

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS – *CAMPUS* OURO PRETO

CURSO DE TECNOLOGIA EM CONSERVAÇÃO E RESTAURO

Cláudia Nara Alves Teixeira

**ARGAMASSAS BASTARDAS À BASE DE CAL AÉREA HIDRATADA:
Caracterização experimental e implicações para intervenções em
sistemas construtivos tradicionais**

Ouro Preto

2026

CLÁUDIA NARA ALVES TEIXEIRA

**ARGAMASSAS BASTARDAS À BASE DE CAL AÉREA HIDRATADA:
Caracterização experimental e implicações para intervenções em
sistemas construtivos tradicionais**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Tecnologia em Conservação e Restauro
do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Ouro Preto,
como requisito parcial para obtenção do grau de
Tecnóloga em Conservação e Restauro.

Orientador: Prof. Dr. Régis Eduardo Martins

Ouro Preto

2026

T266a

Teixeira, Cláudia Nara Alves.

Argamassas bastardas à base de cal aérea hidratada [manuscrito] : caracterização experimental e implicações para intervenções em sistemas construtivos tradicionais / Cláudia Nara Alves Teixeira. – 2026.

107 f.: il.

Orientador: Régis Eduardo Martins.

Trabalho de Conclusão de Curso (tecnologia) - Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Preto, 2026.

1. Argamassa bastarda. 2. Cal. 3. Caracterização experimental. I. Martins, Régis Eduardo. II. Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Preto. III. Título.

CDU: 666.971.3

Catálogo: Kelly Cristiane Santos Moraes - CRB-6/3217

CLÁUDIA NARA ALVES TEIXEIRA

**ARGAMASSAS BASTARDAS À BASE DE CAL AÉREA HIDRATADA:
Caracterização experimental e implicações para intervenções em
sistemas construtivos tradicionais**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Tecnologia em Conservação e
Restauro do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Minas Gerais –
Campus Ouro Preto para obtenção do grau de
Tecnóloga em Conservação e Restauro.

Aprovada em 04 de março de 2026 pela banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 REGIS EDUARDO MARTINS
Data: 09/03/2026 10:10:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Régis Eduardo Martins – IFMG Campus Ouro Preto (Orientador)

Documento assinado digitalmente
 BARBARA HELENA ALMEIDA CARMO
Data: 09/03/2026 16:51:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Me. Bárbara Helena Almeida Carmo – IFMG Campus Ouro Preto

Documento assinado digitalmente
 SERGIO NORBERTO COSTA GONCALVES
Data: 09/03/2026 15:01:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Esp. Sérgio Norberto Costa Gonçalves – Escola de Ofícios Tradicionais de Mariana

Dedico este trabalho aos que vieram antes e aprenderam a construir com a terra, com a madeira, com a pedra, com o fogo e com o tempo.

Aos saberes indígenas e africanos, que, condicionados às técnicas portuguesas, deram forma ao que hoje reconhecemos como o construir brasileiro.

Ao povo mineiro, que, diante das condições e dos materiais disponíveis, se adaptou, transformou e construiu, revelando o caráter único das nossas formas de criar.

Aos mestres e a todos aqueles que aprenderam e ensinaram pelo gesto, pela repetição, dedicando esforço e suor para melhorar nossas vidas e potencialidades.

E, de forma especial, ao meu pai, que primeiro me mostrou, ainda na infância, o caminho de construir com as próprias mãos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Professor Dr. Régis Eduardo Martins, pela condução atenta deste trabalho, pelas exigências que aprofundaram meu pensamento e pela confiança depositada no percurso que construímos.

À Professora Doutora Eduarda Cristina Pires Luso, pela orientação no desenvolvimento experimental da pesquisa no Instituto Politécnico de Bragança, pela paciência e pela abertura ao diálogo entre diferentes contextos de formação.

Ao Professor Doutor Manuel Joaquim da Costa Minhoto, do Instituto Politécnico de Bragança, que me ensinou mais do que materiais, e cuja presença rigorosa e atenta foi determinante para que este trabalho se tornasse o que é.

Aos professores e professoras do Curso de Tecnologia em Conservação e Restauro, que contribuíram para a minha formação, pelos ensinamentos, provocações e caminhos que se abriram ao longo desta trajetória.

Aos colegas de curso, pela partilha, pelo apoio e pela construção coletiva de um caminho feito de trocas, dúvidas, descobertas e histórias que agora levamos conosco.

Às amigas que encontrei ao longo desta caminhada e que se tornaram parte da minha família escolhida. Ao redor das mesas do Barroco, espaço de encontro, descanso e afeto, construímos memórias que levarei para sempre. Entre conversas, partilhas e incontáveis risadas, vocês deram significado à minha permanência em Ouro Preto e fizeram desta etapa uma experiência tão feliz quanto inesquecível.

Ao Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) – *Campus* Ouro Preto e ao Departamento de Relações Internacionais, pela oportunidade da mobilidade acadêmica internacional. Ao Instituto Politécnico de Bragança (IPB), em Portugal, e ao Grupo de Investigação em Construção Sustentável (GICOS), onde esta pesquisa foi realizada.

Ao meu amor, melhor amigo, professor e marido, Anderson Gonçalves Siqueira, por tornar tudo mais leve, possível e cheio de sentido.

À minha mãe, que enxergou antes de mim o fio que atravessa toda a minha história e me devolveu, pelo caminho mais improvável, ao lugar onde sempre estive em casa.

Às minhas irmãs e aos meus sobrinhos e sobrinhas, de sangue ou de coração, que vivem de tantas maneiras diferentes e me ensinam, cada um a seu modo, que a coragem se aprende e se empresta.

“A vida inventa! A gente principia as coisas, no não
saber por que, e desde aí perde o poder de
continuação — porque a vida é mutirão de todos,
por todos remexida e temperada.”

João Guimarães Rosa

RESUMO

Este trabalho parte do reconhecimento de que a cal é um dos materiais de construção mais antigos e resilientes da história humana. Antes dos ensaios, uma revisão histórica e técnica percorre sua origem milenar e os processos químicos que determinam seu desempenho. Acompanha essa trajetória a evolução das argamassas bastardas, das formulações empíricas tradicionais aos produtos industrializados contemporâneos e seus limites de compatibilidade com o patrimônio edificado.

A partir desse fundamento, o trabalho apresenta a caracterização experimental de argamassas bastardas formuladas com cal aérea hidratada como ligante de base, em combinação com cal hidráulica natural, cimento Portland e metacaulim em diferentes proporções. Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Politécnico de Bragança (IPB), Portugal, durante mobilidade acadêmica internacional. Sob condições controladas de temperatura e umidade, foram avaliadas variação de massa, retração, pigmentação, resistência à flexão e à compressão e resposta a ciclos térmicos em câmara climática.

Os resultados evidenciaram a complexidade das argamassas bastardas e a influência que pequenas variações de composição exercem sobre o seu comportamento. Cada formulação respondeu de forma singular às condições de cura e envelhecimento acelerado, reafirmando o que a tradição construtiva já reconhecia antes da normalização técnica: o material dialoga com o lugar, com o tempo e com quem o aplica. A resistência mecânica, analisada isoladamente, constitui um critério insuficiente para orientar intervenções em sistemas construtivos tradicionais. A argamassa mais compatível nem sempre é a mais resistente, e é precisamente essa compreensão que transforma o conhecimento técnico em um instrumento de cuidado e preservação do patrimônio.

Palavras-chave: Argamassas bastardas. Cal aérea hidratada. Caracterização experimental. Patrimônio edificado. Sistemas construtivos tradicionais.

ABSTRACT

This work departs from the recognition that lime is one of the oldest and most resilient building materials in human history. Before the experimental work, a historical and technical review traces its millennial origins and the chemical processes that determine its performance. Running alongside this trajectory is the evolution of bastard mortars, from traditional empirical formulations to contemporary industrialized products and their compatibility limits with the built heritage.

Building on this foundation, the study presents the experimental characterization of bastard mortars formulated with hydrated air lime as the base binder, combined with natural hydraulic lime, Portland cement and metakaolin in different proportions. The tests were conducted at the Construction Materials Laboratory of the Polytechnic Institute of Bragança (IPB), Portugal, during an international academic mobility period. Under controlled temperature and humidity conditions, the evaluated properties included mass variation, shrinkage, flexural and compressive strength, and response to thermal cycles in a climatic chamber.

The results demonstrated the complexity of the interactions between binders, aggregates, and curing conditions in bastard mortars. Each composition responded in a singular way to curing and accelerated aging conditions, reaffirming what constructive tradition already knew before any standard: the material converses with the place, with time, and with whoever applies it. Mechanical strength, taken in isolation, is an insufficient criterion for guiding interventions in traditional building systems. The most compatible mortar is not always the most resistant one, and it is precisely this understanding that makes technical knowledge an instrument of care for heritage.

Keywords: Bastard mortars. Hydrated air lime. Experimental characterization. Built heritage. Traditional building systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Pont du Gard, França. Aqueduto romano do século I a.C., construído com argamassa à base de cal e materiais pozzolânicos, preservado até os dias atuais.	22
Figura 2 - Trajetória histórica das argamassas e seus ligantes.	23
Figura 3 - Efeito da temperatura na calcinação	24
Figura 4 - Ciclo da Cal	27
Figura 5 - Classificação dos ligantes hidrófilos	28
Figura 6 - Mapa simplificado das principais unidades litológicas de Portugal e localização dos fornos tradicionais de cal de Dine (Bragança).....	29
Figura 7 - Fornos tradicionais de Dine, Bragança	30
Figura 8 - Fornos da cal de Dine: planta, corte vertical e componentes.....	31
Figura 9 - Distribuição geográfica das rochas carbonáticas (calcário e dolomito) em Minas Gerais, com destaque para a região de Ouro Preto.....	32
Figura 10 - Fluxograma simplificado da produção industrial da cal e seus derivados.....	33
Figura 11 - Composição e processo de endurecimento de uma argamassa tradicional.....	36
Figura 12 - Manifestações patológicas em edificações do Centro Histórico de Bragança, Portugal: destacamento de rebocos e intervenções sobrepostas incompatíveis (esquerda) e fachada do Museu do Abade de Baçal em estado de degradação (direita).....	41
Figura 13 - Exemplos de intervenções em edificações históricas de Ouro Preto/MG: área de reparo curativo visualmente distinta do revestimento original em fachada histórica (esq.) e aplicação de massa corrida em fachada tombada flagrada no momento da execução (dir.)	42
Figura 14 - Ligantes utilizados nas argamassas bastardas estudadas.	45
Figura 15 - Metacaulim utilizado como adição pozzolânica.....	45

Figura 16 - Areia silicosa rolada durante o processo de caracterização granulométrica.....	46
Figura 17 - Pigmentos à base de óxido de ferro utilizados nas Argamassas II, IV e VII: azul ultramar, verde e amarelo metálico.	48
Figura 18 - Composição volumétrica da argamassa.	49
Figura 19 - Equação dos volumes absolutos e definição dos símbolos utilizados no cálculo de dosagem.	49
Figura 20 - Legenda dos símbolos utilizados na equação dos volumes absolutos para o cálculo de dosagem das argamassas.....	49
Figura 21 - Pesagem dos componentes secos.	52
Figura 22 - Etapas de produção das argamassas: mistura dos materiais secos em misturadora mecânica, medição da água de amassadura em proveta graduada e homogeneização da mistura.	52
Figura 23 - Equipamentos utilizados no ensaio de consistência por espalhamento.	53
Figura 24 - Medição do diâmetro de espalhamento com paquímetro digital.	53
Figura 25 - Desmoldante de base vegetal utilizado nos moldes prismáticos.	55
Figura 26 - Moldes prismáticos.	55
Figura 27 - Compactadora horizontal.	56
Figura 28 - Desmoldagem dos provetes após 96 horas.	56
Figura 29 - Provetes identificados com data, grupo de cura, numeração da composição, numeração do provete e siglas dos ligantes.	57
Figura 30 - Pesagem dos provetes em balança digital após a desmoldagem.	57
Figura 31 - Medição das dimensões longitudinais e transversais com paquímetro.....	58
Figura 32 - Provetes acondicionados na câmara úmida.	59

Figura 33 - Câmara climática ESPEC LHU-114: painel digital com leituras de temperatura e umidade, vista externa e interior com os corpos de prova posicionados para o ensaio.....	60
Figura 34 - Argamassa II: coloração inicial na primeira semana de cura.	73
Figura 35 - Argamassa II: alteração cromática na superfície em contato com a prateleira após cura em câmara úmida.	74
Figura 36 - Argamassa II: seção transversal após rompimento, evidenciando a migração do pigmento para as camadas superficiais.....	74
Figura 37 - Argamassa IV: coloração inicial na primeira semana de cura.....	75
Figura 38 - Argamassa IV: alteração cromática discreta após cura em câmara úmida.	75
Figura 39 - Argamassa IV: seção transversal após rompimento, evidenciando a permanência do pigmento verde no interior.	76
Figura 40 - Argamassa VII: coloração inicial.	76
Figura 41 - Argamassa VII: desbotamento superficial após cura em câmara úmida.	77
Figura 42 - Argamassa VII: seção transversal após rompimento, evidenciando a preservação do amarelo intenso no interior.	77
Figura 43 - Prensa hidráulica automática.	81
Figura 44 - Geometria do corpo de prova prismático, fórmula de cálculo e esquema de aplicação de carga no ensaio de flexão em três pontos.	81
Figura 45 - Prensa hidráulica universal.	85

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica.....	47
Gráfico 2 - Variação de temperatura ao longo dos ciclos de 24 horas na câmara climática. ...	61
Gráfico 3 - Variações das massas inicial e final em câmara úmida.	63
Gráfico 4 - Variações das massas inicial e final em câmara climática.....	66
Gráfico 5 - Variações de retração inicial e final.	69
Gráfico 6 - Resistência à flexão.....	81
Gráfico 7 - Resistência à compressão.....	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características dos ligantes utilizados nas argamassas bastardas estudadas.....	39
Quadro 2 - Composição das argamassas.	51
Quadro 3 - Registro fotográfico dos corpos de prova em câmara úmida e câmara climática, incluindo seções transversais após rompimento.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise granulométrica.....	47
Tabela 2 - Relação água/ligante e resultados do ensaio de espalhamento.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CEN - European Committee for Standardization (Comitê Europeu de Normalização)

CH - Cal Hidratada

CL - Cal Cálcica (Calcium Lime)

CP - Cimento Portland

CPB - Cimento Portland Branco

DL - Cal Dolomítica (Dolomitic Lime)

EN - Norma Europeia

ESTIG - Escola Superior de Tecnologia e Gestão

GICOS - Grupo de Investigação em Construção Sustentável

IFMG - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

IPB - Instituto Politécnico de Bragança

IPHAN - Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

IPQ - Instituto Português da Qualidade

MT - Metacaulim

NBR - Norma Brasileira

NHL - Cal Hidráulica Natural (Natural Hydraulic Lime)

NP - Norma Portuguesa

UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 PROBLEMA DE PESQUISA.....	19
3 OBJETIVOS	20
3.1 Objetivo Geral	20
3.2 Objetivos Específicos	20
4 ESTUDO DO ESTADO DA ARTE	21
4.1 Origem e permanência histórica da cal.....	21
4.2 Processos de transformação da cal e fatores que condicionam seu desempenho	23
4.3 Argamassas bastardas: da prática empírica ao conhecimento técnico	34
5 MATERIAIS E MÉTODOS	43
5.1 Organização da pesquisa experimental.....	43
5.2 Materiais	44
5.3 Composição e dosagem das argamassas.....	47
5.4 Moldagem, desmoldagem e cura em câmara úmida.....	54
5.5 Envelhecimento acelerado em câmara climática.....	59
5.6 Procedimentos de caracterização física	61
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	62
6.1 Variação de massa em câmara úmida	62
6.1.1 Argamassas com maior estabilidade de massa	63
6.1.2 Argamassas com variação intermediária	64
6.1.3 Argamassas com maior perda de massa	64
6.2 Variação de massa em câmara climática.....	65
6.2.1 Argamassas que ganharam massa	66
6.2.2 Argamassas que perderam massa	67
6.3 Retração	68
6.3.1 Retração no comprimento.....	69
6.3.2 Retração na largura	70
6.4 Alterações cromáticas e caracterização visual.....	71
6.4.1 Argamassa II — pigmento azul ultramar.....	71
6.4.2 Argamassa IV — pigmento verde.....	74
6.4.3 Argamassa VII — pigmento amarelo metálico	75

6.5 Características visuais, estéticas e texturais	77
7 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	79
7.1 Ensaio de resistência mecânica	79
7.2 Ensaio de resistência à flexão	79
7.2.1 Argamassas que ganharam resistência à flexão após a câmara climática.....	82
7.2.2 Argamassa que manteve resistência à flexão.....	82
7.2.3 Argamassa que perdeu resistência à flexão após a câmara climática	82
7.3 Ensaio de resistência à compressão	83
7.3.1 Argamassas que ganharam resistência à compressão após a câmara climática.....	85
7.3.2 Argamassas que perderam resistência à compressão após a câmara climática	86
7.3.3 Análise comparativa dos ensaios de flexão e compressão.....	87
8 REFLEXÕES SOBRE FORMAÇÃO, PATRIMÔNIO E PRÁTICA	88
9 CONCLUSÃO.....	92
REFERÊNCIAS	94
GLOSSÁRIO	99
APÊNDICE A — PLANILHAS DE DESENVOLVIMENTO, ACOMPANHAMENTO E ENSAIO DAS ARGAMASSAS	107

1 INTRODUÇÃO

As argamassas à base de cal acompanharam a história da construção durante séculos e permanecem presentes em grande parte do patrimônio edificado mundial. Utilizadas no assentamento de alvenarias, na execução de revestimentos e na proteção das edificações contra intempéries, desempenham papel fundamental no funcionamento dos sistemas construtivos tradicionais (KANAN, 2008). Sua plasticidade lhe confere capacidade de trabalhar em conjunto com pedra, terra, madeira e cerâmica, acomodando movimentações, permitindo a troca de umidade com o ambiente e contribuindo para o equilíbrio do conjunto construtivo (VEIGA, 2018).

A principal aplicação histórica da cal ocorreu justamente na produção dessas argamassas. Ao atuar como ligante, a cal une os agregados e permite a formação de uma pedra artificial moldável, capaz de assumir a forma e a função que cada sistema construtivo exige. Essa cal, porém, não era a mesma em todos os lugares. Em muitos casos, a própria geologia já produzia a cal com impurezas argilosas que conferiam comportamento ao mesmo tempo aéreo e hidráulico (LUSO, 2020; MARGALHA, 2011).

As argamassas tradicionais raramente foram compostas apenas por cal, areia e água. Ao longo do tempo, construtores incorporaram substâncias às misturas, buscando corrigir limitações, melhorar o desempenho ou adaptar as formulações às matérias-primas disponíveis em cada região. Materiais orgânicos respondiam empiricamente a necessidades específicas que a cal pura não conseguia atender. Essas práticas são o ponto de partida de uma longa tradição de formulações modificadas, que ao longo dos séculos evoluiu até as argamassas compostas e bastardas que a construção contemporânea conhece e que este trabalho investiga (KANAN, 2008; COELHO; TORGAL; JALALI, 2009).

Com a consolidação do cimento Portland ao longo do século XX, as argamassas tradicionais foram progressivamente substituídas por soluções cimentícias de comportamento muito distinto. Mais rígidas e menos permeáveis, essas argamassas nem sempre apresentam compatibilidade com sistemas construtivos concebidos para funcionar com a cal. Em edificações históricas, essa incompatibilidade pode favorecer a retenção de umidade, a concentração de tensões, a fissuração e o destacamento de revestimentos, comprometendo a conservação dos elementos preexistentes (VEIGA, 2003; VEIGA, 2018; KANAN, 2008).

A cal disponível atualmente não é mais produzida em fornos artesanais. É industrializada, classificada por normas técnicas que padronizam sua composição e garantem comportamento previsível, condições que tornaram possível o desenvolvimento das argamassas

bastardas contemporâneas com adições controladas (FERREIRA, 2016). Nas últimas décadas, a crescente preocupação com a preservação do patrimônio edificado tem motivado o resgate dos conhecimentos relacionados às argamassas tradicionais. Compreender esses materiais exige reconhecer que eles resultam de processos históricos complexos. No caso específico de Minas Gerais, embora o emprego da cal tenha sido trazido por artífices portugueses, sua aplicação ocorreu em um cenário marcado pelo encontro entre diferentes povos, materiais e saberes. Técnicas construtivas europeias foram reinterpretadas e adaptadas por indígenas, africanos, afrodescendentes e luso-brasileiros, contribuindo para a formação do modo de construir brasileiro (WEIMER, 2005).

Foi por meio da mobilidade acadêmica entre o IFMG e o IPB que essas reflexões ganharam ancoragem. Estar em Bragança, no Norte de Portugal de onde partiram muitos dos mestres que contribuíram para a construção de Vila Rica (WEIMER, 2005), permitiu observar de perto os núcleos históricos tombados e reconhecer um elo que vai além da estética arquitetônica: os afloramentos de rochas calcárias pardas em Bragança e pretas em Ouro Preto (LUSO, 2020; VASCONCELLOS, 1977 apud MARTINS, 2010) condicionaram, em ambos os territórios, soluções construtivas distintas para um mesmo desafio: produzir argamassas compatíveis com os materiais e o clima de cada lugar.

Partindo desse contexto histórico, mas considerando a realidade contemporânea da conservação e do restauro, em que a cal aérea hidratada industrializada constitui o ligante mais amplamente disponível, o presente trabalho investiga o comportamento de argamassas bastardas formuladas com esse material, em combinação com cal hidráulica natural, cimento Portland e metacaulim em diferentes proporções. Os ensaios de caracterização física, retração, resistência à flexão, resistência à compressão e envelhecimento acelerado em câmara climática foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTIG) do IPB, entre outubro de 2024 e fevereiro de 2025, no âmbito do Grupo de Investigação em Construção Sustentável (GICOS), vinculado ao Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG, *Campus* Ouro Preto). Os resultados buscam contribuir para intervenções em sistemas construtivos tradicionais e para a conservação do patrimônio edificado.

O trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta o problema de pesquisa e o Capítulo 3 os objetivos. O Capítulo 4 aborda o estado da arte, percorrendo a trajetória histórica da cal, sua transformação em argamassa e a evolução das argamassas bastardas. O Capítulo 5 apresenta os materiais e os procedimentos experimentais adotados. Os Capítulos 6 e 7 apresentam e discutem os resultados obtidos, referentes respectivamente à caracterização física e à caracterização mecânica. O Capítulo 8 traz reflexões sobre formação,

patrimônio e prática a partir da experiência da pesquisa. O Capítulo 9 reúne as conclusões da investigação. Ao final, é apresentado o conjunto de planilhas utilizadas no desenvolvimento, acompanhamento e ensaio das argamassas, conforme demonstrado no APÊNDICE A.

2 PROBLEMA DE PESQUISA

As edificações históricas construídas com sistemas à base de cal não preservam seus materiais originais em estado estático. Ao longo do tempo, as argamassas sofrem processos contínuos de carbonatação, variação de umidade e interações químicas com o suporte, alterando progressivamente suas propriedades físicas e mecânicas. Não é apenas o suporte que envelhece: os recobrimentos preexistentes em bom estado também fazem parte desse sistema, e qualquer nova camada aplicada precisará conviver com eles, integrando-se a um conjunto que já encontrou sua própria estabilidade. Esse conjunto, ao receber uma intervenção, constitui, portanto, um sistema em equilíbrio dinâmico, resultado de séculos de transformação, e não pode ser tratado como se fosse o mesmo de quando foi construído.

Nessa perspectiva, a escolha de uma argamassa bastarda para intervenção não pode ser orientada apenas pela resistência mecânica inicial. Embora a cal aérea hidratada industrializada seja considerada o ligante atualmente disponível mais próximo das cales utilizadas nas argamassas históricas tradicionais (VEIGA, 2018), seu comportamento ao longo do tempo não é idêntico ao das cales artesanais de origem geológica variada. Uma argamassa que parte de alta resistência pode perder desempenho com o tempo, enquanto outra que parte de baixa resistência pode ganhá-la progressivamente, ultrapassando a capacidade do suporte envelhecido. Há ainda formulações que se mantêm estáveis ao longo de todo o processo.

Essa mesma cautela se estende às fontes históricas disponíveis. Vitruvius, no século I a.C., documentou alguns traços de argamassas, mas essas referências são pontuais e não representam a diversidade de práticas construtivas que existiram ao longo dos séculos e nos diferentes territórios (VITRÚVIO apud COELHO; JALALI; TORGAL, 2011; VEIGA, 2018). O conhecimento construtivo histórico era transmitido oralmente, de mestre a aprendiz, adaptado empiricamente aos materiais de cada região e ajustado pela experiência acumulada de gerações. Esse saber raramente foi registrado, e os poucos registros existentes não capturam a riqueza das adaptações locais.

Ainda assim, mesmo que existissem registros completos e confiáveis, aplicá-los diretamente sobre o suporte atual seria insuficiente: a carbonatação contínua, as variações climáticas e a exposição prolongada a agentes ambientais transformaram tanto o suporte quanto os recobrimentos preexistentes de formas que nenhum registro histórico poderia antecipar,

tornando os resultados obtidos em qualquer momento do tempo um retrato parcial de um sistema em permanente transformação (VEIGA, 2018; BANDEIRA, 2012). O critério de prescrição, portanto, não pode ser a reconstituição do passado, mas a compatibilidade com o presente.

Surge, então, a seguinte questão: de que forma o comportamento físico e mecânico de argamassas bastardas à base de cal aérea hidratada, avaliado em diferentes composições e condições de envelhecimento, pode orientar a prescrição de intervenções compatíveis com o suporte histórico, duráveis e respeitosas às técnicas construtivas tradicionais?

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Caracterizar experimentalmente o comportamento físico e mecânico de argamassas bastardas à base de cal aérea hidratada, discutindo as implicações das variações composicionais para a prescrição de argamassas compatíveis com sistemas construtivos tradicionais em estado de envelhecimento.

3.2 Objetivos Específicos

- Examinar a influência das diferentes substituições de ligantes no comportamento físico das argamassas avaliadas, considerando parâmetros como consistência, variação de massa e retração.
- Comparar o desempenho mecânico das composições sob distintas condições de cura e envelhecimento acelerado, identificando formulações com comportamento mais estável entre os dois momentos de ensaio.
- Avaliar o comportamento das diferentes formulações quanto à demanda de água necessária para atingir a consistência de moldagem estabelecida.
- Discutir as implicações técnicas das variações composicionais observadas para a prescrição de argamassas em intervenções sobre sistemas construtivos tradicionais, reconhecendo que a compatibilidade com o suporte envelhecido prevalece sobre a resistência mecânica isolada.

4 ESTUDO DO ESTADO DA ARTE

4.1 Origem e permanência histórica da cal

A cal é um dos materiais de construção mais antigos utilizados pela humanidade. Produzida a partir da queima de rochas calcárias, desempenha funções distintas conforme o sistema construtivo em que é empregada. Nas argamassas, atua como ligante, participando do assentamento, revestimento e preenchimento das alvenarias. No adobe e no pau a pique, estabiliza o barro, reduzindo sua retração e aumentando sua resistência à umidade. Nas caldas e rejuntas, consolida estruturas e sela juntas. Em pavimentações, regulariza superfícies e contribui para sua resistência e durabilidade.

Essa versatilidade permitiu que a cal fosse empregada em sistemas construtivos muito distintos ao longo da história. Sua capacidade de desempenhar diferentes funções, adaptando-se às características de outros materiais e das condições ambientais, explica sua permanência em culturas, territórios e períodos históricos diversos (KANAN, 2008; ROTONDARO, 2011, p. 20; 67; LUSO; LOURENÇO; ALMEIDA, 2004; LUSO, 2020).

As evidências materiais mais antigas do uso da cal remontam ao período neolítico. Vestígios identificados em sítios arqueológicos nas regiões correspondentes à atual Turquia e Palestina indicam a presença de cal apagada em pavimentos e revestimentos datados entre 10.000 e 8.000 a.C., sugerindo que o processo de calcinação do calcário já era dominado empiricamente por diferentes povos (MARGALHA, 2011, p. 4).

Na antiguidade, egípcios, gregos e romanos, ampliaram progressivamente o uso da cal em revestimentos arquitetônicos e obras construtivas diversas (KANAN, 2008). Os romanos, em particular, deram contribuição decisiva ao incorporar materiais pozolânicos naturais e artificiais às argamassas, como cinzas vulcânicas e fragmentos cerâmicos moídos. Esses materiais reagem com a cal na presença de água, originando compostos com propriedades hidráulicas que permitiam o endurecimento das argamassas mesmo em ambientes úmidos ou submersos (KANAN, 2008, p. 34), resultando em estruturas de excepcional durabilidade, algumas das quais permanecem íntegras até os dias atuais, como o aqueduto Pont du Gard, no sul da França, construído no século I a.C. (Figura 1).

Figura 1 - Pont du Gard, França. Aqueduto romano do século I a.C., construído com argamassa à base de cal e materiais pozzolânicos, preservado até os dias atuais.



Fonte: LIEU SONG, Benh. *Pont du Gard*. Wikipédia, [s.d.]. 1 fotografia, color. Disponível em: pt.wikipedia.org/wiki/Ponte_do_Gard. Acesso em: 27 maio 2026. Licença: CC BY-SA 3.0.

Com o declínio do Império Romano, parte do conhecimento técnico relacionado à produção e formulação das argamassas foi gradualmente disperso. A redução das grandes obras públicas, a perda de padronização construtiva e a descentralização dos sistemas produtivos contribuíram para formulações menos controladas ao longo da Idade Média (MARGALHA, 2011).

O conhecimento sobre as propriedades hidráulicas dos ligantes voltou a ser sistematizado no século XVIII, especialmente a partir dos estudos desenvolvidos pelo engenheiro inglês John Smeaton durante a reconstrução do Farol de Eddystone¹. Seus experimentos demonstraram a influência das argilas presentes nos calcários sobre o endurecimento em ambientes úmidos, contribuindo para o desenvolvimento posterior das cales hidráulicas e dos cimentos modernos (KANAN, 2008).

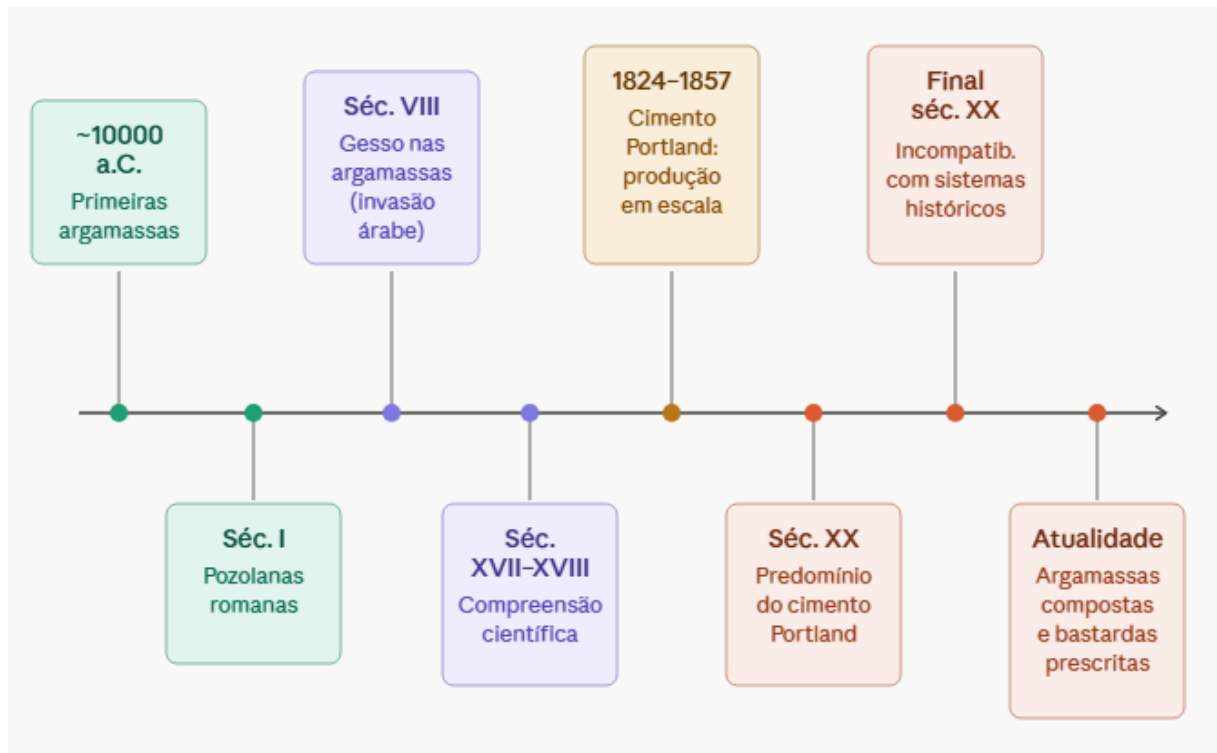
No século XIX, o desenvolvimento do cimento Portland transformou profundamente a construção civil. Patentado na Inglaterra por Joseph Aspdin² em 1824, o

¹ O Farol de Eddystone, localizado no Canal da Mancha, ao largo de Plymouth, Inglaterra, foi reconstruído por John Smeaton entre 1756 e 1759. Durante os estudos preparatórios, Smeaton realizou experimentos sistemáticos com diferentes tipos de cal e calcário, combinando cal obtida de calcários margosos com gesso e pozzolana italiana, e identificou que calcários com teores de argila produziam ligantes capazes de endurecer em ambientes úmidos. Esses experimentos são considerados o ponto de partida do desenvolvimento científico das cales hidráulicas (KANAN, 2008).

² Joseph Aspdin (1778-1855), pedreiro e inventor inglês, patenteou o cimento Portland em 1824 sob o número de patente 5022, denominando-o em referência às pedras calcárias da ilha de Portland, Dorset, Inglaterra (KANAN, 2008).

material apresentava características que respondiam às demandas de escala e velocidade impostas pela industrialização e pela urbanização acelerada do período (KANAN, 2008). A Figura 2 sintetiza essa trajetória, dos primeiros usos da cal no período neolítico ao contexto contemporâneo de prescrição de argamassas bastardas compatíveis com o patrimônio edificado.

Figura 2 - Trajetória histórica das argamassas e seus ligantes.



Fonte: Elaborada pela autora com base em AZEVEDO, 2015; KANAN, 2008; LUSO, 2020; MARGALHA, 2011; REDENTOR, 2003, 2026.

4.2 Processos de transformação da cal e fatores que condicionam seu desempenho

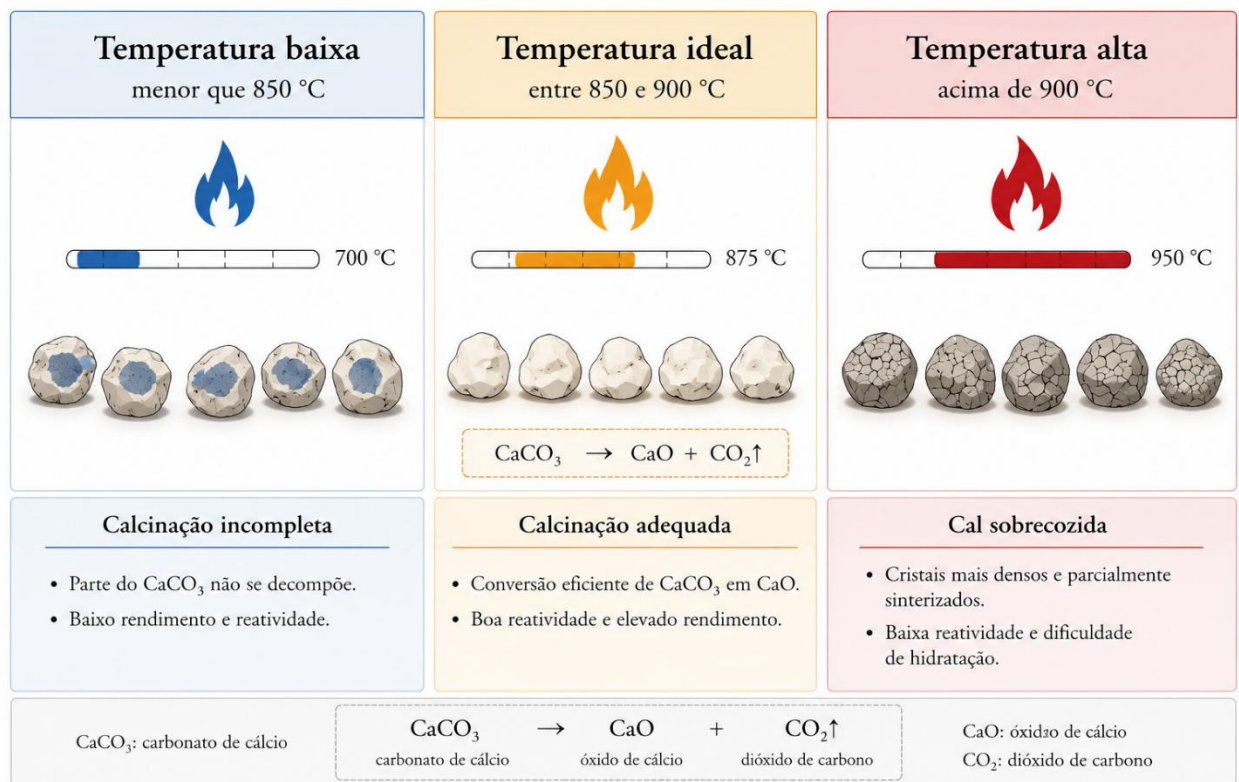
A obtenção da cal pressupõe o domínio de um processo de transformação que a humanidade aprendeu a controlar empiricamente muito antes de compreendê-lo quimicamente. Antes da industrialização, esse processo era inteiramente artesanal: o calcário extraído localmente era queimado em fornos construídos pela própria comunidade, utilizando lenha da região, e a cal resultante refletia diretamente a geologia do lugar onde havia sido produzida. Esse processo, conhecido como ciclo da cal, desdobra-se em três etapas principais: calcinação, hidratação e carbonatação (KANAN, 2008; MARGALHA, 2011).

A calcinação consiste no aquecimento da rocha calcária em fornos a temperaturas entre 850 °C e 900 °C. Sob essas condições térmicas, o carbonato de cálcio se decompõe,

liberando dióxido de carbono e formando óxido de cálcio, conhecido popularmente como cal viva ou cal virgem.

O controle da temperatura era decisivo e exigia conhecimento empírico acumulado ao longo de gerações. Abaixo do intervalo ideal, a calcinação incompleta deixava carbonato de cálcio não decomposto, comprometendo o rendimento. Dentro do intervalo, a calcinação adequada produzia óxido de cálcio reativo e de bom rendimento. Acima dele, a sobrecalcinação formava cristais de cal insolúveis e pouco reativos, chamados cal morta, inapropriadas para a construção (COELHO; TORGAL; JALALI, 2009), conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Efeito da temperatura na calcinação.



Fonte: Elaborada pela autora com base em COELHO; TORGAL; JALALI, 2009. Imagens geradas com auxílio de IA.

O óxido de cálcio formado durante a calcinação encontra-se em estado energético elevado e tende a reagir com qualquer substância disponível, especialmente a água e o dióxido de carbono, buscando atingir um estado mais estável. É essa instabilidade, provocada pela reação química da calcinação, que caracteriza a cal viva.

Em sistemas construtivos tradicionais como o adobe e o pau a pique, essa reatividade é aproveitada pela incorporação direta da cal viva ao barro úmido, onde a umidade

promove sua hidratação gradual. Para seu uso em argamassas, a cal viva é submetida à hidratação ou extinção, mediante adição controlada de água.

Nessa reação, o óxido de cálcio reage com a água formando hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 . Durante a reação, as ligações químicas que se formam no hidróxido de cálcio são mais fortes do que as que existiam no óxido de cálcio e na água separados, e esse excedente de energia é liberado na forma de calor intenso, classificando a hidratação como reação exotérmica, capaz de atingir temperaturas superiores a 150 °C e exigindo cuidados no manuseio (LUSO, 2020). A reação provoca também significativa expansão volumétrica: o hidróxido de cálcio formado ocupa volume maior do que o óxido de cálcio original, pois sua estrutura cristalina em camadas é menos densa do que a estrutura compacta do CaO . O produto obtido é denominado cal apagada ou cal hidratada, e sua forma final depende diretamente da quantidade de água utilizada no processo.

Com quantidade mínima de água, apenas suficiente para completar a reação, não há água livre sobrando após a hidratação. O calor intenso liberado pela reação exotérmica evapora parte da umidade residual, e o material passa por secagem complementar para garantir um produto em forma de pó fino e seco, a cal hidratada em pó. Quando a quantidade de água é insuficiente para completar a reação, partículas de óxido de cálcio não reagido permanecem no material. Ao entrar em contato com a umidade do ambiente ou do suporte após a aplicação, essas partículas continuam reagindo, provocando expansão localizada, fissuração e destacamentos no revestimento, problema conhecido como cal não extinta ou cal viva residual.

Com excesso de água, obtém-se a cal em pasta, de elevada plasticidade e facilidade de aplicação. A pasta pode ser armazenada submersa em água por meses ou anos sem carbonatar, pois a ausência de contato com o CO_2 atmosférico impede o endurecimento prematuro. Ao longo desse período de maturação, as partículas de hidróxido de cálcio continuam se refinando e tornando-se progressivamente menores e mais homogêneas, aumentando a superfície de contato disponível para a carbonatação futura e resultando em argamassas mais plásticas, coesas e de melhor desempenho em diversas aplicações, do assentamento de alvenarias aos rebocos finos. Vitruvius, no século I a.C., já recomendava que a cal fosse maturada por ao menos três anos antes de ser utilizada em rebocos finos (KANAN, 2008; MARGALHA, 2011).

É precisamente a intensidade dessa expansão volumétrica que está relacionada às denominações tradicionais de cal gorda e cal magra. Calcários mais puros produzem pastas abundantes e plásticas, enquanto calcários com maiores teores de impurezas produzem menor quantidade de pasta e apresentam baixa plasticidade, dificultando sua aplicação. Essa

classificação empírica, utilizada muito antes do desenvolvimento da química moderna, refletia características reais do comportamento do material (MARGALHA, 2011; LUSO, 2020).

A etapa final do ciclo corresponde à carbonatação. Após a aplicação da argamassa, o hidróxido de cálcio reage lentamente com o dióxido de carbono atmosférico, retornando à forma de carbonato de cálcio e promovendo o endurecimento gradual do revestimento. Esse endurecimento lento constitui uma das principais características da cal aérea, permitindo acomodar pequenas movimentações das construções sem provocar fissurações abruptas (VEIGA, 2018). A (Figura 4) apresenta uma síntese das transformações químicas envolvidas nesse ciclo.

Além das cales aéreas e hidráulicas, a história da construção registra o uso de materiais pozolânicos, como cinzas vulcânicas, cerâmica moída e metacaulim. Trata-se de substâncias silicosas ou sílico-aluminosas que, isoladamente, não endurecem, mas que, quando combinadas com cal e água, conferem hidráulicidade às argamassas, aumentando sua resistência mecânica e durabilidade (KANAN, 2008; COELHO; TORGAL; JALALI, 2009). Esses materiais integram o grupo dos ligantes hidrófilos, aqueles que formam pasta ao serem misturados com água, subdivididos entre ligantes aéreos, que endurecem por reação com o ar, e ligantes hidráulicos, que endurecem por reação com a água, conforme sintetizado na (Figura 5).

Embora classificada como hidráulica, a cal hidráulica natural apresenta um mecanismo de endurecimento misto, que ocorre em duas etapas distintas. Inicialmente, os silicatos e aluminatos de cálcio presentes na cal, formados durante a calcinação a partir das impurezas argilosas e silicosas naturalmente presentes no calcário de origem, reagem rapidamente com a água, conferindo à cal hidráulica a capacidade de endurecer mesmo em ambientes saturados, de forma análoga ao cimento. Posteriormente, a fração de cal livre não consumida nessa reação hidráulica inicial hidrata-se e carbonata lentamente pela reação com o CO_2 atmosférico, processo equivalente ao da cal aérea. Esse comportamento misto, que combina pega hidráulica inicial e ganho de resistência contínuo por carbonatação, é o que confere à cal hidráulica natural um desempenho intermediário entre a cal aérea e o cimento Portland (KANAN, 2008; COELHO; TORGAL; JALALI, 2009).

Figura 4 - Ciclo da Cal.



Fonte: Elaborada pela autora com auxílio de IA, 2026.

Figura 5 - Classificação dos ligantes hidrófilos.



Fonte: Elaborado pela autora com base em Luso (2020).

Essa distinção entre ligantes aéreos e hidráulicos, porém, nem sempre foi tão nítida na prática construtiva. Em muitos territórios, a própria geologia do calcário disponível já introduzia na cal compostos silicosos e aluminosos que conferiam comportamento parcialmente hidráulico, sem que os construtores precisassem adicionar nada. Esse foi o caso de Bragança, cidade localizada em Trás-os-Montes, região no extremo nordeste de Portugal caracterizada por uma geologia predominantemente granítica e xistosa, com ocorrências de calcário escassas e dispersas, conforme evidencia o mapa litológico de Portugal apresentado na (Figura 6). Os calcários disponíveis nessa região produziam uma cal parda, magra e de baixa plasticidade.

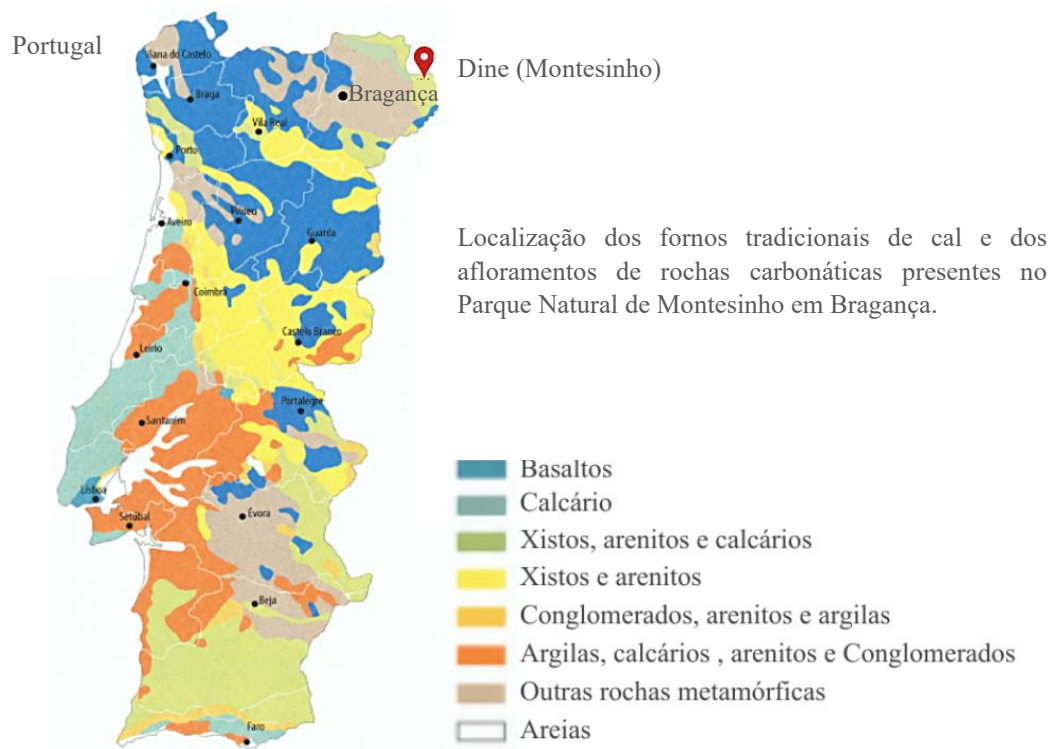
A plasticidade é uma das propriedades mais relevantes da cal para uso em argamassas. É ela que determina a facilidade de aplicação, a capacidade de adesão ao suporte e o rendimento em obra. Calcários mais puros produzem maior quantidade de partículas finas de hidróxido de cálcio, que retêm água entre si e formam pastas abundantes e trabalháveis. Calcários com maiores teores de impurezas, como argilas, silicatos e óxidos de ferro, produzem menor quantidade dessas partículas e resultam em cales de baixa plasticidade, mais difíceis de aplicar e com menor rendimento em revestimentos.

A pureza do calcário depende diretamente do ambiente geológico em que a rocha se formou. O calcário origina-se da acumulação de carbonato de cálcio no fundo de mares e lagos antigos, proveniente de conchas, esqueletos de organismos marinhos e precipitação química. Quando esse ambiente é cercado por rochas ricas em argilas, silicatos ou óxidos de ferro, esses materiais se depositam junto com o carbonato de cálcio e ficam aprisionados na

rocha. Em regiões de embasamento cristalino antigo, como Trás-os-Montes, os afloramentos calcários se formaram em contato direto com granitos, xistos e formações ricas em ferro, o que explica o elevado teor de impurezas nas cales produzidas nessas regiões (KANAN, 2008; MARGALHA, 2011; RIBEIRO, 1974).

A Figura 6 apresenta também a localização dos fornos tradicionais da aldeia de Dine, nos arredores de Bragança, que testemunharam essa realidade demonstrando como a qualidade do ligante disponível condicionava as técnicas construtivas locais (REDENTOR, 2003).

Figura 6 - Mapa simplificado das principais unidades litológicas de Portugal e localização dos fornos tradicionais de cal de Dine (Bragança).



Fonte: Elaborada pela autora (2026), com base em cartografia geológica de Portugal disponibilizada pelo LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia.

Os fornos de Dine enquadram-se na categoria de fornos contínuos, nos quais a matéria-prima e o combustível, ou seja, camadas alternadas de pedra calcária e lenha de urze, contactam diretamente no interior da câmara de calcinação.

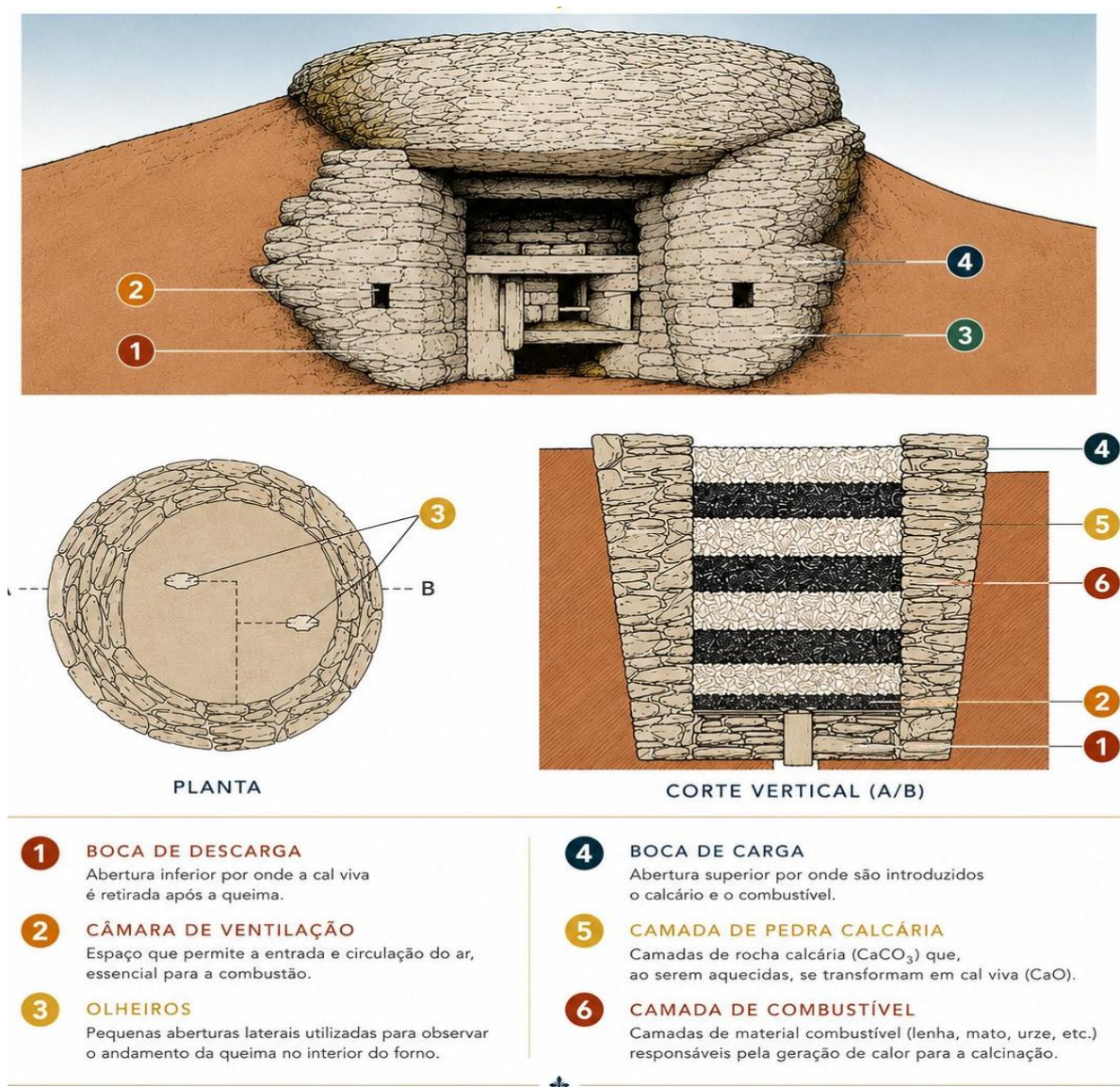
Construídos em alvenaria de pedra irregular de extração local, filitos e quartzofilitos unidos com terra argilosa, estruturavam-se em duas partes principais: uma câmara de ventilação térrea, encimada por um lajedo de lajes xistosas, e uma câmara de calcinação de forma troncocônica invertida, totalmente aberta na parte superior para carga e com uma boca de descarga ao nível da base. As fornadas ardiam entre 36 e 72 horas, conforme a capacidade do forno e as características da matéria calcária disponível, produzindo quase exclusivamente cal parda destinada à construção na região de Vinhais e Bragança (REDENTOR, 2003), conforme ilustram as Figuras 7 e 8.

Figura 7 - Fornos tradicionais de Dine, Bragança.



Fonte: MINDTRIP. Fornos de Cal de Dine. Disponível em: mindtrip.ai/attraction/dine-braganca-district/fornos-de-cal-de-dine/at-a4pJucKa. Acesso em: 20 maio 2026.

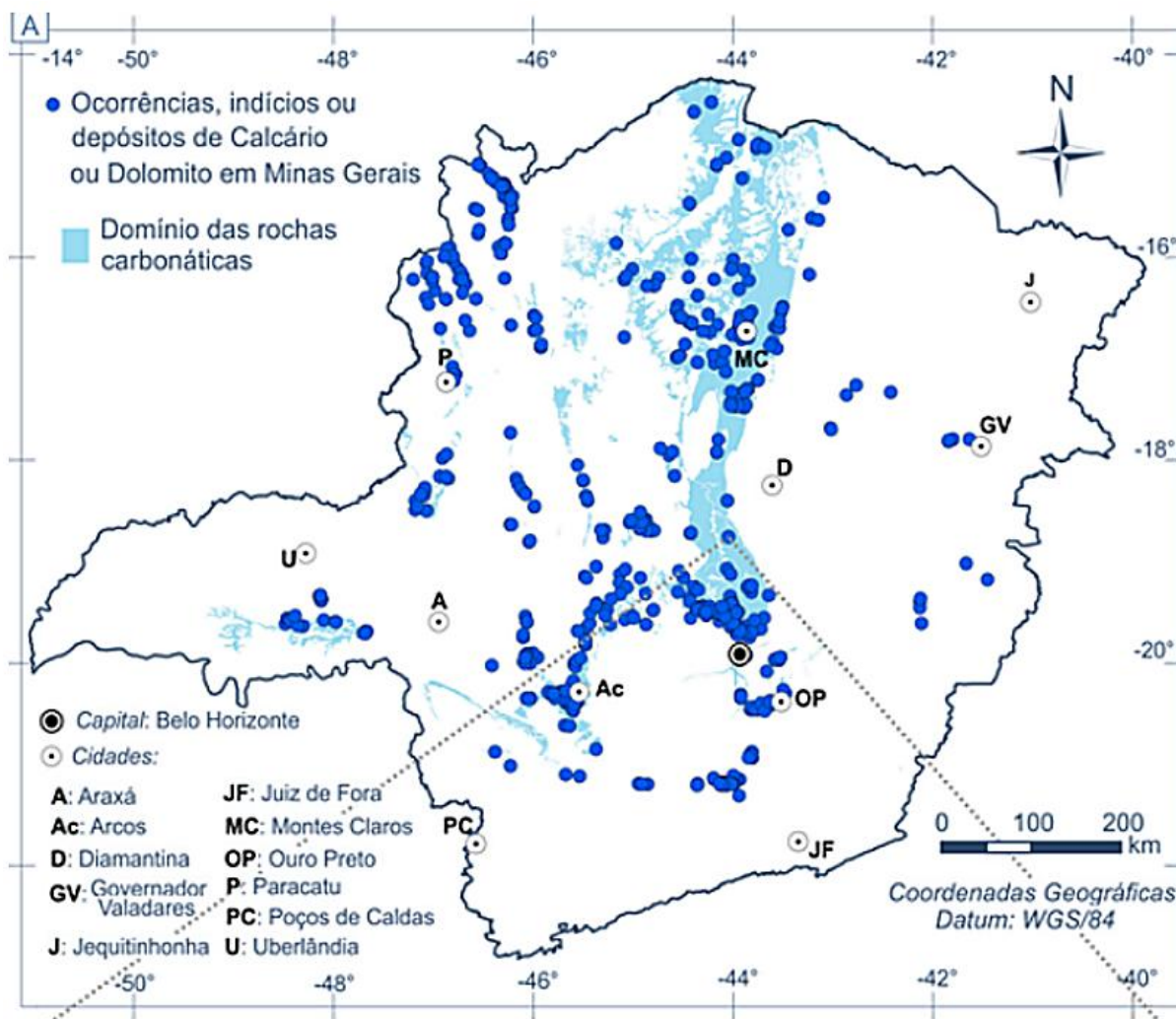
Figura 8 - Fornos da cal de Dine: planta, corte vertical e componentes.



Fonte: Elaborada pela autora com base em REDENTOR, 2003. Imagem gerada com auxílio de IA, 2026.

Situação semelhante foi observada em Vila Rica, atual Ouro Preto. A chamada cal preta era produzida a partir de jazidas calcárias de características distintas das encontradas em muitas regiões das Minas Gerais, embora apresentasse bom desempenho em estruturas destinadas ao contato com água, sua utilização em acabamentos e pinturas era limitada, exigindo adaptações por parte dos construtores (VASCONCELLOS, 1977 apud MARTINS, 2010), conforme ilustra a Figura 9.

Figura 9 - Distribuição geográfica das rochas carbonáticas (calcário e dolomito) em Minas Gerais, com destaque para a região de Ouro Preto.



Fonte: Adaptado de CODEMGE (2026), a partir de dados da CPRM (2018) e CODEMIG (2018), disponíveis no projeto Recursos Minerais de Minas Gerais.

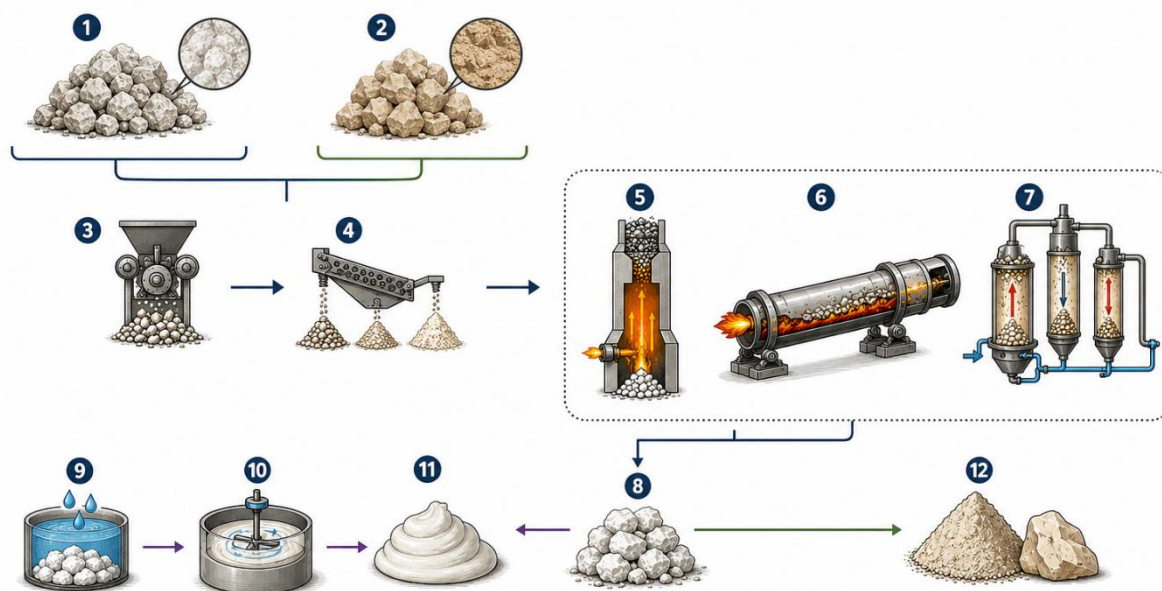
O mapa evidencia a distribuição desigual das ocorrências de calcário em Minas Gerais. Enquanto o centro-norte do estado concentra os principais domínios de rochas carbonáticas, a região de Ouro Preto aparece à margem dessas ocorrências, com registros pontuais e dispersos, reflexo direto de uma geologia dominada por complexos metamórficos arqueanos e por importantes formações ferríferas do Quadrilátero Ferrífero (AZEVEDO et al., 2012). Era com esse calcário escasso e de qualidade variável que se produzia a cal em Vila Rica.

A cal produzida em Dine e em Ouro Preto carregava consigo a marca do lugar onde havia sido feita. Sua vocação aparecia com clareza nos usos construtivos que exigiam resistência à umidade: era especialmente eficaz em fundações, alvenarias enterradas e

ambientes úmidos. Suas limitações, por outro lado, concentravam-se nos acabamentos: a cor escura a tornava inadequada para pinturas, e o menor rendimento em revestimentos finos exigia adaptações por parte dos construtores. Não era uma cal pior, mas uma cal cujo desempenho dependia diretamente do uso que se fazia dela (REDENTOR, 2003; VASCONCELLOS, 1977 apud MARTINS, 2010).

A industrialização padronizou a cal e universalizou seu acesso: regiões que dependiam de calcários impuros, como Dine e Ouro Preto, passaram a dispor de um ligante de composição controlada, comportamento repetível e disponível em qualquer território. Em contrapartida, o comportamento parcialmente hidráulico que a geologia conferia naturalmente deixou de estar presente no ligante e a responsabilidade de compor as propriedades da argamassa de acordo com as exigências específicas de cada obra passou da natureza para o formulador. A Figura 10 sintetiza esse processo, apresentando o fluxograma simplificado da produção industrial da cal e seus derivados.

Figura 10 - Fluxograma simplificado da produção industrial da cal e seus derivados.



Legenda: 1. Calcário calcítico (puro); 2. Calcário margoso; 3. Britagem; 4. Classificação granulométrica; 5. Forno vertical; 6. Forno rotativo; 7. Forno regenerativo; 8. Cal virgem (CaO); 9. Hidratação; 10. Cal hidratada [Ca(OH)_2]; 11. Cal em pasta; 12. Cal hidráulica natural (NHL).

Fonte: Elaborado pela autora com base em BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN KALKINDUSTRIE, 2026. Imagem gerada com auxílio de IA.

4.3 Argamassas bastardas: da prática empírica ao conhecimento técnico

Se todas as argamassas desempenhassem a mesma função, uma única formulação provavelmente teria sido suficiente ao longo da história. A realidade construtiva, contudo, sempre foi mais complexa. Uma argamassa destinada ao assentamento de alvenarias está sujeita a exigências distintas daquelas impostas ao emboço, ao reboco ou à camada de acabamento. Essa última camada é intencionalmente a mais frágil, mas atua como uma camada de sacrifício, envolvendo e protegendo o sistema construtivo contra a ação da água, das variações térmicas e dos processos naturais de envelhecimento, absorvendo tensões para que os elementos que ela reveste não as sofram. Quando bem prescrita, essa fragilidade é uma qualidade: os danos aparecem primeiro neste recobrimento, sinalizando a necessidade de intervenção antes que o suporte histórico seja comprometido (VEIGA, 2003).

A necessidade de modificar o comportamento da cal aérea pura acompanha a própria história da construção. Ao longo do tempo, diferentes substâncias foram incorporadas às formulações com objetivos distintos. Algumas dessas modificações envolveram adições orgânicas, como sangue animal, caseína, esterco e fibras vegetais, que alteravam a plasticidade, reduziam fissurações ou aumentavam a resistência à água sem modificar o ligante inorgânico de base. Outras consistiram na combinação de dois ou mais ligantes inorgânicos distintos, como cal e gesso, cal aérea e cal hidráulica, ou cal e cimento Portland. Embora ambas as estratégias sejam frequentemente reunidas na literatura sob o termo genérico de abastardamento, elas não correspondem necessariamente ao mesmo conceito. Neste trabalho, o termo é empregado em seu sentido amplo, enquanto a expressão argamassa bastarda é reservada às formulações constituídas por dois ou mais ligantes inorgânicos distintos, conforme a definição adotada por Azevedo (2015) e Mendonça (2007 apud Fonseca, 2016). Considera-se, ainda, que a presença de adições pozolânicas não altera essa classificação. A partir dessa definição, discutem-se, a seguir, as principais combinações de ligantes empregadas nas argamassas bastardas.

Independentemente da formulação adotada, toda argamassa resulta da combinação entre um ligante, um agregado e água. O ligante é o componente aglomerante da argamassa. Nas formulações de cal aérea, o hidróxido de cálcio reage com o CO_2 atmosférico pelo processo de carbonatação, formando carbonato de cálcio e promovendo o endurecimento progressivo da mistura. Nos ligantes hidráulicos, como a cal hidráulica e o cimento Portland, o endurecimento se inicia pela reação com a água. A qualidade e a proporção do ligante determinam diretamente a coesão, a resistência e a compatibilidade da argamassa com o suporte (KANAN, 2008; LUSO, 2020).

A areia é o componente que define a estrutura interna da argamassa. Sua granulometria, ou seja, a distribuição dos tamanhos dos grãos, determina diretamente a porosidade da mistura e, com ela, o desempenho esperado: poros maiores favorecem a carbonatação e a permeabilidade ao vapor; poros menores aumentam a resistência e reduzem a absorção de água. É a areia que reduz retrações, distribui tensões internas e confere estabilidade dimensional à argamassa endurecida (COELHO; TORGAL; JALALI, 2009).

A água, por sua vez, permite a formação da pasta e a aplicação da mistura. Nos ligantes hidráulicos, como a cal hidráulica e o cimento Portland, desencadeia também as reações de endurecimento por hidratação. Nas argamassas de cal aérea, o endurecimento ocorre posteriormente, pelo processo de carbonatação. Sua quantidade influencia diretamente a consistência da argamassa, sua porosidade final e seu comportamento mecânico: quantidades insuficientes comprometem a aplicação, ao passo que quantidades excessivas elevam a porosidade, aumentam a retração e reduzem a resistência (COELHO; TORGAL; JALALI, 2009; AZEVEDO, 2015).

O resultado dessa combinação entre ligante, areia e água é o que a (Figura 11) ilustra: a argamassa tradicional é uma pedra artificial porosa, plástica no estado fresco e capaz de assumir a forma que se quiser antes de endurecer, formada por agregados unidos por uma matriz carbonatada que, com a escolha correta de materiais e proporções, tem capacidade de desempenhar suas funções com durabilidade (LUSO, 2020).

Quando esses elementos não se encontram adequadamente proporcionados, a argamassa não desenvolve plenamente sua função aglomerante. Em argamassas de cal aérea, esse risco é especialmente presente: a carbonatação é lenta e depende de condições favoráveis de umidade e temperatura, e sua interrupção pode resultar em materiais que perdem coesão progressivamente. O aspecto arenoso observado em muitos revestimentos históricos não decorre necessariamente da idade do material, mas frequentemente de condições inadequadas de cura, de suporte excessivamente absorvente que retira a água da argamassa antes da carbonatação completar, de umidade elevada do ar que satura os poros e dificulta a difusão do CO_2 , ou da ação de agentes de degradação como os sais solúveis (MARGALHA, 2011; COELHO; TORGAL; JALALI, 2009).

Figura 11 - Composição e processo de endurecimento de uma argamassa tradicional.



Fonte: Elaborada pela autora com auxílio de IA, 2026.

A preocupação em superar as limitações da cal aérea acompanha a própria história da construção. Desde a Antiguidade, os construtores recorreram à associação entre diferentes ligantes e à utilização de materiais capazes de alterar significativamente o endurecimento e o desempenho das misturas. As argamassas romanas enriquecidas com materiais pozolânicos constituem um dos exemplos mais conhecidos dessa estratégia: embora as pozolanas não endureçam isoladamente, sua reação com o hidróxido de cálcio presente na cal, na presença de

água, forma silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, os mesmos compostos responsáveis pela resistência do cimento, conferindo hidraulicidade às argamassas (KANAN, 2008; COELHO; TORGAL; JALALI, 2009). Na Península Ibérica, a influência árabe introduziu, a partir do século VIII, os chamados trabadilhos, argamassas que combinavam cal viva e gesso como ligantes distintos (ALMEIDA, 2010 apud AZEVEDO, 2015). Em outras regiões, materiais pozolânicos continuaram a ser associados à cal para melhorar o desempenho em ambientes úmidos e aumentar a durabilidade. Embora distintas entre si, essas experiências revelam uma compreensão prática comum: diferentes problemas construtivos exigem diferentes combinações de materiais.

Com a industrialização, os ligantes deixaram de depender exclusivamente dos materiais disponíveis em cada região e passaram a ser produzidos de forma padronizada, ampliando as possibilidades de formulação e transferindo ao projetista, ao construtor e ao conservador-restaurador a responsabilidade de selecionar a combinação mais adequada para cada intervenção (COELHO; TORGAL; JALALI, 2009; LUSO, 2020).

Os materiais utilizados nesta investigação são classificados segundo as normas europeias, vigentes no país em que os ensaios foram realizados. A cal aérea hidratada e a cal hidráulica natural seguem a norma EN 459-1, que classifica as cales pelo teor de hidróxido de cálcio e pela resistência à compressão. No Brasil, a norma ABNT NBR 7175 classifica a cal hidratada em três categorias, CH-I, CH-II e CH-III, pela pureza do produto, sem contemplar a cal hidráulica natural como categoria distinta. O cimento Portland utilizado segue a norma europeia EN 197-1, enquanto a norma brasileira ABNT NBR 16697 adota a sigla CP seguida do tipo e classe de resistência. Embora os produtos sejam tecnicamente comparáveis, a nomenclatura distinta pode gerar dificuldades de correspondência para o leitor brasileiro, razão pela qual os materiais desta investigação são identificados sempre pela classificação europeia.

A utilização de ligantes hidráulicos poderia sugerir, à primeira vista, que as limitações da cal aérea estariam definitivamente resolvidas. De fato, tanto a cal hidráulica quanto o cimento Portland desenvolvem resistências mecânicas superiores e apresentam menor dependência das condições ambientais para o endurecimento. Entretanto, em edificações históricas, o ganho de resistência conferido pelos ligantes hidráulicos é frequentemente acompanhado por aumento da rigidez e redução da permeabilidade, características que podem ser vantajosas em determinadas situações e problemáticas em outras, como nas alvenarias que precisam acomodar movimentações e permitir a troca de umidade com o ambiente.

O cimento Portland, assim como a cal, nasce do calcário. A diferença está no que acontece durante a queima. Enquanto a cal é produzida pela calcinação do calcário puro a

temperaturas entre 850 °C e 900 °C, o cimento resulta da queima de uma mistura de calcário e argila a temperaturas que chegam a 1450 °C. Nessas condições elevadas de temperatura, os silicatos e aluminatos presentes na argila reagem com o cálcio e formam compostos que, ao entrar em contato com a água, endurecem rapidamente e desenvolvem resistências mecânicas muito superiores às da cal. O gesso, adicionado após a moagem do clínquer, regula o tempo de presa. O resultado desse processo é um ligante com propriedades distintas das da cal: maior resistência mecânica, maior rigidez e menor permeabilidade ao vapor. Embora ambos tenham origem no calcário, os processos de fabricação conferem ao cimento e à cal comportamentos físicos e mecânicos distintos, exigindo cautela na substituição de um pelo outro em sistemas construtivos tradicionais (COELHO; TORGAL; JALALI, 2009).

A cal hidráulica natural, por sua vez, ocupa uma posição intermediária entre a cal aérea e o cimento Portland. Como a cal aérea, é produzida a partir do calcário, mas de calcários naturalmente ricos em silicatos e aluminatos que, durante a calcinação, formam compostos hidráulicos sem a necessidade de adições externas. Seu endurecimento ocorre tanto pela reação com a água quanto pela carbonatação com o CO₂ atmosférico, resultando em argamassas mais resistentes que as de cal aérea pura, mas mais deformáveis e permeáveis que as cimentícias. A norma europeia EN 459-1 classifica a cal hidráulica natural pela resistência à compressão mínima aos 28 dias: NHL 2, NHL 3,5 e NHL 5, onde o número indica essa resistência em megapascals. Quanto maior o índice, mais hidráulica e mais resistente, mas também mais rígida (LUSO, 2020; KANAN, 2008).

Além dos ligantes empregados na formulação, a incorporação de materiais pozolânicos também pode modificar significativamente o comportamento das argamassas. Entre eles, destaca-se o metacaulim, uma pozolana artificial obtida pela calcinação do caulim a temperaturas entre 600 °C e 800 °C. Esse processo destrói a estrutura cristalina do mineral, tornando-o altamente reativo. Quando incorporado a argamassas à base de cal, reage com o hidróxido de cálcio formado durante sua hidratação, na presença de água, formando silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, os mesmos compostos responsáveis pelo desenvolvimento da resistência mecânica do cimento. Diferentemente deste, porém, o metacaulim não atua como ligante hidráulico, mas como material pozolânico, dependendo da presença da cal para que essa reação ocorra. Em condições adequadas, a reação pozolânica pode contribuir para o aumento da resistência mecânica e da durabilidade das argamassas, preservando, em geral, sua permeabilidade ao vapor (BANDEIRA, 2012; AZEVEDO, 2015).

É precisamente no equilíbrio entre esses materiais que as argamassas bastardas encontram seu lugar. Ao combinar ligantes com comportamentos distintos, é possível compor

propriedades que isoladamente seriam incompatíveis. A plasticidade no estado fresco e a deformabilidade após o endurecimento da cal aérea podem coexistir com a resistência da cal hidráulica, do cimento Portland ou com a reatividade do metacaulim. O objetivo deixa de ser a resistência máxima e passa a ser a resposta certa para cada situação. O Quadro 1 sintetiza as características dos quatro ligantes utilizados nas formulações estudadas nesta investigação: cal aérea, cal hidráulica, cimento Portland e metacaulim, constituindo uma referência para a interpretação dos resultados apresentados nos capítulos seguintes. (COELHO; TORGAL; JALALI, 2009; LUSO, 2020).

Quadro 1- Características dos ligantes utilizados nas argamassas bastardas estudadas.³

Característica	Cal aérea (CL 90)	Cal hidráulica (NHL)	Cimento Portland	Metacaulim
Mecanismo de endurecimento	Carbonatação - reação com CO ₂	Hidratação e carbonatação	Hidratação - Reação com água	Reação com hidróxido de cálcio na presença de água
Velocidade de presa	Lenta - semanas a meses	Moderada - dias a semanas	Rápida - horas	Depende da cal com que é combinado
Resistência mecânica	Baixa	Moderada a alta - conforme grau de hidráulicidade	Alta	Aumenta a resistência da argamassa quando combinado com a cal
Rigidez	Baixa - acomoda movimentações	Moderada - menor deformabilidade que a cal aérea	Alta - pouco deformável	Moderada: depende da proporção utilizada
Comportamento à umidade	Permeável - absorve e libera umidade	Moderadamente permeável - varia com o grau de hidráulicidade	Pouco permeável - tende a reter umidade no suporte	Reduz a absorção de água por capilaridade - mantendo a permeabilidade ao vapor
Indicação em sistemas construtivos tradicionais	Rebocos, acabamentos, caiações	Fundações, áreas úmidas, juntas de alvenaria	Uso restrito - baixos teores em argamassas bastardas	Adição para aumentar durabilidade sem comprometer a permeabilidade

Fonte: Elaborado pela autora com base em COELHO; TORGAL; JALALI, 2009; KANAN, 2008; LUSO, 2020; VEIGA, 2003; VEIGA, 2018.

³ As classificações CL 90 e NHL referem-se à norma europeia NP EN 459-1:2015. A sigla CL (Calcium Lime) designa a cal aérea calcítica, com baixo teor de magnésio; a mesma norma prevê ainda a categoria DL (Dolomitic Lime), de teor de magnésio mais elevado, não utilizada nesta investigação. No Brasil, a cal aérea hidratada é regulada pela NBR 7175:2003, que classifica o produto em CH-I, CH-II e CH-III conforme o teor de óxidos totais, sem correspondência direta com a nomenclatura europeia nem distinção entre calcítica e dolomítica. Não existe no Brasil uma categoria normalizada equivalente às cales hidráulicas naturais (NHL).

Conhecer os materiais existentes na edificação é condição prévia a qualquer prescrição responsável. O trabalho desenvolvido por Verardo (2025) no Museu da Inconfidência, em Ouro Preto, exemplifica essa abordagem: por meio de técnicas analíticas como fluorescência de raios X, difração de raios X, espectroscopia de infravermelho, microtomografia computadorizada e análise granulométrica, a pesquisa identificou uma argamassa predominantemente calcária, com traço de 1:3 cal/areia, agregados quartzosos de origem local, elevada porosidade e absorção de água de 12,6%, sem indícios de adições hidráulicas ou cimentícias. Esses parâmetros estabelecem o perfil da argamassa de recobrimento preexistente e definem os limites de compatibilidade que qualquer argamassa de intervenção deve respeitar: porosa, deformável e com resistência mecânica compatível com a da argamassa original. A presente investigação insere-se nesse mesmo esforço: ao caracterizar (VEIGA, 2018, p. 92; p. 96) experimentalmente formulações bastardas à base de cal aérea hidratada em diferentes composições e condições de envelhecimento, oferece subsídios para que o conservador- restaurador possa selecionar, diante dos parâmetros identificados no suporte, a formulação cujo comportamento ao longo do tempo seja mais compatível com o sistema construtivo que receberá a intervenção.

Contudo, o uso crescente e indiscriminado do cimento em edificações originalmente construídas com sistemas à base de cal passou a produzir alterações incompatíveis com o funcionamento desses sistemas, favorecendo a retenção de umidade, fissurações, destacamentos de rebocos, eflorescências e outras manifestações patológicas recorrentes em tecidos históricos (VEIGA, 2003; VEIGA, 2018; LUSO; LOURENÇO; ALMEIDA, 2004).

Durante a mobilidade acadêmica realizada no Instituto Politécnico de Bragança (IPB), em Portugal, foi possível observar em campo manifestações compatíveis com esse quadro em edificações do centro histórico da cidade. Embora os principais monumentos de Bragança sejam classificados como Monumento Nacional desde 1910 e o conjunto urbano tenha passado a dispor de proteção patrimonial em 2005, intervenções incompatíveis e manifestações patológicas continuam presentes, demonstrando que o reconhecimento legal, por si só, não garante a adoção de práticas compatíveis de conservação (LUSO; LOURENÇO; ALMEIDA, 2004). (Figura 12).

Figura 12 - Manifestações patológicas em edificações do Centro Histórico de Bragança, Portugal: destacamento de rebocos e intervenções sobrepostas incompatíveis (esquerda) e fachada do Museu do Abade de Baçal em estado de degradação (direita).



Fonte: Autora, 2024.

Situação semelhante pode ser observada em Ouro Preto, tombada pelo IPHAN desde 1938 e reconhecida como Patrimônio Mundial pela UNESCO em 1980 (BOHRER, 2011, p. 39). Apesar desse amplo reconhecimento institucional, a gradual substituição de argamassas e revestimentos tradicionais à base de cal por materiais industrializados continua gerando incompatibilidades físicas e químicas com os sistemas construtivos históricos, resultando em manifestações patológicas recorrentes nas edificações protegidas (KANAN, 2008; MOTTA, 2010) (Figura 13).

Figura 13 - Exemplos de intervenções em edificações históricas de Ouro Preto/MG: área de reparo curativo visualmente distinta do revestimento original em fachada histórica (esquerda) e aplicação de massa corrida em fachada tombada flagrada no momento da execução (direita).



Fonte: Autora, 2025 (esquerda); MARTINS, Régis Eduardo, 2026 (direita).

Esse quadro revela uma lacuna persistente entre a produção de conhecimento sobre as argamassas de cal e sua efetiva aplicação nas práticas construtivas, refletida no progressivo distanciamento entre o saber prático e o conhecimento técnico-científico. É precisamente esse vazio que favorece a adoção de argamassas comerciais pré-dosadas ou do cimento como solução (COELHO; JALALI; TORGAL, 2011).

Por causa de intervenções equivocadas acumuladas ao longo do tempo, a cal voltou a ocupar lugar de destaque nos estudos de conservação e restauração do patrimônio edificado. As argamassas bastardas emergem nesse cenário como resposta técnica a sistemas construtivos que, embora históricos, não são estáticos. Transformam-se continuamente em coexistência com os materiais que os constituem e com o ambiente que os cerca, reconhecendo que uma intervenção mal fundamentada pode, ela própria, tornar-se agente de deterioração daquilo que se pretende conservar (VEIGA, 2018, p. 92, 96).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Organização da pesquisa experimental

O Laboratório de Materiais de Construção da ESTIG, situado no campus de Santa Apolónia do IPB, em Bragança, Portugal, tem como função apoiar atividades de desenvolvimento nas áreas de agregados, concretos e materiais de construção, prestando também serviços à comunidade. Nesse ambiente laboratorial foram realizados, entre outubro de 2024 e fevereiro de 2025, como parte do Estágio de Iniciação Científica do IPB, programa que integra alunos em mobilidade acadêmica a projetos de pesquisa em curso nas unidades de investigação da instituição.

A pesquisa foi conduzida pelo GICOS, grupo de investigação do IPB dedicado à construção sustentável, organizado em três linhas: Engenharia Estrutural; Materiais, Produtos e Eco-Construção; e Energia, Ambiente e Gestão. Este trabalho se insere na linha de Materiais, Produtos e Eco-Construção, sob orientação da Professora Doutora Eduarda Cristina Pires Luso⁴, e integrou o programa de mobilidade acadêmica internacional do IFMG, Campus Ouro Preto, coordenado pela Diretoria de Relações Internacionais, estabelecendo uma ponte entre as tradições construtivas brasileira e portuguesa que atravessa o próprio objeto de estudo e que encontra seu ponto de chegada nesta monografia.

O trabalho foi avaliado em três momentos por júri da instituição: apresentação do projeto, apresentação dos resultados parciais e apresentação dos resultados finais, além da avaliação pelo orientador responsável pelo estágio. Os resultados obtidos deram origem ao artigo *Characterization of Traditional Mortars Using Ageing Tests*, inicialmente elaborado por Cláudia Nara e Eduarda Luso e posteriormente desenvolvido em colaboração com Débora Macanjo Ferreira, Ana Briga-Sá e Bruna Carvalho, sendo publicado nos anais do *11th American Congress on Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management* (REHABEND 2026), um dos principais congressos internacionais na área de patologia das construções, reabilitação tecnológica e gestão do patrimônio construído, reunindo pesquisadores da Europa e das Américas.

⁴ Eduarda Cristina Pires Luso, Doutora em Engenharia Civil pela Universidade do Minho (2012), Mestre em Reabilitação de Materiais e Construção pela Universidade do Minho (2002) e Graduada em Engenharia Civil pela Universidade de Coimbra (1997). Professora Coordenadora e responsável pelo Laboratório de Materiais de Construção da ESTIG do IPB. Autora de 9 artigos em revistas especializadas e 3 livros publicados em 2013 e 2020. Pesquisadora em 6 projetos científicos e orientadora de 28 dissertações de mestrado. Desenvolve investigação nas áreas de danos em edificações, reabilitação, argamassas antigas e técnicas construtivas tradicionais (LUSO, 2024. Disponível em: cienciavita.pt/portal/2A1D-4B9F-9935).

Foram formuladas sete composições de argamassas bastardas, tendo a cal aérea hidratada em pó como ligante de base em todas elas. As composições foram definidas a partir da substituição parcial desse ligante por cal hidráulica natural, cimento Portland e metacaulim em diferentes proporções, com o objetivo de avaliar a influência de cada substituição sobre o comportamento físico e mecânico das argamassas. Para garantir a comparabilidade entre as composições, estabeleceu-se que nenhuma substituição ultrapassaria 50% em relação à quantidade de cal aérea hidratada, com o limite do cimento fixado em 10%, conforme recomendado pela literatura para argamassas destinadas a revestimentos de edifícios antigos (VEIGA, 2003; SILVA; PINTO; GOMES, 2012). A Argamassa I, composta exclusivamente por cal aérea hidratada, funcionou como referência para a comparação dos resultados.

Para cada composição, foram moldados seis corpos de prova prismáticos com dimensões de 40 mm × 40 mm × 160 mm, divididos em dois grupos de três. Todos permaneceram em câmara úmida por 56 dias. Ao término desse período, um grupo de cada composição foi transferido para a câmara climática, onde passou por 4 dias de envelhecimento acelerado, enquanto o outro permaneceu em câmara úmida pelo mesmo período, aguardando o ensaio. Ambos os grupos foram ensaiados aos 60 dias da fabricação, permitindo comparar o desempenho das argamassas sob condições de cura controlada e sob exposição a variações térmicas extremas.

5.2 Materiais

Os ligantes empregados foram cal aérea hidratada em pó do tipo CL 90, marca Calcidrata; cal hidráulica natural em pó do tipo NHL 5, marca Secil; cimento Portland de calcário CEM II/B-L 32,5 N, marca Secil Maestro; e cimento Portland branco de calcário CEM II/B-L 32,5 N, marca Secil Lumen, conforme ilustrado na Figura 14. Como adição pozolânica, foi utilizado metacaulim⁵ em pó, marca Míbal, conforme ilustrado na Figura 15

⁵ Denominado metacaulino em Portugal, o metacaulim é uma pozolana artificial obtida pela calcinação do caulim a temperaturas entre 600 °C e 800 °C, processo que destrói sua estrutura cristalina e o torna quimicamente reativo. Quando combinado com cal na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio formando silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, aumentando a resistência mecânica e a durabilidade da argamassa sem comprometer significativamente sua permeabilidade ao vapor (BANDEIRA, 2012; AZEVEDO, 2015).

Figura 14 - Ligantes utilizados nas argamassas bastardas estudadas.



Fonte: CALCIDRATA, 2024; SECIL, 2024.

Figura 15 - Metacaulim utilizado como adição pozolânica.



Fonte: MÍBAL, 2024.

O agregado utilizado foi areia silicosa rolada de origem espanhola, apresentada na Figura 16, com módulo de finura de 3,38, valor calculado a partir das percentagens retidas em cada peneira que caracteriza a distribuição granulométrica geral da areia e indica que se trata de uma areia média. O valor foi obtido por peneiramento mecânico nas dimensões de 0,0625 a 3,15 mm, utilizando o conjunto de peneiros ilustrado na Figura 16, conforme a norma EN 933-1:2012. A distribuição granulométrica da areia está apresentada na Tabela 1 e no Gráfico 1.

Figura 16 - Areia silicosa rolada durante o processo de caracterização granulométrica.



Fonte: Autora, 2024.

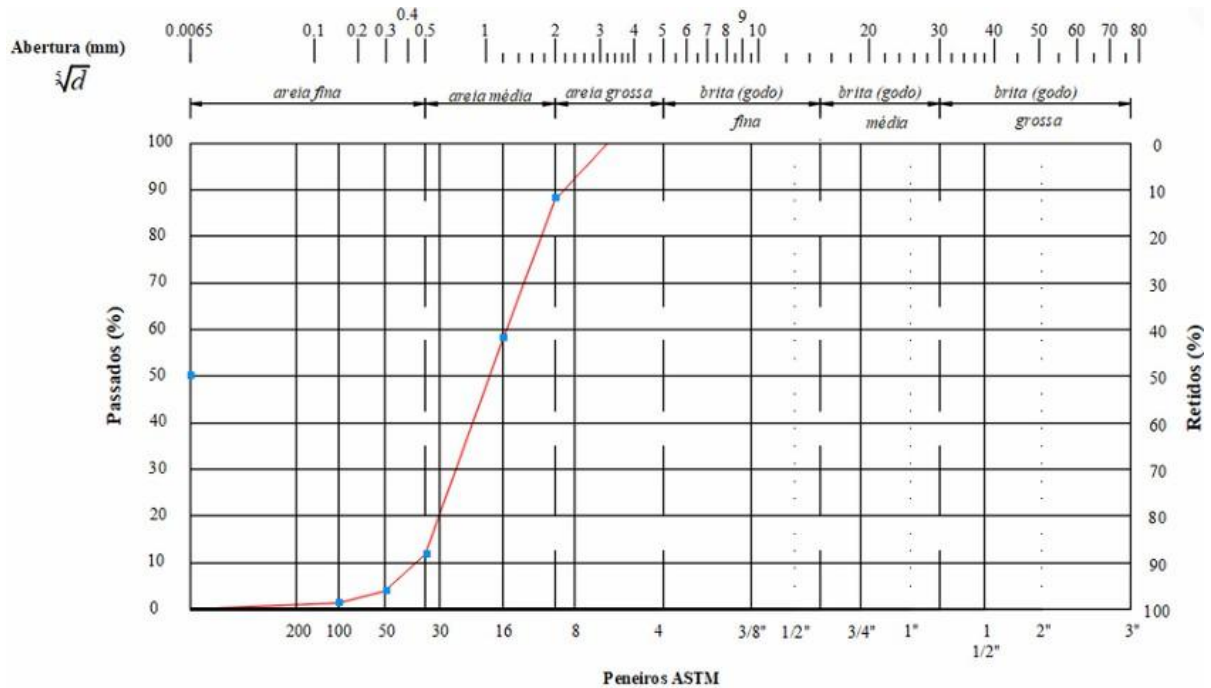
Tabela 1 - Análise granulométrica.

Data do ensaio: 13/11/2024		Material analisado: Areia média		Massa da amostra: 1010 g	
Peneiro n°	Abertura da malha (mm)	Massa (g)	Retida (%)	Retida acumulada (%)	Passante (%)
-	3,15	2,65	0,26	0,26	99,74
5	2,00	111,93	11,38	11,34	88,66
4	1,00	308,45	30,54	41,88	58,12
3	0,50	470,86	46,62	88,50	11,50
2	0,25	81,26	8,05	96,55	3,45
1	0,125	28,48	2,82	99,37	0,63
0	0,0625	6,37	0,63	100,00	0,00
Massa total da amostra: 1010 g					
Módulo de finura = 3,38					

Fonte: Autora, 2024.

A adição de pigmentos às Argamassas II, IV e VII teve como objetivo avaliar a estabilidade cromática em diferentes condições de cura e envelhecimento, aspecto relevante para intervenções em edificações históricas onde a compatibilidade visual com os revestimentos preexistentes é um critério de prescrição. A escolha das cores azul ultramar, verde e amarelo metálico buscou representar três dos grupos cromáticos historicamente utilizados em revestimentos portugueses, que incluíam azuis, verdes e ocre entre os pigmentos mais comuns em fachadas de edifícios (CARVALHO, 2011 apud MELLO, 2019). Foram utilizados pigmentos à base de óxido de ferro da marca Lacrilar, conforme ilustrado na Figura 17, incorporados às Argamassas II, IV e VII por reunirem composições distintas entre si, o que permitiu avaliar a influência do tipo de ligante sobre o comportamento cromático.

Gráfico 1 - Curva granulométrica



Fonte: Laboratório de Materiais de Construção - ESTIG, IPB - Adaptado pela autora, 2024.

A adição de pigmentos às Argamassas II, IV e VII teve como objetivo avaliar a estabilidade cromática em diferentes condições de cura e envelhecimento, aspecto relevante para intervenções em edificações históricas onde a compatibilidade visual com os revestimentos preexistentes é um critério de prescrição. A escolha das cores azul ultramar, verde e amarelo metálico buscou representar três dos grupos cromáticos historicamente utilizados em revestimentos portugueses, que incluíam azuis, verdes e ocre entre os pigmentos mais comuns em fachadas de edifícios (CARVALHO, 2011 apud MELLO, 2019). Foram utilizados pigmentos à base de óxido de ferro da marca Lacrilar, conforme ilustrado na Figura 17, incorporados às Argamassas II, IV e VII por reunirem composições distintas entre si, o que permitiu avaliar a influência do tipo de ligante sobre o comportamento cromático.

5.3 Composição e dosagem das argamassas

Todas as composições foram formuladas com traço volumétrico de 1:2 (ligante:agregado), proporção reconhecida na literatura como adequada para garantir bom preenchimento de vazios e maior resistência mecânica em função do elevado teor de aglomerante (VEIGA, 2018).

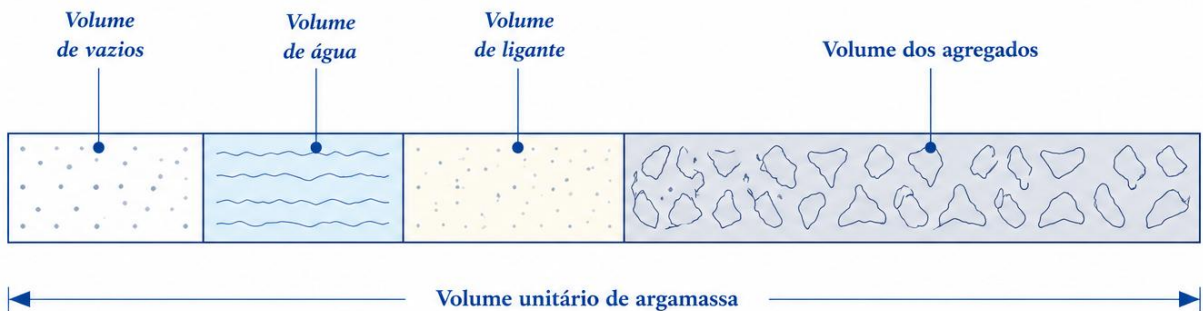
Figura 17 - Pigmentos à base de óxido de ferro utilizados nas Argamassas II, IV e VII: azul ultramar, verde e amarelo metálico.



Fonte: LACRILAR, 2024.

As quantidades de cada material foram calculadas pelo método dos volumes absolutos, adaptado de Luso (2020). O ponto de partida do método é o volume total do molde a ser preenchido, em metros cúbicos. Esse volume é então distribuído entre os componentes da argamassa, ligante, agregado, água de amassadura e vazios, de forma que a soma dos volumes absolutos de cada um seja igual ao volume total do molde. Em outras palavras, cada ingrediente ocupa uma fração do espaço disponível, e o cálculo garante que essas frações se encaixem exatamente no recipiente, conforme ilustrado na Figura 18. Essa relação entre os volumes absolutos pode ser expressa matematicamente pela equação apresentada na Figura 19, na qual cada termo corresponde à fração volumétrica ocupada por um dos componentes da argamassa. O significado e a unidade de medida de cada símbolo utilizado nessa equação estão detalhados na Figura 20.

Figura 18 - Composição volumétrica da argamassa.



Fonte: Adaptado de LUSO, 2024. Imagem gerada com auxílio de IA.

Figura 19 - Equação dos volumes absolutos e definição dos símbolos utilizados nos cálculos

Tomando por unidade de volume o metro cúbico e para unidade de massa o quilograma, a expressão $c + m + w + v_v = 1$ pode apresentar-se sob a forma:

$$\frac{C}{\mu_c} + \sum \frac{M_i}{\mu_i} + w + v_v = 1$$

Fonte: Adaptado de LUSO, 2024. Imagem gerada com auxílio de IA.

Figura 20 - Legenda dos símbolos utilizados na equação dos volumes absolutos para o cálculo de dosagem das argamassas.

Símbolo	Significado	Unidade
C	Dosagem do ligante (cimento e/ou cal)	kg/m ³ de argamassa
μ_c	Massa volúmica do ligante (cimento e/ou cal)	kg/m ³
M_i	Massa do agregado da classe granulométrica i	kg/m ³ de argamassa
μ_i	Massa volúmica do agregado da classe granulométrica i	kg/m ³
w	Volume de água	m ³ /m ³ de argamassa
v_v	Volume de vazios (ar)	m ³ /m ³ de argamassa

Fonte: Adaptado de LUSO, 2020. Imagem gerada com auxílio de IA.

Para a aplicação da equação foram adotadas massa específica de 2,75 g/cm³ para a cal hidratada e 2,65 g/cm³ para a areia. Embora algumas formulações tenham incorporado outros ligantes, optou-se por manter a massa específica da cal hidratada como referência para os cálculos iniciais de dosagem, uniformizando o procedimento entre as diferentes composições e favorecendo a comparação dos resultados.

Os provetes apresentavam dimensões de 40 × 40 × 160 mm. Considerando a moldagem de três provetes por molde, o volume total adotado para os cálculos foi:

$$V = (0,04 \times 0,04 \times 0,16) \times 3 = 0,000768 \text{ m}^3$$

O volume de vazios foi fixado em 10 L/m³, valor recomendado para formulações ricas em ligante, convertido para o volume efetivamente produzido:

$$V_v = 0,000768 \times 10 = 0,00768 \text{ L} = 0,00000768 \text{ m}^3$$

A quantidade inicial de água foi estimada a partir da relação água/ligante de 0,60, recomendada por (COELHO; TORGAL e JALALI, 2009) para a moldagem dos provetes. Os teores efetivamente utilizados foram posteriormente ajustados em função da consistência desejada e dos resultados obtidos nos ensaios de espalhamento.

Como exemplo de aplicação do método, apresenta-se o cálculo da Argamassa I, composta exclusivamente por cal hidratada e agregado na proporção volumétrica 1:2:

$$c/2,75 + 2c/2,65 + 0,60c + 0,00000768 = 0,000768$$

$$0,363c + 0,755c + 0,60c = 0,00076032$$

$$1,718c = 0,00076032$$

$$c = 0,000442 \text{ m}^3 = 442 \text{ g}$$

Pela proporção volumétrica 1:2, a massa teórica de agregado correspondeu a 884 g. A quantidade de água inicial estimada pela equação, correspondente a 60% da massa do ligante, serviu apenas como ponto de partida para a amassadura. Os teores efetivamente utilizados foram ajustados durante o processo até que cada composição atingisse a consistência desejada, resultando em relações água/ligante significativamente superiores ao valor teórico inicial, conforme apresentado na Tabela 2. Essa variação reflete as diferentes demandas de água de cada formulação e é discutida em detalhe no item seguinte.

Para compensar perdas inerentes às etapas de pesagem, mistura, moldagem e manuseio, como material retido na pá da misturadora, no recipiente de amassadura ou perdido durante a transferência para a compactadora, o excedente de 14% foi definido em função da quantidade de material disponível, situando-se dentro da faixa operacional recomendada pelo técnico responsável pelo laboratório. Aplicando esse fator, obtiveram-se 503,88 g de cal hidratada e 1007,76 g de areia, arredondados para 505 g e 1010 g respectivamente.

Para as composições pigmentadas, adotou-se a proporção de 5,94% da massa dos ligantes, valor ligeiramente superior ao limite de 5% recomendado por Veiga (2009 apud MELLO, 2019) para argamassas antigas, aplicando a mesma lógica de compensação de perdas previstas durante o preparo e a homogeneização das misturas e arredondando para 30 gramas. O Quadro 2 apresenta as sete composições com as dosagens dos ligantes, pigmentos e areia em gramas e a porcentagem de cada ligante para o preparo de cada argamassa.

Quadro 2 - Composição das argamassas.

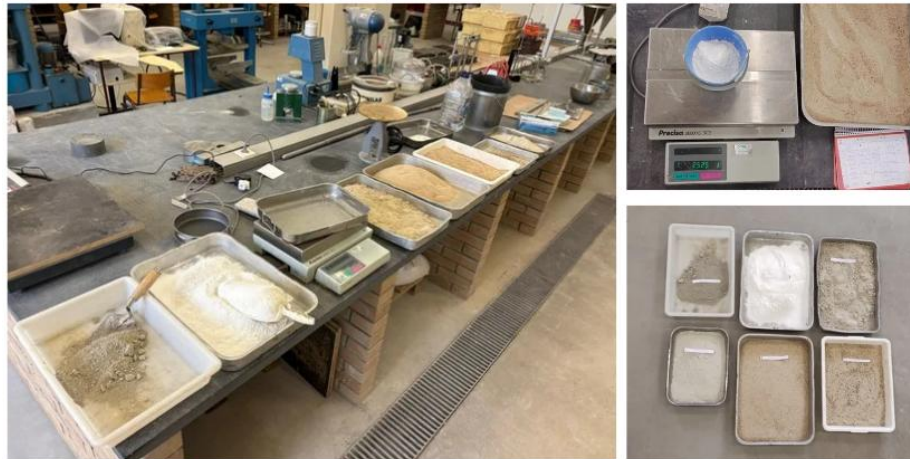
Argamassa	Composição dos ligantes (g)	Porcentagem dos ligantes (%)	Agregado (g)	Água (mL)	Pigmento (g)
I	CL 90 (505)	CL 90: 100%	1010	430	—
II	CL 90 (252,5) CH (252,5)	CL 90: 50% CH: 50%	1010	300	Azul (30)
III	CL 90 (202) CH (101) CP (50,5) MT (151,5)	CL 90: 40% CH: 20% CP: 10% MT: 30%	1010	380	—
IV	CL 90 (303) MT (202)	CL 90: 60% MT: 40%	1010	420	Verde (30)
V	CL 90 (303) CH (151,5) CP (50,5)	CL 90: 60% CH: 30% CP: 10%	1010	280	—
VI	CL 90 (303) CP (50,5) MT (151,5)	CL 90: 60% CP: 10% MT: 30%	1010	380	—
VII	CL 90 (454,5) CPB (50,5)	CL 90: 90% CPB: 10%	1010	400	Amarelo (30)

Nota: CL 90 = cal aérea hidratada; CH = cal hidráulica natural NHL 5; CP = cimento Portland CEM II/B-L 32,5 N; CPB = cimento Portland branco CEM II/B-L 32,5 N; MT = metacaulim. Os pigmentos são à base de óxido de ferro (Lacrilar): azul ultramar (Argamassa II), verde (Argamassa IV) e amarelo metálico (Argamassa VII).

Fonte: Autora, 2024.

O processo de amassadura seguiu as normas NP EN 196-1:2016 e EN 1015-2:1999. Os componentes secos foram pesados individualmente, conforme ilustrado na Figura 21, e transferidos para misturadora automática (Figura 22), com a água adicionada de forma progressiva até que a mistura atingisse consistência homogênea.

Figura 21 - Pesagem dos componentes secos.



Fonte: Autora, 2024.

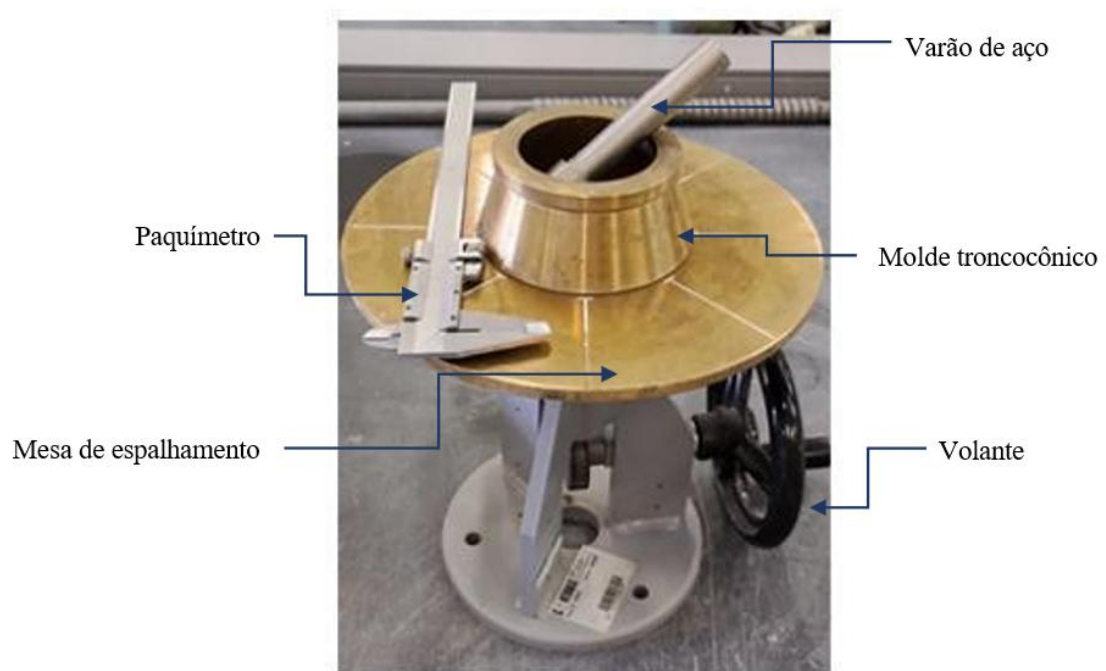
Figura 22 - Etapas de produção das argamassas: mistura dos materiais secos em misturadora mecânica, medição da água de amassadura em proveta graduada e homogeneização da mistura.



Fonte: Autora, 2024.

A consistência das argamassas foi verificada por meio do ensaio de espalhamento, realizado conforme a norma EN 1015-3:1999. Os equipamentos utilizados estão apresentados na Figura 23, e a medição do diâmetro de espalhamento com paquímetro pode ser observada na Figura 24. O valor alvo adotado foi de 150 ± 5 mm, próximo ao recomendado por Vargas (2013) para argamassas à base de cal aérea e adaptado às composições bastardas deste estudo.

Figura 23 - Equipamentos utilizados no ensaio de consistência por espalhamento.



Fonte: Autora, 2024.

Figura 24 - Medição do diâmetro de espalhamento com paquímetro digital.



Fonte: Autora, 2024.

Os resultados, apresentados na Tabela 2, demonstram que todas as composições atingiram consistência próxima ao valor alvo, com médias variando entre 148,5 mm e 150,5 mm, evidenciando o bom controle do ensaio de espalhamento.

Tabela 2 - Relação água/ligante e resultados do ensaio de espalhamento.

Argamassas	Relação água/ligante	Espalhamento		
		Diâmetro 1	Diâmetro 2	Média
I	0,85	153	147	150
II	0,59	151	149	150
III	0,75	151	147	149
IV	0,83	145	152	148,5
V	0,55	151	150	150,5
VI	0,75	151	147	149
VII	0,79	149	148	148,5

Fonte: Autora, 2024.

Entretanto, para atingir esse resultado, algumas formulações exigiram relações água/ligante significativamente superiores ao valor inicial de 0,60 adotado como referência de dosagem. Essa diferença sugere comportamentos distintos de trabalhabilidade entre as composições e merece atenção, uma vez que a quantidade de água incorporada à mistura influencia a formação da microestrutura da argamassa e pode repercutir em propriedades como porosidade, retração, variação de massa e resistência mecânica.

5.4 Moldagem, desmoldagem e cura em câmara úmida

Antes da moldagem, os moldes prismáticos foram untados com desmoldante de base vegetal, marca Sika Separol Universal, conforme ilustrado na Figura 25, aplicado para facilitar a desmoldagem e evitar danos aos corpos de prova durante esse processo.

Figura 25 - Desmoldante de base vegetal utilizado nos moldes prismáticos.



Fonte: Autora, 2024.

Para cada composição foram moldadas duas formas prismáticas com dimensões de 40 mm × 40 mm × 160 mm, contendo três prismas cada, totalizando seis amostras por composição, conforme ilustrado na Figura 26. As amostras foram compactadas mecanicamente em compactadora horizontal (Figura 27), conforme os parâmetros da norma EN 196-1:2016

Figura 26 - Moldes prismáticos.



Fonte: Autora, 2024.

Figura 27 - Compactadora horizontal.



Fonte: Autora, 2024.

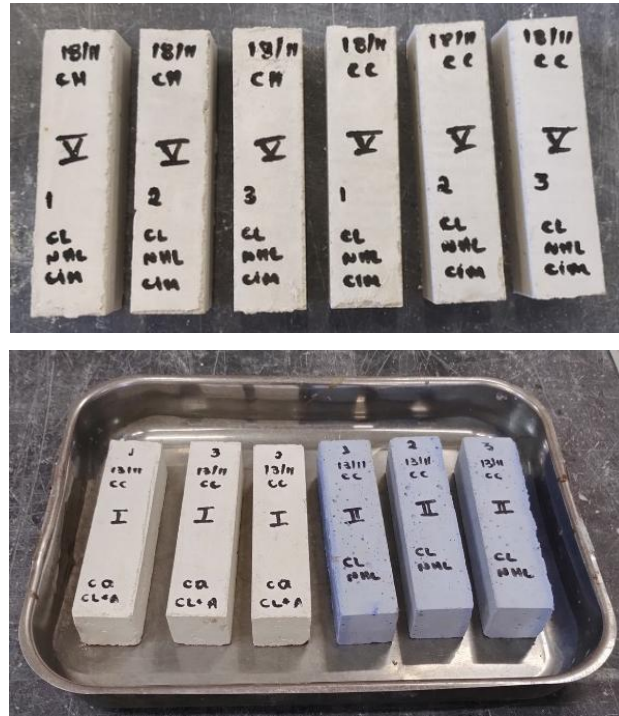
Após 96 horas, quando as argamassas atingiram a presa sem sofrer deformações, os corpos de prova foram desmoldados (Figura 28) e identificados individualmente com marcações que indicavam a data de preparo, o grupo de cura, o número da composição em algarismo romano, a numeração do corpo de prova dentro do grupo e as siglas dos ligantes e adição utilizados em cada formulação, conforme pode ser observado na Figura 29. Em seguida, foram pesados em balança digital (Figura 30) e medidos com paquímetro manual nas direções longitudinal e transversal (Figura 31).

Figura 28 - Desmoldagem dos provetes após 96 horas.



Fonte: Autora, 2024.

Figura 29 - Provete identificado com data, grupo de cura, numeração da composição, numeração do provete e siglas dos ligantes.



Fonte: Autora, 2024.

Figura 30 - Pesagem dos provetes em balança digital após a desmoldagem.



Fonte: Autora, 2024.

Figura 31 - Medição das dimensões longitudinais e transversais com paquímetro.



Fonte: Autora, 2024.

Em seguida, os provetes foram acondicionados em câmara úmida com umidade relativa de $90 \pm 5\%$ e temperatura constante de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, conforme a norma EN 12390-2, onde permaneceram por 56 dias (Figura 32). Esse período, superior ao mínimo normativo de 28 dias, foi adotado para permitir que as reações de hidratação dos ligantes hidráulicos e a carbonatação da cal aérea avançassem por um tempo mais prolongado, aproximando as condições de ensaio da realidade de uma argamassa aplicada em obra (VEIGA, 2018; BANDEIRA, 2012).

Semanalmente, os provetes eram retirados da câmara úmida, pesados em balança digital e medidos com paquímetro manual nas direções longitudinal e transversal, para registro e acompanhamento da variação de massa e das dimensões ao longo do período de cura, sendo em seguida reacondicionados.

Figura 32 - Provetes acondicionados na câmara úmida.



Fonte: Autora, 2024.

5.5 Envelhecimento acelerado em câmara climática

Após a desmoldagem, os 42 corpos de prova foram acondicionados em câmara úmida com umidade relativa de $90 \pm 5\%$ e temperatura constante de $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, conforme a norma EN 12390-2 (Figura 33). O período de cura adotado foi de 56 dias, correspondendo ao dobro do tempo mínimo normativo de 28 dias estabelecido pela EN 1015-11:1999. Essa decisão foi fundamentada na natureza dos ligantes utilizados: a carbonatação da cal aérea é um processo lento e progressivo, que avança do exterior para o interior da argamassa e pode levar meses para se completar em toda a espessura do revestimento (KANAN, 2008; MARGALHA, 2011), enquanto as reações pozolânicas do metacaulim dependem da disponibilidade de hidróxido de cálcio e de tempo suficiente para se desenvolverem (BANDEIRA, 2012). Dobrar o tempo de cura permitiu que essas reações avançassem de forma mais completa, aproximando as condições de ensaio da realidade de uma argamassa aplicada em obra (VEIGA, 2018).

Semanalmente, os corpos de prova eram retirados da câmara úmida, pesados em balança digital e medidos com paquímetro manual nas direções longitudinal e transversal, para registro e acompanhamento da variação de massa e das dimensões ao longo do período de cura, sendo em seguida reacondicionados.

Figura 33 - Câmara climática ESPEC LHU-114: painel digital com leituras de temperatura e umidade, vista externa e interior com os corpos de prova posicionados para o ensaio.



Fonte: Autora, 2024.

Os corpos de prova foram pesados diariamente durante o período na câmara climática, para registro e acompanhamento da variação de massa sob os ciclos térmicos. Os três corpos de prova remanescentes de cada composição, mantidos exclusivamente em câmara úmida, serviram como grupo de controle para a comparação dos resultados nos ensaios físicos e mecânicos. Ao término dos 4 dias de envelhecimento acelerado, todos os 42 corpos de prova foram ensaiados mecanicamente, totalizando 60 dias desde a fabricação até o momento do ensaio.

Gráfico 2 - Variação de temperatura ao longo dos ciclos de 24 horas na câmara climática.



Fonte: Autora, 2025.

5.6 Procedimentos de caracterização física

A caracterização física compreendeu a determinação da massa específica aparente, a avaliação da retração linear e o registro das alterações cromáticas das composições pigmentadas, realizados ao longo dos períodos de exposição em câmara úmida e câmara climática.

A massa específica aparente foi determinada conforme a norma EN 1015-10:1999. Para isso, as dimensões dos provetes foram medidas com paquímetro manual e suas massas obtidas em balança digital, com acompanhamento semanal para os corpos de prova em câmara úmida e diário para os submetidos à câmara climática. A variação de massa relativa, expressa em percentagem ($\Delta m\%$), ou seja, a diferença percentual entre a massa inicial e final de cada provete, foi calculada pela fórmula:

$$\Delta m (\%) = (\text{massa inicial} - \text{massa final}) / \text{massa inicial} \times 100$$

Para cada composição, foi calculada a média das variações de massa dos três corpos de prova de cada grupo, somando os valores obtidos e dividindo pelo número de medições realizadas.

A retração linear foi avaliada por meio de medições semanais de comprimento e largura com paquímetro manual, comparando os valores iniciais, registrados imediatamente após a desmoldagem, com os valores finais, obtidos ao término dos períodos de exposição em câmara úmida e câmara climática. Por limitações na execução da moldagem, as superfícies expostas dos provetes apresentaram irregularidades que impediram uma análise normativa rigorosa. Os resultados são, portanto, apresentados de forma comparativa entre as composições, sem referência a valores normativos.

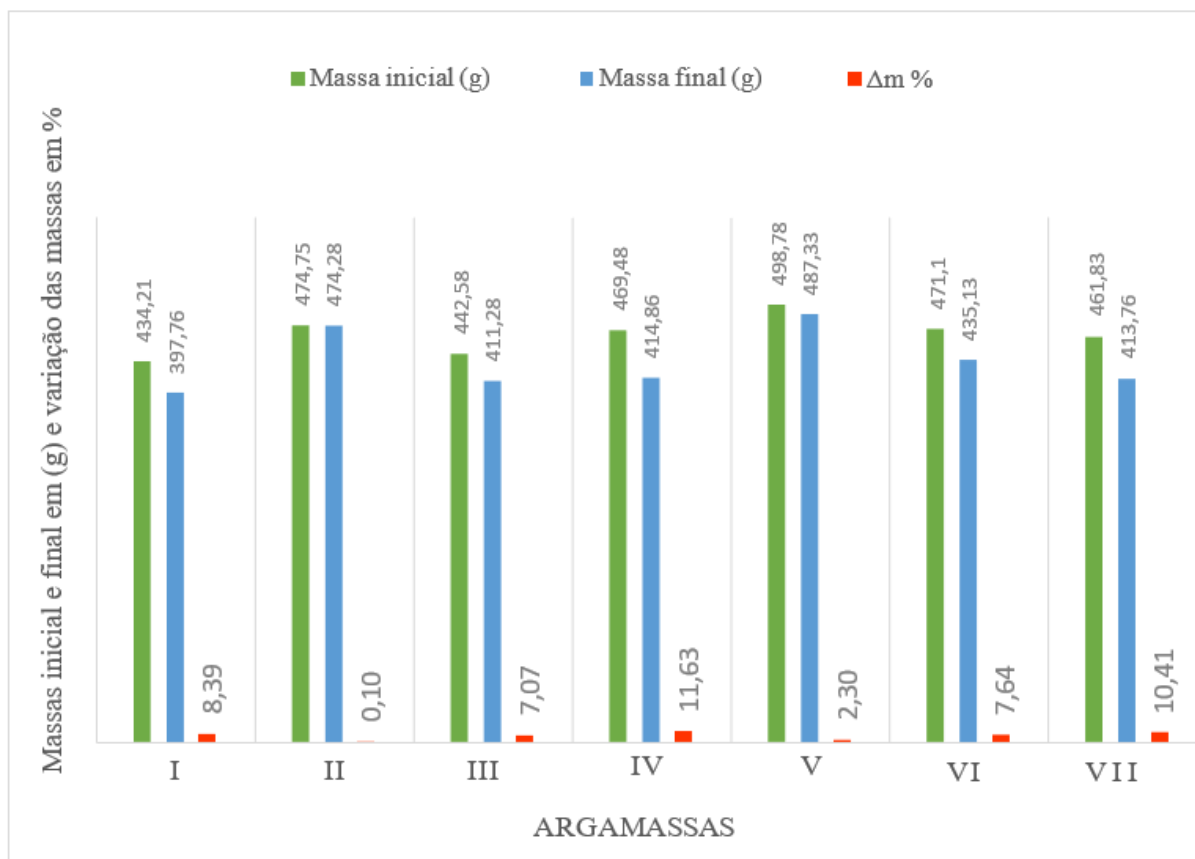
As alterações cromáticas das composições pigmentadas, Argamassas II, IV e VII, foram registradas por meio de fotografias sistemáticas ao longo dos dois períodos de exposição. As argamassas não pigmentadas não apresentaram alterações visuais significativas, exceto pelo escurecimento temporário característico do estado úmido, que desapareceu com a secagem. Os resultados dos ensaios de caracterização física estão apresentados e discutidos no Capítulo 6.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

6.1 Variação de massa em câmara úmida

Os resultados, apresentados no Gráfico 3, demonstram que todas as composições perderam massa ao longo dos 56 dias de cura, comportamento esperado e associado principalmente à evaporação da água livre que não participou das reações de hidratação e carbonatação. Nas primeiras semanas, a taxa de perda foi mais acentuada, estabilizando-se progressivamente à medida que as reações químicas avançaram e o equilíbrio entre evaporação e absorção de umidade foi se estabelecendo.

Gráfico 3 - Variações das massas inicial e final em câmara úmida.



Fonte: Autora, 2025.

As composições apresentaram comportamentos distintos, que podem ser agrupados em três perfis.

6.1.1 Argamassas com maior estabilidade de massa

A Argamassa II, composta por 50% de cal aérea hidratada e 50% de cal hidráulica, registrou a menor variação de massa entre todas as composições estudadas, apenas 0,10%. A elevada proporção de cal hidráulica favorece reações de hidratação que consomem a água disponível na formação de compostos sólidos, reduzindo a quantidade de água livre que se perde por evaporação durante a cura. A Argamassa V, composta por 60% de cal aérea hidratada, 30% de cal hidráulica e 10% de cimento, registrou variação de 2,30%. Tanto a cal hidráulica quanto o cimento são ligantes hidráulicos que consomem água em suas reações de endurecimento, contribuindo para a retenção hídrica da composição. No entanto, a proporção total de ligantes hidráulicos na Argamassa V é menor do que na Argamassa II, o que explica a

variação de massa mais elevada, ainda que significativamente inferior às demais composições (VEIGA, 2018; BANDEIRA, 2012).

6.1.2 Argamassas com variação intermediária

As Argamassas III e VI apresentaram variações de massa de 7,07% e 7,64% respectivamente, comportamento intermediário entre os grupos anteriores. A Argamassa III, composta por 40% de cal aérea hidratada, 20% de cal hidráulica, 10% de cimento e 30% de metacaulim, combina ligantes hidráulicos com uma adição pozolânica. A cal hidráulica consome água nas reações de hidratação, reduzindo a quantidade disponível para evaporação, enquanto o metacaulim, ativado pelo hidróxido de cálcio liberado pela cal, contribui progressivamente para o adensamento da microestrutura. A Argamassa VI, composta por 60% de cal aérea hidratada, 10% de cimento e 30% de metacaulim, apresentou variação ligeiramente superior. Embora tenha a mesma proporção de metacaulim que a Argamassa III, a ausência de cal hidráulica reduz tanto a disponibilidade de hidróxido de cálcio para ativar o metacaulim quanto a quantidade de ligante hidráulico consumindo água nas reações. O cimento, presente em apenas 10% nas duas composições, não foi suficiente para compensar essa diferença, confirmando que em pequenas quantidades esse ligante não altera significativamente o comportamento hídrico da argamassa (MARGALHA, 2011, p. 21). A comparação entre as duas composições evidencia que é a cal hidráulica, e não o cimento, o fator determinante para a retenção de água nesse grupo (BANDEIRA, 2012; AZEVEDO, 2015).

6.1.3 Argamassas com maior perda de massa

A Argamassa IV, composta por 60% de cal aérea hidratada e 40% de metacaulim, registrou a maior variação de massa entre todas as composições, 11,63%. Sem nenhum ligante hidráulico na formulação, a ativação do metacaulim depende exclusivamente do hidróxido de cálcio liberado pela cal aérea, processo lento e pouco eficiente no período estudado. Com menos reações consumindo água, maior quantidade fica disponível para evaporar, resultando na elevada perda de massa observada (BANDEIRA, 2012).

A Argamassa VII, composta por 90% de cal aérea hidratada e 10% de cimento branco, registrou variação de 10,41%, valor superior ao da Argamassa I, composta exclusivamente por 100% de cal aérea hidratada, que registrou 8,39%. Esse resultado é

aparentemente contraditório: a VII contém cimento, um ligante hidráulico, e ainda assim perdeu mais massa do que a I, que não contém nenhum ligante hidráulico. O cimento branco é quimicamente equivalente ao cimento Portland cinza, diferindo apenas na coloração, resultado da ausência de óxidos de ferro e manganês em sua composição, apresentando as mesmas propriedades hidráulicas (COELHO; TORGAL; JALALI, 2009).

A explicação para esse resultado está no fenômeno da segregação, descrito por O'Hare (2003) com base nos resultados do Projeto Smeaton, conduzido pela British Heritage: quando o cimento é adicionado à cal em proporções baixas, o colóide de cimento tende a migrar para os poros da argamassa durante o endurecimento, selando-os e formando uma estrutura porosa mal desenvolvida. Nessas condições, a argamassa resultante fica enfraquecida e mais vulnerável à perda de massa e a danos por variações térmicas.

O Projeto Smeaton demonstrou que todas as amostras contendo menos de 25% de cimento falharam, e que misturas com proporções tão baixas quanto 5% a 10% estão quase certamente em risco de segregação (O'HARE, 2003). A Argamassa VII, com apenas 10% de cimento, situa-se precisamente nessa faixa crítica.

Além da segregação, a adição de pequenas quantidades de cimento altera a estrutura da argamassa dificultando o acesso do dióxido de carbono necessário para o processo de carbonatação da cal aérea (MARGALHA, 2011, p. 21). Com a carbonatação prejudicada, a cal aérea presente na Argamassa VII formou menos carbonato de cálcio do que a cal da Argamassa I, resultando em microestrutura menos densa e maior quantidade de água livre disponível para evaporar.

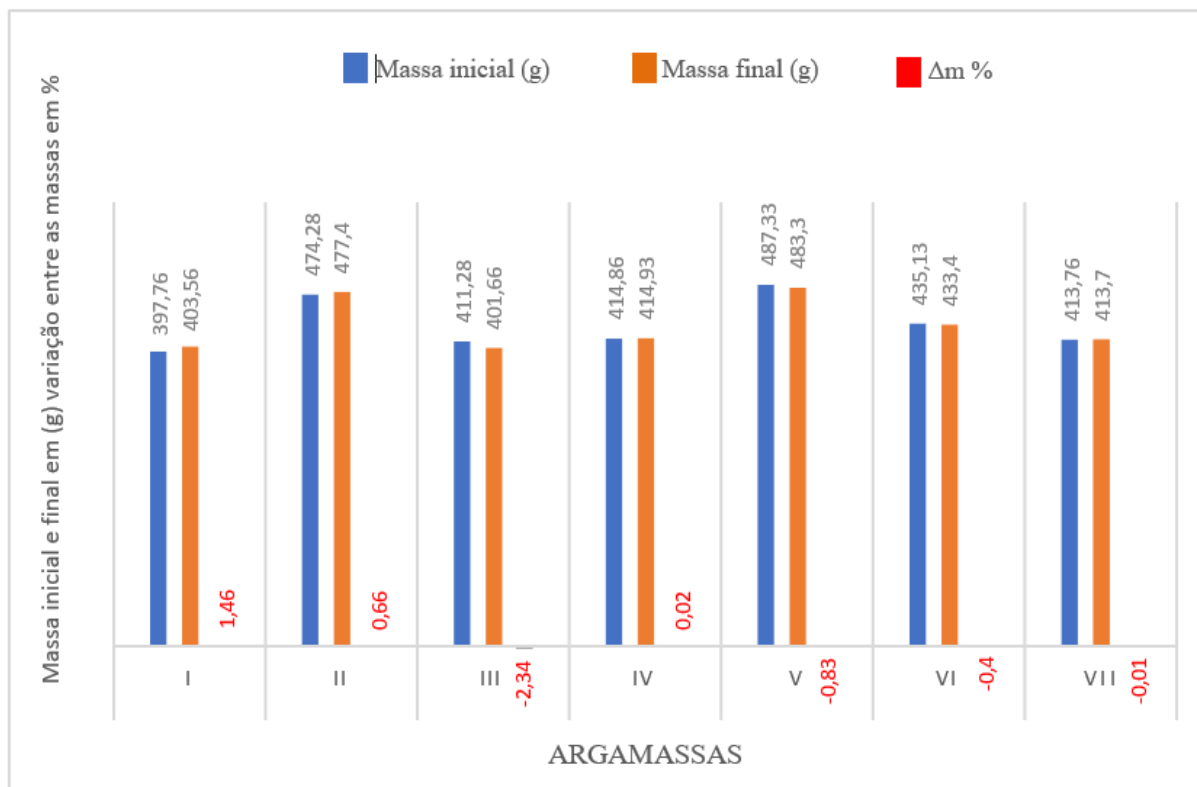
Em outras palavras, o cimento em proporção insuficiente não apenas deixou de melhorar o comportamento hídrico da composição como prejudicou o mecanismo de endurecimento do ligante majoritário, a cal aérea, resultando em desempenho inferior ao da argamassa sem nenhum ligante hidráulico (VEIGA, 2018; SILVA; PINTO; GOMES, 2012).

6.2 Variação de massa em câmara climática

Após os 56 dias de cura em câmara úmida, três corpos de prova de cada composição foram submetidos aos ciclos térmicos na câmara climática, conforme descrito no item 5.5. O ensaio de envelhecimento acelerado busca simular, em condições controladas de laboratório, os efeitos que as variações climáticas reais produzem sobre os revestimentos ao longo de anos de exposição: ciclos de calor, frio, umidade e seca que uma fachada histórica enfrenta continuamente. Os resultados, apresentados no Gráfico 4, revelam um comportamento distinto

do observado na câmara úmida. As variações de massa foram consideravelmente menores, o que era esperado dado o curto período de exposição de quatro dias, e as composições se dividiram entre aquelas que ganharam massa e aquelas que perderam.

Gráfico 4 - Variações das massas inicial e final em câmara climática.



Fonte: Autora, 2025.

6.2.1 Argamassas que ganharam massa

As Argamassas I (100% de cal aérea hidratada), II (50% de cal aérea hidratada e 50% de cal hidráulica) e IV (60% de cal aérea hidratada e 40% de metacaulim) ganharam massa durante a exposição aos ciclos térmicos, com variações de +1,46%, +0,66% e +0,02% respectivamente. Nas fases de temperatura baixa (-10°C), a água presente no ambiente condensa na superfície e nos poros dos corpos de prova. Quando essa água congela, ela expande cerca em volume, gerando pressão interna nos poros. Se a quantidade de água congelada for suficientemente grande, essa pressão pode causar microfissuras ou desagregação do material, mecanismo conhecido como gelo-degelo. No entanto, após 56 dias de cura, grande parte da água livre já havia sido consumida pelas reações químicas ou evaporado, de modo que a água

retida nos poros não foi suficiente para gerar pressões destrutivas. O resultado foi uma absorção líquida positiva: a umidade absorvida nas fases frias superou a perda por evaporação nas fases quentes (35°C), resultando em ganho de massa ao final dos quatro dias de ensaio.

A magnitude desse ganho reflete diretamente a porosidade de cada composição. A Argamassa I registrou o maior ganho, +1,46%, porque é a mais porosa de todas as formulações estudadas: sem ligantes hidráulicos que densifiquem a microestrutura, seus poros permanecem amplamente abertos e disponíveis para absorver umidade (VEIGA, 2018). A Argamassa IV registrou o menor ganho do grupo, +0,02%: embora também não conte com ligantes hidráulicos, o metacaulim reage progressivamente com o hidróxido de cálcio da cal, contribuindo para o preenchimento parcial dos poros ao longo do período de cura, o que limitou sua capacidade de absorção. A Argamassa II registrou ganho intermediário de +0,66%: apesar de ser a composição mais densa entre as três, com microestrutura mais desenvolvida pelas reações de hidratação da cal hidráulica, seus poros residuais ainda disponíveis aos 56 dias foram suficientes para absorver umidade durante as fases frias, resultando em ganho de massa superior ao da Argamassa IV (VEIGA, 2018; COELHO; TORGAL; JALALI, 2009).

6.2.2 Argamassas que perderam massa

As Argamassas III (40% de cal aérea hidratada, 20% de cal hidráulica, 10% de cimento e 30% de metacaulim), V (60% de cal aérea hidratada, 30% de cal hidráulica e 10% de cimento), VI (60% de cal aérea hidratada, 10% de cimento e 30% de metacaulim) e VII (90% de cal aérea hidratada e 10% de cimento branco) perderam massa, com variações de -2,34%, -0,83%, -0,40% e -0,01% respectivamente. Nessas composições, a evaporação nas fases quentes (35°C) superou a absorção ocorrida nas fases frias. A maior densificação da microestrutura promovida pelos ligantes hidráulicos e pelo metacaulim reduz a quantidade de poros disponíveis para absorver umidade, tornando a evaporação o processo dominante quando a temperatura sobe. A Argamassa III registrou a maior perda do grupo, -2,34%, reflexo de sua composição com o maior conjunto de ligantes hidráulicos e pozolânicos entre as formulações estudadas. As Argamassas VI e VII registraram perdas muito pequenas, de -0,40% e -0,01%, sugerindo que após os 56 dias de cura essas composições já haviam atingido equilíbrio relativo com o ambiente (BANDEIRA, 2012; AZEVEDO, 2015).

De modo geral, as variações registradas na câmara climática foram pequenas em todas as composições, indicando que os corpos de prova já haviam atingido relativo equilíbrio

após os 56 dias de cura e que nenhuma composição sofreu danos estruturais expressivos pelos ciclos de gelo-degelo. Esse resultado, por si só, é relevante: significa que todas as sete formulações resistiram ao envelhecimento acelerado sem desintegração, o que as qualifica como candidatas viáveis para intervenções em sistemas construtivos tradicionais expostos a variações climáticas.

As diferenças entre elas, no entanto, apontam para usos distintos. As Argamassas I e IV, mais porosas e com maior absorção de umidade, são mais adequadas para suportes que precisam respirar e trocar umidade com o ambiente, como alvenarias de pedra em bom estado. As Argamassas III e V, mais densas e com maior perda de massa nas fases quentes, oferecem maior proteção contra a entrada de água, sendo mais indicadas para situações de maior exposição à chuva e à umidade. As Argamassas II, VI e VII apresentaram comportamento intermediário, combinando alguma capacidade de absorção com resistência à evaporação excessiva (VEIGA, 2003; VEIGA, 2018).

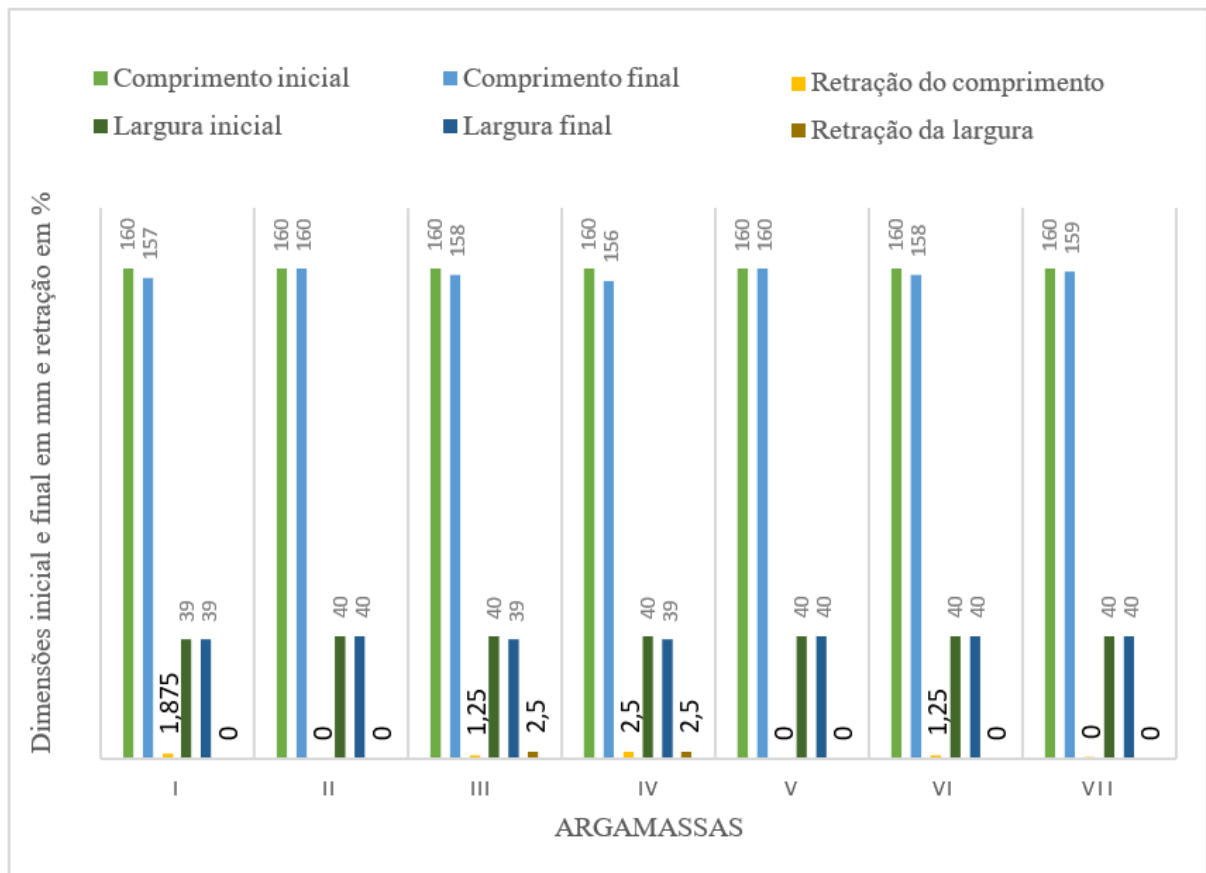
6.3 Retração

A retração linear foi avaliada por meio de medições semanais de comprimento e largura com paquímetro manual, comparando os valores registrados imediatamente após a desmoldagem com os obtidos ao término dos períodos de exposição em câmara úmida e câmara climática. Durante a moldagem, as superfícies expostas dos corpos de prova, ou seja, aquelas que não estavam em contato com o molde, apresentaram irregularidades superficiais decorrentes do processo de compactação manual.

Essas irregularidades tornaram as medições menos precisas do que o exigido pelas normas, impossibilitando uma comparação rigorosa com valores de referência bibliográficos. Ainda assim, os dados obtidos são suficientes para identificar tendências de comportamento entre as composições e avaliar qualitativamente quais formulações apresentaram maior ou menor estabilidade dimensional ao longo do período de cura, que é o objetivo desta análise.

Os resultados comparativos, apresentados no Gráfico 5, mostram variações pequenas em todas as composições, o que é esperado para argamassas com traço 1:2 e elevado teor de ligante, formulações que tendem a apresentar retração controlada em função da quantidade de agregado presente na mistura (VEIGA, 2018).

Gráfico 5 - Variações de retração inicial e final



Fonte: Autora, 2025.

6.3.1 Retração no comprimento

As Argamassas I (100% de cal aérea hidratada) e IV (60% de cal aérea hidratada e 40% de metacaulim) apresentaram as maiores retrações no comprimento, de 1,875% e 2,5% respectivamente. A Argamassa I é a que apresenta maior potencial de retração: a carbonatação da cal aérea é um processo lento e contínuo, acompanhado de redução volumétrica progressiva, que aos 60 dias ainda não havia se completado (KANAN, 2008; MARGALHA, 2011). A Argamassa IV apresentou retração ainda mais acentuada que a Argamassa I, sugerindo que a combinação de cal aérea e metacaulim sem ligante hidráulico não foi suficiente para controlar as variações dimensionais durante a cura. Esse resultado é coerente com o comportamento já observado na variação de massa, onde essa composição também registrou a maior perda do grupo, reforçando que a ausência de ligante hidráulico comprometeu o desenvolvimento da microestrutura em ambos os ensaios.

As Argamassas II (50% de cal aérea hidratada e 50% de cal hidráulica), V (60% de cal aérea hidratada, 30% de cal hidráulica e 10% de cimento) e VII (90% de cal aérea hidratada e 10% de cimento branco) não apresentaram retração mensurável no comprimento, indicando maior estabilidade dimensional. Nas Argamassas II e V, a presença de cal hidráulica promove endurecimento mais rápido e uniforme, reduzindo as variações dimensionais durante a cura (SILVA; PINTO; GOMES, 2012). Na Argamassa VII, a estabilidade pode estar associada ao cimento branco que, mesmo em pequena proporção de 10%, confere maior rigidez inicial à composição.

As Argamassas III (40% de cal aérea hidratada, 20% de cal hidráulica, 10% de cimento e 30% de metacaulim) e VI (60% de cal aérea hidratada, 10% de cimento e 30% de metacaulim) apresentaram retrações intermediárias de 1,25% cada, comportamento coerente com suas composições que combinam múltiplos ligantes, equilibrando parcialmente as tensões de retração.

6.3.2 Retração na largura

Na largura, as variações foram ainda menores. Apenas as Argamassas IV e VI registraram retração de 2,5%, enquanto as demais não apresentaram variação mensurável nessa direção. Essa assimetria entre comprimento e largura é um fenômeno conhecido em argamassas, relacionado à anisotropia do material: as tensões de retração não se distribuem de forma uniforme em todas as direções, sendo influenciadas pela orientação das partículas de agregado, pela direção de compactação e pela taxa de evaporação em cada face do corpo de prova (COELHO; TORRAL; JALALI, 2009).

De modo geral, os resultados de retração confirmam que a presença de ligantes hidráulicos contribui para a estabilidade dimensional das argamassas bastardas, enquanto composições baseadas predominantemente em cal aérea, com ou sem metacaulim, tendem a apresentar maior variação dimensional durante a cura. Para intervenções em edificações históricas, esse comportamento é relevante: revestimentos aplicados sobre suportes rígidos e pouco deformáveis, como alvenarias de pedra consolidadas, beneficiam-se de formulações com menor retração, que reduzem o risco de fissuração e destacamento (VEIGA, 2003; VEIGA, 2018).

6.4 Alterações cromáticas e caracterização visual

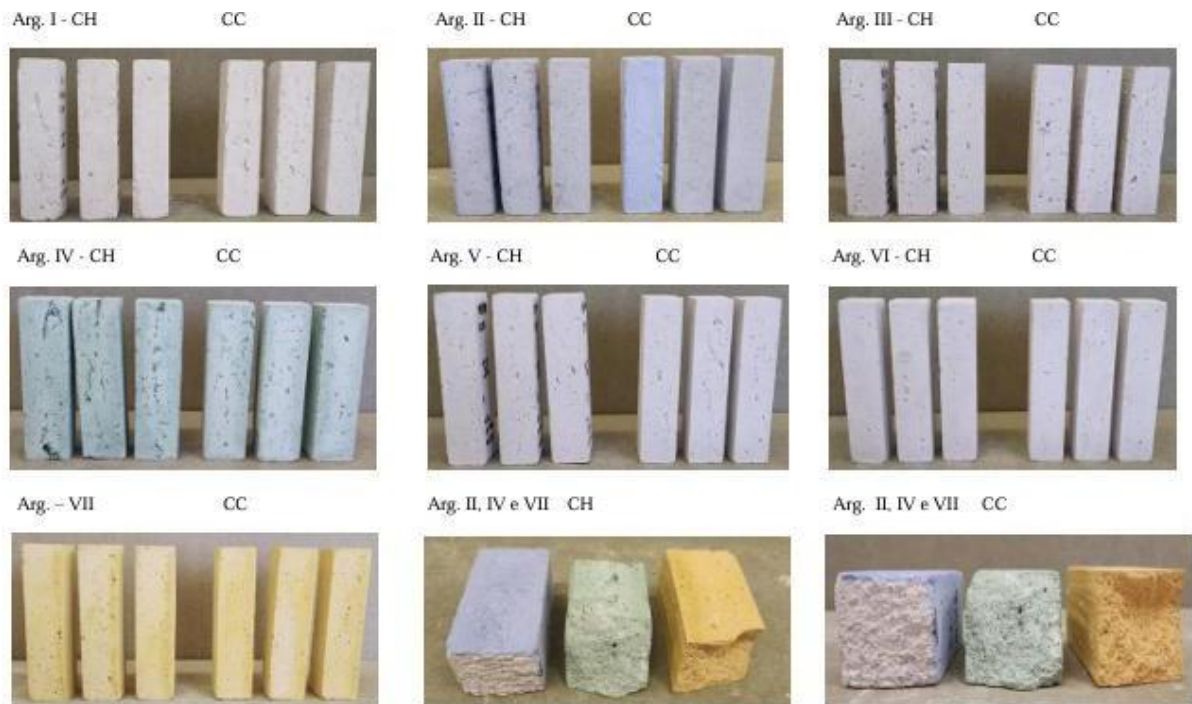
As alterações cromáticas foram avaliadas por registro fotográfico sistemático ao longo dos dois períodos de exposição, câmara úmida e câmara climática, nas três composições pigmentadas: Argamassa II, com pigmento azul ultramar; Argamassa IV, com pigmento verde; e Argamassa VII, com pigmento amarelo metálico, conforme apresentado no Quadro 3.

Todas as argamassas pigmentadas apresentaram algum grau de alteração cromática ainda durante a cura em câmara úmida, enquanto as alterações observadas após a câmara climática foram quase imperceptíveis, sugerindo que a umidade constante e o tempo de exposição exercem maior influência sobre a estabilidade da cor do que as variações térmicas isoladas. As argamassas não pigmentadas, Argamassas I, III, V e VI, não apresentaram alterações visuais significativas ao longo dos ensaios, exceto pelo escurecimento temporário característico do estado úmido, que desapareceu com a secagem.

6.4.1 Argamassa II - pigmento azul ultramar

Ainda nas primeiras semanas de cura em câmara úmida, a superfície em contato com a prateleira apresentou desbotamento mais acentuado do que as demais faces (Figura 34). Essa face, impedida de perder umidade por evaporação, por estar apoiada sobre uma superfície sólida, reteve mais água por mais tempo. A umidade acumulada movimentou-se pelos poros capilares em direção às faces expostas ao ar, onde podia evaporar, carregando consigo o pigmento em solução. Esse mecanismo é análogo ao da eflorescência: para que ocorra o transporte de substâncias pelos poros, são necessários três fatores simultâneos, a presença de substância solúvel, a presença de água e um gradiente hidráulico que conduza a solução em direção à superfície de evaporação (CARASEK, 2010). No caso da Argamassa II, o pigmento azul em solução percorreu esse caminho, concentrando-se nas superfícies expostas e deixando a face em contato com a prateleira mais pálida, conforme registrado na Figura 35.

Quadro 3 - Registro fotográfico dos corpos de prova em câmara úmida e câmara climática, incluindo seções transversais após rompimento.



Nota: Arg = argamassa; CH = câmara úmida; CC = câmara climática. Os corpos de prova identificados como "rompidos" foram seccionados transversalmente após os ensaios mecânicos para avaliação da distribuição interna dos pigmentos.

Fonte: Autora, 2025.

Figura 34 - Argamassa II: coloração inicial na primeira semana de cura.



Fonte: Autora, 2024.

Figura 35 - Argamassa II: alteração cromática na superfície em contato com a prateleira após cura em câmara úmida.



Fonte: Autora, 2024.

Um fenômeno particularmente interessante foi observado ao romper os corpos de prova: o pigmento azul havia migrado para as camadas superficiais, desaparecendo do interior da argamassa (Figura 36). Esse comportamento sugere que a umidade presente durante a cura atuou como veículo de transporte do pigmento em direção às superfícies, onde a exposição ao ar pode ter favorecido processos de oxidação e alteração da tonalidade. As razões para o desaparecimento completo do pigmento no interior da argamassa não puderam ser conclusivamente determinadas neste estudo e merecem investigação mais aprofundada em pesquisas futuras.

Figura 36 - Argamassa II: seção transversal após rompimento, evidenciando a migração do pigmento para as camadas superficiais.



Fonte: Autora, 2025.

6.4.2 Argamassa IV - pigmento verde

A Argamassa IV apresentou coloração inicial (Figura 37), alterações cromáticas discretas ao longo da cura em câmara úmida (Figura 38) e leve alteração de tonalidade após a exposição à câmara climática.

Figura 37 - Argamassa IV: coloração inicial na primeira semana de cura.



Fonte: Autora, 2024.

Figura 38 - Argamassa IV: alteração cromática discreta após cura em câmara úmida.



Fonte: Autora, 2025.

Ao contrário da Argamassa II, o rompimento dos corpos de prova revelou que o pigmento verde permaneceu distribuído no interior da argamassa, sem migração para as superfícies (Figura 39). Esse comportamento indica maior estabilidade da cor interna nessa composição. Uma hipótese possível é que a diferença de comportamento entre o pigmento azul e o verde esteja relacionada às suas distintas solubilidades e reatividades em meio alcalino,

característico das argamassas de cal, mas essa relação não pôde ser confirmada no âmbito deste estudo.

Figura 39 - Argamassa IV: seção transversal após rompimento, evidenciando a permanência do pigmento verde no interior.



Fonte: Autora, 2025.

6.4.3 Argamassa VII - pigmento amarelo metálico

A Argamassa VII apresentou, desde a coloração inicial (Figura 40), desbotamento na superfície durante a cura em câmara úmida (Figura 41), com perda de intensidade de cor nas faces externas, enquanto o interior manteve o amarelo intenso.

Figura 40 - Argamassa VII: coloração inicial.



Fonte: Autora, 2024.

Figura 41 - Argamassa VII: desbotamento superficial após cura em câmara úmida.



Fonte: Autora, 2025.

Essa diferença entre superfície e interior pode ser atribuída à interação entre a umidade e o pigmento nas camadas externas, afetando a tonalidade superficial sem comprometer a estabilidade interna da cor. A intensidade preservada no interior pode ainda estar relacionada ao uso do cimento branco nessa composição, cujo fundo mais claro pode ter contribuído para a vivacidade da cor nas camadas internas. Trata-se, no entanto, de uma hipótese observacional que requereria ensaios específicos para ser confirmada, conforme evidenciado na Figura 42.

Figura 42 - Argamassa VII: seção transversal após rompimento, evidenciando a preservação do amarelo intenso no interior.



Fonte: Autora, 2025.

De modo geral, os resultados indicam que pigmentos à base de óxido de ferro, embora amplamente utilizados em argamassas de cal por sua compatibilidade química e

resistência à alcalinidade, podem apresentar comportamentos distintos em função da composição da argamassa e das condições de cura. As observações registradas neste estudo são de natureza qualitativa e exploratória. Para estudos futuros, recomenda-se a utilização de um único pigmento em todas as composições e a adoção de métodos de análise colorimétrica, o que permitiria quantificar as alterações e comparar com maior precisão o efeito de cada formulação sobre a estabilidade da cor.

6.5 Características visuais, estéticas e texturais

Além das alterações cromáticas, as argamassas foram avaliadas quanto às suas características visuais, estéticas e texturais ao longo dos períodos de cura e envelhecimento. Essas observações, embora de natureza qualitativa, fornecem informações complementares importantes sobre o comportamento superficial de cada composição e sua adequação a diferentes contextos de aplicação.

Todas as argamassas apresentaram aparência porosa, característica esperada em formulações à base de cal aérea hidratada, cuja microestrutura é naturalmente mais aberta do que a de argamassas de cimento (VEIGA, 2018).

A Argamassa I (100% de cal aérea hidratada) destacou-se como a mais porosa de todas as composições. Após o rompimento, ao ser pressionada com a mão, desagregava facilmente, comportando-se como um torrão de areia sem coesão. Carasek (2010) denomina esse fenômeno de pulverulência, descrevendo-o como baixa resistência superficial que prejudica a fixação de camadas de acabamento. Esse comportamento é característico de argamassas de cal aérea pura curadas por períodos relativamente curtos: a carbonatação progride lentamente do exterior para o interior, podendo levar meses ou anos para se completar em toda a espessura do revestimento (KANAN, 2008; MARGALHA, 2011). O problema é que a obra real não oferece esse tempo. A chuva chega, o vento age, os usuários transitam, e o revestimento precisa resistir desde os primeiros dias de exposição. É precisamente essa vulnerabilidade inicial da cal aérea pura que historicamente motivou o abastardamento das argamassas: a adição de ligantes hidráulicos não substitui a cal, mas confere ao conjunto a resistência imediata que a carbonatação, por si só, não consegue garantir no tempo da obra (VEIGA, 2018; O'HARE, 2003).

A Argamassa II (50% de cal aérea hidratada e 50% de cal hidráulica) apresentou textura arenosa nas áreas expostas, onde o molde não a cobria durante a cura. Esse

comportamento pode estar relacionado à migração do pigmento azul para as superfícies, descrita no item 6.4.1, que pode ter alterado localmente a distribuição da matriz ligante nas camadas externas.

A Argamassa III (40% de cal aérea hidratada, 20% de cal hidráulica, 10% de cimento e 30% de metacaulim) não apresentou alterações visuais significativas ao longo dos ensaios, mantendo aparência homogênea e estável tanto após a câmara úmida quanto após a câmara climática. Essa estabilidade é coerente com sua composição, que combina todos os ligantes estudados em proporções equilibradas.

A Argamassa IV (60% de cal aérea hidratada e 40% de metacaulim) apresentou inicialmente uma textura untuosa, característica associada à presença do metacaulim, cujas partículas finas conferem plasticidade à mistura fresca (BANDEIRA, 2012). Após a exposição à câmara climática, essa textura foi perdida e as camadas de compactação tornaram-se visíveis na superfície dos corpos de prova, evidenciando falta de homogeneização entre os ligantes, o agregado e a água. Esse resultado reforça a hipótese de que a combinação de cal aérea hidratada e metacaulim sem ligante hidráulico não desenvolve microestrutura suficientemente coesa para resistir às variações térmicas impostas pelos ciclos de envelhecimento acelerado.

A Argamassa V (60% de cal aérea hidratada, 30% de cal hidráulica e 10% de cimento) destacou-se visualmente por ser perceptivelmente a mais pesada e a menos porosa de todas as composições, características consistentes com a presença simultânea de cal hidráulica e cimento, que promovem maior densificação da microestrutura durante a cura (SILVA; PINTO; GOMES, 2012).

As Argamassas VI (60% de cal aérea hidratada, 10% de cimento e 30% de metacaulim) e VII (90% de cal aérea hidratada e 10% de cimento branco) mantiveram suas características visuais praticamente inalteradas ao longo de todo o período de ensaio, com exceção das alterações cromáticas já descritas na Argamassa VII.

As observações visuais e texturais descritas neste item não são dados secundários: elas antecipam, de forma sensível e direta, o que os ensaios mecânicos confirmarão numericamente. A Argamassa I, que esfarelava na mão como areia, registrou as menores resistências. A Argamassa III, homogênea e estável ao olhar, manteve desempenho consistente nas duas condições de cura. A Argamassa IV, que perdeu sua textura untuosa após o envelhecimento acelerado, revelou visualmente o que os números depois confirmaram: sem ligante hidráulico, o metacaulim não sustenta a microestrutura diante das variações térmicas. O olhar do conservador-restaurador, treinado a perceber o comportamento dos materiais, já encontra aqui as primeiras respostas sobre cada formulação. Os ensaios mecânicos,

apresentados a seguir, revelarão o que acontece com esse comportamento quando as argamassas são submetidas a umidade constante e variações térmicas.

7 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

7.1 Ensaios de resistência mecânica

Os ensaios de resistência mecânica foram realizados para avaliar o desempenho das argamassas em condições representativas de uso, comparando corpos de prova curados em câmara úmida com aqueles submetidos ao envelhecimento acelerado por variações térmicas na câmara climática. Essa comparação permitiu verificar o impacto de cada condição de exposição nas propriedades mecânicas das diferentes composições estudadas.

7.2 Ensaio de resistência à flexão

Após 60 dias da fabricação das argamassas, os corpos de prova mantidos em câmara úmida e aqueles submetidos à câmara climática foram avaliados quanto à sua resistência mecânica. O ensaio seguiu a norma EN 1015-11 (1999), que estabelece o procedimento para a determinação da resistência à flexão de argamassas endurecidas.

O objetivo principal deste ensaio foi medir a resistência mecânica máxima que os corpos de prova podem suportar quando submetidos a forças de flexão aplicadas perpendicularmente à sua superfície. O equipamento utilizado foi uma prensa hidráulica automática apresentada na Figura 43, modelo Matest – Mod S212 Multi-Speed Tester.

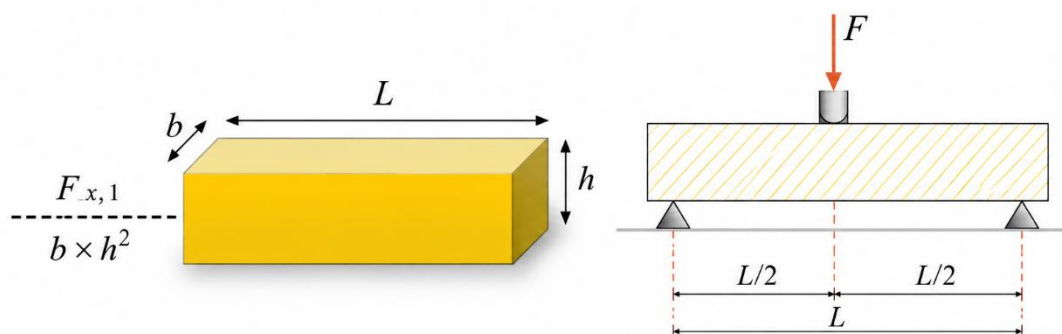
Neste ensaio destrutivo, em que o corpo de prova é submetido a esforços progressivos até a ruptura, foram utilizados corpos de prova prismáticos com dimensões de $40 \times 40 \times 160$ mm. O corpo de prova foi apoiado em dois pontos, com a força F aplicada no ponto central, dividindo o vão em duas partes iguais de $L/2$, conforme ilustrado na Figura 44. Essa configuração, conhecida como ensaio de flexão em três pontos, permite determinar a resistência à flexão com base na carga máxima suportada antes da ruptura. As duas metades resultantes foram posteriormente utilizadas no ensaio de resistência à compressão, descrito no item 7.3.

Figura 43 - Prensa hidráulica automática.



Fonte: Autora, 2025.

Figura 44 - Geometria do corpo de prova prismático, fórmula de cálculo e esquema de aplicação de carga no ensaio de flexão em três pontos.



Fonte: Adaptada de LUSO, 2020.

A resistência à flexão foi calculada por meio da seguinte expressão:

$$R_f = F \times L / (b \times h^2)$$

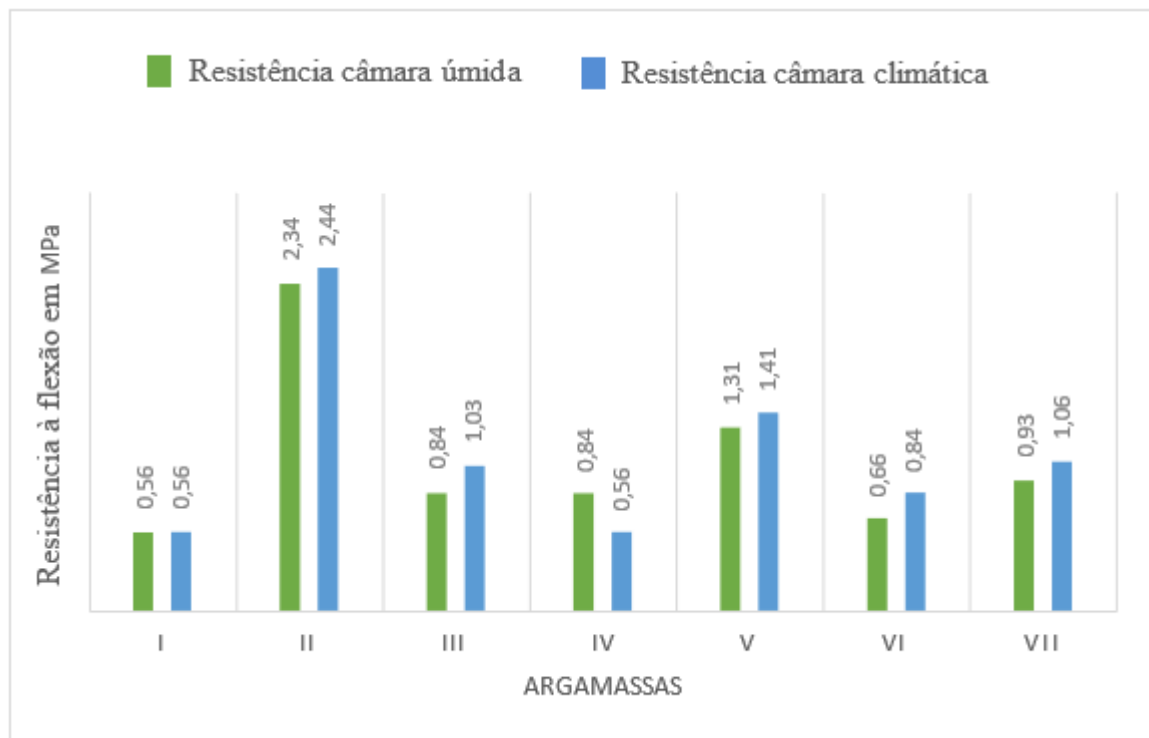
Onde:

- R_f — resistência à flexão, em MPa;
- F — carga máxima de flexão suportada, em N;
- L — distância entre os apoios, em mm;
- b e h — dimensões da seção transversal do corpo de prova, em mm (40×40 mm).

O resultado foi expresso em MPa (megapascal), unidade de pressão equivalente a um newton por milímetro quadrado (N/mm^2), que fornece uma medida quantitativa da capacidade da argamassa de resistir a esforços de flexão.

Os resultados estão apresentados no Gráfico 6, com os valores expressos em megapascas (MPa).

Gráfico 6 - Resistência à flexão



Fonte: Autora, 2025.

7.2.1 Argamassas que ganharam resistência à flexão após a câmara climática

As Argamassas II (50% de cal aérea hidratada e 50% de cal hidráulica), III (40% de cal aérea hidratada, 20% de cal hidráulica, 10% de cimento e 30% de metacaulim), V (60% de cal aérea hidratada, 30% de cal hidráulica e 10% de cimento), VI (60% de cal aérea hidratada, 10% de cimento e 30% de metacaulim) e VII (90% de cal aérea hidratada e 10% de cimento branco) apresentaram aumento de resistência à flexão após a câmara climática. A Argamassa II destacou-se com os maiores valores absolutos, passando de 2,34 MPa para 2,44 MPa. As demais registraram aumentos de 0,84 para 1,03 MPa (III), de 1,31 para 1,41 MPa (V), de 0,66 para 0,84 MPa (VI) e de 0,93 para 1,06 MPa (VII). Esse comportamento sugere que os ciclos térmicos com umidade constante de 90% favoreceram o avanço das reações de carbonatação e hidratação, contribuindo para o adensamento progressivo da microestrutura (KANAN, 2008; MARGALHA, 2011).

7.2.2 Argamassa que manteve resistência à flexão

A Argamassa I, composta exclusivamente por cal aérea hidratada, manteve a mesma resistência à flexão nas duas condições, 0,56 MPa, indicando que os ciclos térmicos não alteraram seu desempenho nesse ensaio. Esse valor está dentro da faixa esperada para argamassas de cal aérea pura, entre 0,3 MPa e 1,5 MPa (VEIGA, 2018). A estabilidade observada reflete uma característica da cal aérea: seu endurecimento por carbonatação é um processo lento e contínuo, que aos 60 dias ainda não havia se completado, e que os ciclos térmicos não foram suficientes para acelerar de forma mensurável na flexão (KANAN, 2008; MARGALHA, 2011).

7.2.3 Argamassa que perdeu resistência à flexão após a câmara climática

A Argamassa IV, composta por 60% de cal aérea hidratada e 40% de metacaulim, foi a única que apresentou redução de resistência à flexão após a câmara climática, passando de 0,84 MPa para 0,56 MPa. A resistência à flexão é mais sensível à presença de microfissuras superficiais, que podem ter sido induzidas pelos ciclos térmicos. A ausência de ligante hidráulico comprometeu a capacidade da microestrutura de resistir a essas variações: sem cal hidráulica ou cimento, o metacaulim não dispõe de hidróxido de cálcio em quantidade suficiente

para desenvolver sua função pozolânica de forma eficiente, resultando em uma microestrutura menos coesa e mais vulnerável ao fissuramento (BANDEIRA, 2012; AZEVEDO, 2015).

Os valores de resistência à flexão obtidos são coerentes com os intervalos indicados pela literatura. De acordo com a EN 196-1, argamassas de cal hidratada apresentam resistência à flexão entre 0,3 MPa e 1,5 MPa, enquanto argamassas de cal e cimento podem atingir entre 1,0 MPa e 2,5 MPa. Esses valores são estabelecidos para argamassas curadas por 28 dias, período inferior aos 54 dias adotados nesta investigação, o que pode ter contribuído para o desenvolvimento adicional das propriedades mecânicas, especialmente nas composições com ligantes de endurecimento mais lento (VEIGA, 2018; COELHO; TORGAL; JALALI, 2009).

7.3 Ensaio de resistência à compressão

O objetivo deste ensaio foi determinar a resistência à compressão das argamassas, seguindo a norma EN 1015-11:1999. O ensaio foi realizado imediatamente após o ensaio de flexão, utilizando as duas metades resultantes da ruptura de cada corpo de prova, conforme descrito no item 7.2.

O procedimento consistiu em posicionar cada metade no prato inferior da prensa hidráulica universal da marca MATEST (Figura 45), centrando o corpo de prova e colocando em contato uma das faces laterais de moldagem. O prato superior foi então descido até estabelecer contato com a face superior do corpo de prova, aplicando-se uma força gradualmente crescente, de modo contínuo e sem choques, até a ruptura. Registrou-se a carga máxima suportada por cada amostra.

A resistência à compressão, expressa em MPa (megapascal), unidade equivalente a um newton por milímetro quadrado (N/mm^2), representa a capacidade do material de resistir a forças compressivas antes de falhar ou sofrer deformações permanentes. Para argamassas de assentamento de alvenaria, a norma NP EN 998-1:2013 indica resistência à compressão esperada de 5 N/mm^2 aos 28 dias.

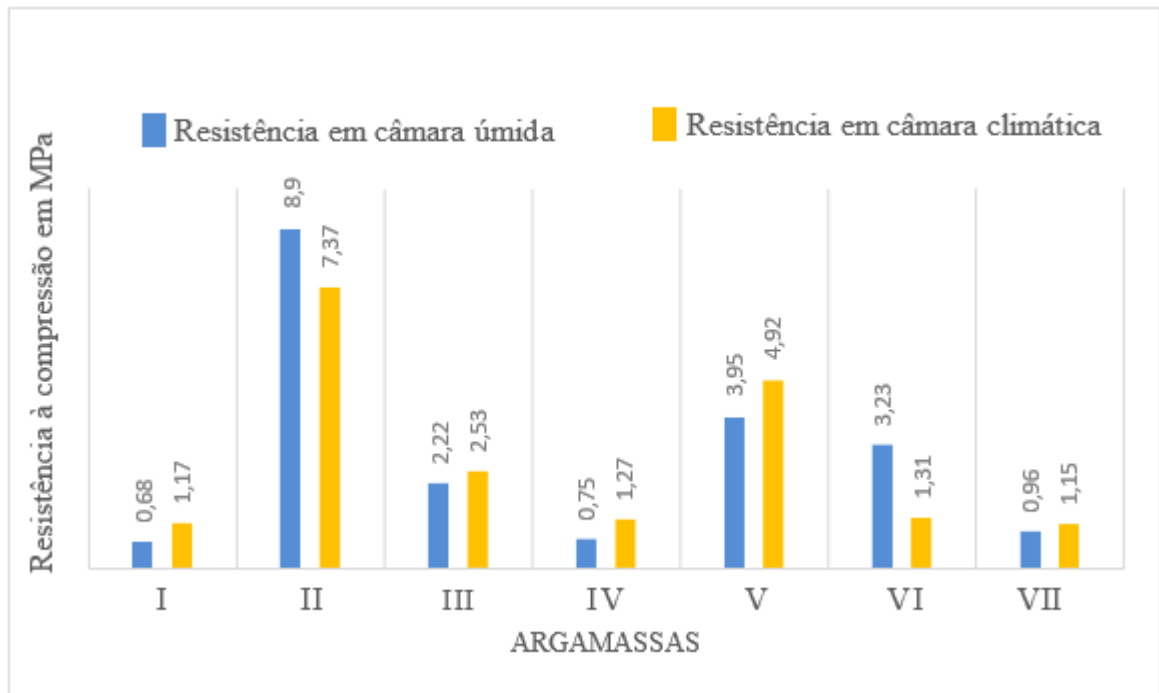
Figura 45 - Prensa hidráulica universal.



Fonte: Autora, 2025.

A resistência à compressão, expressa em MPa (megapascal), unidade equivalente a um newton por milímetro quadrado (N/mm^2), representa a capacidade do material de resistir a forças compressivas antes de falhar ou sofrer deformações permanentes. Para argamassas de assentamento de alvenaria, a norma NP EN 998-1:2013 indica resistência à compressão esperada de 5 N/mm^2 aos 28 dias.

Gráfico 7 - Resistência à compressão.



Fonte: Autora, 2025.

7.3.1 Argamassas que ganharam resistência à compressão após a câmara climática

As Argamassas I (100% de cal aérea hidratada), III (40% de cal aérea hidratada, 20% de cal hidráulica, 10% de cimento e 30% de metacaulim), IV (60% de cal aérea hidratada e 40% de metacaulim), V (60% de cal aérea hidratada, 30% de cal hidráulica e 10% de cimento) e VII (90% de cal aérea hidratada e 10% de cimento branco) apresentaram aumento de resistência à compressão após a câmara climática, com valores que passaram de 0,68 para 1,17 MPa (I), de 2,22 para 2,53 MPa (III), de 0,75 para 1,27 MPa (IV), de 3,95 para 4,92 MPa (V) e de 0,96 para 1,15 MPa (VII). Esse comportamento sugere que os ciclos térmicos favoreceram o avanço das reações de hidratação e carbonatação, contribuindo para o adensamento progressivo da microestrutura em todas essas composições (KANAN, 2008; VEIGA, 2018; COELHO; TORGAL; JALALI, 2009).

Do ponto de vista da prescrição para intervenções em edificações históricas, esse ganho progressivo de resistência é uma característica desejável: significa que a argamassa continua a desenvolver suas propriedades após a aplicação, acompanhando o ritmo natural do envelhecimento do suporte. No entanto, é importante observar que algumas dessas composições

ainda apresentaram valores abaixo do intervalo de referência de 1,5 MPa a 4,0 MPa indicado pela literatura para argamassas de cal aérea, como é o caso das Argamassas I e IV, cujos resultados evidenciam as limitações de formulações sem ligante hidráulico (VEIGA, 2003; BANDEIRA, 2012).

7.3.2 Argamassas que perderam resistência à compressão após a câmara climática

A Argamassa II (50% de cal aérea hidratada e 50% de cal hidráulica) e a Argamassa VI (60% de cal aérea hidratada, 10% de cimento e 30% de metacaulim) foram as únicas que registraram perda de resistência à compressão após o envelhecimento acelerado. A Argamassa II passou de 8,90 MPa para 7,37 MPa, e a Argamassa VI de 3,23 MPa para 1,31 MPa, queda de aproximadamente 59%.

No caso da Argamassa II, a redução pode ser atribuída à sua elevada resistência inicial, que resulta em maior rigidez e menor capacidade de acomodar as deformações impostas pelos ciclos térmicos. Argamassas de alta resistência tendem a ser mais suscetíveis ao fissuramento quando submetidas a variações térmicas bruscas, pois não conseguem absorver as tensões geradas sem romper internamente (VEIGA, 2003). Essa característica é particularmente relevante para a prescrição em edificações históricas: uma argamassa excessivamente resistente pode transferir tensões ao suporte envelhecido em vez de absorvê-las, tornando-se ela própria agente de deterioração.

No caso da Argamassa VI, a queda expressiva sugere que os ciclos térmicos afetaram de forma significativa sua microestrutura interna. Uma hipótese possível é que o metacaulim, ativado progressivamente pelo hidróxido de cálcio liberado pela cal e pelo cimento, tenha desenvolvido compostos expansivos em resposta às variações térmicas, gerando tensões internas que reduziram a coesão da argamassa sob compressão (BANDEIRA, 2012). Esse comportamento contrasta com o da Argamassa III, que também contém metacaulim mas associado a maior proporção de ligantes hidráulicos, e que manteve estabilidade nas duas condições de cura, reforçando a hipótese de que o equilíbrio entre os ligantes é determinante para a estabilidade da microestrutura. Esse comportamento merece investigação mais aprofundada em estudos futuros.

7.3.3 Análise comparativa dos ensaios de flexão e compressão

Os resultados de compressão confirmam e aprofundam o que os ensaios de flexão já haviam revelado: a cal hidráulica foi o fator mais determinante para o desempenho mecânico das composições estudadas. As Argamassas II (50% de cal aérea hidratada e 50% de cal hidráulica) e V (60% de cal aérea hidratada, 30% de cal hidráulica e 10% de cimento), ambas contendo cal hidráulica, registraram os maiores valores em ambos os ensaios e nas duas condições de cura. O metacaulim, por sua vez, demonstrou eficácia apenas quando associado a ligantes hidráulicos: a Argamassa III (40% de cal aérea hidratada, 20% de cal hidráulica, 10% de cimento e 30% de metacaulim) manteve estabilidade nas duas condições, enquanto a Argamassa IV (60% de cal aérea hidratada e 40% de metacaulim), sem ligante hidráulico, registrou os menores valores de resistência e foi a única a perder desempenho à flexão após o envelhecimento acelerado.

O envelhecimento acelerado favoreceu o avanço das reações químicas na maioria das composições, mas expôs a vulnerabilidade das Argamassas II e VI (60% de cal aérea hidratada, 10% de cimento e 30% de metacaulim) às variações térmicas, cada uma por razões distintas: excesso de rigidez em uma, instabilidade microestrutural na outra (VEIGA, 2003; VEIGA, 2018).

Do ponto de vista da prescrição para intervenções em edificações históricas, os resultados reforçam o princípio já estabelecido pela literatura: a argamassa mais resistente não é necessariamente a mais indicada. A Argamassa II (50% de cal aérea hidratada e 50% de cal hidráulica), apesar de seu desempenho mecânico excepcional, apresentou redução de resistência após o envelhecimento e pode transferir tensões excessivas ao suporte. A Argamassa III (40% de cal aérea hidratada, 20% de cal hidráulica, 10% de cimento e 30% de metacaulim), com resistência moderada, mas comportamento estável, pode ser mais adequada para revestimentos de sistemas construtivos em estado avançado de envelhecimento. A Argamassa V (60% de cal aérea hidratada, 30% de cal hidráulica e 10% de cimento) oferece boa resistência com tendência de melhora ao longo do tempo, sendo uma opção interessante para aplicações de assentamento. A Argamassa I (100% de cal aérea hidratada), apesar do desempenho abaixo dos valores normativos, representa a composição de maior compatibilidade química com suportes históricos à base de cal, e seu desempenho tende a melhorar progressivamente com a carbonatação (VEIGA, 2003; VEIGA, 2018; SILVA; PINTO; GOMES, 2012).

8 REFLEXÕES SOBRE FORMAÇÃO, PATRIMÔNIO E PRÁTICA

Esta pesquisa percorreu um caminho que vai além dos dados registrados nas tabelas e gráficos dos capítulos anteriores. Desenvolvida durante mobilidade acadêmica no Instituto Politécnico de Bragança, esta pesquisa refletiu as condições climáticas e os materiais disponíveis em Portugal, mas o pensamento que a acompanhou nunca deixou de voltar à realidade brasileira, e mineira em particular. Essa travessia geográfica produziu uma perspectiva que só a distância permite: olhar para a sua própria realidade com outros olhos.

A primeira dessas reflexões surgiu de uma limitação técnica. A cal hidráulica natural (NHL), utilizada em quatro das sete composições estudadas, não é fabricada no Brasil. Esse ligante foi determinante tanto para o comportamento físico quanto para o desempenho mecânico das argamassas, conforme discutido nos Capítulos 6 e 7, e é industrializado e comercializado em Portugal segundo a norma EN 459-1, mas inexistente no mercado brasileiro, onde a ABNT NBR 7175 classifica a cal hidratada apenas em CH-I, CH-II e CH-III, pela pureza do produto, sem contemplar uma categoria de comportamento parcialmente hidráulico equivalente à NHL.

Vale notar que essa ausência de uma categoria equivalente à NHL na NBR 7175 não significa necessariamente que o Brasil careça de calcários com impurezas argilosas capazes de conferir hidraulicidade natural. Apenas que a norma brasileira não testa nem classifica essa característica especificamente, já que seus critérios de qualidade não distinguem a composição mineralógica de origem. É possível, portanto, que depósitos de calcário naturalmente hidráulico existam no território brasileiro sem que isso seja identificado ou comercializado como tal, dado que a estrutura normativa nacional não oferece um canal de reconhecimento para esse tipo de material.

Um pesquisador brasileiro interessado em repetir os ensaios desta investigação precisaria buscar essa hidraulicidade ausente recorrendo a um pouco de cimento misturado à cal hidratada nacional, o conhecido "cheirinho de cimento" que muitos profissionais já adotam empiricamente. A diferença, porém, não é sutil: a cal hidráulica nasce de um calcário que já contém, naturalmente, silicatos e aluminatos suficientes para conferir hidraulicidade ao queimá-lo a temperaturas próximas das usadas na cal aérea, resultando em um único ligante ainda permeável e deformável. O cimento Portland, por sua vez, é produzido misturando calcário e argila propositalmente e queimando a mistura a temperaturas muito mais altas, o que gera compostos muito mais resistentes, porém rígidos e pouco permeáveis, menos compatíveis com

o suporte histórico do que a hidráulica naturalmente moderada da cal hidráulica. Substituir um pelo outro alteraria as proporções e, provavelmente, o comportamento das argamassas resultantes, na direção de uma rigidez que o sistema construtivo tradicional não pede. Essa ausência talvez reflita menos a falta de demanda industrial e mais a falta de obras que ainda preservem seus sistemas construtivos tradicionais a ponto de exigir esse material, o que reforça a necessidade de formar profissionais capazes de prescrever argamassas compatíveis mesmo diante de um mercado de ligantes menos diversificado que o português.

Os números disponíveis sustentam essa leitura, ainda que de forma aproximada. Portugal é um país pequeno: cerca de seis vezes menor que o estado de Minas Gerais em extensão territorial. Ainda assim, quando comparado ao Brasil inteiro, que soma cerca de 1,7 mil bens já tombados ou ainda em processo de tombamento pelo IPHAN em todo o território nacional (FIQUEM SABENDO, 2025). Portugal sozinho contava em 2022 com mais de 4.600 imóveis de patrimônio cultural classificado (DIREÇÃO-GERAL DAS ARTES; ISCTE-INSTITUTO UNIVERSITÁRIO DE LISBOA, 2024). Essa diferença reflete também critérios distintos de contagem: o IPHAN tende a tomba conjuntos urbanos inteiros sob um único registro, enquanto a classificação portuguesa é predominantemente feita por imóvel individual, o que por si só infla o número português em relação ao brasileiro.

Independentemente da extensão real de patrimônio preservado em cada país, nenhum dos dois números é filtrado por sistema construtivo: ambos reúnem desde edificações anteriores à industrialização padronizada dos ligantes, erguidas com cal e técnicas tradicionais, até construções híbridas e bens de períodos posteriores, já concebidos com cimento Portland. Essa indefinição é, em si, um sintoma do problema discutido nesta investigação: nem o Brasil nem Portugal isolam, em seus indicadores oficiais, do que ainda resta de sistema construtivo tradicional propriamente dito.

A escassez de demanda por cal hidráulica no Brasil, sugerida no parágrafo anterior, talvez tenha uma causa mais concreta do que a simples falta de obras tradicionais: a falta de política pública estável que sustente sua manutenção. Carmo (2020) mostra que o Programa de Aceleração do Crescimento – Cidades Históricas, anunciado em 2009 para abranger 173 municípios, e que chegou a reunir 141 cidades na etapa preliminar de planejamento, terminou contemplando com recursos efetivos apenas 44 delas na revisão de 2013, equivalente a 10% do número inicialmente mobilizado. Ouro Preto está entre as exceções que reuniram recursos dos três principais programas federais de preservação. Sem uma política contínua que garanta obra após obra, ano após ano, não há mercado capaz de justificar, para qualquer fabricante, o investimento na produção nacional de um ligante de nicho como a cal hidráulica natural: a

ausência do material no mercado brasileiro pode ser, então, menos uma causa e mais um sintoma da intermitência das próprias políticas de preservação.

Ainda assim, mesmo nessa escala mais ampla, os números confirmam, em parte, uma percepção que já existia antes de qualquer levantamento estatístico: ao visitar Bragança e, em outras ocasiões, Guimarães, Braga, Vila Real, Porto, Coimbra, Lisboa, Sintra e Mafra, a sensação foi de que as construções tradicionais sobreviveram em maior proporção do que no Brasil. Essa percepção, porém, exige cautela e olhar crítico. Martins (2021), que estudou a casa corrente tanto em núcleos portugueses quanto em Ouro Preto e Mariana, mostra que a fachada das vilas luso-brasileiras herdou uma estrutura de loteamento medieval portuguesa, de frente estreita e grande profundidade, mantida por séculos como elemento de uniformidade urbana (TEIXEIRA, 2012 apud MARTINS, 2021). É possível que parte do que presenciei em terras portuguesas seja, na verdade a permanência dessa lógica antiga de loteamento e volumetria, que impõe certa harmonia às fachadas mesmo onde o sistema construtivo já foi alterado por dentro. Não há, no escopo desta pesquisa, como separar uma coisa da outra. O que parece evidente, porém, é que a sobrevivência desses sistemas construtivos não depende apenas de sua permanência física, mas também da existência de profissionais capazes de compreendê-los.

Se a permanência dos sistemas construtivos tradicionais depende de fatores históricos, econômicos e políticos, sua continuidade futura depende também da formação de profissionais capazes de compreendê-los e intervir neles de forma compatível. Nesse aspecto, a pesquisa laboratorial representa apenas uma parte do processo. A preservação efetiva exige espaços em que conhecimento técnico, prática construtiva e participação comunitária possam se encontrar.

No Brasil, reduzir essa distância entre o pouco que resta desses sistemas construtivos tradicionais e o pouco que se conhece sobre eles é um grande desafio. O IFMG Campus Ouro Preto sustenta, há anos, iniciativas que aproximam a formação técnica da comunidade que vive dentro do patrimônio. O programa Bom-será, parceria entre o IFMG, o IPHAN e o Instituto de Arte Contemporânea de Ouro Preto, restaurou residências de famílias de baixa renda em Ouro Preto e, paralelamente, ofereceu oficinas gratuitas de carpintaria, alvenaria e argamassas de cal a moradores e profissionais da construção civil da cidade. É formação técnica que sai da sala de aula e se mistura ao próprio tecido urbano que se pretende conservar, capacitando justamente quem constrói e mantém essas casas no dia a dia.

Essa aproximação entre patrimônio e comunidade também aparece em outra frente, mais teórica, na pesquisa de Simão (2025) sobre patrimônio urbano e direito à cidade: a autora argumenta que a preservação só se sustenta quando dialoga com o uso cotidiano e com o olhar

de quem habita os núcleos protegidos, e não apenas com sua materialidade. No projeto "Paisagens Pitorescas", coordenado pelo professor Alex Fernandes Bohrer, pude examinar essa mesma aproximação sob outro ângulo: comparando o registro iconográfico de viajantes estrangeiros do século XIX com o cenário atual de Ouro Preto, ficou evidente que a cidade histórica nunca foi um cenário congelado, mas um tecido em transformação constante, ainda que essa transformação seja menos visível que em centros urbanos comuns. Os resultados dessa comparação são convertidos em conteúdo audiovisual, disponibilizado em plataformas gratuitas, ampliando o acesso a esse entendimento sobre o patrimônio para além dos limites da academia. Já o projeto do Canteiro Experimental, coordenado pelas professoras Ana Paula de Moraes e Bárbara Helena Almeida Carmo e pelo professor Régis Eduardo Martins, reúne no mesmo espaço mestres de ofício convidados em parceria com a Escola de Ofícios Tradicionais de Mariana, professores e alunos que já trazem experiência prévia de obra, criando uma troca de saberes que nenhuma das partes teria isoladamente.

Entretanto, as ações não são suficientes. Existe um obstáculo que atravessa toda essa formação para os profissionais a quem esta pesquisa serve: o Projeto de Lei 1.183/2019, que deve regulamentar o exercício das profissões de conservador-restaurador e de técnico em conservação-restauração de bens culturais, segue em tramitação na Câmara dos Deputados, já tendo recebido parecer favorável em comissão, mas ainda sem votação definitiva. Ou seja, nossa profissão ainda não é reconhecida, o que torna pouco atrativo buscar todo esse e outros conhecimentos relativos ao patrimônio edificado. Quando participei de uma audiência pública na Assembleia Legislativa de Minas Gerais sobre o tema, aprendi muito com os que lutam por essa causa e levei dessa experiência a mesma preocupação que me trouxe a esta monografia: enquanto a ciência do patrimônio não for reconhecida pelo Estado como ciência, ela continuará dependendo da resiliência e também da militância de quem a pratica.

A bagagem que sustenta esta investigação não nasceu em Bragança. Foi construída ao longo de todo o curso, entre disciplinas, visitas técnicas e os projetos nos quais atuei como bolsista. Minha intenção, com tudo isso, é demonstrar a relevância dessa trajetória e contribuir para o reconhecimento dos inúmeros profissionais, mestres de ofício, técnicos, pesquisadores, meus professores e agentes da preservação que, muitas vezes sem o devido reconhecimento institucional, trouxeram a história até os dias atuais na forma de documento edificado.

9 CONCLUSÃO

Este trabalho investigou o comportamento físico e mecânico de sete composições de argamassas bastardas à base de cal aérea hidratada, avaliando o efeito da substituição parcial desse ligante por cal hidráulica natural, cimento Portland e metacaulim em diferentes proporções. Os ensaios de variação de massa, retração, resistência à flexão e à compressão, realizados após 56 dias de cura em câmara úmida e 4 dias de envelhecimento acelerado em câmara climática, produziram um conjunto de dados que permite orientar escolhas de prescrição para intervenções em sistemas construtivos tradicionais.

Os resultados confirmaram que não existe uma composição universalmente superior. Cada formulação respondeu de forma singular às condições de cura e envelhecimento, revelando que o desempenho das argamassas bastardas é profundamente condicionado pela combinação de ligantes, pela relação água/ligante, pelas condições ambientais e pelo tempo de cura. A presença de cal hidráulica mostrou-se o fator mais determinante para o desempenho mecânico, enquanto o metacaulim demonstrou eficácia apenas quando associado a ligantes hidráulicos capazes de promover sua ativação pozolânica. A Argamassa III, combinando cal aérea hidratada, cal hidráulica, cimento e metacaulim em proporções moderadas, destacou-se pela estabilidade de comportamento nas duas condições de cura, característica que pode ser tão relevante quanto a resistência absoluta em intervenção patrimonial.

Esses resultados reforçam um princípio fundamental que atravessa toda a investigação: a argamassa mais resistente não é necessariamente a mais indicada. Em edificações históricas cujos sistemas construtivos envelheceram por décadas ou séculos, a compatibilidade com o suporte preexistente prevalece sobre o desempenho mecânico isolado. Uma argamassa excessivamente rígida pode transferir tensões ao suporte em vez de absorvê-las, tornando-se ela própria agente de deterioração daquilo que se pretende conservar. A escolha de uma formulação deve considerar a aplicação, as exigências mecânicas, as condições ambientais e a compatibilidade com os materiais existentes, premissa que o laboratório pode fundamentar, mas que a obra real sempre refinará.

Essas conclusões não pretendem encerrar a discussão sobre argamassas bastardas, nem esgotar as possibilidades de composição entre cal aérea, cal hidráulica, cimento e metacaulim. Investigações futuras que ampliem o número de formulações, estendam o período de cura ou incorporem suportes reais de edificações históricas darão continuidade natural ao que aqui foi apenas o primeiro passo.

O coração deste trabalho, no entanto, não está nos números isolados de cada gráfico, mas no que eles, em conjunto, oferecem a quem decide: subsídios técnicos para a prescrição de argamassas. Essa não é uma escolha qualquer dentro de uma intervenção: é a camada de sacrifício que vai absorver o desgaste do tempo no lugar do suporte histórico, ou é a coesão que sustenta a alvenaria por dentro.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175: cal hidratada para argamassas — requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: cimento Portland — requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

AZEVEDO, Isabela Neves. **Avaliação de desempenho de argamassas de ligantes aéreos ou hidráulicos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2015.

AZEVEDO, Úrsula Ruchkys de; MACHADO, Maria Márcia Magela; CASTRO, Paulo de Tarso Amorim; RENGGER, Friedrich Ewald; TREVISOL, Andréa; BEATO, Décio Antônio Chaves. Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG): proposta. In: SCHOBENHAUS, Carlos; SILVA, Cassio Roberto da (org.). **Geoparques do Brasil: propostas**. Rio de Janeiro: CPRM, 2012. v. 1, p. 185-216.

BANDEIRA, André Filipe Domingos. **Caracterização de argamassas de cal aérea e de cal hidráulica natural com metacaulino: evolução com a idade**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Perfil Construção) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

BOHRER, Alex Fernandes. **Ouro Preto: um novo olhar**. São Paulo: Scortecci, 2011.

CARASEK, Helena. Argamassas. In: ISAIA, Geraldo Cechella (org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 893-941.

CARMO, Bárbara Helena Almeida. **PCH, Programa Monumenta e PAC-CH: o patrimônio cultural na perspectiva de política pública**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências – Teoria e História da Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

COELHO, Ana Zulmira Gomes; TORGAL, Fernando Pacheco; JALALI, Said. **A cal na construção**. Guimarães: TecMinho/Universidade do Minho, 2009.

COELHO, Ana Zulmira Gomes; JALALI, Said; TORGAL, Fernando Pacheco. Argamassas de cal aérea e metacaulino versus argamassas comerciais pré-preparadas para a reabilitação. Parte 1. **Engenharia Civil (Revista da Universidade do Minho)**, n. 39, 2011.

DIREÇÃO-GERAL DAS ARTES; ISCTE-INSTITUTO UNIVERSITÁRIO DE LISBOA. **Atlas artístico e cultural de Portugal**. Lisboa: DGArces/ISCTE-IUL, 2024.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1015-2: methods of test for mortar for masonry – part 2: bulk sampling of mortars and preparation of test mortars**. Brussels: CEN, 1999.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1015-3: methods of test for mortar for masonry – part 3: determination of consistence of fresh mortar (by flow table)**. Brussels: CEN, 1999.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1015-10: methods of test for mortar for masonry – part 10: determination of dry bulk density of hardened mortar**. Brussels: CEN, 1999.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1015-11: methods of test for mortar for masonry – part 11: determination of flexural and compressive strength of hardened mortar**. Brussels: CEN, 1999.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 12390-2: testing hardened concrete – part 2: making and curing specimens for strength tests**. Brussels: CEN, 2019.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 196-1: methods of testing cement – part 1: determination of strength**. Brussels: CEN, 2016.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 933-1: tests for geometrical properties of aggregates – part 1: determination of particle size distribution – sieving method**. Brussels: CEN, 2012.

FERREIRA, Karina. **Estudo comparativo entre argamassas convencionais e industrializadas**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016.

FIQUEM SABENDO. Patrimônio cultural: veja a lista atualizada de bens tombados pelo Iphan desde 1938. 2025. Disponível em:

<https://fiquemsabendo.com.br/transparencia/patrimonio-cultural-veja-a-lista-atualizada-de-bens-tombados-pelo-iphan-desde-1938/>. Acesso em: 20 maio 2026.

FONSECA, Vanessa Rafaela de Sousa. **Estudo das principais argamassas utilizadas na reabilitação de edifícios antigos.** 2016. Relatório de estágio (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2016.

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. **NP EN 459-1: cal de construção. Parte 1: definições, especificações e critérios de conformidade.** Caparica: IPQ, 2015.

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. **NP EN 998-1: especificações de argamassas para alvenarias. Parte 1: argamassas de reboco e de revestimento interior e exterior.** Caparica: IPQ, 2013.

KANAN, Maria Isabel. **Manual de conservação e intervenção em argamassas e revestimentos à base de cal.** Brasília: IPHAN/Programa Monumenta, 2008. (Cadernos Técnicos, 8).

LUSO, Eduarda Cristina Pires. **Apontamentos teóricos: Materiais de Construção.** Bragança: Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Bragança, 2020. Material didático.

LUSO, Eduarda Cristina Pires; FERREIRA, Débora Macanjo; BRIGA-SÁ, Ana; CARVALHO, Bruna; NARA, Cláudia. **Characterization of Traditional Mortars Using Ageing Tests. In: 11th Euro-American Congress on Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management (REHABEND 2026), 11., 2026, Bilbao. Book of Papers. Santander: University of Cantabria, 2026. p. 1061-1067.**

Disponível em: <https://deposito.unican.es/ficheros/blancowh810577/fichero.pdf>. Acesso em: 9 jul. 2026.

LUSO, Eduarda Cristina Pires; LOURENÇO, Paulo B.; ALMEIDA, Manuela Guedes de. **Centro histórico de Bragança: caracterização do edificado, aspectos arquitectónicos e anomalias.** Publindústria, 2004.

MARGALHA, Maria Goreti. **Argamassas**. 2011. Documento de apoio às aulas de Conservação e Recuperação do Património – Universidade de Évora, Évora, 2011.

MARTINS, Régis Eduardo. **A habitação vernacular no séc. XVIII: residências mineiras do período colonial**. 2010. Monografia (Tecnologia em Conservação e Restauro) – Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

MARTINS, Régis Eduardo. **A casa corrente luso-brasileira em Minas Gerais: releitura sobre a casa urbana das regiões de Vila Rica e do Rio das Mortes (séculos XVIII e XIX)**. 2021. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

MELLO, Gabriela Karina Moraes de. **Caracterização física, mecânica e térmica de argamassas coloridas à base de cal para revestimentos de paredes de edifícios antigos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção) – Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2019.

MOTTA, Sylvio Nelson Mariano da. **Metodologia para caracterização dos processos construtivos e das patologias de edificações históricas: estudo de caso em Ouro Preto-MG**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

NEVES, Célia Maria Martins; FARIA, Obede Borges; ROTONDARO, Rodolfo; CEVALLOS, Patricio S.; HOFFMANN, Márcio Vieira. **Seleção de solos e métodos de controle na construção com terra – práticas de campo**. Rede Ibero-americana PROTERRA, 2009.

O'HARE, Graham. **Lime mortars and renders: the relative merits of adding cement**. The Building Conservation Directory, 2003. Tradução de António de Borja Araújo: Argamassas e rebocos de cal: as vantagens relativas de se adicionar cimento. Disponível em: <https://www.buildingconservation.com/articles/cement/cement.htm>. Acesso em: 06/02/2024.

REDENTOR, Armando. **A produção tradicional de cal no extremo setentrional dos concelhos de Vinhais e Bragança: contributo para o seu estudo**. Brigantia: Revista de Cultura, Bragança, v. 23, n. 3/4, p. 37-62, jul./dez. 2003.

RIBEIRO, A. **Contribution à l'étude tectonique de Trás-os-Montes Oriental**. Lisboa, 1974.

SILVA, B.; PINTO, A. P. F.; GOMES, A. **Influência da dosagem de cimento nas características mecânicas de argamassas bastardas para rebocos de edifícios antigos**. Comunicação apresentada no 4º Congresso da APFAC, Lisboa, 2012.

SIMÃO, Maria Cristina Rocha. **Diferentes olhares sobre a preservação das cidades: entre os dissensos e os diálogos dos moradores com o patrimônio**. São Paulo: Editora Dialética, 2025.

VARGAS, Duarte d'Eça Leal Ferreira de. **Argamassas de cal aérea e metacaulino: a influência do traço e da cura**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Perfil de Construção) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

VEIGA, Maria do Rosário. Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos: características e campo de aplicação de algumas formulações correntes. In: ENCONTRO SOBRE CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS, 3., 2003, Lisboa. **Actas [...]**. Lisboa: LNEC, 2003.

VEIGA, Maria do Rosário. Argamassas de cal para conservação e reabilitação de edifícios: conhecimento consolidado e necessidades de investigação. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 4, p. 85-96, out./dez. 2018.

VERARDO, Camila Lana. **Análise do traço da argamassa do Museu da Inconfidência, Ouro Preto/MG: identificação dos materiais constituintes para propostas de intervenção futuras**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Conservação e Restauração de Bens Culturais) – Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Ouro Preto, Ouro Preto, 2025.

WEIMER, Günter. **Arquitetura popular brasileira**. São Paulo: Martins Fontes, 2005.

GLOSSÁRIO

Aglomerante - Material que, misturado aos agregados e à água, forma uma pasta capaz de unir os grãos do agregado após o endurecimento.

Agregados - Partículas de rochas provenientes da desagregação natural ou da britagem. Nas argamassas, utiliza-se o agregado de granulometria miúda, denominado areia.

Argamassas bastardas - Argamassas produzidas pela combinação de dois ou mais ligantes inorgânicos, como cal aérea, cal hidráulica e cimento Portland, buscando conciliar as propriedades específicas de cada material para atender às exigências de desempenho da aplicação.

Argamassas compostas - Argamassas produzidas com um único ligante inorgânico, ao qual podem ser incorporadas adições minerais, como materiais pozolânicos, e aditivos orgânicos destinados a modificar ou melhorar propriedades específicas, sem caracterizar a combinação de diferentes ligantes.

Argamassas pré-dosadas - Argamassas industrializadas produzidas com proporções previamente definidas de ligantes, agregados e, quando necessário, aditivos, necessitando apenas da adição da quantidade de água recomendada pelo fabricante para sua utilização.

Argilas - Materiais naturais de origem mineral, formados pela alteração de rochas ao longo do tempo. Tornam-se plásticas quando umedecidas, característica que permite sua moldagem. São amplamente utilizadas na fabricação de materiais cerâmicos e, quando presentes em determinados calcários, fornecem os constituintes necessários à produção da cal hidráulica natural.

Cal aérea hidratada - Aglomerante obtido pela hidratação da cal viva, constituído predominantemente por hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$. Endurece lentamente pela reação com o dióxido de carbono presente no ar, formando carbonato de cálcio (CaCO_3).

Cal aérea hidratada industrializada - Cal aérea hidratada produzida e classificada segundo normas técnicas, com composição controlada e comportamento previsível, em contraste com as cales artesanais de origem geológica variável.

Cal apagada - Denominação tradicional da cal hidratada, obtida pela adição de água à cal viva.

Cal hidráulica natural - Aglomerante obtido pela calcinação de calcários que contêm argilas naturais. Diferentemente da cal aérea, endurece tanto pela reação com a água quanto pelo contato com o dióxido de carbono do ar.

Cal não extinta - Partículas de cal viva que não reagiram completamente durante a hidratação. Quando presentes na argamassa endurecida, podem hidratar-se posteriormente, provocando expansão, fissuração e destacamentos.

Cal virgem - Denominação tradicional da cal viva.

Cal viva - Aglomerante obtido pela calcinação do calcário, constituído predominantemente por óxido de cálcio (CaO). Caracteriza-se pela elevada reatividade com a água, originando a cal hidratada.

Calcinação - Primeira etapa do ciclo da cal: aquecimento do calcário a temperaturas entre 850°C e 900°C , decompondo o carbonato de cálcio em óxido de cálcio.

Câmara climática - Equipamento utilizado para simular condições controladas de temperatura e umidade, permitindo avaliar o comportamento e a durabilidade dos materiais.

Câmara úmida - Equipamento ou ambiente com temperatura e umidade controladas, utilizado para a cura de corpos de prova e para favorecer o desenvolvimento adequado das propriedades das argamassas.

Carbonatação - Reação química entre o hidróxido de cálcio presente na cal aérea e o dióxido de carbono do ar, formando carbonato de cálcio, principal responsável pelo endurecimento das argamassas de cal aérea.

Carbonato de cálcio - Composto químico (CaCO_3) que constitui o principal componente das rochas calcárias. É a matéria-prima utilizada para a produção da cal e também o produto formado durante a carbonatação das argamassas de cal aérea.

Cimento Portland - Aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer com adição de gesso e, conforme sua classificação, de outros constituintes. Quando misturado com água, endurece por hidratação, desenvolvendo resistência mecânica e estabilidade mesmo em ambientes úmidos ou submersos.

Clínquer - Material obtido pela calcinação de uma mistura de calcário e argila em temperaturas próximas de 1450 °C. Durante esse processo, a cal formada reage com a sílica, a alumina e os óxidos de ferro, originando compostos hidráulicos que constituem o principal componente do cimento Portland.

Comportamento aéreo - Característica dos aglomerantes que endurecem predominantemente pela reação com o dióxido de carbono presente no ar, como ocorre com a cal aérea. Após o endurecimento, não apresentam o mesmo desempenho quando mantidos permanentemente submersos.

Comportamento hidráulico - Característica dos aglomerantes de endurecer pela reação com a água, conservando sua resistência e estabilidade mesmo em ambientes úmidos ou submersos.

Corpos de prova - Amostra preparada com dimensões padronizadas para a realização de ensaios laboratoriais destinados à determinação das propriedades físicas, químicas ou mecânicas de um material.

Cura - Processo de manutenção das condições adequadas de temperatura e umidade após a moldagem, permitindo o desenvolvimento das propriedades físicas e mecânicas das argamassas.

Curva granulométrica - Representação gráfica da distribuição dos tamanhos dos grãos do agregado, obtida por peneiramento.

Degradação - Processo de alteração das características originais de um material, provocado pela ação de agentes físicos, químicos, biológicos ou mecânicos, que pode comprometer sua integridade, desempenho, durabilidade e aparência.

Destacamentos - Perda total ou parcial da aderência entre um revestimento ou outro material e o substrato ao qual está ligado. Pode manifestar-se por abaulamentos, som cavo ou desprendimento parcial, podendo evoluir para a perda do material.

Difração de Raios X (DRX) - Técnica analítica empregada para identificar as fases cristalinas presentes em um material, permitindo determinar sua composição mineralógica. É amplamente utilizada na caracterização de argamassas, cales, cimentos e pozolanas.

Edificações tombadas - Edificações protegidas por tombamento em razão de seu reconhecido valor histórico, artístico, arquitetônico ou cultural, estando sujeita às normas de preservação e às restrições legais aplicáveis às intervenções.

Envelhecimento acelerado - Procedimento experimental em que um material é submetido a condições ambientais controladas, como variações de temperatura e umidade, para acelerar os processos de degradação e simular, em um período reduzido, os efeitos do envelhecimento natural.

Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) - Técnica analítica utilizada para identificar ligações químicas e grupos funcionais presentes em um material. Na caracterização de argamassas, permite identificar compostos como carbonatos, hidróxidos, silicatos, sulfatos, argilas e materiais orgânicos, auxiliando na determinação da natureza dos aglomerantes e das adições.

Estado da arte - Revisão crítica da literatura científica que reúne, analisa e discute o conhecimento disponível sobre um determinado tema, permitindo identificar conceitos consolidados, controvérsias, lacunas e contribuições que fundamentam o desenvolvimento de uma pesquisa.

Fissuração - Manifestação patológica caracterizada pelo aparecimento de fissuras em um material ou elemento construtivo, decorrente de ações mecânicas, variações térmicas, retração, movimentações estruturais ou incompatibilidade entre materiais.

Fluorescência de Raios X (XRF) - Técnica analítica utilizada para determinar a composição química elementar de um material por meio da detecção da radiação fluorescente emitida pelos elementos químicos quando excitados por raios X.

Formulações empíricas - Composições de argamassa desenvolvidas a partir da prática construtiva, da observação e da experiência acumulada ao longo do tempo, anteriores à normalização técnica dos materiais.

Granulometria - Distribuição dos tamanhos das partículas que compõem um agregado, determinada por análise granulométrica. Nas argamassas, influencia propriedades como trabalhabilidade, porosidade, resistência e durabilidade.

Hidratação - Segunda etapa do ciclo da cal, correspondente à reação exotérmica entre o óxido de cálcio (CaO) e a água, formando hidróxido de cálcio [Ca(OH)_2].

Intempéries - Conjunto de agentes atmosféricos, como chuva, vento, radiação solar, variações de temperatura e umidade, que atuam sobre os materiais e podem provocar sua degradação.

Juntas - Espaços entre os elementos da alvenaria preenchidos com argamassa de assentamento, responsáveis pela união entre os componentes e pela acomodação de pequenas deformações.

Manifestações patológicas - Alterações observáveis decorrentes de processos de degradação que afetam materiais ou sistemas construtivos, evidenciando o comprometimento de suas características ou desempenho.

Materiais pozolânicos artificiais - Pozolanas obtidas por tratamento térmico ou processos industriais.

Materiais pozolânicos naturais - Pozolanas de origem vulcânica ou sedimentar.

Matriz carbonatada - Matriz endurecida da argamassa de cal aérea, constituída predominantemente por carbonato de cálcio (CaCO_3) formado durante a carbonatação.

Metacaulim - Pozolana artificial obtida pela calcinação do caulim entre $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, que reage com o hidróxido de cálcio, aumentando a resistência mecânica sem comprometer significativamente a permeabilidade da argamassa.

Microtomografia computadorizada (Micro-CT) - Técnica não destrutiva de imageamento tridimensional por raios X que permite visualizar e analisar a estrutura interna de materiais, como poros, fissuras e distribuição dos constituintes, sem danificar a amostra.

Módulo de finura - Índice numérico que representa a granulometria de um agregado miúdo, calculado a partir das porcentagens retidas em uma série padronizada de peneiras.

Patrimônio edificado - Conjunto de bens imóveis construídos reconhecidos por seu valor histórico, cultural, arquitetônico, artístico ou paisagístico, cuja preservação é de interesse público.

Permeabilidade ao vapor - Capacidade de um material permitir a passagem do vapor de água através de sua estrutura, favorecendo as trocas de umidade com o ambiente.

Plasticidade - Propriedade de um material fresco de deformar-se sob a ação de uma força sem se romper, facilitando sua moldagem, aplicação e aderência ao substrato.

Presa - Processo inicial de endurecimento da argamassa, no qual o material perde gradualmente a plasticidade e a trabalhabilidade, passando do estado fresco para o estado endurecido, sem que suas propriedades mecânicas finais tenham sido plenamente desenvolvidas.

Pozolana - Material silicoso ou sílico-aluminoso que, isoladamente, possui pouca ou nenhuma capacidade aglomerante, mas que, na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$, formando compostos com propriedades hidráulicas. O termo "pozolana" deriva de Pozzuoli, cidade italiana próxima a Nápoles, cujas cinzas vulcânicas eram utilizadas pelos romanos na produção de argamassas hidráulicas.

Propriedade hidráulica - Característica de um ligante que lhe permite endurecer e manter sua resistência na presença de água.

Reação exotérmica - Reação química que libera calor. Na produção da cal, caracteriza a hidratação da cal viva, podendo atingir temperaturas superiores a 150 °C.

Reparo curativo - Intervenção realizada após o surgimento de um dano, com o objetivo de restabelecer o desempenho ou a integridade do elemento afetado.

Retenção de umidade - Capacidade de uma argamassa fresca reter a água necessária ao desenvolvimento das reações de endurecimento, reduzindo sua perda para o ambiente ou para o substrato.

Retração - Redução das dimensões ou do volume de um material durante o processo de endurecimento ou secagem, podendo favorecer o aparecimento de fissuras.

Silicatos e aluminatos - Compostos formados durante a calcinação de calcários argilosos, responsáveis pelas propriedades hidráulicas da cal hidráulica natural e do cimento Portland.

Silicoso(a) - Diz-se do material rico em sílica (SiO_2).

Sinterizados - Cristais de cal mais densos e parcialmente fundidos, formados quando a calcinação ocorre em temperatura excessiva, resultando em baixa reatividade e dificuldade de hidratação.

Sistemas construtivos tradicionais - Sistema construtivo característico das técnicas construtivas anteriores à industrialização dos materiais de construção, baseado no emprego de materiais locais, como pedra, terra, madeira e cal, e em conhecimentos transmitidos pela prática construtiva.

Sobrecalcinação - Calcinação realizada acima da temperatura ideal, resultando na formação de partículas de cal densificadas, pouco reativas e de difícil hidratação, conhecidas como cal morta.

Superfície de contato - Área total exposta das partículas de um material, disponível para interagir com outras substâncias ou participar de reações químicas. Quanto menores forem as partículas, maior será sua superfície de contato.

Suporte - Base material sobre a qual um revestimento, pintura, argamassa ou outro material é aplicado ou aderido.

Tecido histórico - Conjunto edificado de valor histórico que compõe um núcleo urbano protegido, sujeito a processos contínuos de degradação e transformação.

Tecido urbano - Conjunto de edificações, espaços públicos e demais elementos urbanos de valor histórico que compõem um núcleo urbano preservado.

Trabadilhos - Argamassas tradicionais da Península Ibérica, introduzidas durante o período de influência árabe (al-Andalus), produzidas com cal viva, gesso, areia calcária e aditivos orgânicos, como gorduras animais, ceras e látex de figueira. Eram empregadas em juntas, estuques e rebocos, inclusive exteriores, devido às técnicas utilizadas para aumentar a resistência do gesso à ação da água.

Urze - Arbusto do gênero *Erica*, abundante em regiões montanhosas de Portugal. Sua madeira, utilizada tradicionalmente como combustível em fornos artesanais de calcinação, apresenta elevado poder calorífico e foi amplamente empregada na produção de cal em regiões como Bragança.

APÊNDICE A — PLANILHAS DE DESENVOLVIMENTO, ACOMPANHAMENTO E ENSAIO DAS ARGAMASSAS

Planilhas em Excel para desenvolvimento das argamassas, acompanhamento em câmara úmida e climática, e ensaios de resistência.

Acesse diretamente pelo:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1DNM0x5jwJRaQo5Bm3LVW1d8WKREDiECA/edit?usp=drive_link&ouid=110928224136865824138&rtpof=true&sd=true. Acesso em: 20/06/2026.

Ou escaneie pelo QR CODE abaixo:

