 0,43$)
16	4,96 ($\pm 0,32$)	3,65 ($\pm 0,48$)

Nota: Autoria Própria, 2026.

Figura 23 - Gráfico comparativo das resistências à flexão obtidas.

Nota: Autoria Própria, 2026.

Nota metodológica: Ressalta-se, preliminarmente, que durante a execução dos ensaios referentes à Etapa 10 ocorreu um erro de leitura da máquina de ensaios no momento da ruptura. Por comprometer a confiabilidade dos valores de carga, os dados referentes a esta etapa específica foram descartados e suprimidos das análises e representações gráficas.

Analizando o comportamento dos corpos de prova expostos ao envelhecimento acelerado (CE), nota-se que as severas solicitações de expansão e contração impostas pelos ciclos térmicos extremos (transições entre 35 °C e -10 °C) induzem um claro processo de fadiga. A rápida oscilação térmica gera um gradiente de tensões internas que a argamassa não consegue absorver plasticamente. Esse fenômeno corrobora os achados de Parracha et al. (2024) e Romero-Gómez et al. (2025), que destacam que o envelhecimento higrotérmico acelerado e os choques térmicos são implacáveis na indução de fissuração nas zonas de transição da matriz, penalizando diretamente a capacidade de suportar esforços de tração indireta. Embora pequenas oscilações ou falsos ganhos de resistência possam ocorrer nos primeiros ciclos devido à hidratação residual, a tendência primária na câmara climática é a deterioração progressiva.

No que tange aos corpos de prova submetidos ao envelhecimento natural (AR), a evolução da resistência à flexão encontra-se intrinsecamente ligada à agressividade do clima de Bragança. Diferente do ambiente laboratorial, o intemperismo natural promove uma interação complexa e simultânea entre os processos contínuos de hidratação e carbonatação do cimento, que tendem a aumentar a resistência mecânica e enrijecer a matriz, conforme evidenciado por Ramalho (2013), e as ações deletérias do clima (Ye et al., 2022).

Durante os primeiros meses (fevereiro e março), a constante saturação higrométrica pelas chuvas volumosas e o pico de gelicidade (com temperaturas chegando a -3,5 °C) geraram agressões na rede de poros saturada, provocando as primeiras quedas de resistência. Contudo, o fator mais letal para a queda da resistência à flexão em ambiente externo consolidou-se a partir de abril, estendendo-se por maio e junho. Neste período, a forte amplitude térmica diária (variações bruscas que chegaram a 18 °C de diferença entre a madrugada e a tarde), combinada a um tempo cada vez mais seco,

submeteu os prismas a severos e ininterruptos ciclos de contração e dilatação. Essa movimentação térmica exógena causou o rompimento gradual e silencioso das ligações da matriz, refletindo-se em uma clara perda de capacidade de suporte à tração indireta nas semanas finais de exposição.

4.5 Resultados da resistência a compressão

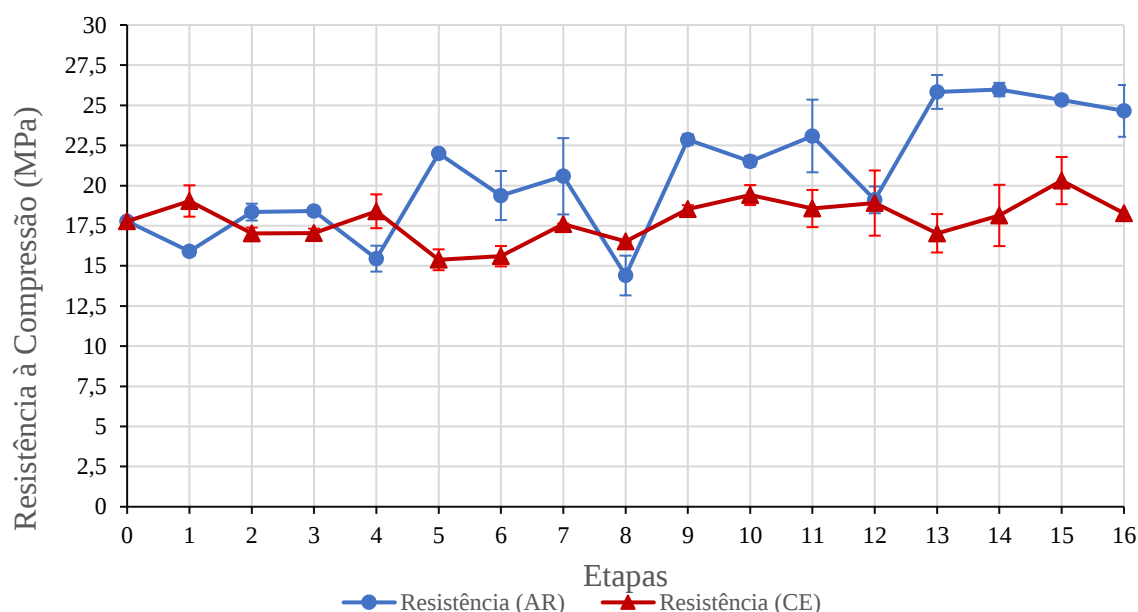
A resistência à compressão simples, diferentemente da resistência à tração na flexão, que demonstra alta sensibilidade a microfissuras localizadas. O comportamento face a esforços de compressão reflete a capacidade global de suporte da estrutura interna da argamassa, sendo diretamente influenciada pelo índice de vazios, pela porosidade capilar e pela densidade dos produtos resultantes da hidratação do cimento. A Tabela 11 e a Figura 24 subsequentes apresentam a evolução dos valores de resistência à compressão para os corpos de prova submetidos aos dois métodos de envelhecimento, os valores entre parênteses representam os desvios padrão das amostras.

Tabela 11 – Resultados da resistência à compressão em MPa.

Etapa	AR	CE
0	17,78 ($\pm 0,23$)	17,78 ($\pm 0,97$)
1	15,91 ($\pm 0,26$)	19,04 ($\pm 0,36$)
2	18,35 ($\pm 0,52$)	17,02 ($\pm 0,26$)
3	18,41 ($\pm 0,26$)	17,05 ($\pm 1,05$)
4	15,45 ($\pm 0,80$)	18,4 ($\pm 0,65$)
5	22,01 ($\pm 0,01$)	15,38 ($\pm 0,16$)
6	19,38 ($\pm 1,52$)	15,6 ($\pm 0,16$)
7	20,58 ($\pm 2,37$)	17,59 ($\pm 0,04$)
8	14,4 ($\pm 1,23$)	16,53 ($\pm 0,04$)
9	22,87 ($\pm 0,32$)	18,54 ($\pm 0,24$)
10	21,51 ($\pm 0,32$)	19,41 ($\pm 0,62$)
11	23,09 ($\pm 2,26$)	18,57 ($\pm 1,15$)
12	19,11 ($\pm 0,83$)	18,91 ($\pm 2,02$)
13	25,83 ($\pm 1,05$)	17,03 ($\pm 1,19$)
14	25,98 ($\pm 0,41$)	18,14 ($\pm 1,90$)
15	25,34 ($\pm 0,26$)	20,31 ($\pm 1,47$)
16	24,65 ($\pm 1,61$)	18,27 ($\pm 0,21$)

Nota: Autoria Própria, 2026.

Figura 24 - Gráfico comparativo das resistências à compressão obtidas.



Nota: Autoria Própria, 2026.

Os resultados obtidos para as amostras submetidas à câmara de envelhecimento (CE) revelam a robustez da matriz padronizada frente aos esforços de compressão, mesmo sob condições severas de ciclagem térmica. Embora os choques térmicos induzam tensões superficiais capazes de penalizar a flexão, o núcleo dos prismas tende a manter-se preservado nas etapas iniciais e intermediárias. Esse comportamento está associado ao teor de cimento da mistura, que garante uma matriz densa e com elevada capacidade de preenchimento de poros. Conforme apontado por Ramalho (2013), matrizes com maior teor de ligante hidráulico exibem uma resistência intrínseca superior quando expostas a ensaios de envelhecimento físico acelerado, retardando os efeitos macroscópicos da degradação por compressão. Além disso, as temperaturas mais elevadas registradas em determinados picos do ciclo da câmara podem atuar como um catalisador térmico para a cinética de hidratação de grãos de cimento retardatários, promovendo uma estabilização ou até mesmo pequenos incrementos pontuais na resistência à compressão.

No que concerne ao envelhecimento natural (AR), o perfil evolutivo da resistência à compressão evidencia a influência direta do clima de Bragança, consolidando um fenômeno clássico de cura ambiental. Durante as etapas que compreenderam o período

de maior pluviosidade, a exposição contínua das amostras à água da chuva funcionou como um agente de cura subsequente.

Esse ganho progressivo de resistência mecânica em ambiente externo converge com as observações de Farias Filho (2007), cujos ensaios de longa duração demonstraram que argamassas expostas ao intemperismo natural frequentemente apresentam uma consolidação da resistência à compressão ao longo do tempo devido aos ciclos naturais de molhagem e cura subsequente. Da mesma forma, Ye et al. (2022) ressaltam que a variação da resistência à compressão difere significativamente entre o envelhecimento laboratorial e o natural; enquanto o método acelerado impõe uma degradação física acelerada por fadiga térmica, o ambiente natural, apesar das intempéries, propicia janelas climáticas favoráveis para o ganho de densidade da matriz cimentícia através de reações químicas lentas e estáveis.

4.6 Análise comparativa entre o envelhecimento acelerado e natural

A predição da vida útil e a avaliação da durabilidade de materiais, em específico de argamassas cimentícias dependem, neste contexto, da extrapolação de resultados obtidos em ensaios de envelhecimento acelerado (CE) para prever o comportamento em condições reais de exposição (AR). Contudo, a experiência prática e os resultados experimentais desta investigação revelam que a transposição desses dados não é um processo linear, mas sim uma interface complexa.

Nesta seção, realiza-se uma análise comparativa profunda entre os dados obtidos no ambiente de envelhecimento natural e os submetidos aos ciclos da câmara climática. Através da análise estatística das linhas de tendência (coeficiente de determinação R^2) e da morfologia das curvas de degradação, busca-se identificar os pontos de convergência, onde os fenômenos de fadiga térmica se sobrepõem e, fundamentalmente, os pontos de divergência, onde a realidade climática de Bragança impõe exigências que a câmara de envelhecimento falha em replicar.

Mais do que validar um modelo de correlação, esta análise propõe uma reflexão crítica sobre as limitações dos métodos de ensaio atuais. Abordar-se-á como fatores

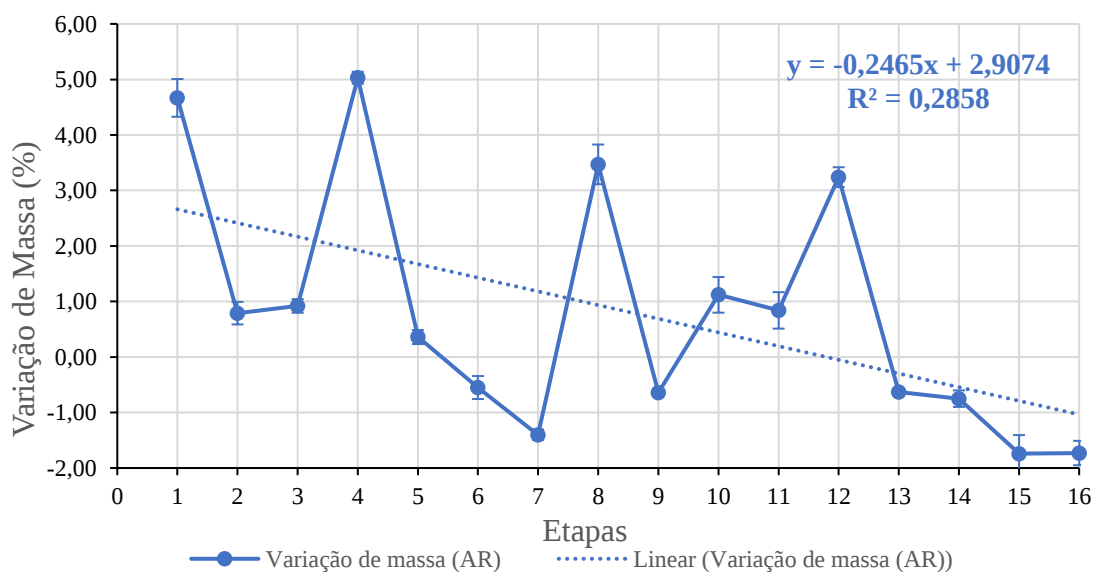
intrínsecos à cinética das argamassas cimentícias, a falta de simulação de agentes específicos, e a própria natureza descontínua dos fenômenos naturais, dificultam a aplicação de modelos matemáticos simplificados. O objetivo central é discutir a validade da aceleração como ferramenta de predição e justificar, com base na evidência empírica, por que a busca por uma correlação universal ou direta, para este caso específico, encontra barreiras intransponíveis.

Por fim, os resultados serão plotados sob a égide da equação de Coffin-Manson, não com o intuito de forçar um ajuste estatístico, mas para ilustrar, através da mecânica da fratura e fadiga, a disparidade entre o dano induzido laboratorialmente e a degradação multifatorial observada.

4.6.1 Análise comparativa entre CE e AR – variação de massa

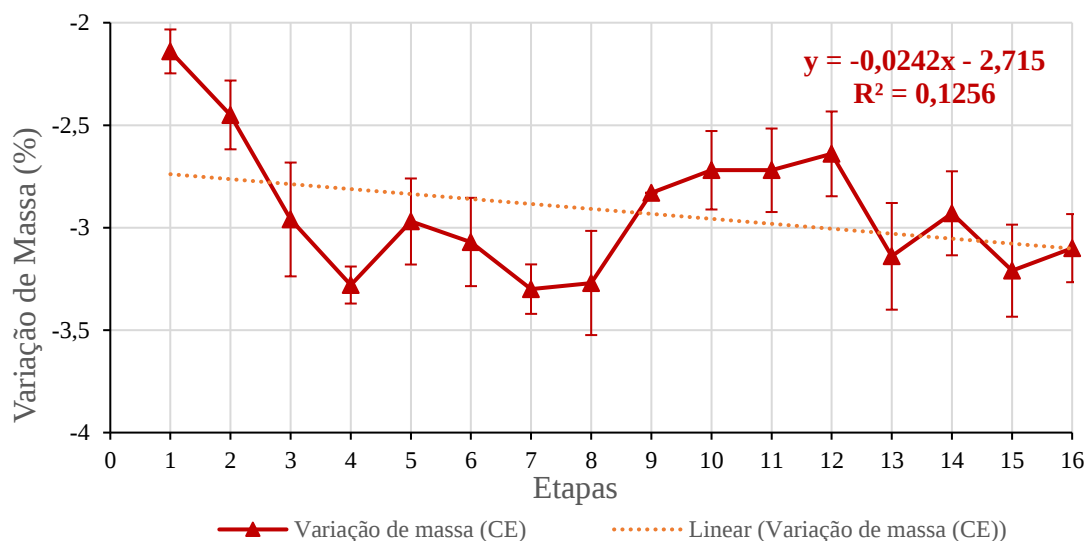
A análise da variação de massa ao longo das etapas experimentais revela disparidades fundamentais entre os dois regimes de exposição (Figura 25 e Figura 26), evidenciando que a perda de material não é um processo puramente mecânico, mas sim o resultado de uma interação complexa com o ambiente.

Figura 25 – Gráfico da variação de massa pelo regime AR.



Nota: Autoria Própria, 2026.

Figura 26 – Gráfico da variação de massa pelo regime CE.



Nota: Autoria Própria, 2026.

Ao observarmos as linhas de tendência obtidas, nota-se uma baixa capacidade explicativa dos modelos lineares para a série AR. Enquanto a câmara de envelhecimento (CE) apresenta uma curva com tendência mais definida, refletindo a perda constante de finos e a degradação superficial cíclica induzida pelos choques térmicos, enquanto a série de envelhecimento natural (AR) exibe um comportamento oscilatório.

A curva AR descreve um padrão de "ganho-perda" que acompanha o clima de Bragança. O ganho de massa nos períodos de maior pluviosidade decorre da saturação capilar dos poros (absorção de água), enquanto as quedas observadas nas etapas subsequentes a períodos de seca intensa indicam que, apesar da hidratação, há uma perda progressiva de material sólido, a baixa linearidade (R^2 reduzido) na série AR é, portanto, uma evidência científica de que o fenômeno é irregular, dependente das variações climáticas diárias que a câmara, por sua própria natureza, não consegue simular fielmente.

Apesar disso, existe um ponto de convergência notável, mesmo com a baixa correlação do R^2 é possível verificar que a linha de tendência indica uma certa intenção de perda de massa com o passar do tempo, mesmo nas etapas de AR, é possível notar que a argamassa não consegue recuperar novamente a % de massa perdida ao longo das etapas, sendo assim, cria-se uma linha de tendência ao decaimento dessa massa, evidenciado pela etapa CE, mesmo que de forma sutil.

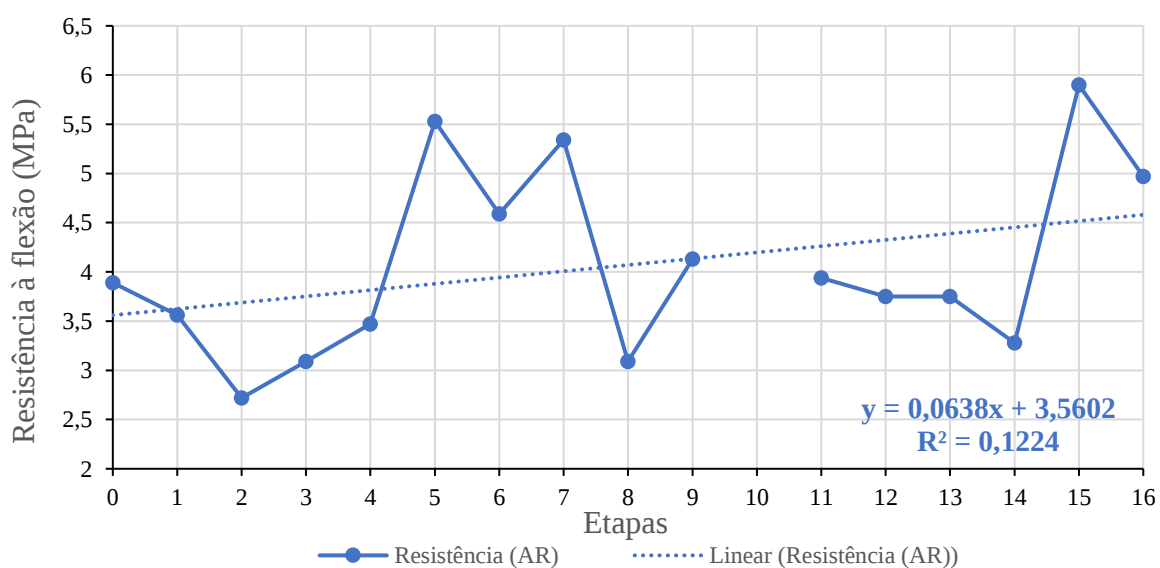
Por este motivo, a impossibilidade de estabelecer uma correlação matemática direta (um fator de aceleração único) entre CE e AR para a variação de massa fundamenta-se nos seguintes pilares:

- A maioria dos ensaios de câmara foca na variação térmica, ignorando o papel da água como agente de lixiviação química e condutor de transporte de finos. O ciclo adotado na câmara não lava a argamassa, apenas a aquece, resfria e muda a umidade presente;
- O envelhecimento acelerado busca a linearidade para facilitar o cálculo da vida útil, mas o envelhecimento natural em Bragança é inerentemente não linear. A falha na correlação não é um erro do experimento, mas a prova de que a aceleração não é uma escala linear do tempo, mas uma alteração da natureza do dano. Sendo necessário um tempo muito maior para validar a correlação correta quando relacionado a perda de massa.

4.6.2 Análise comparativa entre CE e AR – resistência à Flexão

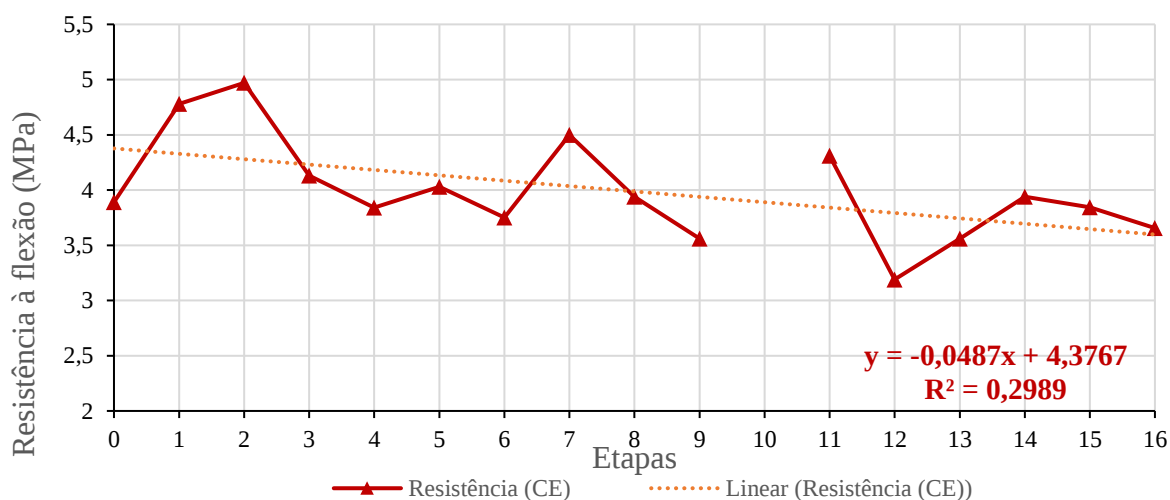
A resistência à tração na flexão demonstrou ser o parâmetro de maior sensibilidade aos danos estruturais da argamassa, como indica a Figura 27 e 28.

Figura 27 - Gráfico comparativo da resistência à flexão pelo regime AR.



Nota: Autoria Própria, 2026.

Figura 28 - Gráfico comparativo da resistência à flexão pelo regime CE.



Nota: Autoria Própria, 2026.

Observa-se uma tendência de decaimento mais acentuado em CE, com um R^2 que indica um ajuste estatístico superior. Conforme discutido por Parracha et al. (2024) a linearidade da curva evidencia um mecanismo de degradação constante, onde a fadiga térmica impõe uma "erosão de resistência" previsível e monótona. O processo de é contínuo e não encontra barreiras de autocura, decaindo sem conseguir retornar à resistência inicial.

Já em AR, o gráfico revela uma trajetória fragmentada e oscilatória, com um R^2 significativamente mais baixo. Esta falta de ajuste linear não deve ser interpretada como um erro de leitura, mas como a assinatura da complexidade climática. A resistência à flexão sofre "soluços" quedas bruscas seguidas de estabilizações pontuais que coincidem com os episódios de gelicidade e secagem severa em Bragança.

Além disso, ao analisar os gráficos, a divergência entre os métodos é marcante, enquanto a CE impõe uma perda de desempenho em ritmo acelerado e constante, a série AR demonstra uma resistência surpreendente em certos períodos, seguida de quedas que a câmara não consegue prever.

No ambiente natural, as reações químicas de estabilização da matriz cimentícia ocorrem simultaneamente à degradação térmica. Na câmara, o ambiente é "seco" e inerte quimicamente; ele degrada a estrutura mecânica sem dar à matriz a chance de "cicatriz"ar

através de processos lentos. A CE acaba por ser um ensaio de destruição pura, enquanto a AR é um ensaio de competição entre degradação e regeneração.

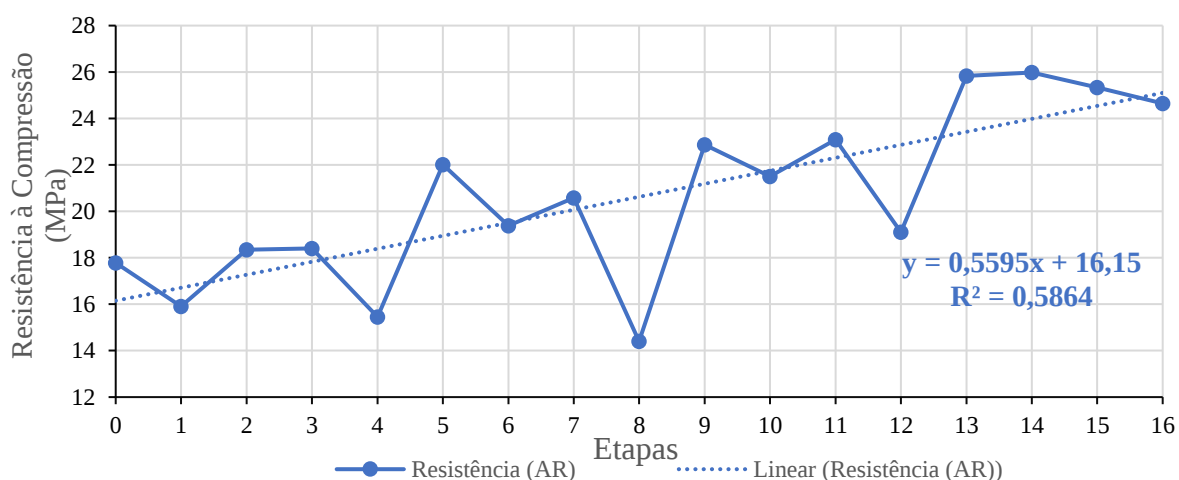
Com base nisto, estabelecer um fator único e 100% correto torna-se complexo devido:

- A flexão em argamassas é altamente dependente do grau de saturação. A câmara não controla a pressão de vapor interna da mesma forma que a umidade de Bragança, o que significa que o estado de "tensão interna" da amostra no ensaio natural é qualitativamente diferente do estado de tensão da amostra na câmara.
- A linearidade da CE, é uma simplificação que ignora que, na vida real, o material tende a se adaptar ao clima, a câmara força uma falha, enquanto o ambiente permite uma certa adaptação.

4.6.3 Análise comparativa entre CE e AR – resistência à Compressão

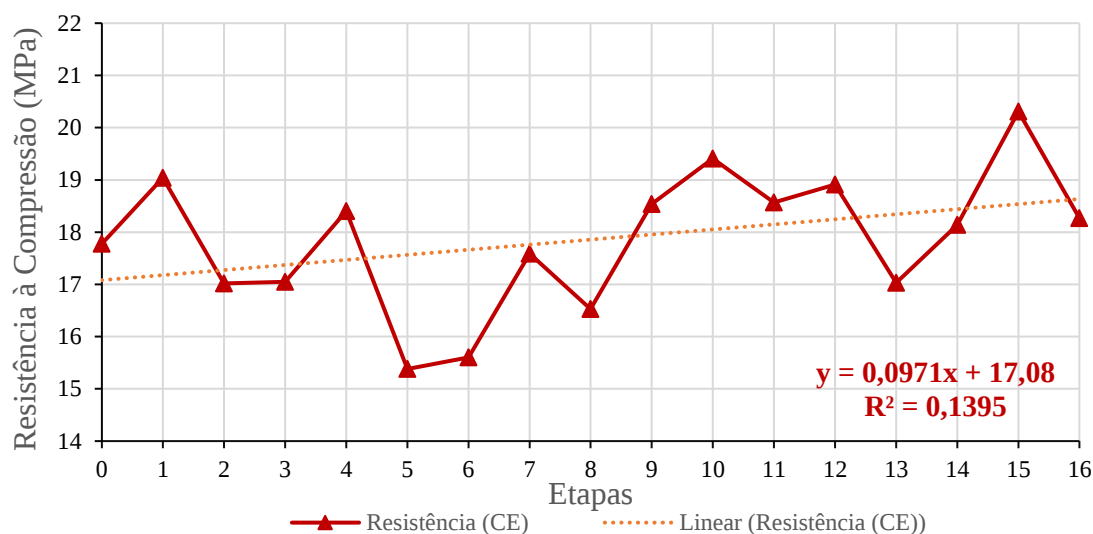
Diferente do comportamento observado na flexão, a resistência à compressão revelou uma maior convergência entre as séries de envelhecimento acelerado (CE) e natural (AR) (Figura 29 e Figura 30). Esta estabilidade mecânica sugere que a matriz de suporte global da argamassa exibe uma resiliência que transcende a agressividade dos ciclos térmicos imediatos

Figura 29 - Gráfico comparativo da resistência à compressão pelo regime AR.



Nota: Autoria Própria, 2026.

Figura 30 - Gráfico comparativo da resistência à compressão pelo regime CE.



Nota: Autoria Própria, 2026.

Ao observar os gráficos, nota-se que as curvas de tendência tendem a um comportamento de baixa escalada, com R^2 mais elevados em ambos os casos. Este comportamento contrasta com o decaimento linear da flexão. Como aponta Farias Filho (2007), a resistência à compressão em argamassas cimentícias é uma propriedade "volumétrica".

Conforme observado por Ramalho (2013), mesmo sob envelhecimento, as reações de hidratação das fases anidras do cimento continuam a ocorrer. Em ambos os ambientes, a formação de novos cristais nas idades avançadas do ensaio promove um adensamento que compensa a perda de resistência causada pelas microfissuras superficiais.

A compressão "ignora" microfissuras que não estejam alinhadas com o vetor da carga principal. Como Ye et al. (2022) destacam, o ensaio de compressão acaba por "fechar" fissuras incipientes, resultando em valores de resistência que não refletem a degradação real da rede porosa, mas sim a integridade do núcleo denso da amostra.

Embora as curvas pareçam convergir numericamente, a natureza do material sob carga é distinta. A justificativa para a impossibilidade de uma correlação preditiva unificada, baseada em de Freitas et al. (2014) e Parracha et al. (2024), reside na disparidade da rede de poros:

- Na CE: O adensamento é induzido por secagem rápida, resultando em uma matriz mais frágil e propensa a falhas por fragilidade.
- Na AR: A matriz consolida-se através de ciclos naturais de umedecimento (chuva), o que promove uma rede de poros mais refinada e menos conectada (menor porosidade capilar).

Os resultados reforçam a premissa de que a resistência à compressão é um parâmetro insuficiente, e potencialmente enganoso, para caracterizar a durabilidade. A estabilidade das curvas demonstra que a câmara de envelhecimento, ao forçar a hidratação e a secagem mimetiza o adensamento natural, mas falha ao não introduzir os agentes de lixiviação que, no caso da série AR, alteram quimicamente a composição do ligante.

Conclui-se que a correlação na compressão é, na verdade, uma coincidência de valores absolutos resultante de mecanismos de endurecimento distintos. A busca por um modelo de predição baseado apenas na compressão seria, portanto, cientificamente frágil, uma vez que não captura a "memória" de degradação interna de cada corpo de prova.

Para afirmar uma verdadeira degradação seria necessário um tempo muito superior para que a resistência à compressão começasse a demonstrar fortes indicadores de queda. É possível verificar alguns pontos de convergência de valores, como na etapa 12, mas são insuficientes para afirmar, de fato, que há uma correlação direta entre os métodos em tão pouco tempo.

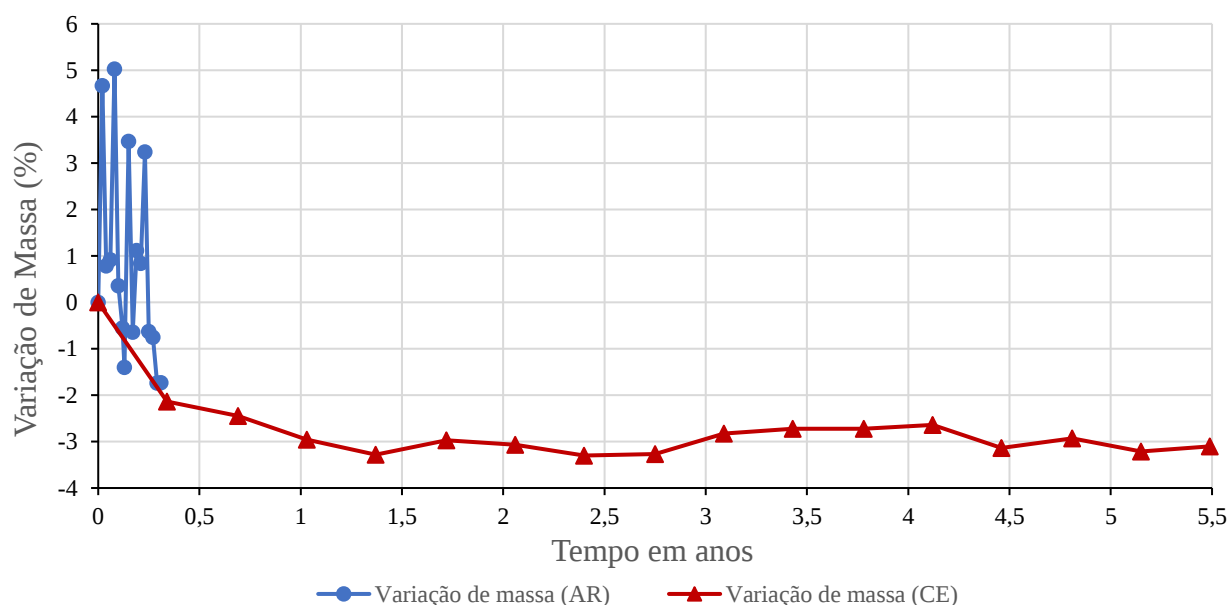
4.6.4 Análise comparativa entre CE e AR – Segundo a metodologia de Coffin-Manson

A determinação de um Fator de Aceleração (AF) de 17,9, resultante da modelagem térmica dos ciclos de ensaio frente às variações climáticas locais, permite uma análise teórica sobre a equivalência temporal entre os dois regimes de envelhecimento. Sob esta ótica, os 112 dias de ensaios laboratoriais equivaleriam a aproximadamente 5,49 anos de degradação natural.

No entanto, ao plotarmos os resultados experimentais sob a égide da equação de Coffin-Manson, tradicionalmente empregada para descrever a fadiga térmica em materiais através da relação entre a amplitude de deformação e o número de ciclos de

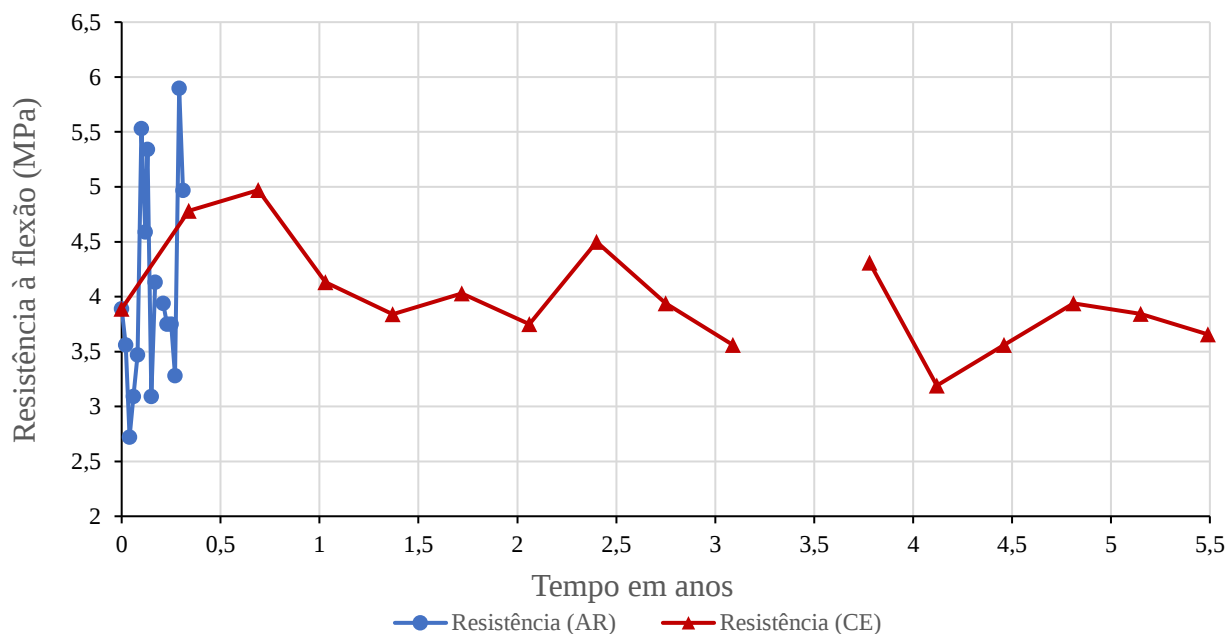
falha, verifica-se que a aplicação pura deste modelo a argamassas cimentícias enfrenta limitações significativas. Embora o valor de AF sugira que a câmara climática antecipa em quase dezoito vezes o efeito dos ciclos naturais, a observação dos gráficos plotados revela que a "assinatura de dano" a trajetória de degradação da resistência não apresenta o paralelismo esperado com o fluxo temporal de 5,49 anos. Esta divergência ilustra a premissa central de que a degradação em Bragança é um fenômeno de natureza não linear e multifatorial, onde a interação entre a umidade pluvial e o gradiente térmico impõe uma complexidade que o modelo de fadiga térmica pura, mesmo com o ajuste do fator de aceleração para uma escala de meia década, não consegue mimetizar com precisão. Abaixo as Figuras 31, 32 e 33, indicam respectivamente Variação de massa, Resistência à Flexão e Resistência à Compressão

Figura 31 - Gráfico comparativo da variação de massa entre o regime AR e CE.



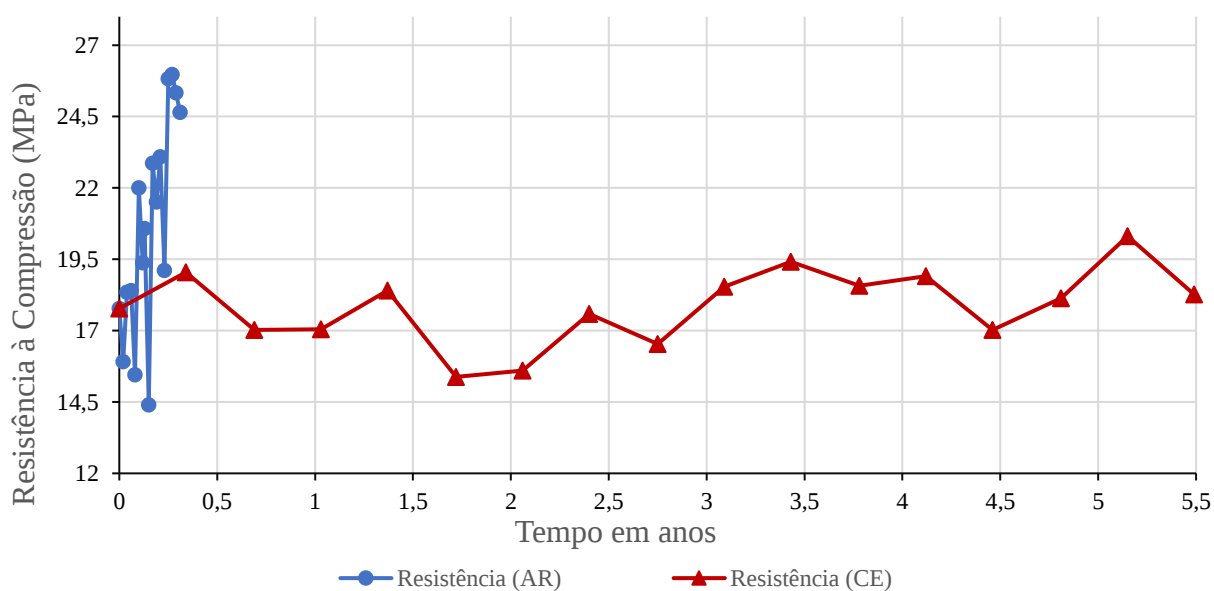
Nota: Autoria Própria, 2026.

Figura 32 - Gráfico comparativo da resistência à flexão entre o regime AR e CE.



Nota: Autoria Própria, 2026.

Figura 33 - Gráfico comparativo da resistência à compressão entre o regime AR e CE.



Nota: Autoria Própria, 2026.

A análise comparativa entre os resultados laboratoriais e a exposição real, mediada pela aplicação do modelo de Coffin-Manson, permite uma reflexão crítica sobre o uso de ferramentas matemáticas na engenharia de durabilidade.

Um aspecto positivo notável deste estudo é a demonstração de que, apesar da divergência nas curvas, o modelo de Coffin-Manson, quando ajustado pelo fator de aceleração ($AF = 17,9$), atua como um indicador de tendência. Ele estabelece uma "bússola" para o engenheiro, é possível prever, em linhas gerais, o horizonte de degradação da argamassa. Se o tempo de ensaio fosse estendido para além dos 112 dias, é provável que a convergência estatística entre o modelo e a realidade se tornasse mais clara, revelando se a curva AR se estabilizaria em um novo patamar de resistência ou se seguiria um declínio mais lento e persistente. O modelo não deve ser descartado por não coincidir ponto a ponto com a realidade; ele deve ser interpretado como um preditor de comportamento que necessita de calibração contínua à medida que novos ciclos naturais são adicionados à série temporal.

Contudo, o estudo também evidencia os pontos negativos críticos do uso de modelos simplificados para fenômenos de degradação:

- A falha do modelo em capturar a resiliência química (carbonatação e hidratação tardia) é seu maior ponto negativo. O modelo trata a degradação apenas como perda de resistência por fadiga, ignorando que, no ambiente real, o material "se transforma" quimicamente enquanto degrada.
- A extrapolação para 5,49 anos baseada em 112 dias de ensaio pressupõe que os mecanismos de degradação no início da vida útil da argamassa serão os mesmos ao longo de meia década. Como vimos, a argamassa em Bragança possui uma fase inicial de "adaptação" que o modelo linear de Coffin-Manson não consegue discernir de uma falha iminente.

A conclusão central que se extrai deste tópico não é que o modelo de Coffin-Manson está errado, mas sim que ele não é uma ferramenta de validação final, e sim de predição técnica. A busca por uma validação, ou seja, tentar provar que o laboratório é uma réplica perfeita do mundo real mostrou-se infrutífera justamente porque a realidade de Bragança impõe variáveis imprevisíveis que não cabem em uma função de fadiga térmica.

Em vez disso, a tese propõe que o uso do modelo seja visto como um exercício de predição iterativa. O fato de não termos encontrado uma correlação perfeita é, na verdade, uma evidência científica valiosa, pois a argamassa é mais resiliente do que o modelo de fadiga sugere. Portanto, a modelagem preditiva deve servir como uma ferramenta de auxílio ao projeto, nunca substituindo o monitoramento de longo prazo. O "erro" entre a curva prevista pelo modelo e a curva real observada é o espaço onde reside a verdadeira durabilidade do material, um domínio que exige mais do que cálculos de fadiga térmica: exige a compreensão da dinâmica intrínseca da matriz cimentícia em sua interação constante e imprevisível com o meio ambiente.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo propôs uma análise aprofundada sobre a durabilidade de materiais, em específico argamassas cimentícias normalizadas, confrontando os resultados de ensaios de envelhecimento acelerado (CE) em câmara climática com os resultados observados em condições de exposição natural (AR) no clima de Bragança, com o intuito de avaliar a correlação entre os métodos, a partir da discussão dos dados experimentais e da modelagem preditiva aplicada, conclui-se, portanto que:

- Enquanto o método acelerado impôs uma trajetória de degradação linear e puramente mecânica (fadiga por ciclagem térmica), a exposição natural revelou um comportamento complexo e não linear. A incapacidade de correlação direta entre os métodos demonstra que os ensaios laboratoriais convencionais operam sob um regime que isola a fadiga física, ignorando a sinergia entre os ciclos de umedecimento pluvial e as reações químicas de hidratação tardia e carbonatação que ocorrem naturalmente, contudo isto se especifica apenas para este ciclo que tentou reproduzir de forma fiel o clima real da região;
- Em conjunto, conclui-se, também que, para uma maior confiabilidade e assertividade, a máquina de envelhecimento deve simular de forma real e evidente os agentes presentes na natureza, como água, agentes químicos, dentro outros;
- Neste contexto, o clima de Bragança, caracterizado por amplitudes térmicas diárias severas e eventos pontuais de gelicidade, atuou como um determinante de degradação mais complexo do que os ciclos laboratoriais fixos. Observou-se que a argamassa exibiu uma "estabilidade adaptativa" em períodos de umidade, sugerindo que o material possui uma resiliência química capaz de mitigar, em parte, os danos mecânicos superficiais. Este comportamento adaptativo não é capturado por este tipo de câmara climática, tornando o ambiente natural o verdadeiro laboratório de prova da durabilidade;

- Conclui-se, ainda, que enquanto a câmara acelerada degrada a flexão de forma linear (por fadiga pura), o ambiente natural impõe uma queda na flexão que não é apenas mecânica, mas também higroscópica. Por outro lado, a resistência à compressão mostrou-se surpreendentemente estável, mantendo patamares elevados mesmo quando a flexão já sinalizava dano severo. Isso leva à conclusão de que a compressão é uma métrica conservadora e pouco sensível para a avaliação de durabilidade em estágios iniciais;
- O tempo de ensaio foi insuficiente para afirmar qualquer tipo de alteração e degradação futura;
- A aplicação do modelo de Coffin-Manson, fundamentada em um fator de aceleração ($AF = 17,9$) que projetou 112 dias de ensaio como equivalentes a 5,49 anos de exposição, evidenciou que modelos de fadiga térmica são insuficientes para prever a vida útil de sistemas cimentícios heterogêneos. A "falha" em obter uma aderência estatística perfeita entre os dados AR e a linha de tendência do modelo não deve ser interpretada como um erro, mas como um resultado central: a prova de que a vida útil de uma argamassa é um fenômeno irregular e dependente da história de exposição, impossível de ser simplificado por fatores de aceleração constantes. E que o modelo pode, sim, servir como auxílio para uma predição futura.

5.1 Considerações finais e recomendações

Para próximos estudos, recomenda-se que:

- Recomenda-se que estudos futuros expandam o período de monitoramento natural para além do horizonte de 5 anos proposto, permitindo verificar se a tendência de estabilização observada nas curvas AR se mantém ou se um processo de degradação acelerada ocorre após a saturação da capacidade de autorrecuperação da matriz;
- A análise isolada de uma única propriedade (como a resistência à compressão) é insuficiente para atestar a durabilidade em curtos períodos de tempo, portanto o para ensaios que tenham curta duração a curva de durabilidade tende a ser mais evidente em ensaios de resistência à flexão e variação de massa;
- Investigar outras metodologias de previsão de envelhecimento, bem como em diferentes materiais
- O ciclo acelerado deve continuar o mais fiel possível ao natural, por isso recomenda-se a utilização de uma máquina que consiga reproduzir fielmente aspectos como chuva, agentes químicos, dentre outros fatores presentes na natureza.

6. REFERÊNCIAS

- A. P. Ferreira Pinto, Augusto Gomes, Bessa Pinto. (2006). Argamassas. Disponível em: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1970943312381256/MCI_Argamassa_Dez_2013.pdf
- Alvarez, J., Sequeira, C., & Costa, M. (2005, November). Ensinaamentos a retirar do passado histórico das argamassas. In 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). ABNT NBR 15575-1: Edificações habitacionais — Desempenho — Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT.
- Baía, L. L. M., & Sabbatini, F. H. (2008). Projeto e execução de revestimento de argamassa (4ª ed.). São Paulo, SP: O Nome da Rosa Editora Ltda.
- Barros, H. E. B., Ferreira, D. S., da Silva, A. F. P., & do Nascimento Sousa, J. (2018). Análise dos Agentes de Degradação no Descolamento de Revestimentos Cerâmicos. In 6ª Conferência sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios – PATORREB.
- Bauer, E. (1987). Resistência à penetração da chuva em fachadas de alvenaria de materiais cerâmicos: uma análise de desempenho (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Bauer, E. (2005). Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades. Brasília: LEM-UnB.
- Botas, S. (2009). Avaliação do comportamento de argamassas em climas frios (Doctoral dissertation, FCT-UNL).
- Brandão, F., Coelho, V., & Guimarães, C. (2022). Utilização de cinzas de caldeiras industriais como substituição parcial do cimento Portland em argamassas. Revista Militar de Ciência e Tecnologia, 39(1), 18-26.
- Camuffo, D. (2016). Weathering of building materials. In Urban Pollution and Changes to Materials and Building Surfaces (pp. 19-64).
- Campos, M. A., Passos, L., Ferrão, A. M., & Júnior, A. L. (2020). Argamassas com agregados alternativos: potencialidade do emprego de areia de descarte de fundição e isoladores elétricos de porcelana.
- Carvalho, B. M., & Luso, E. C. P. (2025). Caracterização de argamassas tradicionais sujeitas a ensaios de envelhecimento físico e químico. Instituto Politécnico de Bragança.
- CEN – European Committee for Standardization. (1996). Métodos de ensaio de cimentos – Parte 1: Determinação das resistências mecânicas (NP EN 196-1:1996). Brussels: CEN.

- CEN – European Committee for Standardization. (2001). Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements (NP EN 197-1:2001). Brussels: CEN.
- Coutinho, J. (2002). Materiais de construção 2. FEUP.
- De Freitas, V. P., Corvacho, H., Quintela, M., & Delgado, J. M. P. Q. (2014). Assessing the durability of mortars tiles – A contribution for a prediction model. *Engineering Failure Analysis*, 44, 36-45.
- de Souza Kazmierczak, C., Lunardi, M. P., Menegotto, C. W., & Tavares, S. H. (2025). Efeito do Envelhecimento Acelerado e Carbonatação nas Propriedades de uma Argamassa de Revestimento. *Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*, 15.
- dos Santos Lima, J. L. M. (2010). Argamassas tradicionais e industriais de alvenaria em edifícios (Master's thesis, Universidade do Porto, Portugal).
- Dubaj, E. (2000). Estudo comparativo entre traços de argamassa de revestimento utilizadas em Porto Alegre.
- El Inaty, F., Marchetti, M., Quiertant, M., & Omikrine Metalssi, O. (2023). Mecanismos químicos envolvidos no ataque acoplado de íons sulfato e cloreto em materiais cimentícios de baixo carbono: um estudo aprofundado. *Applied Sciences*, 13(21), 11729.
- European Committee for Standardization. (2002). EN 1015-21:2002 — Métodos de ensaio para argamassas para alvenaria — Parte 21: Determinação da compatibilidade de argamassas monocapa de revestimento com os substratos. CEN.
- Farias Filho, J. (2007). Estudo da durabilidade de argamassas alternativas produzidas de resíduos de construção e granito.
- Farias Filho, J., Menezes, R. R., Ferreira, H. S., Santana, L. N. L., Neves, G. A., & Ferreira, H. C. (2011). Estudo da durabilidade de argamassas alternativas contendo resíduos. *Cerâmica*, 57, 395-403.
- Fernandez, F., Germinario, S., Basile, R., Montagno, R., Kapetanaki, K., Gobakis, K., et al. (2020). Development of eco-friendly and self-cleaning lime-pozzolan plasters for bio-construction and cultural heritage. *Buildings*, 10(10), 172.
- Garrido, M. A. (2010). Previsão da vida útil em pinturas de fachadas de edifícios antigos – Metodologia baseada na inspecção de edifícios em serviço. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

- Gaspar, P. L., Flores-Colen, I., & Brito, J. de. (2006). Técnicas de diagnóstico e classificação de fissuração em fachadas rebocadas. In 2º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios (PATORREB).
- GCCA. (2021). Durability: Essential Concrete. Global Cement and Concrete Association.
- Hovde, P. (2004). Factor methods for service life prediction. In CIB W080/RILEM 175: Service Life Methodologies—Prediction of Service Life for Buildings and Components (pp. 1–51). Trondheim, Norway.
- Industry Research Biz. (2024). Mortar market size, share, growth and industry analysis. Recuperado de <https://www.industryresearch.biz/market-reports/mortar-market-113496>
- International Organization for Standardization. (2001). Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 2: Service life prediction procedures (ISO 15686-2:2001). Geneva: ISO.
- ISO. (2011). ISO 15686-1:2011 — Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 1: General principles. International Organization for Standardization.
- John, V. M., & Sato, N. M. N. (2006). Durabilidade de componentes da construção. Construção e Meio Ambiente.
- Laurentino, R. N. D. A. (2019). Estudo da argamassa estabilizada para assentamento com adição mineral de metacaulim.
- Lemos, B. (2025). Avaliação dos efeitos do envelhecimento acelerado por ciclagem térmica em argamassas mistas de revestimento com resíduos de PET: uma análise física e mecânica.
- Lima, P. R. L., Filho, R. D. T., Neumann, R., & Barros, J. A. (2016). Efeito do envelhecimento acelerado sobre as propriedades do microbetão fibro-reforçado com fibras naturais.
- Longhi, M. A. (2012). Revestimentos de argamassa industrializada sobre substrato de concreto estrutural: análise do desempenho quando submetidos a envelhecimento acelerado.
- Maciel, L. L., Barros, M. M. S. B., & Sabbatini, F. H. (1998). Recomendações para a execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação internas e exteriores e tetos. São Paulo: EPUSP.
- Maia, J. (2016). Durabilidade de rebocos térmicos (Projeto de tese de doutoramento). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

- Maia, J., Ramos, N. M., & Veiga, R. (2019). A new durability assessment methodology of thermal mortars applied in multilayer rendering systems. *Construction and Building Materials*, 222, 654-663.
- Margalha, M. G. (2011). Argamassas.
- Margalha, M. G. L. B. (1997). O uso da cal em argamassas no Alentejo. Universidade de Évora (Portugal).
- Mauri, J., Dias, D. P., Cordeiro, G. C., & Dias, A. A. (2009). Argamassa geopolimérica: estudo da degradação por sulfato de sódio e ácido sulfúrico. *Matéria* (Rio de Janeiro), 14(3), 1039-1046.
- Morgado, A. F. T. dos S. (2017). Durabilidade de argamassas térmicas com agregados leves e isolantes [Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa].
- Obrzut, L., Medeiros, A., & Luso, E. (2020). Caracterização experimental de argamassas de substituição à base de cal submetidas ao envelhecimento natural e artificial. In *Congresso Brasileiro de Patologias das Construções*, Fortaleza.
- Parracha, J. L., Veiga, R., Nunes, L., & Flores-Colen, I. (2024). Effects of hygrothermal and natural aging on the durability of multilayer insulation systems incorporating thermal mortars with EPS and aerogel. *Cement and Concrete Composites*, 148, 105483.
- Pinchard, L., Parracha, J. L., Veiga, R., Matias, L., Santos Silva, A., Duarte, S., & Nunes, L. (2024). Weather ageing effects on the long-term thermal conductivity and biological colonisation of thermal insulating mortars with EPS, cork and aerogel.
- Quintela, M. B. O. A. (2006). Durabilidade de revestimentos exteriores de parede em reboco monocamada. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ribeiro, A. J. H., Ferreira, G. T., Junior, M. B. F., & de Gois Silva, M. D. (2022). Análise das propriedades da argamassa com diferentes teores de grafite por substituição parcial de cimento Portland. *Research, Society and Development*, 11(6), e49911629535-e49911629535.
- Romero-Gómez, M. I., Flores-Colen, I., Hooper, F., Cardoso, R., Pereira, M. F. C., Bravo, M., & Mendes, M. P. (2025). Testing the durability of hydraulic lime-based renders against extreme weather: experimental aging tests for compound events in a changing climate. *Journal of Building Engineering*.
- Sabbatini, F. H. (1989). Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistente.
- Santos, D. G. D. (2018). Estudo da vida útil e degradação de fachadas em argamassa a partir da inspeção de edifícios.

- Santos, D. G. D. (2019). Estudo da vida útil e degradação de fachadas em argamassa a partir da inspeção de edifícios.
- Sentena, J. A. A. (2015). Discussão sobre métodos acelerados para a avaliação do envelhecimento de revestimentos de argamassas submetidos a ciclos térmicos: aplicação em argamassa com filer de concreto. Dissertação (Mestrado), Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, São Leopoldo, RS.
- Silva, A. C. (2002). Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Silva, A. D. P., Carvalho Júnior, A. N. D., Gouvêa, G. H. R., & Vieira, M. E. L. (2021). Desempenho da argamassa técnica decorativa antes e após envelhecimento acelerado em câmara de intemperismo. *Matéria* (Rio de Janeiro), 26, e13041.
- Silva, S. C. B. D. (2014). Estudo da degradação acelerada da argamassa em um sistema de revestimento cerâmico de fachadas.
- Socoloski, R. F. (2021). Indicadores para avaliação de anomalias em fachadas com revestimento de argamassa.
- Temoche Esquivel, J. F. (2009). Avaliação da influência do choque térmico na aderência dos revestimentos de argamassa.
- Veiga, M. D. R. (2009). Conservação e reparação de revestimentos de paredes de edifícios antigos – Métodos e materiais.
- Ye, J., Yuan, K., Xiong, H., Sha, B., Wei, T., Wu, L., et al. (2022). Experimental investigations on water absorption and mechanical properties of expanded perlite mortar under accelerated and natural aging conditions. *Materials Research Express*, 9(6), 065506.