

Proteção de superfícies de concreto aparente: diretrizes e parâmetros técnicos para intervenção

Matheus Gregorio Kaminski



Universidade de Brasília



faunb





Universidade de Brasília



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO**

Dissertação de Mestrado

**Proteção de superfícies de concreto aparente:
diretrizes e parâmetros técnicos para intervenção**

Matheus Gregorio Kaminski

Orientação Profa. Dra. Vanda Alice Garcia Zanoni

Brasília, 2026

Matheus Gregorio Kaminski

**Proteção de superfícies de concreto aparente:
diretrizes e parâmetros técnicos para intervenção**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília – PPGFAU / UnB como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de mestre.

Área de concentração: Tecnologia, Ambiente e Sustentabilidade.

Linha de pesquisa: Projeto, Construção, Estrutura e Conservação.

Orientação: Profa. Dra. Vanda Alice Garcia Zanoni
Coorientação: Profa. Dra. Valdirene Maria Silva Capuzzo

Brasília
2026

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo autor

Kaminski, Matheus Gregorio.

Proteção de superfícies de concreto aparente: diretrizes e parâmetros técnicos para intervenção. / Matheus Gregorio Kaminski; orientadora Vanda Alice Garcia Zanoni. – Brasília, 2026.

184 p.

Dissertação (Mestrado – Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, 2026.

1. Arquitetura Moderna. 2. Superfície de concreto aparente. 3. Conservação. 4. Manutenção predial. 5. Proteção. 6. Manifestação patológica. 7. Durabilidade. I. Zanoni, Vanda Alice Garcia, orient. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

KAMINSKI, Matheus Gregorio. Proteção de superfícies de concreto aparente: diretrizes e parâmetros técnicos para intervenção. 2026. 184 p. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2026.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Matheus Gregorio Kaminski

TÍTULO: Proteção de superfícies de concreto aparente: diretrizes e parâmetros técnicos para intervenção

GRAU: Mestrado em Arquitetura e Urbanismo

ANO: 2026

É concedida à Universidade de Brasília – UnB permissão para reproduzir cópias totais ou parciais desta dissertação de mestrado, por quaisquer meios convencionais ou eletrônicos, e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos, desde que citada a fonte. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Todas as citações em línguas estrangeiras foram traduzidas, sob exclusiva responsabilidade do autor.

Uso de IA em revisão gramatical e tratamento de imagens.

Foto de capa: Matheus Gregorio Kaminski – Edição: Andressa de Araújo Silva

Matheus Gregorio Kaminski

e-mail: matheuskaminski@unb.br / matheusgkaminski@gmail.com

70.910-900 Brasília/DF – Brasil

Brasília, 29 de maio de 2026

Dissertação de Mestrado defendida no Programa de Pós-Graduação da Faculdade de
Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília
e aprovada pela Banca Examinadora constituída por

Orientadora

Profa. Dra. Vanda Alice Garcia Zanoni

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo
da Universidade de Brasília – PPGFAU/UnB

Coorientadora

Profa. Dra. Valdirene Maria Silva Capuzzo

Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil
da Universidade de Brasília – PECC/UnB

Examinador Externa

Profa. Dra. Claudia Terezinha de Andrade Oliveira

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo
da Universidade de São Paulo – PPGFAU/USP

Examinadora Externa

Profa. Dra. Maria Cláudia de Freitas Salomão

Faculdade de Engenharia Civil
da Universidade Federal de Uberlândia – FECIV/UFU

Suplente

Prof(a). Dr(a). Flaviana Barreto Lira

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo
da Universidade de Brasília – PPGFAU/UnB

AGRADECIMENTOS

À insistência e ao incentivo da Andressa.

Às minhas orientadoras, cujas paciência e exigência me guiaram pelo caminho certo.

Aos professores, aos amigos e aos familiares que estiveram de alguma forma presentes
ao longo do caminho.

Ao apoio da Secretaria de Infraestrutura (INFRA) da Universidade de Brasília.

Ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (PPGFAU)
da Universidade de Brasília.

Ao Laboratório de Materiais de Ensaio de Materiais (LEM) do Departamento de Engenharia
Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade de Brasília pelo apoio na
realização dos ensaios laboratoriais.

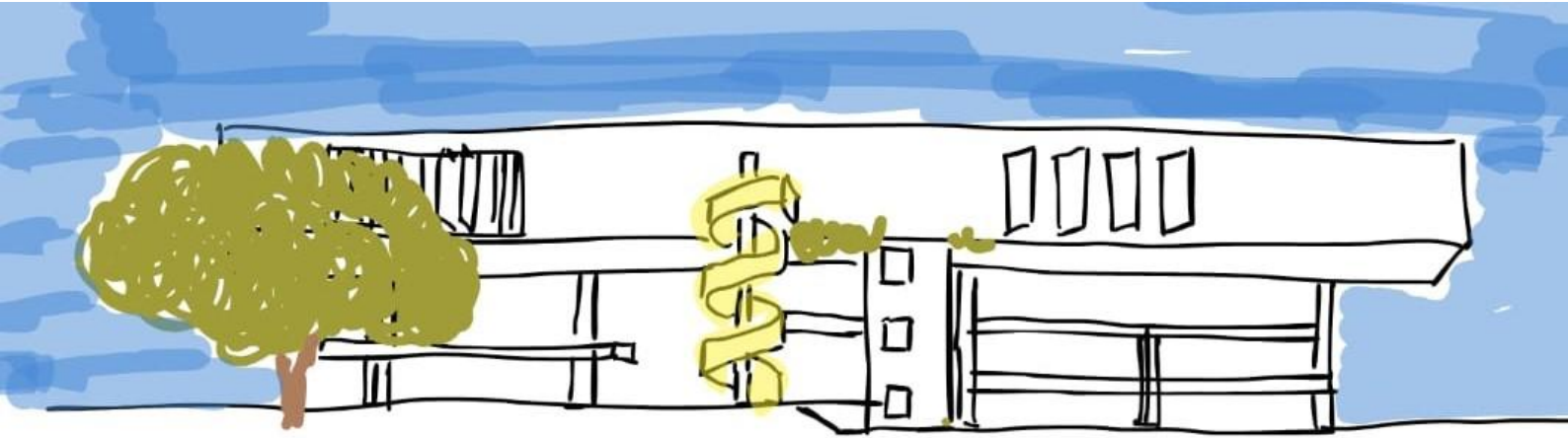
Ao Laboratório de Monitoramento Atmosférico e Climático do Instituto de Física
da Universidade de Brasília pelo apoio no monitoramento das condições microclimáticas
locais.

Ao Laboratório de Laminação do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília pelo
apoio na preparação de amostras para realização do programa experimental.

À MC-Bauchemie® pelo apoio na realização do programa experimental.

À Universidade de Brasília.

Fachada nordeste do Restaurante Universitário da Universidade de Brasília. Projeto – José Galbinski. Elaborado pelo autor.



KAMINSKI, Matheus Gregorio. **Proteção de superfícies de concreto aparente: diretrizes e parâmetros técnicos para intervenção**. 2026. 184 p. Dissertação (mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2026.

RESUMO

Esta dissertação investiga a proteção de superfícies de concreto aparente, com foco na formulação de diretrizes e parâmetros técnicos para intervenções em edificações da Arquitetura Moderna. Nessas edificações, o concreto aparente constitui simultaneamente a solução construtiva e a expressão arquitetônica, exigindo que as estratégias de conservação conciliem eficácia técnica com o respeito à significância cultural do bem. A base teórica articula o papel do concreto como linguagem material, os princípios contemporâneos de conservação do patrimônio e os aspectos de durabilidade, contemplando mecanismos de deterioração e manifestações patológicas recorrentes. O objetivo geral é estabelecer diretrizes e parâmetros técnico-científicos para intervenções conservativas em superfícies de concreto aparente, fundamentados na análise experimental do comportamento higrotérmico do material e no desempenho de produtos de proteção que preservem seus atributos e propriedades materiais, especialmente nas superfícies submetidas a processos de degradação expostas às condições do ambiente. A metodologia adota uma abordagem experimental aplicada ao patrimônio moderno da Universidade de Brasília (UnB), utilizando o Restaurante Universitário (RU/UnB) como estudo de caso. O programa experimental envolve ensaios *in loco* e laboratoriais do concreto para analisar os mecanismos de transporte de água líquida e vapor d'água em testemunhos do concreto original extraídos do local de estudo. De forma complementar, avalia-se o desempenho de um sistema hidrofugante à base de silano-siloxano e de um verniz acrílico, analisando comparativamente seus efeitos sobre a absorção capilar e a difusão de vapor. Os resultados indicam que a proteção deve ser orientada por diagnósticos precisos e critérios de compatibilidade físico-química, evitando soluções que alterem a aparência ou comprometam o funcionamento higrotérmico da fachada. Ao final, o estudo consolida diretrizes técnicas para apoiar a tomada de decisão, contribuindo para práticas de manutenção e conservação consistentes com as exigências do patrimônio moderno em concreto aparente.

PALAVRAS-CHAVE: Arquitetura Moderna. Superfície de concreto aparente. Conservação. Manutenção predial. Proteção. Manifestação patológica. Durabilidade.

KAMINSKI, Matheus Gregorio. **Protection of exposed concrete surfaces: guidelines and technical parameters for intervention**. 2026. 184 p. Thesis (master's). Faculty of Architecture and Urbanism, University of Brasília, Brasília, 2026.

ABSTRACT

This dissertation investigates the protection of exposed concrete surfaces, focusing on the formulation of guidelines and technical parameters for interventions in Modern Architecture buildings. In these buildings, exposed concrete constitutes both the constructive solution and the architectural expression, requiring conservation strategies that reconcile technical effectiveness with respect for the cultural significance of the heritage. The theoretical framework articulates the role of concrete as a material language, contemporary principles of heritage conservation, and durability aspects, covering deterioration mechanisms and recurring pathological manifestations. The general objective is to establish technical-scientific guidelines and parameters for conservative interventions on exposed concrete surfaces, based on experimental analysis of the material's hygrothermal behavior and the performance of protective products that preserve its attributes and material properties, especially on surfaces subjected to degradation processes exposed to environmental conditions. The methodology adopts an experimental approach applied to the modern heritage of the University of Brasília (UnB), using the University Restaurant (RU/UnB) as a case study. The experimental program involves in-situ and laboratory concrete tests to analyze the mechanisms of liquid water and water vapor transport in original concrete cores extracted from the study site. Complementarily, the performance of a silane-siloxane-based water-repellent system and an acrylic varnish is evaluated, comparatively analyzing their effects on capillary absorption and vapor diffusion. The results indicate that protection should be guided by precise diagnostics and physicochemical compatibility criteria, avoiding solutions that alter the appearance or compromise the hygrothermal functioning of the façade. Finally, the study consolidates technical guidelines to support decision-making, contributing to maintenance and conservation practices consistent with the requirements of modern exposed concrete heritage.

KEYWORDS: Modern Architecture. Exposed concrete surface. Conservation. Building maintenance. Protection. Water repellent. Pathological manifestation. Durability.

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AFNOR	<i>Association Française de Normalisation</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BCE	Biblioteca Central da Universidade de Brasília
CAA	Classe de Agressividade Ambiental
CCBB	Centro Cultural Banco do Brasil
CEN	<i>European Committee for Standardization</i> (Comitê Europeu de Normalização)
CEPLAN	Centro de Planejamento Oscar Niemeyer
CP	Corpo de Prova ou Cimento Portland
DIMAP	Diretoria de Manutenção Predial da Universidade de Brasília
EN	<i>European Standard</i> (Norma Europeia)
END	Ensaio não-destrutivo
EPI	Equipamento de Proteção Individual
FACE	Faculdade de Economia, Administração, Contabilidade e Gestão de Políticas Públicas
FAU	Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
IA	Inteligência Artificial
ICOMOS	Conselho Internacional de Monumentos e Sítios
INFRA	Secretaria de Infraestrutura da Universidade de Brasília
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IoT	<i>Internet of things</i> (Internet das coisas)
IPHAN	Instituto de Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

ITZ	Zona De Transição Interfacial
LEM	Laboratório de Ensaio de Materiais da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília
NBR	Norma Brasileira
pH	Potencial Hidrogeniônico ou de Acidez
PPGFAU/UnB	Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília
PU	Poliuretano
RU/UnB	Restaurante Universitário da Universidade de Brasília
UnB	Universidade de Brasília
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura
UR	Umidade Relativa
VOC	Compostos Voláteis Orgânicos

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Delineamento do percurso metodológico	26
Figura 2	Vista da fachada nordeste do Restaurante Universitário – RU/UnB	29
Figura 3	Vista do jardim interno do prédio da Reitoria da Universidade de Brasília	29
Figura 4	Pilar em concreto aparente do Palácio do Itamaraty, em Brasília, com sua forma curva e marcas das formas; ao fundo, Anexo IV da Câmara dos Deputados	31
Figura 5	<i>Unité d'Habitation</i> , Marselha, França, projetado por Le Corbusier	32
Figura 6	Vista do Ginásio do Clube Atlético Paulistano	34
Figura 7	Vista do Centro Cultural Banco do Brasil Brasília	34
Figura 8	Marcas dos painéis de formas e amarração nos brises da BCE/UnB: antes e depois dos serviços de recuperação	39
Figura 9	Vista da fachada do prédio da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo e de Design da Universidade de São Paulo – FAU-USP	39
Figura 10	Vista do edifício da CELPE, em Recife	41
Figura 11	Representação da equação química e esquemática do avanço da frente de carbonatação em estrutura de concreto armado e alteração do pH no tempo	47
Figura 12	Representação esquemática de modelo de corrosão do concreto armado em razão da penetração de agentes agressivos	48
Figura 13	Fundo de laje nervurada no interior do RU/UnB com fissuras, manchas de ferrugem, destacamento/desplacamento de cobrimento, e exposição de armaduras corroídas	48
Figura 14	Fundo de laje nervurada com manchas e colonização biológica por vegetação	50
Figura 15	Parede externa em concreto aparente com manchas de escoamento	50
Figura 16	Face externa da parede da torre anexa ao RU/UnB: presença de manchas causadas por eflorescências - escoamento esbranquiçado por acúmulo de sais – e sujeira, de cor mais escura	51

Figura 17	Fração molar atmosférica média global anual de dióxido de carbono de 1984 a 2023 em partes por milhão (ppm)	53
Figura 18	Anomalias da temperatura média global anual em relação a uma linha de base pré-industrial (1850–1900), apresentadas no período de 1850 a 2024, para 6 diferentes grupos de dados	54
Figura 19	Vista aérea da Praça Maior do <i>campus</i> Darcy Ribeiro	62
Figura 20	Vista da fachada noroeste da BCE/UnB	65
Figura 21	Vista do fundo da laje da cobertura norte da BCE antes dos serviços de recuperação	66
Figura 22	Vista do fundo da laje da cobertura norte da BCE após os serviços de recuperação	67
Figura 23	Vista da fachada nordeste do RU/UnB	69
Figura 24	Vista da fachada sudeste do RU/UnB	69
Figura 25	Vista de parte da fachada nordeste do RU/UnB	70
Figura 26	Vista da fachada nordeste do RU/UnB	71
Figura 27	Vista aérea da construção do RU/UnB	71
Figura 28	Vista panorâmica lateral da construção do RU/UnB	71
Figura 29	Construção do RU/UnB, vista da fachada nordeste com destaque para a escada em caracol	72
Figura 30	Projeto de corte do Restaurante Universitário – RU/UnB, fachada nordeste	73
Figura 31	Projeto de corte do Restaurante Universitário – RU/UnB, fachada noroeste	73
Figura 32	Planta baixa do nível terraço (38 96) do RU/UnB, com destaque para a torre de serviços	74
Figura 33	Destaque da torre de serviços do RU/UnB, com indicação da espessura, em centímetros, das paredes em concreto armado	74
Figura 34	Laje de cobertura da caixa d'água com fissuras, rachaduras e manchas	75
Figura 35	Laje da caixa d'água com deslocamento e armaduras em estado avançado de corrosão	75

Figura 36	Laje da caixa d'água com deslocamento e armaduras em estado avançado de corrosão	76
Figura 37	Andaimes ao redor da caixa d'água do RU para processo de demolição e recomposição	76
Figura 38	Início do processo de demolição da laje de cobertura para recomposição	76
Figura 39	Nova cobertura da caixa d'água do RU em estrutura e telhas metálicas	77
Figura 40	Fluxograma de execução do programa experimental	83
Figura 41	Imagem de satélite do RU/UnB, com destaque para a torre do anexo com indicação da fachada em estudo	87
Figura 42	Imagem aérea em perspectiva do RU/UnB, destaque para a torre do anexo	87
Figura 43	Vista de parte da fachada noroeste da torre do anexo com indicação dos locais de realização dos ensaios e retirada de testemunhos	87
Figura 44	Mapeamento dos locais de realização dos ensaios de esclerometria (em verde), absorção de água com tubos Karsten (em azul), e de retirada dos testemunhos (em vermelho)	88
Figura 45	Indicação do local de retirada dos testemunhos	90
Figura 46	Retirada de testemunhos do RU/UnB com uso de sonda rotativa do tipo serra copo	90
Figura 47	Mapeamento dos locais de retirada dos testemunhos	90
Figura 48	Testemunhos extraídos da parede noroeste da torre anexa ao RU/UnB	91
Figura 49	Detalhes das faces externas dos testemunhos	91
Figura 50	Indicação, em vermelho, da presença de material aglomerado à esquerda e vazio à direita na amostra CP01	93
Figura 51	Indicação, em vermelho, da presença de vazios entre agregados (ninho de concretagem) à esquerda e de fragmentos de argila aglomerados à direita na amostra CP03	93
Figura 52	Indicação, em vermelho, da presença de vazio à esquerda e de fragmentos de argila aglomerados à direita na amostra CP06	94

Figura 53	Indicação, em vermelho, da presença de fragmentos de argila aglomerados na amostra CP08	94
Figura 54	Indicação, em vermelho, da presença de fragmentos de aço das armaduras da parede de concreto na amostra CP05	95
Figura 55	Esquema de montagem do ensaio de determinação do módulo de elasticidade pelo sistema Sonelastic®	97
Figura 56	Esquema ilustrativo do ensaio de quatro pontos para medição de resistividade elétrica superficial	100
Figura 57	Disposição dos testemunhos dentro do recipiente para realização do ensaio de absorção de água por capilaridade conforme ABNT NBR 9779:2012	102
Figura 58	Testemunhos cortados em discos para realização do ensaio de permeância ao vapor d'água	106
Figura 59	Desenho esquemático do corte do recipiente indicando dimensões à esquerda e modelo 3D para realização do ensaio de permeância ao vapor à direita	107
Figura 60	Recipiente em plástico impresso em 3D para realização do ensaio de permeância ao vapor à esquerda e representação realista de corte da amostra à direita	108
Figura 61	Câmara de ensaio de permeância ao vapor, a partir da adaptação de uma estufa. Em destaque, esquema da dinâmica de transporte de vapor na amostra durante o ensaio de copo seco	110
Figura 62	Gráfico do fator de permeabilidade ao vapor de água do ar em função da pressão barométrica a 23°C	112
Figura 63	Distância em linha reta entre a estação meteorológica com equipamentos de medição de pressão barométrica e o LEM, marcada pela linha amarela	112
Figura 64	Mapeamento dos locais de aplicação dos produtos protetores e realização do ensaio de absorção com tubos Karsten	115
Figura 65	Imagem de cachimbo para permeabilidade, tubo de Karsten, de parede	116
Figura 66	Esquema ilustrativo do posicionamento do tubo de Karsten de parede, medidas aproximadas em milímetros	116

Figura 67	Imagem dos tubos Karsten fixados com PU e massa para calafetar na parede com sujidade para realização do ensaio	117
Figura 68	Mapeamento dos locais de realização do ensaio de esclerometria (em verde), de realização do ensaio de absorção de água com tubos Karsten (em azul), e de retirada dos testemunhos (em vermelho)	118
Figura 69	Realização do ensaio de esclerometria do concreto	119
Figura 70	Marcação dos 16 pontos de realização do ensaio de esclerometria do concreto	119
Figura 71	Gráfico de curva de conversão para o esclerômetro modelo MTK-1015 Metrotokyo®	120
Figura 72	Curva de conversão para o esclerômetro modelo MTK-1015 Metrotokyo®	122
Figura 73	Amostras sem alteração de coloração após aplicação de solução de fenolftaleína	129
Figura 74	Pontos esparsos de coloração rosada nas amostras indicando áreas não carbonatadas	129
Figura 75	Pontos esparsos de coloração rosada nas amostras indicando áreas não carbonatadas	130
Figura 76	Área 01 de ensaio de absorção de água com tubos Karsten 10 minutos após a aplicação de verniz acrílico	135
Figura 77	Área 01 de ensaio de absorção de água com tubos Karsten passado o tempo de secagem do verniz acrílico	135
Figura 78	Área 02 de ensaio de absorção de água com tubos Karsten 10 minutos após a aplicação de dispersão de silano-siloxano	136
Figura 79	Área 02 de ensaio de absorção de água com tubos Karsten passado o tempo de secagem da dispersão de silano-siloxano	136
Figura 80	Exemplo de amostra em disco em que há um agregado de dimensão igual a altura da amostra e indicação de caminho preferencial para transporte de massa ao redor do agregado, em azul	140
Figura 81	Diagrama representativo dos critérios de seleção de produtos de proteção	146

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

Ω	Ohm	Unidade de medida de resistência elétrica
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius	Unidade de medida de temperatura
mA	Miliampères	Unidade de medida de corrente elétrica
Pa	Pascal	Unidade de medida de pressão
ppm	Partes por milhão	Unidade de medida de concentração
V	Volts	Unidade de medida de diferença de potencial elétrico
m/s	Metros por segundo	Unidade de medida de velocidade
a/c		Indica a relação entre a quantidade de água e a quantidade de cimento presente nas argamassas ou concretos
f_{ck}		Resistência característica do concreto à compressão
ν		Coeficiente de Poisson
psi		Unidade de medida de pressão - libras por polegada quadrada
δ		Permeabilidade ao vapor d'água, expresso em $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
$\varnothing$		Temperatura em graus Celsius
θ		Umidade relativa do ar em numeral decimal
μ		Resistência à difusão de vapor d'água
S_d	Metros	Espessura da camada de ar equivalente em metros
W	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$	Permeância ao vapor d'água
Z	$(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})/\text{kg}$	Resistência ao vapor d'água
G	Kg/s	Taxa de fluxo de vapor d'água
g		Densidade de fluxo de vapor d'água, expresso em $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; ou unidade de medida de peso, expresso em gramas

p	Pa	Pressão barométrica
d	m	Espessura ou altura média da amostra
m		Massa da amostra ou do conjunto, expresso em gramas; ou unidade de medida de distância, expresso em metros
<i>Msat</i>	g	Massa saturada
<i>Ms</i>	g	Massa seca
<i>Mi</i>	g	Massa saturada em balança hidrostática

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Classificação de aberturas conforme espessura/dimensão	50
Tabela 2	Condições de ensaio de permeância ao vapor d'água indicadas no item 7.1, tabela 1 da norma ISO 12572:2016	108
Tabela 3	Dados geométricos e resultados do ensaio de determinação do módulo de elasticidade por meio das frequências naturais	123
Tabela 4	Valores de Absorção, Índice de Vazios, Massa Específica Seca, Massa Específica Saturada e Massa Específica Real	124
Tabela 5	Valores de resistividade elétrica superficial calculados para cada um dos testemunhos e após análise estatística para convergência de valores por tolerância percentual	127
Tabela 6	Valores de resistividade elétrica volumétrica calculados para cada um dos testemunhos e após análise estatística para convergência de valores por tolerância percentual	128
Tabela 7	Valores aproximados de profundidade de carbonatação nas faces interna e externa dos testemunhos	131
Tabela 8	Valores de massa total de água absorvida, em g, e coeficiente de capilaridade, em g/cm ² , por amostra e valor médio para cada conjunto de amostra (sem aplicação de produto de proteção, com aplicação de dispersão de silano-siloxano, e com aplicação de verniz acrílico)	131
Tabela 9	Apresentação de resultados do ensaio de permeância ao vapor d'água	133
Tabela 10	Apresentação de resultados do ensaio de absorção de água com tubos Karsten	134
Tabela 11.Ap.A1	Resultados Parciais do Ensaio de Esclerometria	162
Tabela 12.Ap.A1	Resultados Parciais do Ensaio de Absorção de Água por Tubos Karsten e Medição de Temperatura e Umidade Relativa do Ar	166
Tabela 13.Ap.B1	Resultados Parciais do Ensaio de Resistividade Elétrica Volumétrica	169
Tabela 14.Ap.B2	Resultados Parciais do Ensaio de Resistividade Elétrica Superficial	171

Tabela 15.Ap.B3	Resultados do Ensaio de Módulo de Elasticidade e Densidade	173
Tabela 16.Ap.B4	Resultados do Ensaio de Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica	174
Tabela 17.Ap.B5	Resultados Parciais do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade	175
Tabela 18.Ap.B6	Resultados Parciais do Ensaio de Permeância/Permeabilidade ao Vapor	176
Tabela 19.Ap.C1	Tabela resumo dos resultados dos ensaios de caracterização de concreto de resistência mecânica de 50 MPa e desempenho de produtos protetores, e comparativo com valores de referência	182
Tabela 20.An.A1	Especificações técnicas dos produtos de proteção utilizados na pesquisa	183

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	Objetivos Geral e Específicos	25
1.2	Abordagem Metodológica e Estrutura da Dissertação	26
2	A ARQUITETURA MODERNA E O CONCRETO	28
2.1	O Concreto Armado Aparente	30
2.2	Conservação do Patrimônio Edificado em Concreto	35
2.3	Características e Propriedades do Concreto	42
2.4	Manifestações Patológicas do Concreto	46
2.5	Proteção do Concreto e Aspectos Climáticos	52
2.6	Considerações Finais da Seção	59
3	CONSERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO MODERNO EDIFICADO DA UnB	60
3.1	O <i>campus</i> Darcy Ribeiro	60
3.2	A Biblioteca Central	64
3.3	O Restaurante Universitário	68
3.3.1	Condições de Exposição e Agressividade Ambiental	77
3.3.2	O Evento de Ruptura da Laje de Cobertura da Caixa d'Água	78
3.3.3	Documentação e Projetos Executivos do Restaurante Universitário	79
3.4	Considerações Finais da Seção	80
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	82
4.1	Amostragem dos Produtos de Proteção	84
4.2	Amostragem das Superfícies de Concreto	86
4.3	Extração, Preparo e Seleção de Testemunhos	89
4.4	Ensaio em Laboratório	95
4.4.1	Ensaio de Determinação de Módulo de Elasticidade	96

4.4.2	Ensaio de Resistividade Elétrica	97
4.4.2.1	Volumétrica	98
4.4.2.2	Superficial	100
4.4.3	Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade	101
4.4.4	Ensaio de Determinação de Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica	103
4.4.5	Ensaio de Permeância ao Vapor d'Água	105
4.4.6	Ensaio de Determinação de Profundidade de Carbonatação	112
4.5	Ensaio <i>in loco</i> – Ensaio Não Destrutivos (END) em Campo	113
4.5.1	Ensaio de Absorção de Água com Tubos Karsten	114
4.5.2	Avaliação de Resistência Mecânica Superficial por Esclerometria de Reflexão	117
4.6	Considerações Finais da Seção	120
5	RESULTADOS	121
5.1	Resistência Mecânica Superficial por Esclerometria de Reflexão	121
5.2	Determinação de Módulo de Elasticidade	122
5.3	Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica	124
5.4	Resistividade Elétrica	125
5.4.1	Superficial	126
5.4.2	Volumétrica	127
5.5	Profundidade de Carbonatação	128
5.6	Absorção de Água por Capilaridade	131
5.7	Permeância ao Vapor d'Água	132
5.8	Absorção de Água com Tubos Karsten	134
6	DISCUSSÃO	137
6.1	Caracterização do Material	137

6.2	Análise do Desempenho dos Produtos Protetores	143
6.3	Considerações Finais da Seção	145
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	148
	REFERÊNCIAS	151
	APÊNDICE A – Resultados de ensaios <i>in loco</i>	162
	APÊNDICE B – Resultados de ensaios de laboratório	169
	APÊNDICE C – Resumo de Ensaio de Caracterização do Material e Comparação de Desempenho de Produtos Protetores	182
	ANEXO A – Fichas técnicas dos produtos aplicados na pesquisa	183

1. INTRODUÇÃO

A Arquitetura Moderna, ao elevar o concreto armado à condição de linguagem plástica e estrutural, promoveu uma ruptura paradigmática com a tradição secular dos revestimentos ornamentais, expondo a materialidade em sua forma mais pura através do conceito de *béton brut*. Essa abordagem, que defendia a honestidade construtiva e a verdade dos materiais, transformou o concreto no suporte fundamental da racionalidade moderna, permitindo a exploração de vãos audaciosos e geometrias minimalistas que definiram a estética do século XX (Collins, 2004; Frampton, 2015).

A Arquitetura Moderna, caracterizada pela ruptura dos tipos tradicionais pré-determinados, pela racionalidade dos métodos de concepção e produção e pela exploração de novas técnicas e materiais, conferiu ao concreto aparente um protagonismo estético e funcional sem precedentes (Curtis, 2008; Prudon, 2008). As escolhas que valorizavam as superfícies aparentes, as juntas de forma legíveis e as texturas inerentes ao processo de concretagem, tornaram-se um dos pilares da identidade visual de inúmeras obras ao redor do mundo (Benevolo, 2011).

No entanto, a aparente perenidade desse material, frequentemente associada a uma ideia de manutenção praticamente nula, revelou-se um engano técnico e histórico. A ausência de camadas protetoras externas e as pequenas espessuras de cobrimento expõem a matriz de cimento e, indiretamente, as armaduras de aço aos agentes agressivos do meio ambiente. Essa exposição contínua propicia processos de deterioração que ameaçam não apenas a estabilidade física das estruturas, mas a própria essência estética e o valor cultural das obras (FIB, 2006; Prudon, 2008).

A vulnerabilidade do concreto aparente é agravada pela atuação de mecanismos físico-químicos complexos, sendo a carbonatação um dos principais vetores de degradação em ambientes urbanos. A reação do dióxido de carbono atmosférico com os produtos de hidratação do cimento reduz o pH do concreto, despassivando as armaduras e podendo desencadear a corrosão (Helene, 1992; Cascudo, 1997; Ribeiro, 2018). Esse processo é intensificado por fatores microclimáticos, como a umidade relativa e a temperatura, que regulam a taxa de difusão de gases e o transporte de água nos poros do material. A interação entre esses fatores ambientais e as características intrínsecas do material é um aspecto fundamental na conservação do concreto, que exige uma compreensão aprofundada das

dinâmicas de degradação em um cenário de alterações climáticas crescentes (Medeiros-Junior; Reichert, 2024).

Em edificações modernas, onde o cobrimento das armaduras muitas vezes foi executado no limite das exigências da época, a degradação pode acontecer precocemente por meio de manifestações patológicas visíveis na superfície do concreto, como fissuras, manchas de ferrugem e destacamentos. Tais anomalias comprometem a pele do edifício que, conforme Brandi (2004) e Kühl (2007), é o suporte material da imagem artística e histórica da obra, ameaçando a integridade do patrimônio edificado em concreto aparente.

A conservação desse patrimônio exige, portanto, um equilíbrio entre a recuperação técnica e a preservação da autenticidade. O Documento de Madri (ICOMOS, 2014) e as diretrizes mais recentes, como o Documento de Cádiz (ICOMOS, 2021), estabelecem que as intervenções em bens do patrimônio moderno devem priorizar a manutenção da integridade material e do partido arquitetônico original.

No caso do concreto aparente, isso significa que as ações de intervenção não devem alterar as propriedades cromáticas, a textura das formas ou a rugosidade superficial, sob pena de descaracterizar o valor que fundamenta a significância cultural do bem (Peixoto; Melo; Lira, 2021). É aqui que se insere o conceito de manutenção conservativa, que transcende a mera reparação, buscando preservar os atributos originais do material e a intenção estética do projeto (Kühl, 2018). Nesse sentido, a aplicação de sistemas de proteção, como hidrofugantes e vernizes, deve ser precedida de diagnósticos que considerem, por exemplo, a compatibilidade química e a permeabilidade ao vapor (Moraes, 2023), garantindo que a intervenção seja tecnicamente eficaz e historicamente respeitosa.

As medidas de proteção em superfícies de concreto não se limitam à aplicação de produtos, mas dependem da qualidade da execução – desde o traço ao adensamento, da cura às resistências – e das ações de manutenção, o que melhora a confiabilidade do desempenho ao longo do tempo (AFNOR, 2017). Souza e Ripper (1998) e Cai (2020) oferecem diretrizes técnicas relevantes sobre o uso de tratamentos superficiais, enfatizando a importância de soluções que permitam a manutenção da permeabilidade ao vapor do material, evitando o aprisionamento de umidade e a consequente aceleração de processos degradativos.

A manutenção preventiva, nesse contexto, atua como uma estratégia proativa para evitar o surgimento e a progressão das manifestações patológicas, por meio de inspeções

periódicas, limpeza regular e aplicação de tratamentos protetivos antes que a degradação se instale.

A gestão da durabilidade do concreto do patrimônio moderno transcende a engenharia diagnóstica tradicional, inserindo-se no campo da conservação preventiva e manutenção conservativa. Essa abordagem proativa e respeitosa exige uma compreensão aprofundada das interações entre os fatores de degradação ambiental e os valores patrimoniais, permitindo o desenvolvimento de diretrizes de manutenção sustentáveis (Stein, 2010). A limpeza do concreto aparente, por exemplo, não é apenas uma questão estética, mas influencia diretamente o desempenho higrotérmico, pois depósitos de fuligem, poeira, sais e biofilmes alteram cor, rugosidade e umidade superficial, aumentando a absorção e a colonização biológica (Romani *et al.*, 2022).

Portanto, a conservação das superfícies de concreto aparente compreende a manutenção integral de seus atributos e de suas características físicas e estruturais, exigindo a aplicação sistemática de técnicas de intervenção específicas à natureza dos danos identificados, sempre sob a égide da conservação preventiva.

O patrimônio edificado em concreto aparente da Universidade de Brasília (UnB) constitui um conjunto da Arquitetura Moderna, com um acervo relevante de prédios projetados por nomes como Oscar Niemeyer, Paulo Zimbres, José Galbinski e João da Gama Filgueiras Lima (Ficher, 2000; Schlee *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2024). Contudo, apesar de sua relevância arquitetônica, o passar do tempo trouxe desafios consideráveis para a integridade dessas construções. O envelhecimento natural dos materiais, somado à frequente falta de manutenção preventiva e corretiva, tem resultado em processos de degradação acelerada e pode, conseqüentemente, ocasionar perdas arquitetônicas e culturais significativas.

A intervenção realizada na Biblioteca Central da UnB entre 2024 e 2025 concentrou-se na recuperação estrutural da envoltória e na execução de procedimentos técnicos de limpeza e proteção da superfície. Contudo, não foram conduzidos estudos para verificar a compatibilidade dos produtos aplicados com as características higrotérmicas dos materiais, nem houve avaliação dos atributos arquitetônicos do edifício (Kaminski; Zanoni, 2025). Esse caso evidenciou a necessidade de pesquisas que integrem diagnóstico físico, caracterização de materiais, compreensão dos valores patrimoniais e métodos de proteção que contemplem os princípios da manutenção conservativa (Moura; Lira; Melo, 2025).

É nesse contexto de uma abordagem técnica e patrimonial integrada que este estudo se insere, posicionando-se como instrumento de apoio técnico e normativo para a conservação arquitetônica. Com esse propósito, o Restaurante Universitário da UnB foi selecionado como objeto de pesquisa para a obtenção e a sistematização de dados empíricos capazes de orientar procedimentos de conservação do concreto aparente, considerando suas particularidades materiais. Ao integrar ensaios laboratoriais e *in loco*, o estudo visa os procedimentos de manutenção preventiva e conservativa das superfícies de concreto aparente das edificações do patrimônio moderno da UnB.

Em síntese, o estudo baseado em medidas de proteção e durabilidade contribui para políticas e práticas de manutenção preventiva e conservativa que preservem tanto o desempenho físico quanto a relevância cultural das construções de arquitetura moderna. Dessa forma, consolida-se como um documento de suporte técnico-científico para tomada de decisões de conservação no *campus* Darcy Ribeiro, de modo a orientar intervenções compatíveis com os atributos dos edifícios.

1.1. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

Esta pesquisa tem como objetivo geral estabelecer diretrizes e parâmetros técnico-científicos para intervenções conservativas em superfícies de concreto aparente do patrimônio da Universidade de Brasília, fundamentados na análise experimental do comportamento higrotérmico do material e no desempenho de produtos de proteção que preservem seus atributos e propriedades materiais.

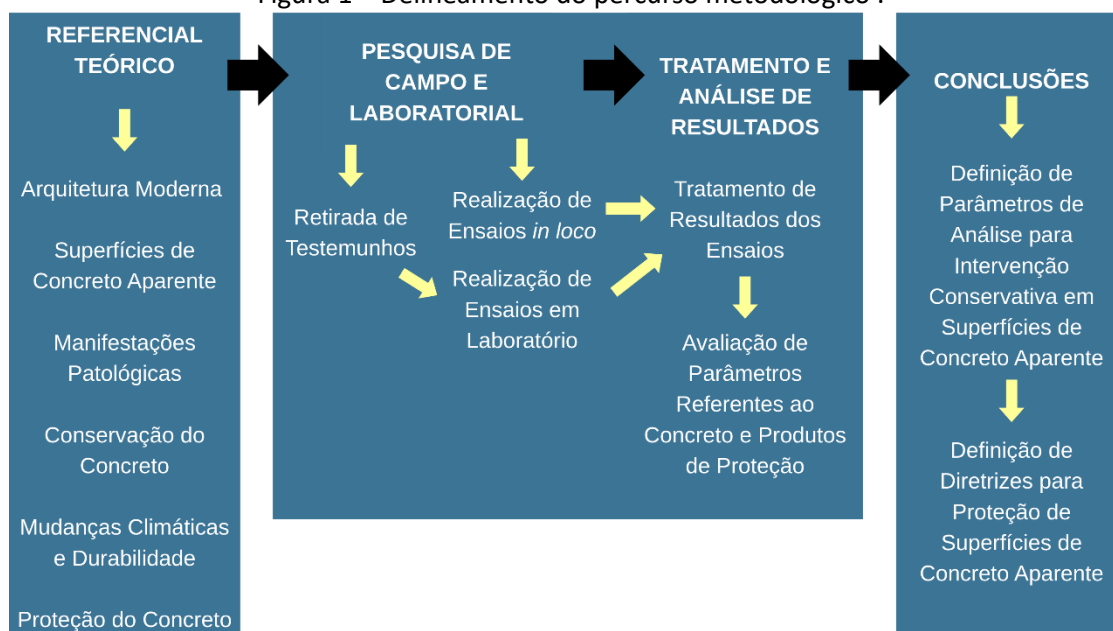
Os objetivos específicos desta pesquisa consistem em:

- (1) Caracterizar o concreto das paredes da fachada noroeste da torre da caixa d'água anexa ao RU/UnB a partir de ensaios *in loco* (ensaios não destrutivos – END) e de ensaios laboratoriais, com foco na investigação dos mecanismos de transporte de água líquida e de vapor d'água; e
- (2) Avaliar o desempenho higrotérmico do substrato mediante a aplicação de diferentes produtos de proteção.

1.2. ABORDAGEM METODOLÓGICA E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A abordagem metodológica adotada para o desenvolvimento desta pesquisa está fundamentada em um caráter experimental e analítico voltado à conservação e proteção do concreto aparente (Figura 1). O trabalho foi estruturado em etapas que compreendem desde o levantamento bibliográfico e a caracterização do substrato até a avaliação comparativa do desempenho de diferentes tratamentos protetores — especificamente sistemas de dispersão de silano-siloxano e verniz acrílico.

Figura 1 – Delineamento do percurso metodológico .



Fonte: Autor, 2026.

A estrutura deste trabalho está organizada em sete seções principais, que percorrem desde a fundamentação teórica até a análise e discussão dos resultados. A seguir, apresenta-se a síntese do conteúdo abordado em cada seção:

- Seção 1 – Introdução apresenta o problema de pesquisa, sua relevância e os objetivos geral e específicos, delineando o percurso metodológico e a organização geral da dissertação;
- Seção 2 – Arquitetura Moderna e o Concreto estabelece a base teórica e técnica do trabalho. Inicia com o enquadramento do concreto armado aparente e os desafios de sua conservação como patrimônio, avançando para a discussão sobre os impactos das mudanças climáticas na durabilidade das estruturas. Consolida, ainda, os fundamentos

sobre as propriedades do material, suas principais manifestações patológicas e as estratégias de proteção superficial para prolongamento da vida útil;

- Seção 3 – Conservação do Patrimônio Moderno Edificado da UnB situa a pesquisa no contexto do *campus* Darcy Ribeiro. Aborda o caso da Biblioteca Central e detalha o objeto central deste estudo, o Restaurante Universitário, conectando a teoria à realidade do patrimônio moderno de Brasília;
- Seção 4 – Programa Experimental descreve os procedimentos adotados, explanando a sistematização dos ensaios. Apresenta a seleção dos produtos, as amostragens e a execução dos ensaios laboratoriais e *in loco*;
- Seção 5 – Resultados organiza e expõe os dados obtidos, reunindo as evidências dos ensaios de caracterização do material e do desempenho dos tratamentos avaliados;
- Seção 6 – Discussão interpreta os resultados obtidos, relacionando os achados aos mecanismos de degradação e ao desempenho das intervenções propostas; e
- Seção 7 – Considerações Finais sintetiza os objetivos alcançados, destaca as principais conclusões do estudo e propõe recomendações para pesquisas futuras na área.

2. A ARQUITETURA MODERNA E O CONCRETO

A Arquitetura Moderna constitui um marco na história da disciplina ao romper com repertórios formais associados aos estilos históricos e ao afirmar novos modos de conceber, produzir e experimentar a edificação. Neste processo, a incorporação de materiais e técnicas construtivas inovadores não se deu apenas como consequência do desenvolvimento tecnológico, mas como parte de um projeto cultural que buscava redefinir a relação entre forma, função e construção (Curtis, 2008; Frampton, 2015).

Os princípios da Arquitetura Moderna diferenciam-se da arquitetura dita tradicional por um conjunto de aspectos distintivos que incluem, entre outros, o rompimento deliberado com regras compositivas e tipologias pré-determinadas, a racionalidade aplicada aos métodos de concepção e produção, a experimentação de novas técnicas e materiais, a associação direta entre requisitos funcionais e soluções formais, o rigor geométrico e a preferência por linhas limpas e minimalistas, o uso de formas e cores puras e a reconfiguração do espaço por meio de maior integração entre interior e exterior (Prudon, 2008; Hertzberger, 2011; Frampton, 2015).

Nesse contexto, a racionalidade dos métodos construtivos implica submeter o edifício a uma lógica sistêmica em que estrutura, vedações, instalações e demais subsistemas são concebidos como partes coordenadas de um mesmo organismo, orientado à simplificação, padronização e controle do processo, com redução de variabilidade em obra, encurtamento de prazos e maior previsibilidade de desempenho (Benevolo, 2011; Frampton, 2020).

No Brasil, o movimento encontrou condições particularmente favoráveis para sua difusão, resultando em um acervo expressivo de obras hoje reconhecidas como patrimônio cultural, o que aproxima a discussão de temas contemporâneos de salvaguarda do legado moderno (Prudon, 2008; DOCOMOMO, 2022). Entre os materiais que se consolidaram como emblemas desse período, destaca-se o concreto, cuja adoção sem o uso de revestimentos reforçou a noção de honestidade construtiva e ampliou as possibilidades de expressão plástica e estrutural, tornando visíveis as marcas do processo construtivo e a lógica resistente que sustenta o objeto arquitetônico (Curtis, 2008; Prudon, 2008; Contier, 2013).

Em termos práticos, essa racionalidade se expressa na adoção de malhas estruturais regulares, na coordenação modular entre componentes, na repetição de peças e procedimentos, no emprego de materiais segundo suas características naturais e na supressão

de ornamentos destituídos de função técnica, conduzindo a soluções em que lajes planas, pilotis, brise-soleils, esquadrias seriadas e, sobretudo, o concreto aparente tornam explícitos o método e a construção (Le Corbusier, 2004; Bruand, 2006), tal qual ocorre no Restaurante Universitário da Universidade de Brasília (Figura 2) e no prédio da Reitoria (Figura 3).

Figura 2 – Vista da fachada nordeste do Restaurante Universitário – RU/UnB.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 3 – Vista do jardim interno do prédio da Reitoria da Universidade de Brasília.



Fonte: UnBImagens, Beto Monteiro, 2024.

Tal perspectiva reforça a compreensão de que a eficiência construtiva e a eliminação de excessos estéticos constituem condições para a valorização da racionalidade e da funcionalidade, em consonância com demandas práticas e culturais do próprio movimento moderno (Loos, 1989; Banham, 2018). Ao mesmo tempo, a disseminação do concreto armado e de seus sistemas construtivos se relaciona a uma trajetória técnica mais ampla, que envolve

o desenvolvimento histórico do material e de seus modos de cálculo e emprego em edifícios (Berg, 2005).

Ao conferir protagonismo à estrutura, a Arquitetura Moderna atribui ao concreto aparente o papel de suporte simultaneamente técnico e expressivo: superfícies expostas, juntas de fôrma legíveis, marcas de sarrafos e texturas passam a integrar a linguagem arquitetônica como evidências do fazer construtivo, enquanto pórticos regulares, lajes planas, cascas e elementos nervurados respondem tanto a intenções formais quanto às trajetórias de esforços e à economia de material (Curtis, 2008; Prudon, 2008).

Esse protagonismo do concreto, entretanto, não se reduz ao plano estético, pois sua utilização intensiva e sua exposição direta às condições de uso e ao ambiente introduzem desafios específicos relacionados ao desempenho e à conservação das superfícies, demandando abordagens compatíveis com a materialidade e com os valores culturais associados às obras da Arquitetura Moderna (Gaudette; Slaton, 2007; Croft; Macdonald, 2019; Muñoz; Tognon, 2022).

É nessa interseção entre ideário arquitetônico, técnica construtiva e permanência material que esta seção se insere, examinando a relação entre a Arquitetura Moderna e o concreto aparente em suas implicações estéticas, técnicas e ideológicas.

2.1. O CONCRETO ARMADO APARENTE

A Arquitetura Moderna consolidou o concreto como base material e técnica para a reorganização de programas, espaços e sistemas construtivos ao longo do século XX. Nesse enquadramento, o concreto deixa de ser apenas um meio estrutural e passa a constituir, de forma explícita, uma dimensão visível do projeto: o concreto aparente (Collins, 2004; Curtis, 2008; Prudon, 2008).

No repertório da Arquitetura Moderna, o concreto adquiriu centralidade por permitir articulações formais e espaciais coerentes com ideais de funcionalidade, economia de meios e aproximação entre forma e estrutura (Figura 4). Em diferentes contextos, essas premissas favoreceram o entendimento do material como suporte para uma linguagem arquitetônica associada à racionalização (Collins, 2004; Curtis, 2008; Prudon, 2008).

Figura 4 – Pilar em concreto aparente do Palácio do Itamaraty, em Brasília, com sua forma curva e marcas das formas; ao fundo, Anexo IV da Câmara dos Deputados.



Fonte: autor, 2026.

É nesse ambiente que se consolida a noção de concreto aparente entendida como o emprego do concreto como material estrutural mantido exposto, sem revestimentos ou acabamentos aplicados para ocultar sua superfície. O elemento construído passa a apresentar, de modo direto, a textura e as cores do material, o desenho das juntas e das marcas das formas, a evidência do processo de moldagem, tornando sua aparência parte do partido arquitetônico (Croft, 2004; Curtis, 2008; Prudon, 2008).

A adoção do concreto aparente intensifica-se, em especial, a partir da década de 1950, quando diferentes arquitetos exploram a expressividade do material. Essa opção não se reduz a um resultado visual; ela envolve uma forma de afirmar a materialidade e a lógica construtiva, o modo de fazer, como componentes da leitura arquitetônica (Curtis, 2008; Prudon, 2008; Croft, 2004).

Ao assumir o concreto como superfície final, a obra incorpora marcas e variações produzidas pelo próprio processo. Em vez de serem necessariamente interpretados como defeitos, esses sinais podem compor a dimensão expressiva do edifício, conforme discutido em abordagens que associam o concreto aparente à ideia de franqueza e honestidade material (Contier, 2013; Croft, 2004).

A presença do concreto aparente conecta-se, ainda, ao repertório brutalista, que ganha projeção sobretudo no período do pós-guerra e em décadas subsequentes, valorizando a materialidade direta e a evidência de soluções estruturais. Nesse contexto, a superfície

adquire papel ativo na comunicação do edifício, não apenas como adorno, mas como parte de sua constituição, leitura e interpretação (Bruand, 2006; Banham, 2018; Frampton, 2020).

A circulação internacional desse vocabulário encontra referências em obras associadas às experiências iniciais da Arquitetura Moderna, nas quais o concreto participa tanto da construção, da estrutura, quanto da expressão arquitetônica. Exemplos como a *Unité d'Habitation* (Figura 5), em Marselha, na França, são frequentemente mobilizados como marcos para compreender a projeção e a difusão de uma estética vinculada ao concreto aparente (Curtis, 2008; Prudon, 2008; Croft, 2004).

Figura 5 – *Unité d'Habitation*, Marselha, França, projetado por Le Corbusier.



Fonte: Paul Kozlowski, 1997 (*Fondation Le Corbusier*).

Na Arquitetura Moderna, difundiu-se também a percepção de que o concreto ofereceria durabilidade elevada e baixa demanda de manutenção, mesmo sob exposição às intempéries. Com o tempo, entretanto, essa expectativa mostrou limites, uma vez que a permanência do material depende de condições de projeto, execução, ambiente e cuidado contínuo, tema presente em debates sobre a conservação de concretos históricos e modernos (Prudon, 1981, 2008; Curtis, 2008).

Do ponto de vista construtivo, o concreto aparente depende de decisões que atravessam o ciclo completo da obra, desde o traço e o adensamento até o regime de cura e o desmolde. Como o acabamento coincide com a própria superfície moldada, escolhas

relativas a formas, desmoldantes e procedimentos de cura influenciam o desempenho e a aparência do elemento ao longo do tempo (Helene, 1992; Isaia *et al.*, 2011; Odgers, 2012).

Essa dependência aumenta a relevância das variações de técnica, como moldagem *in loco* ou pré-fabricação, além do tipo de forma, do padrão de juntas e do acabamento pretendido. Tais variáveis podem repercutir no modo como a superfície envelhece, no ritmo de degradação e na susceptibilidade a manifestações visuais e físicas (Isaia *et al.*, 2011; Odgers, 2012; ACI, 2016a, 2016b).

O detalhamento arquitetônico, por sua vez, interfere diretamente na exposição e no escoamento de água, condicionando ciclos de umedecimento e secagem, e favorecendo ou reduzindo o acúmulo de sujidades na superfície. Elementos como caimentos, pingadeiras, arremates e dispositivos de drenagem constituem parte do sistema que garante o desempenho do conjunto e ganham peso quando a superfície permanece exposta, o que se relaciona a recomendações técnicas e normativas para durabilidade, e reparo ou proteção (ACI, 2016a, 2016b; CEN, 2005).

Em edifícios da Arquitetura Moderna, esse detalhamento pode apresentar soluções menos rigorosas do que padrões atualmente exigidos, o que, em determinadas situações, intensifica a ação de água de chuva e a deposição de partículas. Assim, a leitura do concreto aparente exige considerar a articulação entre intenção arquitetônica projetada e respostas materiais às condições ambientais do meio em que a edificação está inserida (Prudon, 2008; Odgers, 2012).

Além das questões físico-construtivas, a superfície do concreto aparente participa do conforto ambiental e do desempenho funcional dos edifícios. Depósitos de fuligem, poeira, sais e biofilmes alteram cor, rugosidade e umidade superficial, com efeitos sobre albedo, retenção hídrica e colonização biológica, o que reforça a necessidade de compreender a limpeza como uma prática com implicações técnicas e perceptivas (Gaudette; Slaton, 2007; Prudon, 2008).

A presença de sujidades e alterações cromáticas também incide sobre a percepção do público e a aceitação social do concreto aparente. Mesmo quando a adoção do material se alinha a intenções de clareza construtiva, a expressão desprovida de revestimentos pode ser interpretada, em certos contextos, como aspereza, inacabamento ou frieza, compondo um

quadro ambivalente em torno do brutalismo e de suas continuidades (Prudon, 2008; Banham, 2018; Frampton, 2020).

No Brasil, a utilização do concreto aparente consolidou-se em obras que se tornaram referências na historiografia da Arquitetura Moderna. Exemplificam essa trajetória o edifício da FAU-USP (1948), de João Batista Vilanova Artigas, o Ginásio do Clube Atlético Paulistano (1958) (Figura 6), de Paulo Mendes da Rocha, e o Centro Cultural Banco do Brasil – CCBB (antigo Centro de Formação do Banco do Brasil) (1993) (Figura 7), de Oscar Niemeyer. Nesses edifícios, o concreto aparente participa da definição espacial composta pela estrutura em si e da expressão arquitetônica do conjunto (Curtis, 2008; Prudon, 2008; Contier, 2013).

Figura 6 – Vista do Ginásio do Clube Atlético Paulistano.



Fonte: Relae Design, sem data.

Figura 7 – Vista do Centro Cultural Banco do Brasil Brasília.



Fonte: Autor, 2026.

O conjunto das discussões apresentadas sobre o concreto aparente evidencia que sua adoção vai além de uma escolha estética, envolvendo condicionantes materiais, construtivos e de desempenho que influenciam diretamente sua conservação ao longo do tempo. Compreender essas particularidades é fundamental para embasar decisões de intervenção coerentes com a natureza desse material e com as demandas de preservação.

2.2. CONSERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO EDIFICADO EM CONCRETO

A conservação do patrimônio edificado em concreto demanda uma abordagem que considere simultaneamente o comportamento material, as condições de exposição e os valores culturais associados a cada obra. Diferentemente de intervenções orientadas apenas pelo desempenho técnico, a conservação exige compreender como propriedades intrínsecas do concreto —suas respostas a variações ambientais e sua suscetibilidade a agentes de deterioração — se articulam com atributos estéticos e históricos que caracterizam o concreto aparente (Curtis, 2008; Prudon, 2008; DOCOMOMO, 2022).

Quando essas obras passam a ser compreendidas como patrimônio, o concreto aparente deixa de figurar apenas como recurso de linguagem arquitetônica e passa a configurar um tema de conservação, no qual o estado superficial e o desempenho material se tornam parte do debate sobre a permanência do bem. A experiência acumulada em edifícios da Arquitetura Moderna evidencia que manutenção irregular ou ausente e intervenções pontuais podem acelerar perdas materiais e alterar a leitura do projeto, sobretudo quando o reconhecimento social e institucional da valoração cultural permanece instável (Prudon, 2008; Guimarães, 2019; DOCOMOMO, 2022).

Nesse cenário, o concreto aparente passa a ser tratado como um suporte sensível, no qual pequenas variações de limpeza, reparo ou proteção podem produzir efeitos desproporcionais na percepção do conjunto e no entendimento público de sua autenticidade e integridade. Somam-se a isso as pressões de uso contínuo, adequações normativas e expectativas de desempenho contemporâneo, que frequentemente tensionam a preservação da integridade material e demandam processos decisórios mais transparentes e participativos (DOCOMOMO, 2022).

Essa mudança de enquadramento exige compreender a conservação como campo que integra técnica e cultura, pois o edifício passa a ser interpretado como documento material, no qual superfícies, texturas e marcas de execução participam do significado da obra. Assim, decisões de conservação não se limitam à correção de danos, mas lidam com a forma como a intervenção reposiciona o edifício entre autenticidade e integridade, uso contemporâneo e memória construída (Brandi, 2004; Kühl, 2004; ICOMOS, 2013). Nessa perspectiva, cada escolha de material, método de limpeza ou sistema de proteção implica uma tomada de posição sobre o que deve permanecer visível, o que pode ser reintegrado e o que deve ser apenas estabilizado.

A intervenção, portanto, precisa ser justificada não apenas por critérios de desempenho, mas por sua coerência com o valor documental e com o modo como o bem comunica sua história material (Brandi, 2004). Também se torna indispensável estabelecer limites para a normalização estética, reconhecendo que a busca por uniformidade pode entrar em conflito com o princípio de respeito às estratificações e às evidências do processo construtivo (Kühl, 2004). Por fim, ao incorporar cartas e recomendações internacionais, a conservação tende a enfatizar rastreabilidade, reversibilidade possível e compatibilidade, reduzindo o risco de soluções tecnicamente eficientes, mas culturalmente inadequadas (ICOMOS, 2013). Desse modo, a manutenção deixa de ser uma prática meramente operacional e passa a ser compreendida como parte da política cultural associada ao edifício.

No concreto aparente, essa condição documental se torna particularmente sensível porque a superfície exposta opera como acabamento e, simultaneamente, como registro do processo construtivo. A consequência é que operações aparentemente rotineiras podem repercutir de modo direto na leitura arquitetônica, afetando tonalidade, rugosidade e legibilidade das juntas, e das marcas de formas e amarrações (Kühl, 2004; Gaudette; Slaton, 2007; Prudon, 2008). Além disso, intervenções localizadas tendem a produzir ilhas visuais, com contrastes de cor e textura que permanecem legíveis mesmo após tentativas de homogeneização, sobretudo em concretos envelhecidos e heterogêneos, como mostram as Figuras 8 e 9.

Por esse motivo, recomenda-se que as ações sejam precedidas por ensaios em painéis piloto, documentação fotográfica comparativa e avaliação de efeitos após períodos de intemperismo, evitando decisões baseadas apenas no desempenho imediato (Prudon, 2008).

Em síntese, conservar concreto aparente exige reconhecer que a materialidade visível é parte do valor cultural do bem, e que o controle técnico da umidade, da fissuração, da corrosão e de outros mecanismos de degradação deve caminhar junto com a preservação da leitura arquitetônica e do registro de obra inscrito na superfície (Kühl, 2004).

A materialidade do concreto torna visíveis processos de envelhecimento associados a ambiente e uso, de modo que escurecimentos, variações cromáticas e alterações superficiais requerem avaliação antes de serem classificados como sujidade ou degradação. A distinção entre degradação nociva e pátina do tempo, frequentemente discutida no campo da conservação, ganha aqui contornos práticos, pois orienta o grau e a natureza das ações sobre a superfície (Kühl, 2004; Gaudette; Slaton, 2007; ICOMOS, 2013).

A literatura em conservação do concreto aponta, ainda, que a interpretação do estado de conservação depende do entendimento do sistema construtivo e de seus detalhes, uma vez que o comportamento do material resulta de interações entre cobertura, fissuração, presença de armaduras e condições de exposição. Assim, o diagnóstico tende a incorporar leitura visual, registro de danos e análises compatíveis com o tipo de elemento e sua função no conjunto arquitetônico (Helene, 1992; Bussell, 2007; Gaudette; Slaton, 2007).

Além de obras e manuais, a consolidação de normas e padrões técnicos também influencia as tomadas de decisão, ao estabelecer terminologias, requisitos gerais e critérios para produtos e sistemas de proteção e reparo. Embora tais instrumentos não substituam o juízo crítico no patrimônio, eles oferecem referências para qualificação de procedimentos e avaliação de compatibilidade, especialmente em intervenções que envolvem reparo de concreto e proteção superficial (CEN, 2005; Bussell, 2007).

Nesse quadro, a conservação do concreto aparente se estrutura em um conjunto de princípios frequentemente reiterados no debate patrimonial, com destaque para diretrizes internacionalmente difundidas que orientam intervenções em monumentos e sítios. A Carta de Veneza, por exemplo, constitui uma referência histórica para a discussão sobre preservação e intervenção, especialmente ao enfatizar a necessidade de fundamentação crítica e de respeito ao valor histórico dos bens (ICOMOS, 1964).

Ao aproximar esses referenciais do universo da Arquitetura Moderna, autores que discutem restauro e conservação do moderno apontam que a intervenção deve reconhecer especificidades materiais e construtivas do período, bem como a tensão entre manutenção

do caráter original e demandas contemporâneas de uso, desempenho e atualização. Nesse sentido, o debate recente sobre restauro no moderno mostra como diretrizes gerais se desdobram em escolhas objetivas quando se trata de superfícies expostas e sistemas construtivos do século XX (Brandi, 2004; Bierrenbach, 2017; DOCOMOMO, 2022).

Um primeiro eixo de orientação é a delimitação de escopo, evitando substituições extensivas quando alternativas localizadas e compatíveis alcançam o objetivo da conservação. No concreto aparente, esse eixo se traduz em ações que procuram tratar causas e efeitos de degradação sem redefinir, por meio de padronizações, a leitura da superfície enquanto registro do processo construtivo e do envelhecimento (Brandi, 2004; Kühl, 2004; Prudon, 2008).

Um segundo eixo diz respeito à possibilidade de retrabalho e ao cuidado com soluções que impeçam revisões futuras. Ainda que a reversibilidade plena nem sempre seja viável em reparos de concreto, o debate patrimonial enfatiza escolhas que preservem margem de ajuste e minimizem impactos irreversíveis sobre o original, sobretudo em áreas onde o valor documental da superfície se mostra mais relevante (ICOMOS, 1964; Brandi, 2004; ICOMOS, 2013).

Um terceiro eixo se refere à documentação como parte do processo de conservação, abrangendo registros das condições anteriores, dos procedimentos adotados e dos resultados obtidos, de modo a compor uma memória técnica do edifício e apoiar futuras decisões. Em bens modernos de grande escala, a documentação se articula ainda às estratégias de gestão, que integram diagnóstico, planos de gestão de manutenção e diretrizes para intervenções sucessivas (ICOMOS, 1964; Pinheiro; Oliveira, 2017; DOCOMOMO, 2022).

Outro eixo central é a compatibilidade entre materiais, considerada tanto sob aspectos físico-químicos quanto sob efeitos de aparência e desempenho. No concreto aparente, compatibilidade envolve atenção à porosidade, permeabilidade, textura, comportamento higrotérmico e interação com armaduras, evitando que o reparo introduza tensões, variações cromáticas abruptas ou mecanismos de degradação acelerada (Helene, 1992; Bussell, 2007; ACI, 2016a, 2016b).

A distinguibilidade das intervenções, frequentemente discutida no campo patrimonial, também se coloca no concreto aparente, embora de forma particular: trata-se menos de criar contrastes visuais e mais de evitar que a recomposição produza uma homogeneização que

apague a leitura do processo construtivo. Em muitos casos, a distinção ocorre por meio de registro técnico e por escolhas mais discretas, como nos brises em concreto da Biblioteca Central da UnB (Figura 8), reconhecíveis ao olhar especializado, sem converter a superfície em um mosaico visualmente fragmentado, como se observa nas empenas do prédio da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo e de Design da Universidade de São Paulo – FAU-USP (Figura 9) (Brandi, 2004; Kühn, 2004; ICOMOS, 2013).

Figura 8 – Marcas dos painéis de formas e amarração nos brises da BCE/UnB: antes e depois dos serviços de recuperação.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 9 – Vista da fachada do prédio da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo e de Design da Universidade de São Paulo – FAU-USP.



Fonte: Autor, 2024.

O debate sobre autenticidade, por sua vez, se relaciona ao entendimento de que valores estéticos e históricos não se dissociam da materialidade existente e de seus sinais de

permanência no tempo. No concreto aparente, essa perspectiva implica avaliar com cuidado limpezas intensivas e tratamentos superficiais que alterem de modo amplo a tonalidade ou a textura, sobretudo quando tais alterações reconfiguram a percepção do conjunto (Brandi, 2004; Kühl, 2004; Prudon, 2008).

Em termos operacionais, a conservação do concreto também exige reconhecer que o material do século XX apresenta diversidade de traços, técnicas de execução e soluções de detalhamento, com impactos diretos em desempenho e degradação. Essa diversidade torna particularmente importante a aproximação entre diagnóstico, leitura histórica e especificação de procedimentos de reparo, evitando a adoção de receitas prontas desconectadas do edifício em análise (Helene, 1992; Institution of Civil Engineers, 1996; Bussell, 2007).

A ampliação do repertório técnico para intervenções em concreto aparente, incluindo reparo e recomposição de superfícies, aparece em dossiês e estudos dedicados ao tema, que discutem métodos de reparo, critérios de acabamento e desafios de compatibilização estética. Essas referências ajudam a compreender por que o concreto aparente exige decisões simultaneamente construtivas e perceptivas, sobretudo quando se busca reduzir impactos sobre a leitura e interpretação dos atributos do edifício (Jonge; Doolaar, 1998; Gaudette; Slaton, 2007).

No âmbito da Arquitetura Moderna, debates críticos também apontam que a conservação do concreto envolve enfrentar expectativas históricas sobre durabilidade e baixa manutenção, frequentemente associadas ao imaginário do material. A experiência acumulada demonstra, entretanto, que a permanência do concreto depende de condições de exposição, qualidade de execução e estratégias regulares de cuidado, sob pena de perdas funcionais e alterações expressivas ao longo do tempo (Prudon, 1981; Curtis, 2008; Prudon, 2008).

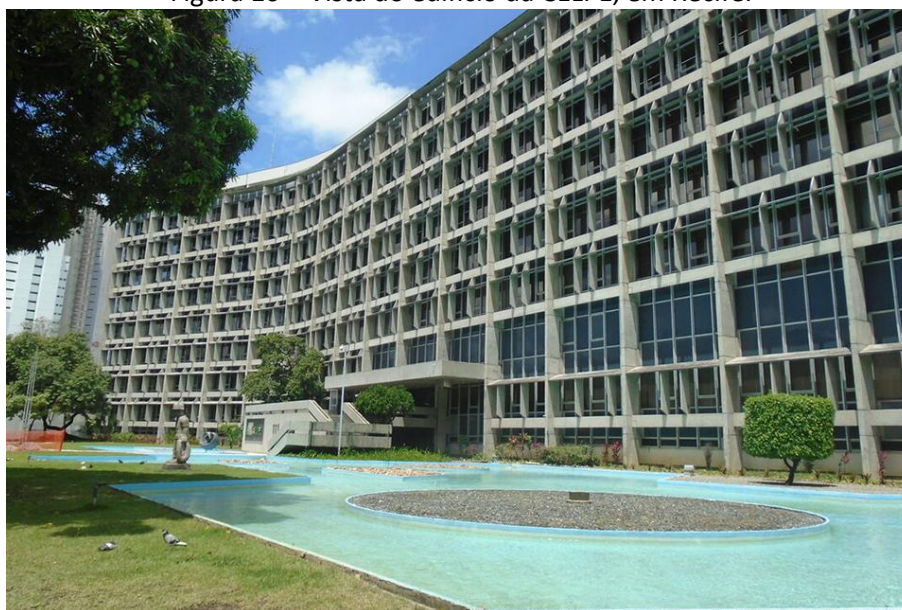
A literatura de casos contribui para esse entendimento ao explicitar decisões e consequências de intervenções reais, incluindo dilemas de acabamento, extensão do reparo e compatibilização de materiais. Estudos reunidos no âmbito do Getty Conservation Institute, por exemplo, mostram como diferentes contextos levam a soluções diversas e reforçam a importância de vincular procedimentos a diagnósticos específicos (Croft; Macdonald, 2019; Aument, 2019).

Nesse conjunto de experiências, a *Unité d'Habitation*, em Marselha, frequentemente citada na historiografia da Arquitetura Moderna, figura como referência para discutir

conservação de concreto em edifícios emblemáticos e amplamente reconhecidos. A análise de intervenções nesse edifício contribui para evidenciar que a conservação do concreto aparente envolve, ao mesmo tempo, estabilidade material, uso continuado e preservação de atributos que sustentam a significância cultural da obra (Curtis, 2008; Prudon, 2008; Croft; Macdonald, 2019).

No Brasil, casos como da intervenção no edifício da CELPE em Recife (Figura 10), de Vital Pessoa de Melo e Reginaldo Esteves (Pinto, 2012), também aparecem em estudos de prática conservativa, permitindo discutir desafios em obras com alto grau de reconhecimento cultural e presença expressiva do concreto. Esses exemplos reforçam que a conservação do concreto no patrimônio moderno exige compatibilizar ações técnicas com uma leitura crítica do bem, considerando efeitos de procedimentos sobre a materialidade e sobre a percepção do conjunto (Marques, Flores, 2016; Pellegrini, 2017; Croft; Macdonald, 2019).

Figura 10 – Vista do edifício da CELPE, em Recife.



Fonte: Diário de Pernambuco, 2025.

Assim, ao situar a conservação do patrimônio edificado em concreto como um campo que articula desempenho material, valores culturais e práticas de gestão contínua, estabelece-se a base conceitual necessária para compreender a complexidade das decisões de intervenção nesse tipo de acervo. Essa perspectiva evidencia que a proteção do concreto aparente exige tanto a leitura crítica de seus atributos físicos quanto a consideração das dinâmicas ambientais que afetam sua durabilidade ao longo do tempo.

2.3. CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO CONCRETO

A conservação da Arquitetura Moderna requer que a proteção do concreto seja antecedida pela identificação dos condicionantes materiais e construtivos que influenciam tanto a degradação quanto a eficácia das intervenções. Nessa perspectiva, compreender características e propriedades do concreto — sobretudo aquelas associadas à entrada e ao transporte de agentes agressivos — constitui etapa necessária para fundamentar escolhas de proteção compatíveis com a durabilidade e com a preservação de atributos materiais, particularmente em superfícies de concreto aparente.

O concreto armado pode ser entendido como a associação entre concreto massa (cimento, água e agregados, com ou sem adições e aditivos) e armaduras de aço, combinando a elevada resistência à compressão do concreto com a resistência à tração do aço. Essa composição explica sua ampla adoção ao longo do século XX e, ao mesmo tempo, evidencia que seu desempenho não se resume à resistência mecânica: ele depende de propriedades do compósito e, em especial, do comportamento da região de cobrimento e da interface com o meio. Assim, parâmetros de projeto e execução assumem papel determinante para a durabilidade, o que é especialmente relevante no patrimônio em concreto aparente, no qual a superfície faz parte do partido arquitetônico (Collins, 2004; Isaia *et al.*, 2011; ABNT, 2024).

Para a temática da conservação, destaca-se a microestrutura porosa do concreto endurecido, que condiciona absorção, permeabilidade, difusividade e capilaridade, determinando a facilidade com que água, CO₂ e íons agressivos se deslocam na matriz cimentícia. Esses mecanismos governam fenômenos decisivos para a durabilidade, como a progressão de frentes de carbonatação e a penetração de cloretos que, em condições específicas, tornam os ambientes favoráveis à corrosão das armaduras. Em termos práticos, a ação de conservação só pode ser corretamente dimensionada quando se compreende como o concreto, enquanto meio poroso, se comporta em ciclos de umedecimento e secagem e nas condições ambientais em que está inserido (Cascudo, 1997; Possan, 2010; Serralheiro *et al.*, 2017).

As propriedades do material relacionadas aos mecanismos de transporte são fortemente influenciadas por variáveis do concreto no estado fresco e por condições de execução, com destaque para a relação água/cimento, o adensamento, a cura e o acabamento

superficial. Em edificações executadas com menor nível tecnológico e maior variabilidade em obra, são frequentemente relatadas condições como relações água/cimento mais elevadas e uso de formas de madeira serrada, fatores que podem resultar em porosidade superficial acentuada e maior permeabilidade. Tais características têm implicações diretas para a durabilidade e, de modo importante para este estudo, podem reduzir a efetividade de produtos de proteção com baixa capacidade de penetração, exigindo que a seleção de tratamentos se apoie na caracterização do substrato existente (Neville; Brooks, 2010; Mehta; Monteiro, 2014; Dyer, 2015).

A rede de poros do concreto — entendida não apenas como a presença de vazios, mas como sua distribuição, conectividade e tortuosidade — constitui um dos principais condicionantes da durabilidade, pois controla os mecanismos de transporte (ISO, 2019) responsáveis pelo ingresso e pela migração de agentes agressivos. Quando a porosidade forma caminhos conectados, aumenta-se a permeabilidade e a absorção por capilaridade, favorecendo a penetração de água e a difusão de CO₂ e íons, o que acelera processos como carbonatação e, em condições específicas, a corrosão das armaduras. Em sentido inverso, uma microestrutura mais densa e com menor conectividade tende a reduzir as taxas desses mecanismos e a ampliar a vida útil do sistema (Helene, 1992; Possan, 2010; Maher, 2022).

Assim, a avaliação da rede de poros é determinante para interpretar o comportamento do material e para dimensionar a adequação de tratamentos de proteção superficial, já que o desempenho de produtos de proteção depende do modo como o concreto absorve, retém e libera umidade ao longo do tempo (Bai, 2009; Possan, 2010; Isaia *et al.*, 2011).

Ainda sob o ponto de vista histórico-material, a discussão sobre durabilidade em edificações da Arquitetura Moderna pode considerar que cimentos amplamente empregados em meados do século XX apresentavam, em diversos contextos, características como menor finura e cinética de hidratação distinta das formulações contemporâneas, o que repercute na evolução inicial de propriedades e, por consequência, em padrões de envelhecimento. Contudo, mesmo quando determinados mecanismos iniciais podem ter sido retardados, a durabilidade em longo prazo permanece dependente da qualidade de execução, do regime de cura, do cobrimento e das condições de exposição, reafirmando que a ação de conservação para proteção não pode ser definida apenas por idade ou por categoria histórica, mas sim por leitura técnica do material existente (FIB, 2006; Odgers, 2012; Kosmatka; Wilson, 2016).

O concreto produzido no Brasil durante a década de 1960 reflete o período da Arquitetura Moderna, de transição técnica e efervescência arquitetônica. Nesse período, as resistências características f_{ck} de projeto eram significativamente inferiores às atuais, situando-se predominantemente na faixa de 13,5 MPa a 18 Mpa, sendo que valores próximos a 21 MPa eram considerados de alta resistência para os padrões da época (Helene, 1992). O cenário era dominado pelo uso do Cimento Portland Comum, composto basicamente por clínquer e gipsita, sem as adições minerais (como escória ou pozzolana) comuns nos cimentos modernos (CP II, III ou IV). Uma diferença fundamental reside na finura do grão: o cimento daquela década possuía uma moagem mais grossa, o que resultava em uma hidratação mais lenta e menor calor de liberação inicial em comparação aos cimentos atuais, que são mais finos para garantir altas resistências iniciais, embora aumentem o risco de fissuração térmica (Isaia *et al.*, 2011). Assim, os concretos daquela época ganhavam resistência progressivamente ao longo do tempo, mesmo passados anos após a concretagem.

Quanto às misturas, a dosagem era majoritariamente empírica ou baseada em traços fixos em volume (por exemplo, 1:2:3), com baixo controle sobre a relação água/cimento (a/c). Pela ausência de aditivos plastificantes ou superplastificantes, a trabalhabilidade era obtida exclusivamente pelo acréscimo de água, elevando a relação a/c para patamares frequentemente acima de 0,65. Essa prática resultava em uma matriz cimentícia mais porosa, com absorção de água por imersão típica entre 7% e 10%, valores consideravelmente superiores aos 5% esperados em concretos contemporâneos de boa qualidade (Helene, 1993). Essa porosidade elevada, aliada aos cobrimentos reduzidos prescritos pela norma vigente na época (NB-1), facilitou o ingresso precoce de agentes agressivos e o avanço das frentes de carbonatação, comprometendo a durabilidade a longo prazo das estruturas desse período (Ribeiro *et al.*, 2018; ABNT, 2024).

No concreto aparente, propriedades superficiais adquirem relevância adicional: rugosidade, textura, microfissuração e heterogeneidade cromática influenciam molhabilidade, deposição de partículas, aderência de biofilmes e padrões de escoamento. Isso afeta diretamente a leitura da fachada — incluindo a percepção de manchas e escurecimentos — e pode também interferir no comportamento higrotérmico e na retenção de umidade, aspectos que se conectam à durabilidade e às decisões sobre manutenção e

proteção. Desse modo, a caracterização da superfície não é apenas estética, mas parte da interpretação técnica do estado do material e de sua interação com o ambiente.

Além disso, o desempenho do concreto armado é sensível a variáveis associadas ao cobrimento de armaduras, à ocorrência de fissuras e à qualidade do concreto na região de cobrimento, pois esses fatores controlam a velocidade de entrada de agentes agressivos e a probabilidade de ativação de processos corrosivos. Importante salientar que esses aspectos estão diretamente relacionados às propriedades do material e em parâmetros de projeto e de execução que, no campo da conservação, orientam tanto o diagnóstico quanto a avaliação de compatibilidade de sistemas protetores (Helene, 1992; Cascudo, 1997; Souza; Ripper, 1998).

Por fim, deve-se reconhecer que o desempenho de sistemas protetores depende do balanço entre redução de absorção de água e manutenção de condições adequadas de difusão de vapor, evitando o aprisionamento de umidade e os efeitos indesejados sobre a aparência e o envelhecimento.

Estudos recentes também ampliam o repertório de materiais e tecnologias, incluindo tratamentos por química organossilícica e seladores silicatados, bem como debates sobre produtos nanoestruturados e seus potenciais efeitos ambientais, o que reforça a necessidade de critérios de seleção que considerem não apenas desempenho imediato, mas comportamento ao longo do tempo e compatibilidade com o patrimônio, levando em consideração as características e propriedades do material que compõe o substrato (CEN, 2004; The Concrete Society, 2009; Brunelli *et al.*, 2021; Iliushchenko *et al.*, 2022).

No recorte empírico desta pesquisa, essas propriedades ganham concretude na análise de edifícios com superfícies em concreto aparente, nos quais diferenças de execução, textura e condição superficial podem repercutir tanto na absorção e na retenção de umidade quanto na resposta a produtos de proteção, por exemplo. Com o exame das características e propriedades do concreto, torna-se evidente que o desempenho desse material resulta da interação entre sua composição, sua microestrutura e as condições ambientais e de uso às quais está exposto. A compreensão desses aspectos permite interpretar adequadamente seu comportamento físico, mecânico e higrotérmico, fornecendo subsídios para avaliar riscos potenciais e orientar estratégias de conservação, bem como sanar as manifestações patológicas nos elementos e componentes construtivos.

2.4. MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DO CONCRETO

Durante o auge da Arquitetura Moderna, difundiu-se a percepção de que o concreto constituiria um material pouco demandante de manutenção, mesmo quando exposto ao ambiente externo, em consonância com ideais de progresso, eficiência e solidez. A experiência acumulada ao longo das décadas, contudo, evidenciou que essa expectativa era limitada, pois o concreto — em especial quando aparente — é sensível a condições de exposição, a variações de execução e a ciclos ambientais que modulam seu envelhecimento material (Curtis, 2008; Prudon, 2008).

A revisão desse paradigma torna as manifestações patológicas um tema central no debate sobre proteção, já que elas expressam, na superfície e no desempenho, a interação entre material, ambiente e manutenção. Em termos gerais, tais manifestações podem comprometer simultaneamente a leitura estética da obra e sua integridade — seja por perda de seção, destacamentos, fissuras ou alterações superficiais persistentes — configurando um campo em que diagnóstico e decisão técnica precisam dialogar com valores culturais do patrimônio moderno (Macdonald, 2003; Prudon, 2008; Bolina; Tutikian; Helene, 2019).

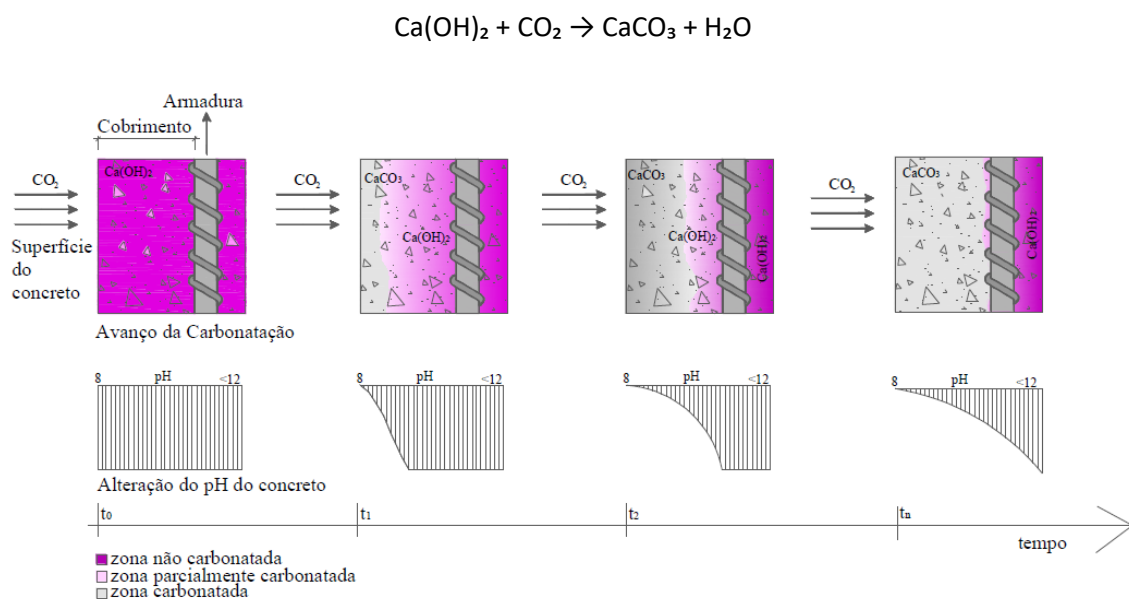
As manifestações patológicas são entendidas como sintomas e evidências de mecanismos físicos e químicos, cujas causas primárias e secundárias devem ser identificadas para orientar intervenções e prognósticos (Macdonald, 2003; Souza; Ripper, 1998; Bolina; Tutikian; Helene, 2019). Esse enfoque é particularmente pertinente ao concreto aparente, pois é a superfície exposta e sujeita à degradação que registra a técnica, o processo construtivo, o uso e as transformações, o que amplia a responsabilidade de uma leitura além dos aspectos rotineiros de limpeza e reparos localizados.

De modo recorrente, a deterioração do concreto se relaciona a mecanismos de transporte atuantes no material — como difusão, permeação e capilaridade — que permitem o ingresso de água, dióxido de carbono, cloretos e outros agentes agressivos. Por essa razão, porosidade e conectividade de poros não são apenas atributos microestruturais, mas determinantes práticos da velocidade com que frentes de degradação avançam e, conseqüentemente, do tipo e da urgência de medidas de proteção e manutenção (Helene, 1992; Isaia *et al.*, 2011; Bolina; Tutikian; Helene, 2019).

Entre os processos de maior relevância para o concreto armado, a carbonatação é frequentemente tratada como mecanismo-chave por reduzir a alcalinidade do concreto e comprometer a proteção natural das armaduras, abrindo caminho para a corrosão. Ainda que a carbonatação seja um processo físico-químico natural, sua importância deriva do fato de que ela pode reconfigurar condições internas do material e gerar, ao longo do tempo, danos com consequências estruturais e de segurança (Helene, 1992; Possan, 2010; ACI, 2016a, 2016b).

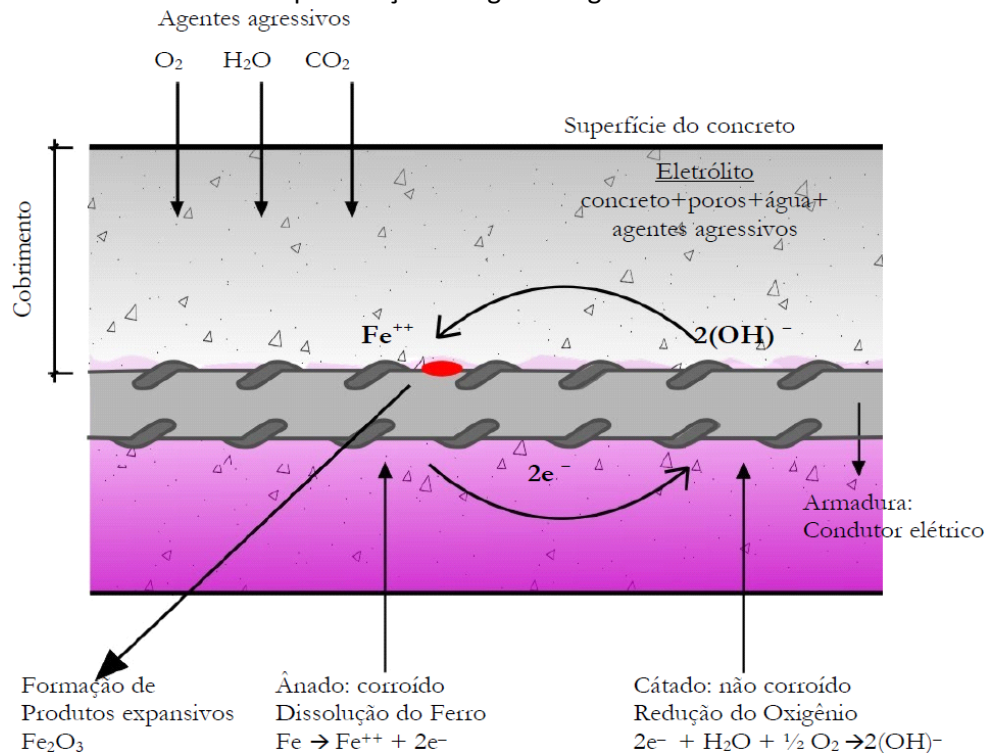
Do ponto de vista operacional, a carbonatação se manifesta como avanço de uma frente que depende das condições de exposição e das propriedades de transporte do concreto, sendo influenciada por ciclos de umedecimento e secagem, qualidade do cobrimento e presença de microfissuras. No contexto desta dissertação, a referência às Figuras 11 e 12 permanece útil para explicitar a natureza do mecanismo e sua relação com a perda de alcalinidade e com a susceptibilidade à corrosão, sem perder de vista que o impacto final depende da interação com o sistema concreto armado, em especial da espessura da camada de cobrimento das armaduras (Possan, 2010; FIB, 2006; Maher, 2022).

Figura 11 – Representação da equação química e esquemática do avanço da frente de carbonatação em estrutura de concreto armado e alteração do pH no tempo.



Fonte: Possan, 2010.

Figura 12 – Representação esquemática de modelo de corrosão do concreto armado em razão da penetração de agentes agressivos.



Fonte: Possan, 2010.

A corrosão das armaduras, por sua vez, costuma aparecer como uma manifestação tardia em relação ao início do processo, mas com sinais externos muito característicos, como fissuras longitudinais, manchas de ferrugem, destacamento do cobrimento e exposição de aço (Figura 13). Trata-se de um fenômeno crítico porque compromete a aderência aço–concreto e pode reduzir a seção resistente, repercutindo diretamente na capacidade estrutural e na durabilidade do sistema (Cascudo, 1997; Ribeiro, 2018; Bolina; Tutikian; Helene, 2019).

Figura 13 – Fundo de laje nervurada no interior do RU/UnB com fissuras, manchas de ferrugem, destacamento/desplacamento de cobrimento, e exposição de armaduras corroídas.



Fonte: Autor, 2024.

Em ambientes onde há presença de sais, o ataque por cloretos assume relevância por acelerar processos corrosivos e intensificar fissuração e deslocamentos. Embora a severidade seja tipicamente maior em áreas costeiras, o ponto central para a conservação do patrimônio moderno é que a presença de água como veículo e a existência de caminhos preferenciais (poros conectados e fissuras) podem tornar o concreto armado vulnerável em diferentes contextos, exigindo diagnóstico cuidadoso para distinguir causas e orientar medidas compatíveis (Helene, 1992; Gaudette; Slaton, 2007; Maher, 2022).

Ainda no campo de reações químicas deletérias, o ataque por sulfatos pode provocar expansão interna e fissuração, além de perda de integridade da matriz, dependendo da exposição e das características do concreto. Em termos de leitura conservativa, a relevância desse mecanismo está em reconhecer que fissuração e desagregação podem decorrer de processos internos não visíveis inicialmente, o que reforça a necessidade de relacionar sintomas superficiais a hipóteses de causa, evitando intervenções apenas cosméticas (Bussell, 2007; Isaia *et al.*, 2011; Maher, 2022).

A fissura é uma das manifestações mais frequentes e, ao mesmo tempo, mais ambíguas, pois pode decorrer de retrações (plástica, térmica ou hidráulica), sobrecargas, deformações, recalques diferenciais, falhas de detalhamento e cura inadequada, além de processos expansivos associados à corrosão. No concreto aparente, fissuras pequenas podem também ter grande impacto perceptivo, mas seu significado técnico depende de abertura, padrão, orientação e evolução, sendo pertinente manter a referência à Tabela 1 como instrumento de sistematização do comportamento e do risco associado (Helene, 1992; Souza; Ripper, 1998; Bolina; Tutikian; Helene, 2019).

Tabela 1 – Classificação de aberturas conforme espessura/dimensão.

Tipo de abertura	Dimensões (mm)	Limites da NBR 6118
Microfissura	< 0,2	Sem problemas
Fissura	$\geq 0,2 \leq 0,4$	Deve-se verificar CAA ¹
Trinca	$\geq 0,5 \leq 1,4$	Acima dos limites
Rachadura	$\geq 1,5 \leq 5,0$	
Junta	> 5,1	

Fonte: adaptado de Bolina *et al.* (2019).

¹ Classe de Agressividade Ambiental: A norma ABNT NBR 6118:2024 classifica o meio ambiente em quatro classes de agressividade (CAA I a IV), variando de Insignificante (rural/submersa) a Muito Forte (industrial/marinha). Essa classificação define o risco de deterioração da estrutura e delimita o limite de abertura de fissuras conforme cada ambiente.

Do ponto de vista da durabilidade, fissuras são relevantes porque atuam como caminhos preferenciais para o ingresso de água e agentes agressivos, amplificando mecanismos de transporte e acelerando frentes de degradação. Assim, mesmo fissuração considerada não estrutural pode ter efeitos cumulativos importantes quando associada a ciclos ambientais e ausência de manutenção, sobretudo em fachadas expostas (Gaudette; Slaton, 2007; Odgers, 2012; Maher, 2022).

Além das manifestações patológicas com repercussão estrutural, há um conjunto de alterações de superfície com impacto direto na leitura do concreto aparente, como manchas, escurecimentos por escoamento, sujidades, biofilmes e colonização biológica (Figuras 14 e 15). Essas ocorrências se intensificam em condições de umidade persistente, sombreamento, detalhamento construtivo que concentra água e ausência de manutenção programada, tornando-se especialmente sensíveis em patrimônio moderno, no qual textura e tonalidade são atributos constitutivos do projeto (Macdonald, 2003; Kühl, 2004; Odgers, 2012).

Figura 14 – Fundo de laje nervurada com manchas e colonização biológica por vegetação.



Fonte: autor, 2024.

Figura 15 – Parede externa em concreto aparente com manchas de escoamento.



Fonte: autor, 2024.

As eflorescências, por sua vez, consistem em depósitos de sais na superfície, resultantes da migração de soluções salinas através da rede porosa e de sua posterior cristalização (Figura 16). Em geral, elas indicam presença de umidade e caminhos de transporte ativos e, embora possam ser tratadas superficialmente, sua recorrência demanda compreensão das condições que sustentam o ciclo (fontes de água, lixiviação, trajetórias de escoamento e retenção), o que tem implicações diretas para a discussão posterior sobre proteção superficial (Gaudette; Slaton, 2007; Odgers, 2012; Maher, 2022).

A desagregação superficial e o deslocamento (destacamento) do revestimento são manifestações relevantes tanto por razões de segurança quanto por perda de material original, frequentemente associadas a corrosão e ataques químicos. Em concreto aparente, a recomposição dessas áreas tende a ser tecnicamente e esteticamente complexa, pois envolve compatibilização de textura, cor, porosidade, aderência e comportamento de envelhecimento, tema recorrente na conservação de concreto em edifícios de valor cultural (Macdonald, 2003; Croft; Macdonald, 2019; Aument, 2019).

Figura 16 – Face externa da parede da torre anexa ao RU/UnB: presença de manchas causadas por eflorescências - escoamento esbranquiçado por acúmulo de sais – e sujeira, de cor mais escura.



Fonte: Autor, 2024.

No patrimônio em concreto aparente, tais manifestações não podem ser interpretadas apenas como defeitos a eliminar, uma vez que o campo da conservação demanda distinguir entre pátina e degradação prejudicial. A leitura histórico-crítica das superfícies — ao reconhecer marcas de execução, uso e transformações — orienta limites de intervenção e reduz o risco de limpezas agressivas ou recomposições que apaguem evidências documentais.

Mantém-se, nesse sentido, a pertinência de referências específicas que tratam do problema teórico das superfícies na restauração (Kühl, 2004, 2006, 2007).

A abordagem contemporânea tende a integrar diagnóstico e monitoramento como base para decisões, combinando registros sistemáticos, inspeções periódicas e, quando pertinente, métodos não destrutivos. Estratégias como mapeamento de danos contribuem para relacionar ocorrências a orientação, detalhamento e microambiente, sustentando intervenções proporcionais e compatíveis — em oposição a respostas episódicas que tratam sintomas sem enfrentar causas (Gaudette; Slaton, 2007; Carvalho, 2008; Carvalho; Oliveira; Zanoni, 2020).

No contexto do patrimônio moderno brasileiro, análises dedicadas às fachadas de concreto aparente reforçam a recorrência de padrões de degradação associados a água, interfaces construtivas e variabilidade de execução, evidenciando que a manifestação patológica é, muitas vezes, o resultado de uma cadeia de fatores e não de um único agente. Os estudos aplicados ao concreto aparente, conduzidos em situações reais de uso e exposição, permitem o aprofundamento das discussões sobre os mecanismos atuantes e as relações de causas e efeitos, contribuindo assim para a tomada de decisão em processos de proteção superficial em intervenções em fachadas (Muñoz; Tognon, 2022; Kaminski; Zanoni, 2025; Canziani; Quist, 2025).

2.5. PROTEÇÃO DO CONCRETO E ASPECTOS CLIMÁTICOS

As mudanças climáticas passaram a integrar o horizonte atual de preocupações sobre o ambiente construído e sua resiliência, porque tendem a modificar as condições de exposição. Tais mudanças podem alterar o comportamento já conhecido do concreto, deslocando parâmetros de temperatura, umidade, regime de chuvas e a maior ocorrência de eventos extremos, com repercussões diretas sobre processos de degradação e sobre a gestão de risco em bens culturais construídos no século XX (Gaudette; Slaton, 2007; Serralheiro *et al.*, 2017).

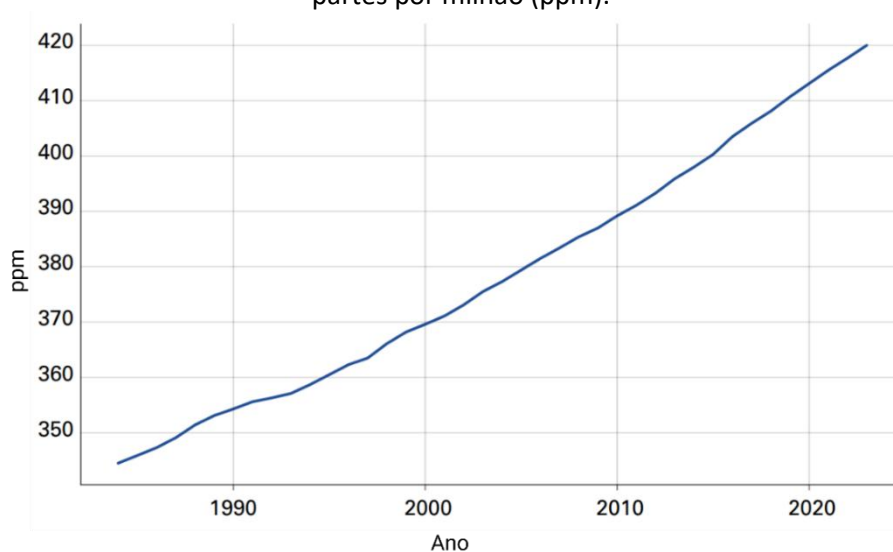
Em termos de conservação, isso desloca a lógica de intervenção de um modelo reativo baseado em danos já consolidados para um modelo preventivo orientado por risco, no qual a identificação de pontos vulneráveis e a definição de limiares de alerta tornam-se decisivas para reduzir a probabilidade de perdas materiais e de intervenções substitutivas (Ekolu, 2020).

A discussão contemporânea sobre conservação de concreto tem enfatizado que a durabilidade não pode ser tratada como atributo intrínseco e invariável do material, pois resulta de uma interação entre projeto, execução, ambiente e manutenção. Quando esse ambiente se torna mais variável ou mais severo, as margens de segurança associadas a práticas historicamente adotadas podem se reduzir, exigindo reavaliações de inspeção, monitoramento e estratégias de decisão (Helene, 1992; Bai, 2009; Ekolú, 2020).

No caso do patrimônio da Arquitetura Moderna, essa questão assume maior visibilidade porque o concreto aparente participa simultaneamente da estrutura e da expressão arquitetônica, de modo que alterações materiais se refletem com rapidez na leitura do edifício. Assim, mudanças em padrões de umedecimento, secagem e deposição de poluentes podem afetar tanto o desempenho quanto aspectos de aparência que contribuem para a significância cultural do bem (Curtis, 2008; Prudon, 2008; Croft; Macdonald, 2019).

Entre os mecanismos que merecem atenção, a carbonatação permanece central por influenciar o estado de passivação das armaduras e, conseqüentemente, a probabilidade de corrosão. Discussões recentes indicam que variações no regime de CO₂ atmosférico, principalmente o seu aumento (Figura 17), e em condições microclimáticas podem alterar a taxa de carbonatação e, por extensão, os horizontes de vida útil considerados em avaliações de desempenho (Helene, 1992; Serralheiro *et al.*, 2017; Ekolú, 2020).

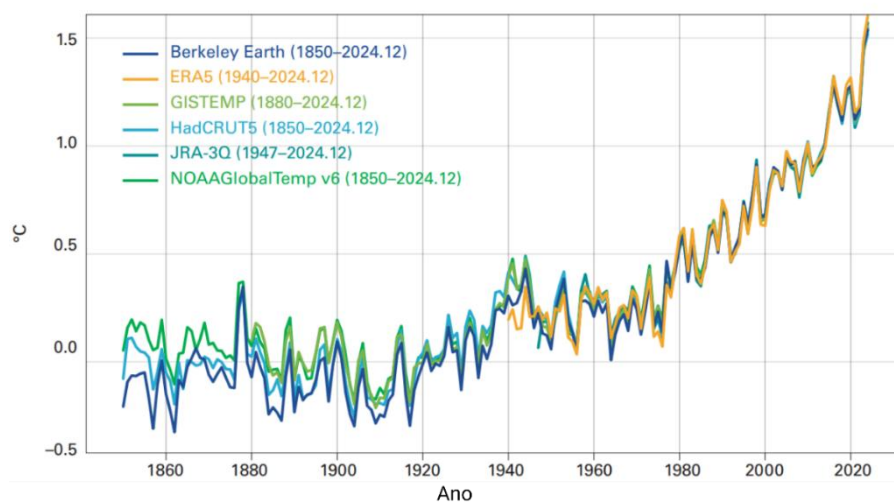
Figura 17 - Fração molar atmosférica média global anual de dióxido de carbono de 1984 a 2023 em partes por milhão (ppm).



Fonte: OMM, 2025.

A elevação de temperatura (Figura 18) também tende a interagir com processos físico-químicos e com a dinâmica higrotérmica das fachadas, afetando gradientes térmicos, ciclos de dilatação e retração e condições de secagem superficial. Em contextos urbanos, efeitos de ilha de calor, por exemplo, podem reforçar esses fenômenos, ampliando a necessidade de interpretar o comportamento do concreto a partir de dados locais e não apenas de premissas generalizadas (Bai, 2009; Zanoni, 2015; Ekolu, 2020).

Figura 18 - Anomalias da temperatura média global anual em relação a uma linha de base pré-industrial (1850–1900), apresentadas no período de 1850 a 2024, para 6 diferentes grupos de dados.



Fonte: OMM, 2025.

De modo complementar, alterações no regime de precipitações e no comportamento da água na envoltória constituem um vetor relevante, sobretudo em superfícies aparentes com detalhamento que favoreça escoamentos, acúmulo de sujidades e ciclos repetidos de umedecimento e secagem. Em termos de conservação, essas condições influenciam a ocorrência de manchas, eflorescências, biodeterioração e a própria velocidade de ativação de mecanismos associados à corrosão (Helene, 1992; Gaudette; Slaton, 2007; Zanoni, 2015).

A intensificação de eventos extremos, incluindo tempestades e ventos de maior intensidade, tende a afetar a integridade de superfícies expostas por meio de impactos mecânicos, abrasão por partículas e aumento da carga de chuva dirigida sobre fachadas. Esse cenário reforça a necessidade de vincular conservação a avaliação de vulnerabilidade física do edifício e, em particular, a leitura do detalhamento arquitetônico como parte do desempenho frente à exposição (Bussell, 2007; Gaudette; Slaton, 2007; Zanoni, 2015).

Ainda que ciclos de congelamento e degelo sejam mais característicos de determinadas regiões do globo, o ponto metodológico permanece válido: mudanças climáticas podem deslocar a frequência e a intensidade de ciclos ambientais críticos para o concreto. A abordagem conservativa, portanto, se beneficia de instrumentos que antecipem cenários de exposição e orientem prioridades de inspeção e intervenção com base em risco e não apenas em resposta a falhas já instaladas (Institution of Civil Engineers, 1996; Bussell, 2007; Serralheiro *et al.*, 2017).

No patrimônio moderno, a consequência prática é a necessidade de revisar premissas de manutenção e de recalibrar o entendimento do que constitui condição normal de envelhecimento material e funcional. Isso não significa abandonar princípios de conservação, mas reposicioná-los diante de novos contextos de exposição, evitando intervenções excessivamente transformadoras sobre superfícies de valor documental (Brandi, 2004; Kühl, 2004; DOCOMOMO, 2022).

Nesse sentido, diretrizes técnicas e normativas voltadas a produtos e sistemas de proteção e reparo oferecem uma base útil para especificação e controle, desde que aplicadas com discernimento no contexto patrimonial. Em especial, tornam-se pertinentes quando a mudança climática amplia a necessidade de reduzir ingressos de água e de agentes agressivos, sem que isso implique a descaracterização do concreto aparente (CEN, 2005; Bussell, 2007; ACI, 2016a, 2016b).

A literatura sobre conservação do concreto aparente também evidencia que a resposta a condições ambientais mais severas tende a combinar medidas preventivas e corretivas, articuladas por diagnóstico e por monitoramento. Do ponto de vista de gestão, a integração entre inspeção periódica, documentação e planejamento de manutenção aparece como caminho para reduzir a dependência de ações emergenciais. Planos de gestão e conservação e práticas de monitoramento por mapas de danos contribuem para construir séries históricas de comportamento, o que se torna especialmente relevante quando padrões climáticos tendem a se tornar menos estáveis ao longo do tempo (Pinheiro; Oliveira, 2017; Carvalho; Oliveira; Zaroni, 2020; Muñoz; Tognon, 2022).

A experiência internacional sistematizada em estudos de caso mostra que a conservação do concreto em obras de reconhecida significância cultural envolve decisões que combinam desempenho, legibilidade e gestão de risco, sobretudo quando o edifício se

mantém em uso. Nesse sentido, análises aplicadas a obras de referência ajudam a discutir estratégias de intervenção e de proteção em condições ambientais variáveis, sem reduzir o concreto aparente a um acabamento substituível (Aument, 2019; Croft; Macdonald, 2019).

No contexto de Brasília, estudos que tratam do comportamento higrotérmico de fachadas reforçam a importância de considerar agentes climáticos e padrões locais de exposição para compreender riscos e orientar medidas de conservação (Zanoni, 2015). Essa perspectiva é particularmente relevante para conjuntos modernos, nos quais a materialidade do concreto aparente e a escala das superfícies expostas ampliam a sensibilidade do edifício a variações ambientais e a práticas de manutenção descontínuas (Prudon, 2008; Muñoz; Tognon, 2022).

Diante desse panorama, a discussão sobre o aumento da influência dos aspectos climáticos na durabilidade e vida útil do concreto não substitui a agenda clássica da conservação, mas a reorienta ao introduzir uma camada adicional de incerteza e de necessidade de adaptação técnica. Esse cenário exige que o concreto armado, consolidado como um dos sistemas mais transformadores do século XX e pilar da Arquitetura Moderna, seja compreendido para além de sua função estrutural, assumindo seu papel como elemento estético e cultural indissociável (Collins, 2004; Curtis, 2008). A difusão desse sistema aproximou forma, estrutura e processo construtivo, permitindo explorar a versatilidade do material em diferentes tipologias e escalas que ainda orientam as disciplinas profissionais (Prudon, 2008).

Nesse contexto, a proteção do material deve ser encarada não como um isolamento extrínseco, mas como um conjunto de estratégias sistêmicas voltadas a reduzir a ação de agentes de degradação frente a uma exposição climática em constante transformação (Croft; Macdonald, 2019). Tal abordagem busca ampliar a vida útil das estruturas sem negligenciar os valores culturais da Arquitetura Moderna e as exigências contemporâneas de manutenção (Kühl, 2004; Canziani; Quist, 2025).

Para estruturar essa ponte metodológica entre a teoria e a prática, articulam-se três eixos fundamentais:

1. Propriedades Físico-Químicas: A proteção pressupõe que a resposta do concreto a tratamentos depende de propriedades microestruturais, como porosidade e permeabilidade. Em estruturas de concreto aparente (*fair face concrete*), essas

características condicionam o ingresso de agentes agressivos e a evolução de frentes de carbonatação (Helene, 1992). A análise técnica apoia-se em referenciais clássicos e normativos que estabelecem requisitos de controle e servem como parâmetro para avaliar a compatibilidade em intervenções de restauro (Isaia *et al.*, 2011; ABNT, 2024; ACI, 2016a, 2016b).

2. Exame de Manifestações Patológicas: Ao analisar o estado de conservação, a investigação busca identificar se as anomalias tiveram origem na concepção dos projetos ou na execução, na perda de funcionalidade por final de vida útil ou por falhas de manutenção, uso e operação, que muitas vezes se materializam como um envelhecimento acelerado (Zanoni, 2015). Em ambientes urbanos, o enegrecimento superficial e a formação de biofilmes comprometem tanto a leitura estética do concreto aparente quanto o desempenho higrotérmico das fachadas (Kühl, 2004; Odgers, 2012). Entre as falhas de maior impacto, destaca-se a corrosão de armaduras, que exige metodologias de inspeção rigorosas para orientar as decisões de intervenção, garantindo que recomposições não interfiram na autenticidade material (Bolina; Tutikian; Helene, 2019; Ribeiro, 2018).
3. Sistemas de Proteção Superficial: O terceiro eixo trata do uso de proteção superficial como estratégia técnico-conservativa. No plano normativo, a família EN 1504 fornece o arcabouço conceitual para esses sistemas (CEN, 2004, 2017). A eficiência de um protetor depende de sua interação com a rede de poros, sendo capaz de alterar as trajetórias de ingresso de umidade e agentes externos para preservar a integridade da matriz (The Concrete Society, 2009; ACI, 2016a, 2016b).

No concreto aparente, a especificação de sistemas de proteção exige ponderar efeitos sobre a permeabilidade ao vapor, brilho e tonalidade, evitando que a intervenção resulte em padronização visual ou barreiras incompatíveis com o funcionamento higrotérmico da fachada (The Concrete Society, 2009; Odgers, 2012). A literatura e as normas técnicas classificam esses sistemas em dois grupos principais: os produtos penetrantes e os filmógenos (CEN, 2004; The Concrete Society, 2009).

Os produtos penetrantes, como hidrofugantes a base de silanos, utilizam a química organossilícica para modificar a energia superficial dos poros, reduzindo a molhabilidade e a capilaridade ativa sem formar filme visível (Bai, 2009; Cai, 2020). Esse mecanismo preserva a

textura e as variações cromáticas do concreto, garantindo a redução da absorção de água líquida enquanto mantém a capacidade de secagem do substrato (Brunelli *et al.*, 2021; Iliushchenko *et al.*, 2022). Tal equilíbrio é desejável em elementos que exigem estabilidade higrótérmica após ciclos de umedecimento (Coppola *et al.*, 2023). Em contrapartida, os produtos filmógenos (vernizes e tintas) criam barreiras contínuas que, embora bloqueiem agentes externos, aumentam o risco de aprisionamento de umidade, favorecendo bolhas e descascamentos (Odgers, 2012). Além disso, podem induzir um rejuvenescimento artificial incompatível com a leitura histórica e os princípios de restauro (Kühl, 2004; Prudon, 2008; Maher, 2022).

A dispersão silano-siloxano tem sido frequentemente apontada como a solução mais adequada para o patrimônio moderno, devido à sua compatibilidade estética (Brunelli *et al.*, 2021). Contudo, sua eficiência depende da porosidade do substrato e do rigor na aplicação – falhas na execução podem converter o protetor em fonte de anomalias ou criar ilhas de intervenção com envelhecimento visual distinto (The Concrete Society, 2009; Aument, 2019). Por sofrer degradação gradual por raios UV e agentes ambientais, a proteção deve ser tratada como uma variável de gestão contínua, assim como as soluções filmógenas, cuja manutenção deve ser mais frequente, pois estão mais expostas aos agentes climáticos de degradação (FIB, 2006; Serralheiro *et al.*, 2017). Isso demanda monitoramento periódico via inspeções prediais e ensaios de campo para orientar as reaplicações (Carvalho; Oliveira; Zanoni, 2020; CEN, 2017). O uso de tecnologias digitais, como sensores e *deep learning*, aliados a protocolos rastreáveis, oferece novas possibilidades para o diagnóstico contínuo e a avaliação de desempenho sob regimes de exposição efetivos (Kaminski; Zanoni, 2025; Canziani; Quist, 2025).

No campo patrimonial, a decisão técnica deve considerar o edifício como documento material, onde texturas e marcas construtivas possuem valor interpretativo (Croft; Macdonald, 2019; Muñoz; Tognon, 2022). A escolha de sistemas que inibam a absorção de água líquida sem bloquear o vapor de água e que, além disso, minimizem discrepâncias visuais é fundamental para preservar a autenticidade do bem.

2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS DA SEÇÃO

Em síntese, a proteção superficial e a durabilidade do concreto aparente devem ser tratadas como um problema integrado de material, ambiente, conservação e gestão (Kaminski; Zaroni, 2025). Ao ponderar compatibilidade e controle de umidade (Croft; Macdonald, 2019), preservação da leitura histórica da arquitetura do edifício (Kühl, 2004) e recuperação do desempenho (Prudon, 2008), estabelece-se as condições para prolongar a vida útil e manter a integridade material e estética, em consonância com princípios contemporâneos de conservação do patrimônio moderno (ICOMOS, 2013; DOCOMOMO, 2022).

A partir desse panorama, a seção seguinte aborda o Patrimônio Moderno Edificado da Universidade de Brasília a partir de dois casos de estudos que permitem observar como intervenções, adaptações e permanências materiais se articulam em diálogo com referenciais de conservação da Arquitetura Moderna.

3. CONSERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO MODERNO EDIFICADO DA UnB

3.1. O CAMPUS DARCY RIBEIRO

No contexto brasileiro, o *campus* Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília (UnB) configura-se como um conjunto representativo de características da Arquitetura Moderna que reúne obras de autores como José Galbinski (Restaurante Universitário e Biblioteca Central), Paulo de Melo Zimbres (Reitoria), Oscar Niemeyer (Instituto Central de Ciências), João da Gama Filgueiras Lima (Edifícios Residenciais da Colina Velha) e Matheus Gorovitz (Faculdade de Direito), entre outros (Schlee *et al.*, 2014).

Inserida no âmbito da Arquitetura Moderna de Brasília, a arquitetura institucional do *campus* Darcy Ribeiro se constituiu como parte indissociável do projeto cultural e político que acompanhou a fundação da capital e a criação da universidade. Nesse contexto, edifícios e espaços livres não se apresentam apenas como suporte para atividades acadêmicas, mas como componentes ativos de uma concepção de vida coletiva na qual a materialidade — em especial o concreto armado — participa da construção de sentidos e de identidades (Ficher, 2000).

A UnB foi idealizada em 1960, em meio a um cenário de intensa efervescência e de expectativas transformadoras, articulando-se à própria narrativa de Brasília como realização moderna de uma nova capital. A universidade nasceu, portanto, associada a um programa de inovação institucional e à crença na capacidade do planejamento e do desenho do espaço de produzir novas formas de sociabilidade, aspecto que se reflete no caráter público de seus edifícios e no papel das áreas de convivência no *campus* (Bomeny, 2016).

Esse entendimento é reforçado quando se considera que a Arquitetura Moderna em Brasília, mais do que repertório formal, opera como estrutura de mediação entre escalas urbanas, sistemas de circulação e experiência cotidiana. A análise da cidade e de sua preservação, mobilizando leituras sobre o Plano Piloto e suas escalas², evidencia como os

² As escalas do Plano Piloto de Brasília, formuladas por Lúcio Costa, estruturam a cidade a partir de diferentes modos de uso, percepção e experiência do espaço urbano. Segundo Costa (1987; 2018), a Escala Monumental organiza os espaços representativos do Estado e da vida cívica, expressa no Eixo Monumental, onde se concentram os principais edifícios administrativos e simbólicos. Já a Escala Gregária define a convivência cotidiana, estruturando a área central de serviços, comércio e atividades coletivas. A Escala Residencial caracteriza-se pela integração entre edificações e áreas verdes, com superquadras amplas, baixas e afastadas da via principal, concebidas para promover qualidade de vida e coletividade. Por fim, a Escala Bucólica envolve

edifícios se inserem em uma lógica territorial que combina monumentalidade, usos coletivos e grandes vazios (Figura 19), quadro que influencia diretamente a percepção e a gestão do patrimônio construído (Leitão *et al.*, 2009).

Figura 19 – Vista aérea da Praça Maior do *campus* Darcy Ribeiro.



Fonte: UnBImagens, Humberto Farias, 2025.

No *campus* Darcy Ribeiro, esse horizonte moderno se manifesta na organização espacial do conjunto universitário, na presença de edifícios de forte expressão plástica e na adoção de soluções construtivas que fazem do concreto um meio técnico e, simultaneamente, um enunciado arquitetônico. A centralidade da materialidade, nesse caso, não é neutra: ela participa da legibilidade do *campus* e do reconhecimento de suas obras como referências no repertório moderno brasileiro (Ficher; Schlee, 2010).

A trajetória de implantação do *campus* inclui experimentação e, em certos momentos, o desenvolvimento de sistemas construtivos com forte vínculo com a pré-fabricação e a racionalização. Essa condição não deve ser lida apenas como resposta pragmática à necessidade de construir rapidamente, mas como expressão de uma cultura técnica e arquitetônica que tomou a universidade como lugar de ensaio, articulando concepções de modernidade, indústria e organização do espaço educativo (Moreth; Fuentes, 2013).

toda a cidade, garantindo a presença contínua da paisagem aberta, dos parques e largos espaços verdes que moldam a percepção da capital e reforçam a harmonia entre o ambiente construído e o cerrado. Azevêdo, Neves e Lira (2014) destacam que essas escalas funcionam de maneira complementar, articulando diferentes intensidades de uso, fluxos e formas de apropriação do território. Cada uma delas se expressa em elementos específicos — edifícios, vias, vazios urbanos, parques, quadras — constituindo um sistema coerente que estrutura o modo de vida e a leitura espacial do Plano Piloto.

Ao mesmo tempo, o conjunto edificado da UnB evidencia a pluralidade interna da Arquitetura Moderna e suas inflexões locais, incluindo a presença de linguagens associadas ao Brutalismo, nas quais o concreto aparente assume protagonismo. Essa diversidade, por vezes, foi interpretada por narrativas que hierarquizam períodos e autores, atribuindo valor superior às obras fundacionais e desqualificando produções posteriores, sobretudo as vinculadas à década de 1970 (Schlee, 2013).

A trajetória arquitetônica da UnB inicia-se nos anos 1960 com uma fase marcada pela urgência construtiva, pela forte experimentação e pelo desenvolvimento de sistemas pré-fabricados, aplicados em edificações como os pavilhões de Serviços Gerais, as OCAs, os prédios da Faculdade de Educação, os primeiros blocos da Colina e o Instituto Central de Ciências. A partir de 1970, a universidade passa a adotar uma linguagem brutalista influenciada pela produção paulista, inaugurada pela Biblioteca Central (BCE) e seguida por edifícios como os blocos da Casa do Estudante, o Restaurante Universitário (RU), a Reitoria, o prédio da FAU, além do Núcleo de Medicina Tropical, da Faculdade de Ciências da Saúde e da Faculdade de Tecnologia (Schlee *et al.*, 2014).

Nos anos 1980, a arquitetura da UnB torna-se mais heterogênea, abrindo espaço para propostas variadas, novas experimentações estruturais e participação de arquitetos externos, o que se reflete em obras com diferentes materiais e sistemas, como o Centro de Excelência em Turismo, o Posto Ecológico e os Pavilhões Multiuso. A partir de meados dos anos 1990, a universidade vive um período de expansão que combina diversidade formal com retomada de elementos característicos de fases anteriores, exemplificado pelo partido pavilhonar do Instituto de Química, pelos edifícios paralelos do Instituto de Ciências Biológicas e pelo pátio central da Faculdade de Economia, Administração, Contabilidade e Gestão de Políticas Públicas (FACE), além da criação dos campi de Planaltina, Ceilândia e Gama (Schlee *et al.*, 2014).

Segundo Schlee (2013), a valoração do moderno não pode depender apenas de afinidades estilísticas ou de recortes ideológicos. Reconhecer a qualidade e a coerência de obras brutalistas no *campus* implica aceitar que a história do patrimônio moderno é feita também de disputas interpretativas, e que o acervo universitário se constitui por camadas temporais e conceituais distintas.

Embora esse conjunto seja amplamente reconhecido por sua relevância arquitetônica, a gestão cotidiana do *campus* revela tensões entre permanência material e uso intensivo. A inexistência de políticas de manutenção preventiva tende a deslocar a conservação para uma lógica predominantemente corretiva, na qual se intervém quando danos já se tornaram evidentes, com impactos diretos sobre custos, desempenho e integridade visual de superfícies aparentes (Guimarães, 2019; UnB, 2023; Kaminski; Zanoni, 2025).

Sob a perspectiva teórica da restauração, o tratamento de superfícies arquitetônicas é um problema conceitual, e não apenas técnico, pois envolve decisões sobre autenticidade, permanência de marcas do tempo – pátina –, e legibilidade do processo e do método construtivos (Kühl, 2004).

Esse debate é particularmente relevante em Brasília e na UnB, onde se observam práticas recorrentes de recobrimento, pintura e renovação de superfícies aparentes, motivadas por fatores diversos, como deterioração, pichações e demandas de limpeza visual. Tais práticas, quando aplicadas de forma indiscriminada, podem apagar camadas de significação e reorientar a leitura do bem, instaurando ciclos repetitivos de intervenção que não resolvem causas e fragilizam a autenticidade material (Guimarães, 2019).

Na Arquitetura Moderna, a superfície do concreto aparente pode ser entendida como documento material: nela permanecem vestígios de formas, juntas, texturas e modos de execução que constituem parte do valor cultural da obra (Kühl, 2004). Nesse cenário, as intervenções realizadas na BCE e no RU são casos recentes e elucidativos das tensões entre desempenho e preservação.

3.2. A BIBLIOTECA CENTRAL

Em 2018 e 2019, a Universidade de Brasília contratou inspeções prediais na área de acervo da Biblioteca Central (BCE/UnB), projetada pelo arquiteto José Galbinski e inaugurada em 1973. As vistorias identificaram problemas de infiltração, bem como fissuras estruturais nos elementos de concreto da envoltória do edifício.

Entre os anos de 2024 e 2025, foram realizadas intervenções na envoltória da BCE para recuperação estrutural de suas fachadas e substituição do sistema de impermeabilização da cobertura, visando corrigir problemas de fissuras, infiltrações e acúmulo de sujeira nas

superfícies de concreto aparente. Associadas ao envelhecimento dos sistemas construtivos e à ausência de manutenção continuada, as intervenções nas superfícies do concreto aparente evidenciaram a vulnerabilidade das superfícies expostas ao longo de mais de cinco décadas de uso (Kaminski; Zanoni, 2025).

Os laudos de vistoria e os diagnósticos técnicos, elaborados por equipe especializada, juntamente com os projetos, especificações técnicas, acervo fotográfico e produções científicas sobre o edifício, além do acompanhamento dos serviços durante a fase de intervenção, fundamenta as análises desenvolvidas neste subitem e os registros fotográficos³.

Na construção da BCE/UnB, a opção pelo concreto moldado in loco, com o uso de formas de madeira, destaca-se pelo processo artesanal de construção como meio para a obtenção de maior plasticidade volumétrica (Figura 20), em oposição à lógica da pré-fabricação que vinha sendo implementada no *campus* Darcy Ribeiro da UnB. Esta escolha, que se destacou em um período de avanço industrial e expansão de sistemas pré-fabricados, demonstra uma valorização da expressão tectônica, especialmente na possibilidade do controle do processo artesanal durante a construção.

Figura 20 – Vista da fachada noroeste da BCE/UnB.



Fonte: Isa Lima, sem data.

³ O estudo realizado na BCE foi publicado em <https://doi.org/10.59804/rdb.2025.v8.190>
Kaminski M.; Zanoni, V. Intervenção nas fachadas da Biblioteca Central da UnB - Análise crítica das estratégias para conservação do concreto aparente. Revista Docomomo Brasil | v.8, n.12, 2025, e190.

Segundo Lima (2013), o concreto aparente na BCE/UnB não se resume a um material de construção, mas desempenha papel central como elemento que define a identidade arquitetônica da edificação, atuando tanto como atributo estético quanto como componente estrutural. A superfície do concreto, ao reter as marcas das formas, não apenas evidencia o processo construtivo, mas também confere singularidade ao potencial arquitetônico do edifício, que “[...] se expressa pela interdependência mútua e harmônica entre estrutura, forma e construção” (Frampton, 1999).

A intervenção nas fachadas da BCE/UnB (Figuras 21 e 22) foi orientada por medidas de reparo e proteção superficial. O acesso às fachadas se deu por meio de andaimes fachadeiros, montados e desmontados ao longo das etapas dos serviços. A preparação da superfície incluiu a remoção de vernizes pré-existentes com removedor pastoso e limpeza com hidrojateamento.

O tratamento e acabamento da superfície englobou o estucamento com argamassa de cimentos Portland CP-II-F-32 e branco estrutural CPB-40 para harmonizar a coloração do concreto aparente, a aplicação de solução realcalinizadora para restaurar o pH do concreto em áreas carbonatadas e, por fim, a aplicação de verniz acrílico monocomponente disperso em água para proteger a superfície aparente contra intempéries e agentes agressivos (Figura 22).

Figura 21 – Vista do fundo da laje da cobertura norte da BCE antes dos serviços de recuperação.



Fonte: CEPLAN, 2009.

Figura 22 – Vista do fundo da laje da cobertura norte da BCE após os serviços de recuperação.



Fonte: Autor, 2025.

Em intervenções que abrangem grandes áreas de fachada, corre-se o risco de homogeneizar a superfície, em vez de pontuar ou contrastar, apagando a cronologia material inscrita no concreto. O resultado pode ser uma aparência unificada que, paradoxalmente, esconde o complexo ciclo de vida do edifício. Nesse sentido, dilui-se a narrativa histórica da edificação, substituindo a autenticidade de sua idade por uma aparência que não reflete o processo de seu envelhecimento natural.

Destaca-se que a sujidade presente nas superfícies de concreto não representa a pátina do tempo, pois elas podem ser formadas por dejetos animais, colônias biológicas, poluentes ou contaminantes, que podem ser altamente agressivos ao concreto. Ao longo do tempo, a presença de umidade associada à sujidade pode agravar o processo natural de degradação do concreto e corrosão das armaduras.

Portanto, limpezas são necessárias para a reaplicação periódica de sistemas de proteção. No entanto, essas ações de conservação podem intensificar a alteração das superfícies ao longo do tempo. Nesse contexto, alerta-se para a especificação de produtos que não alterem o aspecto da superfície e que sejam duráveis, evitando ações frequentes de limpeza e renovação da película de proteção.

A aplicação de verniz acrílico na superfície do concreto protege contra agentes de degradação, como umidade e contaminantes atmosféricos. Contudo, observa-se que sua exposição prolongada à radiação solar e às intempéries pode resultar em amarelamento devido à degradação do filme protetor, devendo ser reaplicado a cada cinco anos em média. Essa mudança estética, embora não comprometa imediatamente o desempenho técnico do

verniz, pode impactar negativamente a percepção visual do concreto aparente, especialmente em edificações onde a integridade estética desempenha papel relevante. Assim, a periodicidade na reaplicação do verniz, aliada a um monitoramento regular das condições da superfície, são necessários para garantir a proteção contínua do material sem comprometer negativamente sua aparência ao longo do tempo.

As intervenções realizadas nas fachadas da BCE, aqui descritas e analisadas, evidenciam a necessidade de equilibrar a recuperação funcional com a conservação do significado cultural associado ao Brutalismo e ao concreto aparente. Embora sejam indispensáveis para a proteção contra agentes de degradação e para assegurar a durabilidade do material, as ações corretivas podem modificar características sensoriais, como a aparência visual original do concreto, o que representa um desafio para a manutenção de sua autenticidade material.

Embora essenciais para garantir a estabilidade, a segurança estrutural e a conservação da edificação, tais intervenções provocaram alterações perceptíveis em atributos, principalmente relacionados à cor e à textura do concreto aparente. Essas características, reconhecidas como elementos intrínsecos à expressividade e à materialidade do edifício, constituem aspectos fundamentais da análise crítica e técnica desenvolvida na presente pesquisa.

3.3. O RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO

No *campus* Darcy Ribeiro, o Restaurante Universitário (Figuras 23 e 24) extrapola a função de equipamento de alimentação, atuando como espaço de encontro e de socialização, alinhado à dimensão pública do projeto universitário do Estado e à ideia moderna de convivência democrática, integrando-se à paisagem da cidade (Schlee, 2013).

O RU/UnB integra, ainda, um conjunto de obras cuja qualidade arquitetônica se fortalece quando se reconhece a coerência entre partido, materialidade e vida universitária, aspecto que o aproxima de outras edificações do mesmo ciclo de consolidação do *campus* – tais como a Reitoria e a BCE/UnB – e sustenta sua relevância como patrimônio moderno (Schlee, 2013).

Figura 23 – Vista da fachada nordeste do RU/UnB.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 24 – Vista da fachada sudeste do RU/UnB.



Fonte: Autor, 2025.

Projetado por José Galbinski, com colaboração do engenheiro Ernesto Walter, o edifício foi concebido de modo a articular eficiência funcional e presença formal, mobilizando soluções que associam racionalidade de fluxos, continuidade espacial e expressão estrutural. Tal abordagem reflete premissas modernas que, no *campus*, se traduzem em edifícios voltados ao uso coletivo, marcados por clareza compositiva e por estratégias de integração com o entorno (Figura 25) (Schlee *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2024). O partido arquitetônico privilegia percursos amplos, rampas generosas e relações visuais abertas, consolidando uma linguagem que responde simultaneamente à lógica interna do programa e às expectativas de monumentalidade discreta que caracterizam a obra.

Figura 25 – Vista de parte da fachada nordeste do RU/UnB.



Fonte: Autor, 2025.

A permanência do RU como referência se relaciona também ao fato de que o edifício preserva, em linhas gerais, sua lógica espacial e sua leitura arquitetônica, sem ter sofrido grandes alterações que descaracterizassem o partido. Essa continuidade contribui para manter a inteligibilidade do projeto, permitindo que as relações entre estrutura, circulação e uso permaneçam visíveis e operantes no cotidiano universitário (Schlee *et al.*, 2014). Ainda que mudanças pontuais tenham ocorrido ao longo das décadas — como atualizações de infraestrutura e adequações às normas de segurança ao fogo e acessibilidade — não se observam alterações significativas em suas características, mantendo o edifício como documento material de uma fase de consolidação da Universidade de Brasília.

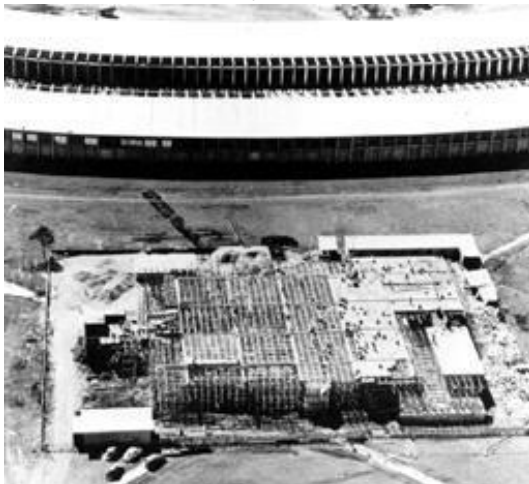
Localizado na Praça Maior do *campus* Darcy Ribeiro, o RU/UnB (Figura 26) é uma edificação de relevante valor histórico e cultural para a universidade (UnB, 2023), feito em concreto armado com área aproximada de 6.333 m², construída entre 1971 e 1974 (Figuras 27 a 29). O edifício principal organiza-se em sete pavimentos em diferentes níveis, interconectados por rampas, solução que reforça a continuidade de percursos e a fluidez de circulação projetadas, aproximando arquitetura e uso em uma experiência espacial integrada (Schlee *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2024). A distribuição vertical e a alternância de meios níveis respondem ao desnível natural do terreno e permitem a clara separação entre fluxos de preparo, distribuição e consumo de alimentos, potencializando a funcionalidade do conjunto.

Figura 26 – Vista da fachada nordeste do RU/UnB.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 27 – Vista aérea da construção do RU/UnB.



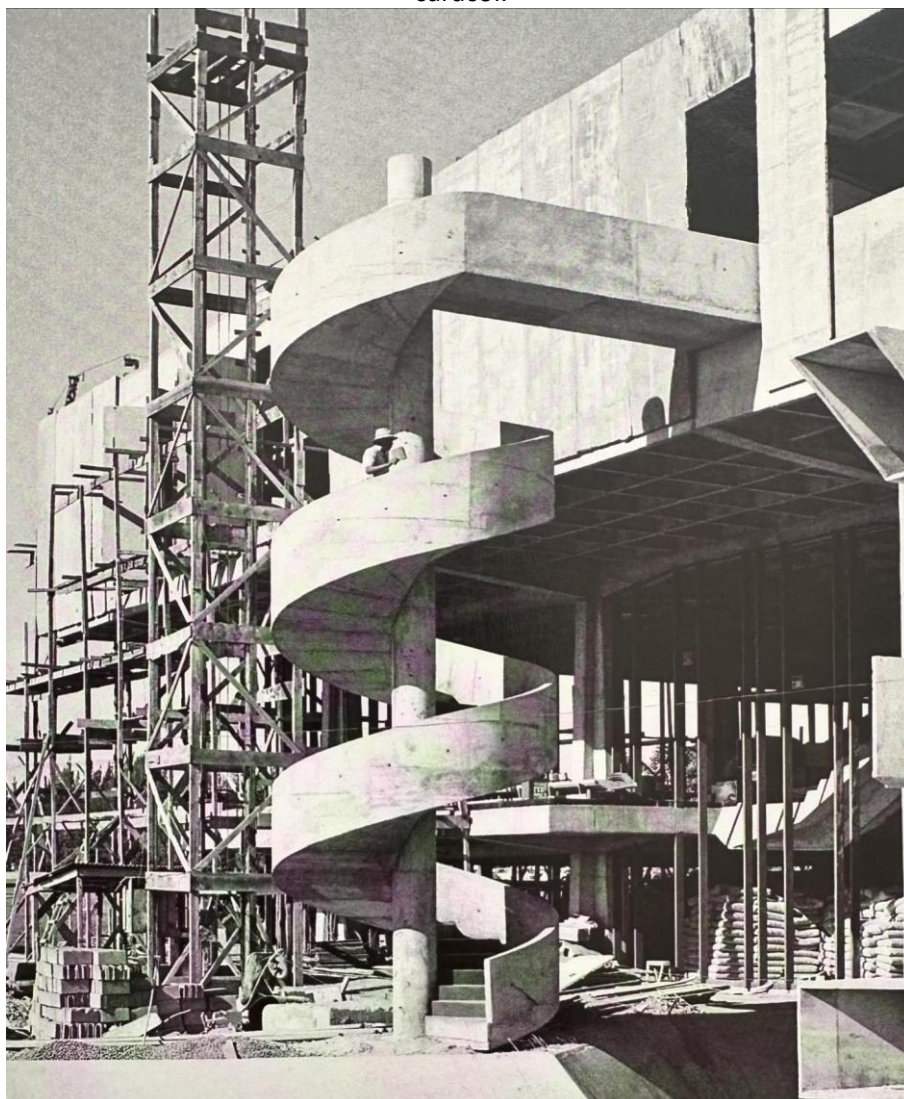
Fonte: Arquivo Central da Universidade de Brasília, sem data.

Figura 28 – Vista panorâmica lateral da construção do RU/UnB.



Fonte: Arquivo Central da Universidade de Brasília, sem data.

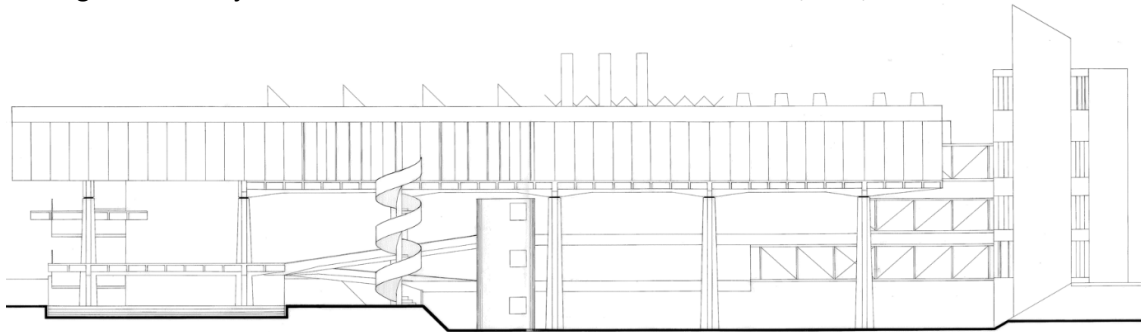
Figura 29 – Construção do RU/UnB, vista da fachada nordeste com destaque para a escada em caracol.



Fonte: Arquivo Central da Universidade de Brasília, 1973.

O prédio principal conecta-se, em três níveis, a uma torre anexa por passarelas em estrutura metálica. No topo dessa torre, situam-se a caixa d'água do edifício e a casa de máquinas do elevador de serviço, enquanto os demais pavimentos abrigam áreas técnicas de diferentes funcionalidades, aspecto que evidencia a articulação entre infraestrutura e arquitetura como parte do desenho do edifício (Figuras 30 e 31) (Schlee *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2024). Essa torre, marcada por forte presença volumétrica, opera como elemento de estabilização do conjunto e como marco vertical no *campus*, reforçando a leitura do RU como equipamento de grande escala e complexidade.

Figura 30 – Projeto de corte do Restaurante Universitário – RU/UnB, fachada nordeste.



Fonte: CEPLAN, 1971.

Figura 31 – Projeto de corte do Restaurante Universitário – RU/UnB, fachada noroeste.



Fonte: CEPLAN, 1972.

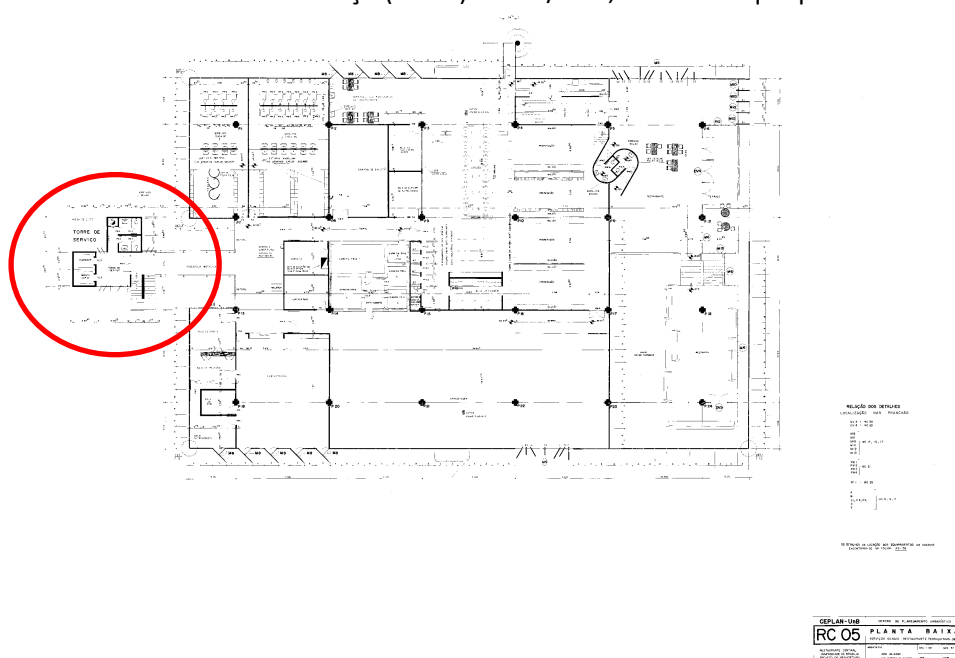
A cozinha está posicionada no nível mais elevado da edificação e, nessa organização vertical, destaca-se um volume prismático em concreto plano da cobertura, que concentra parte das instalações prediais e dutos de exaustão. Essa solução combina desempenho técnico e expressão formal, ao tornar o volume técnico parte constitutiva da composição arquitetônica (Schlee *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2024). A separação entre área de preparo e área de consumo reforça a eficiência operacional, enquanto a concentração das instalações no volume superior reduz interferências na leitura dos demais pavimentos, contribuindo para a clareza estrutural do conjunto.

Os espaços de apoio são ventilados e iluminados por aberturas zenitais, enquanto, os demais pavimentos da edificação recebem painéis envidraçados, estabelecendo contraste entre massa e transparência, e intensificando a relação visual com o entorno. Esse arranjo reforça a leitura do RU/UnB como obra que integra programa coletivo, clima e expressão construtiva, com implicações diretas para a conservação de suas superfícies aparentes e interfaces (Schlee *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2024).

Como edifício que opera intensamente e recebe fluxos diários elevados, sua conservação exige atenção especial às áreas de maior desgaste, à interação entre superfícies envidraçadas e superfícies de concreto aparente e à manutenção contínua de suas circulações abertas, que constituem parte relevante de sua experiência espacial e de sua vocação pública.

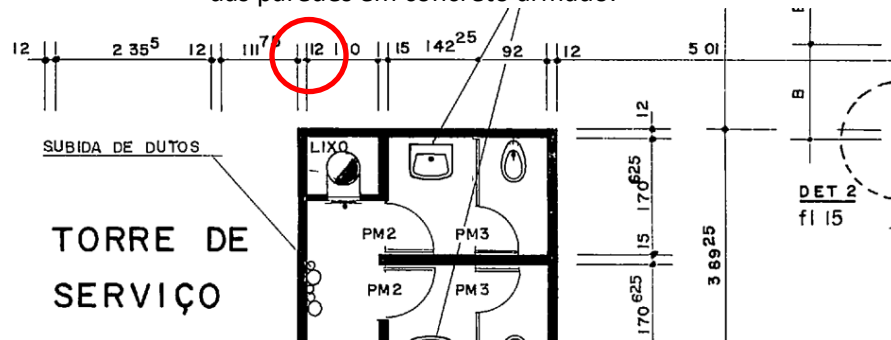
No levantamento documental realizado para esta pesquisa, o projeto executivo da estrutura de concreto da torre de serviços não foi encontrado no acervo do CEPLAN, unidade responsável pela guarda desse tipo de documentação na UnB. Entretanto, há indicações de cotas nas plantas baixas de que as paredes foram dimensionadas com 12 (doze) centímetros de espessura (Figuras 32 e 33), mas não há detalhes construtivos.

Figura 32 – Planta baixa do nível terraço (38 96) do RU/UnB, com destaque para a torre de serviços.



Fonte: CEPLAN, 1972.

Figura 33 – Destaque da torre de serviços do RU/UnB, com indicação da espessura, em centímetros, das paredes em concreto armado.



Fonte: CEPLAN, 1972.

Durante o período de levantamento de dados em campo, quando as vistorias, os registros fotográficos e as anamneses estavam sendo realizados, foi possível acompanhar o caso emergencial de rompimento da laje de cobertura da caixa d'água da torre anexa do RU/UnB. Devido ao colapso sofrido, a laje teve de ser demolida (Figuras 34 a 39).

Esse episódio evidencia e alerta como elementos expostos, submetidos a ciclos repetidos de umedecimento e secagem e, muitas vezes, de difícil inspeção visual, podem evoluir silenciosamente para estados críticos quando não há monitoramento e manutenção sistemáticos. A necessidade de substituição integral indica que a degradação ultrapassou um limiar no qual as intervenções de caráter preventivo ou pequenos reparos já não são suficientes, resultando em perda material, alteração do sistema original, e aumento de custos e complexidade técnica. A laje colapsada foi substituída por uma cobertura metálica.

Figura 34 – Laje de cobertura da caixa d'água com fissuras, rachaduras e manchas.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 35 – Laje da caixa d'água com deslocamento e armaduras em estado avançado de corrosão.



Fonte: INFRA, 2025.

Figura 36 – Laje da caixa d'água com deslocamento e armaduras em estado avançado de corrosão.



Fonte: INFRA, 2025.

Figura 37 – Andaimas ao redor da caixa d'água do RU para processo de demolição e recomposição.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 38 – Início do processo de demolição da laje de cobertura para recomposição.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 39 – Nova cobertura da caixa d'água do RU em estrutura e telhas metálicas.



Fonte: Autor, 2025.

3.3.1. Condições de exposição e agressividade ambiental

A laje de cobertura da caixa d'água, sem um sistema de impermeabilização ou proteção, estava exposta às variações climáticas e à ação da chuva:

- Ambiente Interno: A face inferior da laje, sem um sistema de impermeabilização ou proteção, estava sujeita à umidade proveniente da evaporação e condensação da água armazenada, mantendo o concreto com alto teor de umidade.
- Ambiente Externo: A face superior estava exposta às variações cíclicas de temperatura, radiação solar, umidade relativa e chuva, fatores que favorecem o processo de molhagem e secagem, a abertura de microfissuras e a penetração de agentes agressivos.

A existência de um sistema de impermeabilização envelhecido, em final de vida útil, e a ausência de manutenção periódica permitiu que a umidade e o dióxido de carbono (CO_2) penetrassem na matriz porosa do concreto. Após a investigação do ocorrido e análise das condições de exposição e umidade da laje de concreto, foi possível verificar que a ausência de camadas protetoras ou falta de sistema de impermeabilização na parte interna da laje de cobertura da caixa d'água permitiu a penetração contínua de vapor d'água e condensações superficiais/intersticiais. Além disso, a capacidade de escoamento de água pluviométrica na face externa apresentava-se deficiente, o que favoreceu pontos de acúmulo de umidade e penetração de água.

Esses dados permitiram compreender o regime de exposição do elemento: externamente, ciclos molhagem-secagem com infiltrações pluviométricas acelerando

microfissuras; internamente, alta umidade relativa (próxima a 100%) no reservatório promovendo transporte de vapor por difusão e capilaridade no concreto poroso, com condensações intersticiais (nos poros) e superficiais (na face inferior) mantendo saturação permanente.

Esse mecanismo interno atuou como o principal catalisador da corrosão das armaduras na face inferior da tampa, exercendo uma influência superior aos agentes externos à superfície. Isso ocorreu porque a retenção de umidade impediu a ocorrência de ciclos de secagem; sem esses períodos de perda de água, o concreto permaneceu em um estado de saturação constante, o que manteve a continuidade do eletrólito e evitou a interrupção do processo de corrosão eletroquímica.

3.3.2. O evento de ruptura da laje de cobertura da caixa d'água

Ao longo da vida útil em serviço, não foram feitas inspeções na caixa d'água que detectassem deformações excessivas ou fissuras comprometedoras da estanqueidade. Por isso, não é possível afirmar que o colapso da laje ocorreu de forma súbita, embora o processo de degradação tenha sido progressivo ao longo de décadas. A ruptura evidenciou que a capacidade resistente do elemento havia sido severamente comprometida pela perda de seção das armaduras, impossibilitando a redistribuição de esforços e levando à falha estrutural (Bolina, Tutikian e Helene, 2019).

O colapso parcial sinaliza a importância de reconhecer zonas de risco típicas em estruturas de concreto aparente: bordas, regiões de empoçamento, pontos de descontinuidade geométrica, interfaces com impermeabilizações e detalhes de drenagem insuficiente. Sem rotinas de inspeção, pequenas falhas podem se tornar gatilhos para a aceleração de processos eletroquímicos, com progressão para corrosão ativa e comprometimento da capacidade resistente.

Desse modo, o episódio reforça a necessidade de gestão proativa e reparo como ações de manutenção preventiva que antecipem riscos e reduzam a ocorrência de intervenções substitutivas, estruturando políticas de conservação baseadas em ciclos regulares de verificação, inspeções periódicas e registros das manutenções. Em síntese, a conservação do patrimônio moderno em concreto aparente demanda gestão contínua, com diagnóstico

progressivo, manutenção planejada e tomada de decisão rastreável, de modo a preservar, tanto quanto possível, a materialidade original e a coerência técnico-arquitetônica da edificação.

Esse tipo de ocorrência tensiona, de forma objetiva, o debate entre preservação e atualização, uma vez que a substituição por solução contemporânea, embora necessária para segurança e operação, pode alterar aspectos materiais e construtivos do conjunto. A intervenção passa, então, a exigir justificativas claras e critérios de compatibilidade, de modo a minimizar perdas de integridade e manter a coerência arquitetônica do edifício (Kühl, 2004; Schlee; Medeiros; Ferreira, 2007).

No caso do RU, tais desafios se intensificam pela escala do uso e pela centralidade do equipamento na vida universitária, que impõe exigências constantes de funcionamento, fluxos e adequações técnicas. Essa condição torna o edifício especialmente sensível a decisões de manutenção e de intervenção, pois soluções rápidas e pragmáticas podem comprometer, gradualmente, atributos de materialidade e de leitura arquitetônica que sustentam seu valor patrimonial.

3.3.3. Documentação e projetos executivos do Restaurante Universitário

A ausência de projetos executivos e de detalhes construtivos do RU/UnB reforça uma questão recorrente na gestão do patrimônio moderno: a dependência de documentação técnica para a compreensão do bem, para a rastreabilidade das decisões e para a definição de critérios de intervenção, bem como a necessidade de estratégias metodológicas específicas quando essa documentação é incompleta, fragmentada ou dispersa em diferentes instâncias administrativas.

Em edifícios nos quais o concreto aparente é simultaneamente estrutura e acabamento, essa lacuna documental torna-se ainda mais sensível, porque a leitura do desempenho material não se limita a aspectos superficiais: envolve a identificação de soluções de formas e juntas, espessuras e cobrimentos, posicionamento de armaduras, detalhes de arremate e de encontro com outros elementos, pontos potenciais de entrada de água e zonas de maior retenção de umidade.

Nesse contexto, a indisponibilidade de desenhos e detalhes originais pode limitar a precisão do diagnóstico — por exemplo, dificultando a distinção entre manifestações associadas a anomalias construtivas de origem e aquelas decorrentes do envelhecimento e da exposição ambiental — e amplia a responsabilidade de levantamentos *in loco* como base para orientar intervenções compatíveis, sobretudo quando se busca preservar atributos documentais, texturas e marcas do processo construtivo original.

Quando a documentação é insuficiente, torna-se necessário operar com um conjunto articulado de procedimentos que compensem essa ausência, incluindo levantamentos geométricos e fotográficos sistemáticos, mapeamento de danos em diferentes escalas, inspeção de detalhes de encontro e de arremate, identificação de trajetórias prováveis de escoamento e infiltração, e correlação entre microclima, orientação e padrões de degradação observados. A própria definição de compatibilidade passa a depender mais intensamente de evidências empíricas: a seleção de materiais e produtos deve ser fundamentada em ensaios representativos, painéis piloto e verificação contínua de desempenho, reduzindo o risco de soluções genéricas que desconsiderem particularidades do substrato.

Assim, a lacuna documental não apenas limita o conhecimento prévio do objeto, mas exige que a pesquisa e a prática de conservação adotem uma postura metodológica mais cautelosa, incremental e baseada em validação, em que o diagnóstico não é um evento pontual, e sim uma etapa estruturante de um processo de gestão e acompanhamento.

As inspeções realizadas após o colapso da tampa de concreto da torre do RU confirmaram que o detalhamento construtivo da década de 1970, embora comum para a época, não previa as exigências de durabilidade necessárias para um ambiente de alta umidade, como o interior de um reservatório de água. A sinergia entre a carbonatação e as infiltrações recorrentes acelerou o processo corrosivo de forma exponencial nos anos que antecederam a falha.

3.4. Considerações Finais da Seção

Nesta seção, a Biblioteca Central foi examinada à luz dos serviços de recuperação de fachada pelos quais passou, oferecendo subsídios para discutir critérios de intervenção em

superfícies de concreto aparente, compatibilidade técnica e impactos na leitura arquitetônica do edifício.

Já o caso ocorrido no Restaurante Universitário reforça a motivação para os estudos em edificações do *campus* Darcy Ribeiro que se encontram em estado de conservação não satisfatório. A ocorrência da ruptura da cobertura da torre da caixa d'água permitiu refletir sobre o percurso dos edifícios modernos e suas relações com a conservação, uso e integridade.

Ao situarem-se em condições distintas de intervenção, esses dois casos aproximam os debates teóricos desenvolvidos nesta seção de situações concretas e relevantes sobre o estado de conservação do patrimônio moderno, evidenciando como diferentes escolhas de manutenção e adaptação afetam a preservação de atributos materiais que caracterizam o concreto aparente.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esta seção descreve as etapas do Programa Experimental adotado para a condução prática do estudo no concreto aparente da parede de fachada noroeste da torre da caixa d'água do Restaurante Universitário da UnB (torre anexa do RU/UnB).

Após a revisão teórica e bibliográfica relativa à conservação do concreto aparente presente em edificações da Arquitetura Moderna, a contextualização do objeto de estudo e a identificação das práticas existentes na proteção de superfícies de concreto, propõe-se uma análise experimental do comportamento higrotérmico do concreto. Nesta pesquisa, a ênfase dada aos ensaios de caracterização do material busca superar o empirismo que muitas vezes domina o canteiro de obras.

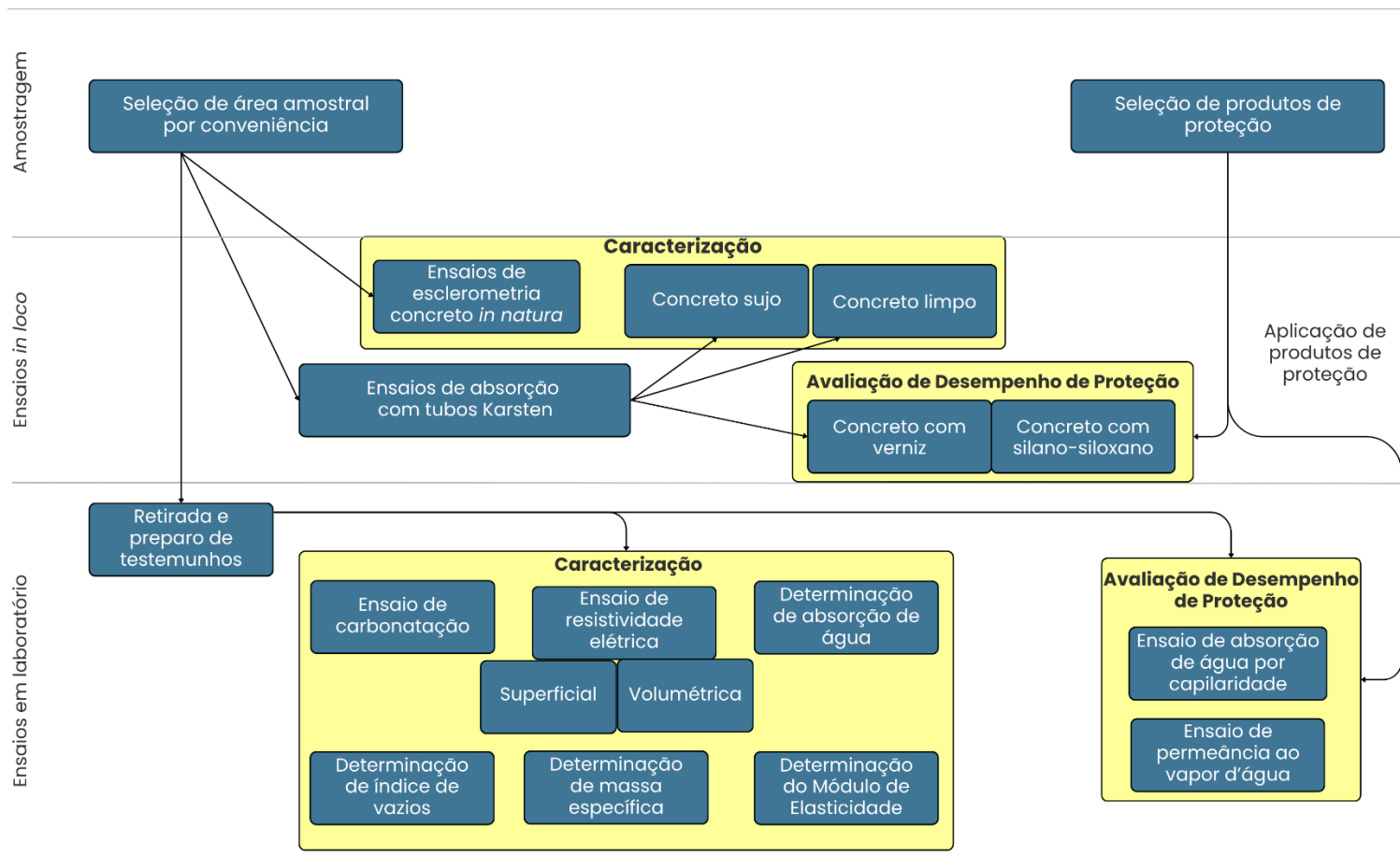
O Programa Experimental desenvolvido neste estudo dedica-se à caracterização do concreto e análise do comportamento de dois tipos distintos de produtos de proteção de superfícies aplicados em amostras da parede. A metodologia proposta adota uma abordagem prática, fundamentada em dados provenientes de ensaios realizados tanto *in loco* quanto em laboratório, o que possibilita compreender as condições de aplicação e o desempenho dos produtos avaliados.

Os ensaios buscam examinar o desempenho dos produtos de proteção de superfícies de concreto aparente e a forma como esses produtos interagem com as propriedades do concreto. Os ensaios laboratoriais oferecem maior controle das variáveis e permitem análises mais detalhadas com testemunhos extraídos da parede estrutural. Complementarmente, os ensaios *in loco* possibilitam observar o comportamento dos materiais sob condições reais de exposição, etapa necessária para comparar os resultados obtidos em laboratório.

A abordagem metodológica adotada neste projeto de pesquisa tem, portanto, caráter experimental, não se excluindo, entretanto, análises de ordem qualitativa e quantitativa. A Figura 40 apresenta o delineamento metodológico da pesquisa, sintetizando o fluxograma de execução do programa experimental.

Figura 40 – Fluxograma de execução do programa experimental.

Fluxograma de Execução do Programa Experimental



Fonte: Autor, 2026.

4.1. AMOSTRAGEM DOS PRODUTOS DE PROTEÇÃO

A seleção de produtos de proteção de superfícies de concreto aparente deve ser entendida como etapa integrante do projeto de conservação de superfícies arquitetônicas. Nesta pesquisa, a escolha de dois produtos, em um rol de cinco opções fornecidas por uma empresa parceira que apoiou o programa experimental, foi baseada em um conjunto de critérios estabelecidos para este estudo, com base nas fichas técnicas dos produtos e nas informações fornecidas pelo fabricante:

- Desempenho higrotérmico
 - Baixa absorção por capilaridade;
 - Taxa de sorção (adsorção e dessorção) capaz de permitir a permeabilidade ao vapor de água compatível com o fluxo higrotérmico do sistema e com o microclima da edificação; e
 - Baixa molhabilidade (repelência inicial da água devido ao ângulo de contato aparente e sua estabilidade após envelhecimento).
- Durabilidade
 - Penetração no concreto e uniformidade de distribuição;
 - Estabilidade frente à radiação UV, chuva ácida, sais e ciclos de umedecimento e secagem; e
 - Compatibilidade com tratamentos existentes, possibilidade de reaplicação e manutenção futura.
- Sustentabilidade ambiental
 - Formulações à base de água;
 - Baixo teor de voláteis orgânicos (VOC) e substância nocivas; e
 - Plano de manejo de resíduos, embalagens, descarte e reciclabilidade, incluindo logística reversa.
- Aparência
 - Variação colorimétrica global dentro de limiar aceitável para o contexto de conservação, não perceptível a olho nu em iluminação padrão;
 - Variação de brilho baixa; e

- Proteção do concreto sem formação de película visível, ou alterações perceptíveis da textura, rugosidade ou aspereza superficial.

Os dois produtos de proteção de superfície de concreto aparente selecionados para essa pesquisa são:

- Produto 1 – hidrofugante em dispersão de silano-siloxano a base d'água: caracteriza-se por impregnações de baixa viscosidade e alta afinidade com matrizes cimentícias, cuja penetração e ancoragem tendem a preservar a textura e o relevo, minimizando a alteração de brilho e o risco de efeito molhado; e
- Produto 2 – verniz acrílico monocomponente disperso em água: produto para pintura de proteção e acabamento superficial do concreto e demais superfícies minerais que formam película e imprimem um certo brilho à superfície.

As fichas técnicas com as especificações completas dos produtos utilizados na pesquisa estão no Anexo A, e apresentam detalhes das características técnicas, incluindo dados como a base do produto (água ou solvente), capacidade de manutenção da cor e textura do substrato, abertura à difusão de vapor de água, além de outras especificações pertinentes e orientações fornecidas pelos fabricantes. A tabela do Anexo A permite a comparação e a análise das características dos produtos.

As fichas técnicas dos produtos não apresentam informações sobre o teor de sólidos, que corresponde à quantidade de material não volátil presente no produto, nem sobre o teor de ativos, que se refere à quantidade de ingredientes que se ligam de forma efetiva ao substrato.

A aplicação dos produtos em superfícies de concreto aparente requer protocolos específicos conforme as características químicas e físicas de cada um deles, sempre indicados pelo fabricante. Deve-se garantir que o substrato esteja completamente limpo, livre de partículas soltas, contaminantes orgânicos ou inorgânicos (como óleos e nata de cimento).

Para a aplicação do hidrofugante, a superfície deve apresentar umidade relativa inferior a 6%, condição alcançada por exposição solar prévia e temperatura ambiente 3°C acima do ponto de orvalho. Para a aplicação do verniz acrílico, uma etapa adicional de pré-tratamento pode ser requerida, com aplicação de primer acrílico para selagem seletiva de poros, caso a base tenha alta porosidade.

Para ambos os produtos, é contraindicada aplicação em cenários de previsão pluviométrica iminente ou umidade atmosférica elevada (acima de 85%), e a temperatura do ar e do substrato devem estar entre 8°C e 35°C. Em superfícies verticais, recomenda-se a aplicação ascendente (da base em direção ao topo) para evitar aplicação irregular e garantir a espessura úmida controlada. Caso o substrato seja muito poroso, aplicam-se duas demãos sempre no sistema úmido sobre úmido, com uso de rolo, trincha ou pulverizador do tipo *airless*.

Todos os protocolos de aplicação têm como requisitos básicos condições de temperatura e umidade relativa do ar semelhantes, e reiteram o princípio basilar da conservação: compatibilidade entre o método de aplicação e as características intrínsecas do substrato, visando a preservação dos atributos materiais.

4.2. AMOSTRAGEM DAS SUPERFÍCIES DE CONCRETO

A torre do anexo do RU/UnB foi escolhida para a realização dos ensaios *in loco* e a extração das amostras para os ensaios em laboratório. Antes do início dos procedimentos, foi feita uma vistoria na fachada de estudo com o uso de drone equipado com sensor RGB de alta resolução para identificar as melhores áreas para a aplicação dos produtos de proteção e coleta de testemunhos. A área escolhida apresentou fácil acesso e poucas manifestações patológicas ou falhas de execução construtiva. A escolha desse local foi estrategicamente importante para reduzir o impacto dos ensaios e da aplicação dos produtos na aparência da superfície de concreto da fachada de estudo.

Após análise sensorial das condições da parede de concreto da fachada do anexo do RU/UnB, foi escolhida uma faixa sem manifestações patológicas visíveis a olho nu. Nesta faixa, foram demarcadas sete áreas distintas: uma central, para retirada dos testemunhos; duas laterais, para realização dos ensaios *in loco* de absorção de água com tubos Karsten; e outras quatro adicionais para realização do ensaio de esclerometria. As Figuras 41 a 44 mostram a localização dos locais de aplicação dos dois diferentes produtos.

Figura 41 – Imagem de satélite do RU/UnB, com destaque para a torre do anexo com indicação da fachada em estudo.



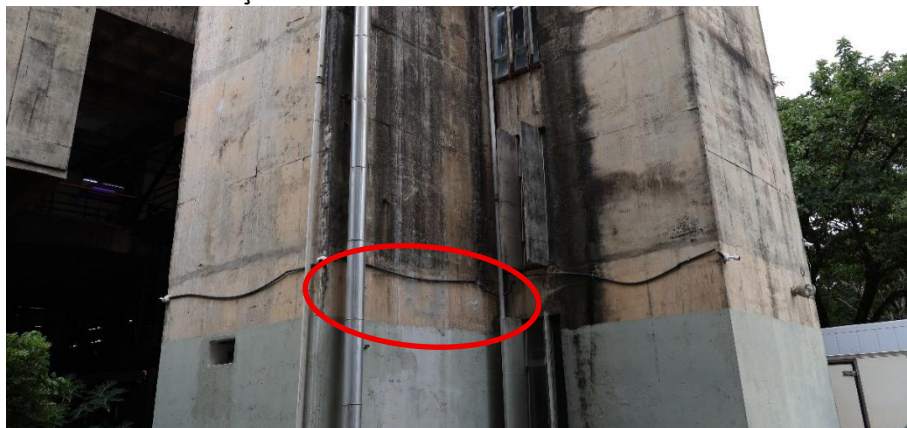
Fonte: Google Earth®, 2025.

Figura 42 – Imagem aérea em perspectiva do RU/UnB, destaque para a torre do anexo.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 43 – Vista de parte da fachada noroeste da torre do anexo com indicação dos locais de realização dos ensaios e retirada de testemunhos.



Fonte: Autor, 2026.

Figura 44 – Mapeamento dos locais de realização dos ensaios de esclerometria (em verde), absorção de água com tubos Karsten (em azul), e de retirada dos testemunhos (em vermelho).



Fonte: Autor, 2026.

No Programa Experimental, essas áreas serviram como substrato base para a aplicação do hidrofugante à base de silano-siloxano e do verniz acrílico, oferecendo um contexto representativo das superfícies de concreto aparente da fachada da edificação. Além disso, os testemunhos foram extraídos desse local para as análises laboratoriais, sem impacto visual à aparência da fachada.

Para a delimitação das áreas, foram adotados os seguintes critérios de elegibilidade:

- a. Homogeneidade Visual e Grau de Sujidade: Superfícies das áreas selecionadas com o mesmo padrão de deposição de sujidades e envelhecimento natural.
- b. Integridade Física do Substrato: Constatação por meio de inspeção tátil e visual da ausência de danos macroscópicos que pudessem distorcer os resultados dos ensaios de permeabilidade. Foram excluídas zonas com presença de fissuras passantes, ninhos de concretagem, segregação de agregados ou armaduras expostas, garantindo que a absorção medida fosse referente à porosidade da matriz de concreto e não a defeitos pontuais.
- c. Exposição Microclimática: Áreas de amostragem posicionadas na mesma faixa da fachada, em cotas de altura próximas, ambas submetidas aos mesmos ciclos de insolação, incidência de chuva dirigida e ação dos ventos, visando reduzir o viés que poderia ser causado por diferenças nas condições de exposição.
- d. Representatividade do Material: Dentro de um mesmo pano de concretagem (mesma etapa executiva), garantindo que as propriedades intrínsecas do concreto original — como traço, relação água/cimento e condições de cura — fossem as mais similares possível entre as áreas de amostragem.

Desta forma, estabeleceu-se como premissa que qualquer divergência de desempenho observada nas etapas subsequentes (após limpeza e após tratamentos) poderia ser atribuída preponderantemente à eficácia dos métodos e produtos aplicados, e não variações pré-existentes no substrato base.

4.3. EXTRAÇÃO, PREPARO E SELEÇÃO DE TESTEMUNHOS

Em atendimento aos objetivos propostos, os ensaios realizados em laboratório demandaram a utilização de amostras retiradas diretamente da parede estrutural de concreto da edificação analisada. Com esse propósito, foram extraídos 10 testemunhos provenientes da torre do RU/UnB, número considerado adequado para atender às exigências do programa experimental, permitindo as análises e tratamento estatístico satisfatório dos dados, além de possibilitar a avaliação do comportamento dos produtos aplicados ao concreto.

A extração dos corpos de prova foi realizada conforme as diretrizes técnicas estabelecidas na norma ABNT NBR 7680:2015, seguindo procedimento semelhante ao adotado no estudo realizado no plano de conservação da Casa de Vidro de Lina Bo Bardi (Anelli *et al.*, 2019). Para minimizar impactos às superfícies originais da edificação, foram retirados testemunhos cilíndricos de 50 mm de diâmetro, utilizando-se serra copo, o que possibilitou preservar a segurança estrutural, a estabilidade, a integridade e o valor patrimonial da construção, garantindo que as intervenções ocasionassem o menor dano possível ao elemento arquitetônico original.

A área central da parede foi escolhida devido à existência de interferências na parte interna da edificação: passagem de tubulações à esquerda e equipamentos instalados à direita. Além disso, a área central permitia melhor mobilidade do equipamento para realizar as extrações (Figuras 45 a 47).

As dimensões reduzidas das amostras atendem às especificações mínimas normativas e foram deliberadamente selecionadas para evitar alterações estéticas perceptíveis, especialmente diante do valor arquitetônico representado pelo edifício. A extração dos testemunhos não teve como objetivo avaliar a resistência estrutural do concreto, mas sim investigar parâmetros relacionados à conservação das superfícies expostas. Os ensaios priorizaram o estudo da influência da água e da umidade no concreto aparente, considerando

tanto a entrada de água líquida quanto a difusão de vapor nas superfícies externas da edificação.

Figura 45 – Indicação do local de retirada dos testemunhos.



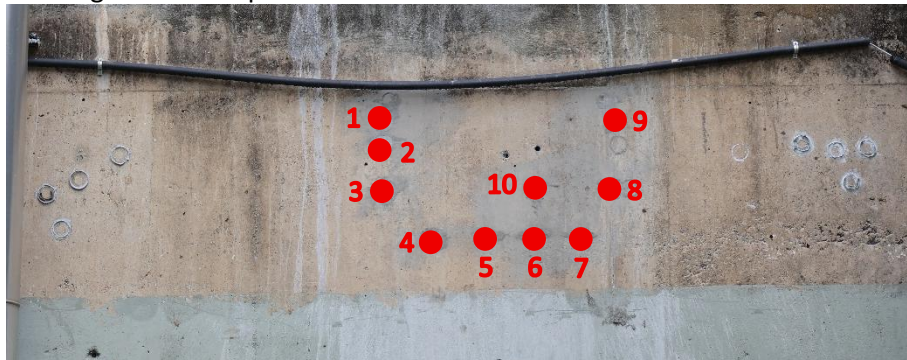
Fonte: Autor, 2026.

Figura 46 – Retirada de testemunhos do RU/UnB com uso de sonda rotativa do tipo serra copo.



Fonte: Autor, 2025.

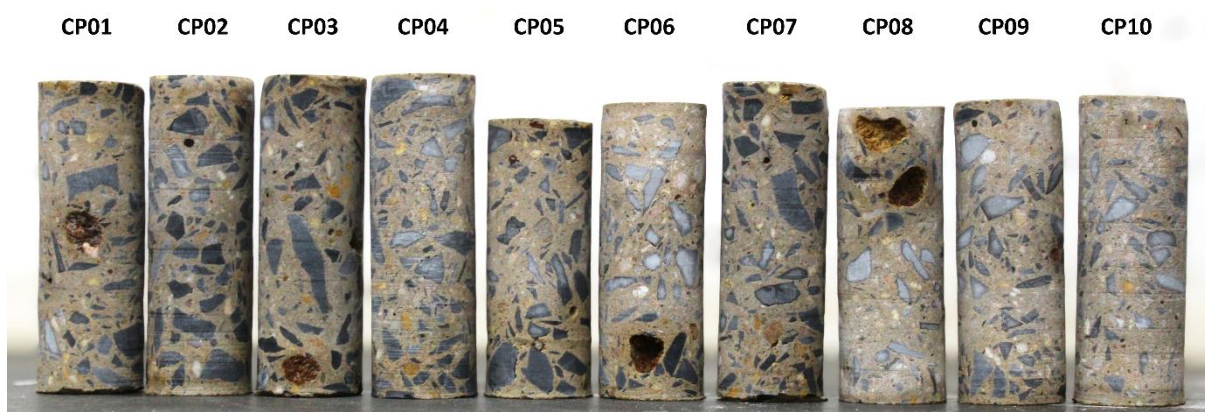
Figura 47 – Mapeamento dos locais de retirada dos testemunhos.



Fonte: Autor, 2026.

Após a extração, os dez testemunhos (Figura 48) foram limpos com água corrente a baixa pressão e tiveram sua superfície voltada para a área interna retificada para retirada de massa corrida e pintura (acabamento da área interna) e organizados em grupos experimentais: três amostras — CP03, CP06 e CP08 — permaneceram sem qualquer tipo de tratamento, sendo utilizadas como referência; outras três — CP01, CP02 e CP04 — receberam aplicação de uma dispersão hidrofugante à base de silano-siloxano até a altura de 2 cm a partir da face externa; e um terceiro conjunto — CP07, CP09 e CP10 — foi submetido à aplicação de verniz acrílico também até a altura de 2 cm a partir da face externa.

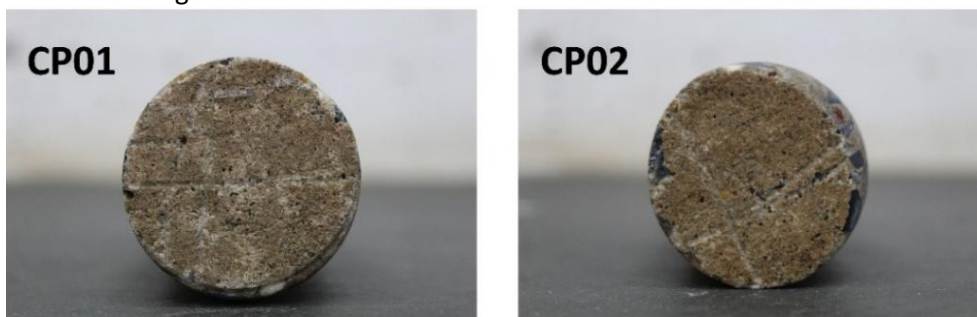
Figura 48 – Testemunhos extraídos da parede noroeste da torre anexa ao RU/UnB.



Fonte: Autor, 2025.

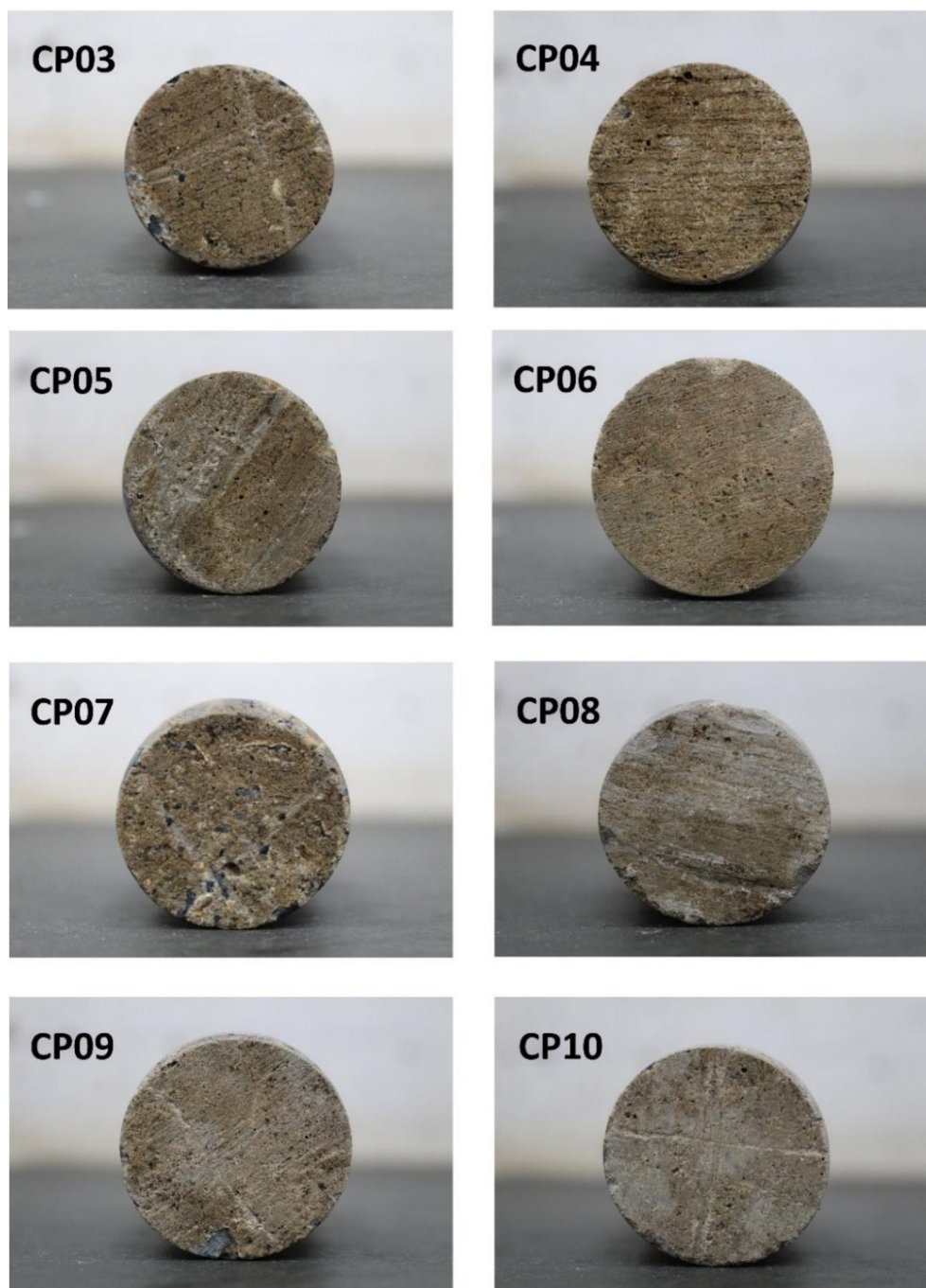
A Figura 49 mostra o topo referente à face externa de cada um dos testemunhos extraídos, podendo-se observar detalhes quanto a textura das superfícies e possíveis danos ou falhas existentes.

Figura 49 – Detalhes das faces externas dos testemunhos.



Fonte: Autor, 2025.

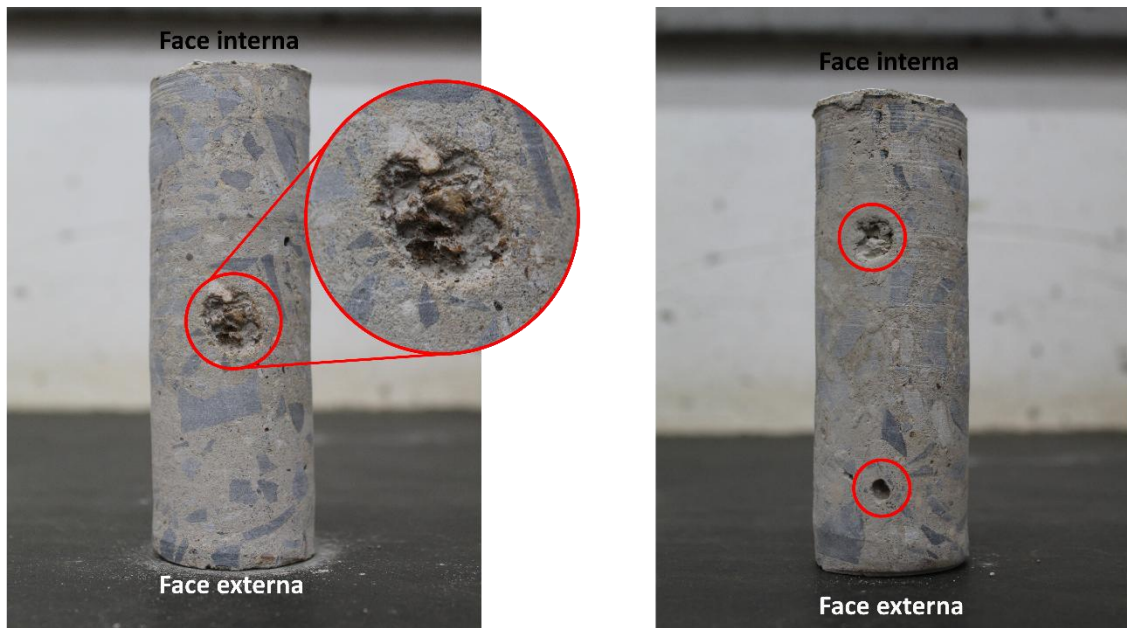
Figura 49 – Detalhes das faces externas dos testemunhos (continuação).



Fonte: Autor, 2025.

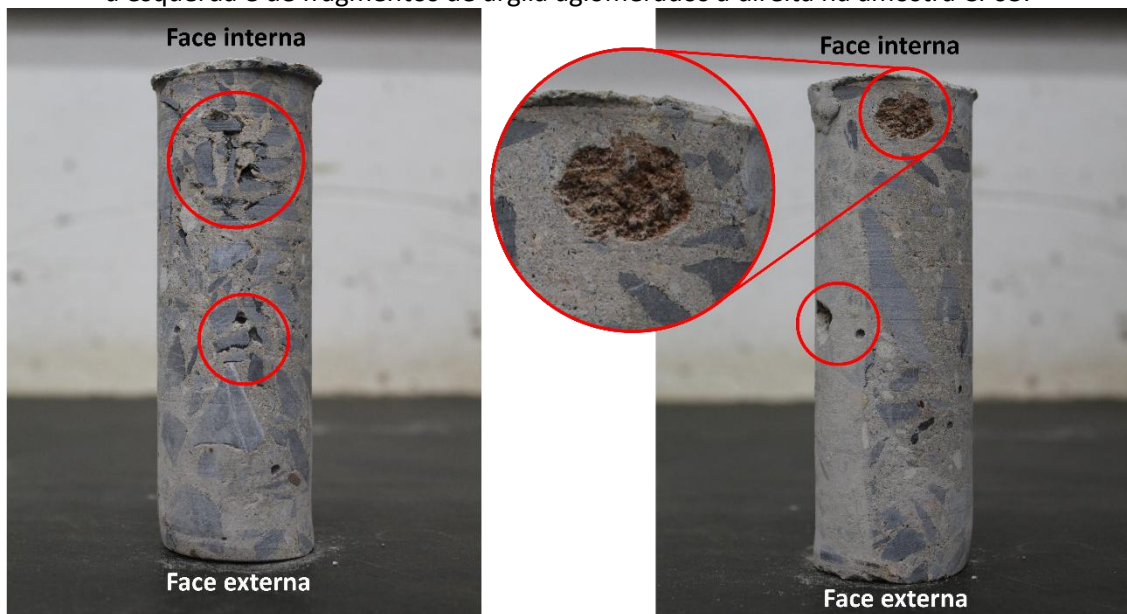
As amostras CP01 (Figura 50), CP03 (Figura 51), CP06 (Figura 52) e CP08 (Figura 53) exibiam aglomerados de argila e incrustações de materiais diversos integrados à matriz do concreto. Nos testemunhos CP06 e CP08, a utilização de água durante o processo de extração com a sonda rotativa provocou a desintegração desses aglomerados argilosos, resultando na formação de vazios no material.

Figura 50 – Indicação, em vermelho, da presença de material aglomerado à esquerda e vazio à direita na amostra CP01.



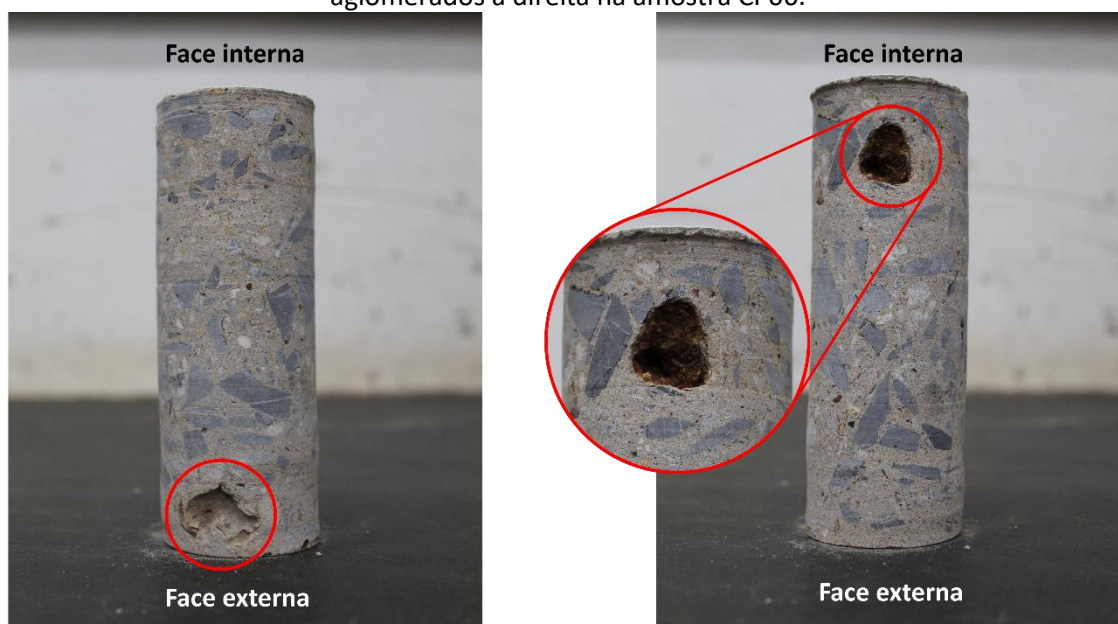
Fonte: Autor, 2025.

Figura 51 – Indicação, em vermelho, da presença de vazios entre agregados (ninho de concretagem) à esquerda e de fragmentos de argila aglomerados à direita na amostra CP03.



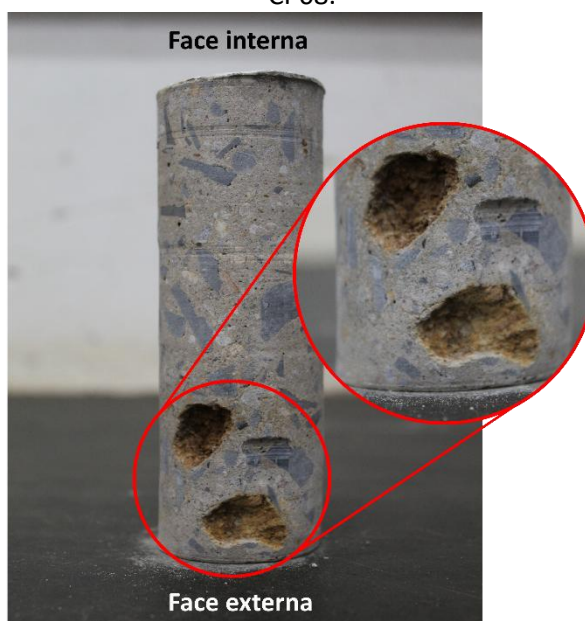
Fonte: Autor, 2025.

Figura 52 – Indicação, em vermelho, da presença de vazio à esquerda e de fragmentos de argila aglomerados à direita na amostra CP06.



Fonte: Autor, 2025.

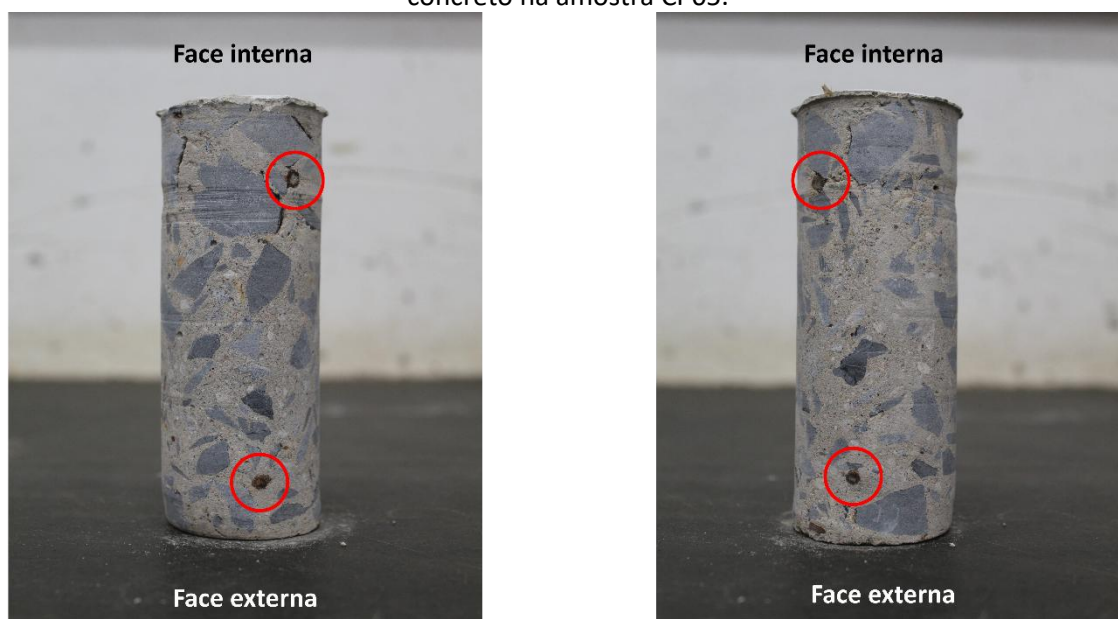
Figura 53 – Indicação, em vermelho, da presença de fragmentos de argila aglomerados na amostra CP08.



Fonte: Autor, 2025.

A amostra remanescente — CP05 — apresentava dois fragmentos de aço provenientes das armaduras da parede (Figura 54) e menor dimensão de altura, por esse motivo, foi destinada exclusivamente aos testes piloto, empregada como ensaio inicial para validação dos procedimentos.

Figura 54 – Indicação, em vermelho, da presença de fragmentos de aço das armaduras da parede de concreto na amostra CP05.



Fonte: Autor, 2025.

Essa distribuição das amostras assegurou representatividade adequada e número mínimo necessário para a aplicação de tratamento estatístico aos resultados, garantindo confiabilidade na interpretação dos dados. Todas as etapas do processo seguiram os padrões técnicos pertinentes, assegurando um procedimento de coleta cuidadoso e representativo, preservando simultaneamente a integridade estrutural e os atributos da superfície de concreto aparente da edificação. Dessa forma, os testemunhos extraídos forneceram a base empírica necessária para a análise do comportamento das superfícies tratadas, contribuindo para os estudos de conservação do concreto aparente em edificações modernas.

4.4. ENSAIOS EM LABORATÓRIO

A etapa de ensaios laboratoriais constitui parte fundamental do presente programa experimental, permitindo uma análise mais detalhada das propriedades físicas e mecânicas do material original e a avaliação do desempenho dos produtos hidrofugantes aplicados. Diferentemente dos testes realizados *in loco*, os ensaios de laboratório oferecem condições com maior controle para a investigação dos mecanismos de interação entre o concreto histórico e os agentes de proteção, assegurando maior precisão na interpretação dos resultados. Para este estudo, foram conduzidos ensaios de: (i) determinação do módulo de elasticidade; (ii) resistividade elétrica volumétrica; (iii) resistividade elétrica superficial; (iv)

absorção de água por capilaridade; (v) permeância ao vapor; (vi) determinação de índice de absorção de água, índice de vazios e massa específica; e (vii) ensaio de determinação de profundidade de carbonatação.

Esses ensaios foram selecionados por sua relevância na avaliação do comportamento do concreto frente à presença de umidade, variáveis ambientais e tratamentos superficiais. Juntos, eles fornecem um panorama abrangente sobre a capacidade de penetração de água líquida e vapor e o desempenho geral dos materiais empregados na proteção das superfícies de concreto. Assim, a realização dessas análises laboratoriais complementa diretamente os resultados obtidos em campo e contribui para a compreensão dos efeitos dos produtos avaliados sobre a durabilidade do concreto aparente em edificações modernas.

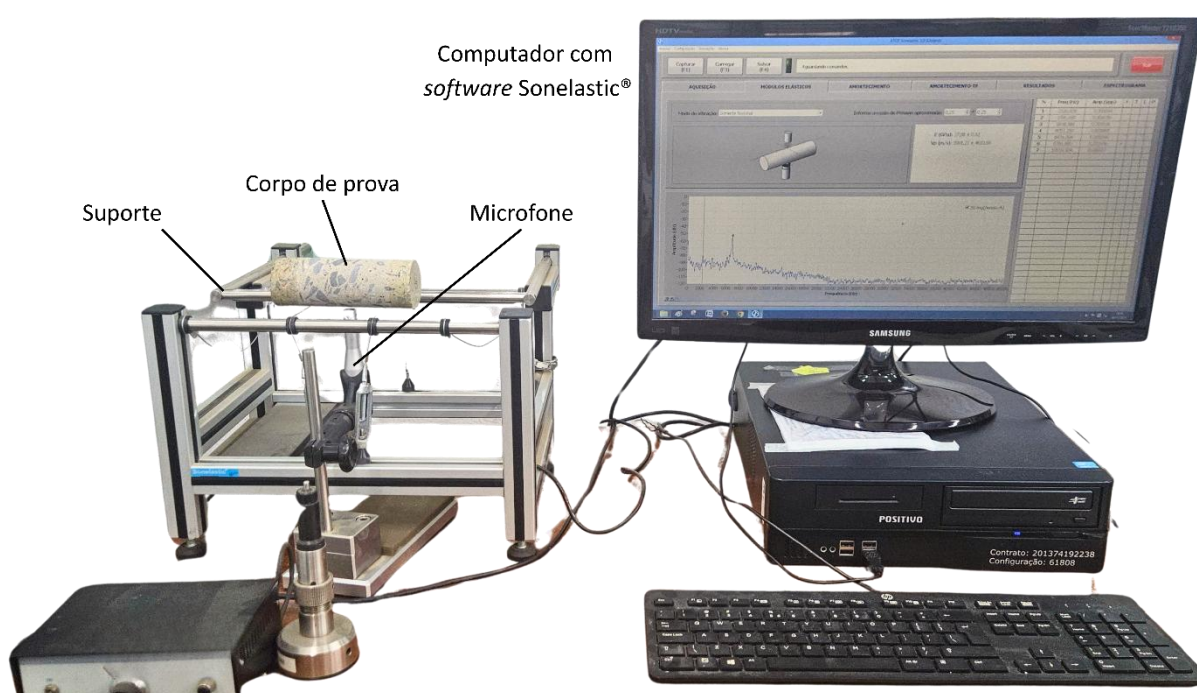
4.4.1. Ensaio de Determinação de Módulo de Elasticidade

Para a caracterização das propriedades elásticas das amostras de concreto, empregou-se um ensaio não destrutivo baseado na excitação por impulso e na identificação das frequências naturais de vibração, com auxílio do sistema Sonelastic®. O procedimento atende aos preceitos estabelecidos pela ABNT NBR 8522-2:2021, que normatiza a determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto endurecido a partir das frequências naturais de vibração, constituindo alternativa de rápida execução e adequada para campanhas experimentais com grande número de corpos de prova (ABNT, 2021). A adoção do módulo dinâmico, bem como sua interpretação e aplicabilidade no contexto de avaliação de desempenho e comparação com módulos obtidos por métodos estáticos, encontra respaldo em discussões técnicas recentes na literatura (Possan *et al.*, 2020; Thomaz; Miyaji; Possan, 2021).

Os ensaios foram conduzidos no arranjo livre-livre, em que os corpos de prova cilíndricos foram posicionados de modo a minimizar restrições externas e permitir a excitação e a leitura adequadas dos modos vibratórios. Previamente ao ensaio, as amostras foram identificadas, pesadas com uma balança de precisão (sensibilidade de 0,01 g) e mensuradas com paquímetro digital, realizando-se medições do diâmetro em diferentes seções ao longo da altura, conforme prática compatível com a verificação geométrica dos testemunhos e com o controle metrológico requerido para a correta caracterização do corpo de prova (ABNT, 2021).

Em seguida, procedeu-se à excitação por percussão leve, e a resposta vibracional foi captada por sensor do tipo microfone acoplado ao sistema, com posterior processamento no domínio da frequência para identificação das frequências fundamentais (Figura 55). Ressalta-se que, no software Sonelastic®, os dados de entrada referentes ao corpo de prova consistem nas medidas de diâmetro, altura e peso (utilizados para obtenção da densidade), os quais, combinados com as frequências medidas e com as formulações previstas na norma, permitem o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico (ABNT, 2021).

Figura 55 – Esquema de montagem do ensaio de determinação do módulo de elasticidade pelo sistema Sonelastic®.



Fonte: Autor, 2025.

4.4.2. Ensaios de Resistividade Elétrica

A determinação da resistividade elétrica do concreto foi realizada com o objetivo de avaliar as propriedades de transporte da matriz cimentícia e sua capacidade de restringir o fluxo de íons. Este parâmetro é um indicador fundamental da durabilidade, uma vez que a resistividade está inversamente correlacionada com a taxa de corrosão das armaduras e com a permeabilidade aos cloretos, sendo influenciada pela porosidade, grau de saturação e composição química da solução dos poros (RILEM TC 154-EMC, 2003).

Os ensaios de resistividade elétrica permitem inferir o potencial de desempenho do material: a resistividade, em conjunto com a disponibilidade de oxigênio, governa a resistência ôhmica do circuito eletroquímico de corrosão (Cascudo, 1997). A condução de corrente ocorre predominantemente através da rede de poros capilares interconectados e microfissuras preenchidas por solução eletrolítica, tornando o parâmetro altamente sensível à umidade e à microestrutura da pasta (AASHTO T 358, 2021).

A resistividade elétrica das amostras foi medida por dois métodos complementares: a resistividade elétrica volumétrica (método de dois eletrodos), e a resistividade elétrica superficial (método dos quatro eletrodos de Wenner), seguindo as diretrizes da AASHTO T 358. Para a execução, foram empregados dispositivos de medição montados em conformidade com os requisitos normativos, utilizando um transformador de isolamento para aplicação de corrente alternada (evitando a polarização dos eletrodos) e multímetros digitais de alta impedância para o registro simultâneo da corrente elétrica e da diferença de potencial.

4.4.2.1. Volumétrica

O ensaio de determinação da resistividade elétrica volumétrica foi conduzido com base nos parâmetros estabelecidos pela norma AASHTO TP 119-2015, com o objetivo de mensurar as propriedades elétricas do concreto endurecido.

Para a execução do ensaio, as amostras de concreto, previamente extraídas da estrutura, foram preparadas de acordo com as especificações normativas. A resistividade elétrico-volumétrica foi determinada utilizando um medidor de resistividade elétrica, que opera por meio da aplicação de corrente alternada através da superfície do concreto: placas de aço inoxidável foram empregadas como eletrodos e posicionadas de forma a acomodar a amostra de concreto entre elas; posteriormente, uma corrente elétrica foi induzida através das placas, enquanto a variação de potencial elétrico correspondente foi registrada; assim, o fluxo de corrente atravessou toda a extensão do corpo de prova, desde a base até o topo.

O ensaio foi conduzido conforme as seguintes etapas:

- **Preparação das Amostras:** As amostras foram retificadas na extremidade correspondente a parte interna da parede de concreto, a fim de se remover as

camadas de tinta e massa corrida aderidas, quando necessário, e garantir um contato uniforme com os eletrodos. Previamente ao ensaio, foram submetidas à saturação completa por meio de imersão em água por um período de 72 horas, conforme requisitos da norma, para uniformizar o teor de umidade nos poros do concreto. Antes da execução do teste, o excesso de água foi removido superficialmente com um pano úmido, atingindo a condição de saturação superficial seca.

- **Configuração do Equipamento:** O equipamento de medição foi calibrado conforme as orientações do fabricante, garantindo-se a adequação das configurações, incluindo a amplitude da corrente aplicada e a disposição dos eletrodos de medição.
- **Posicionamento dos Eletrodos:** Os eletrodos foram dispostos perpendicularmente à superfície da amostra, cujas faces foram cobertas com papel filtro saturado (de resistividade elétrica considerada desprezível), visando melhorar a interface de contato eletrodo-amostra. Este sistema foi utilizado para minimizar a interferência dos contatos superficiais e assegurar maior precisão na medição da resistividade volumétrica.
- **Realização da Medição:** Foi aplicado um sinal de baixa frequência através dos eletrodos externos, enquanto a tensão elétrica foi medida entre os eletrodos internos. Com base no valor de corrente aplicado e na diferença de potencial medida, a resistividade volumétrica foi calculada de acordo com a equação 01.

$$\rho = \frac{V}{I} \times \frac{A}{L} \times 1000 \quad \text{equação 01}$$

onde

ρ : Resistividade elétrica volumétrica ($\Omega \cdot \text{cm}$)

V : Diferença de potencial medida (v)

I : Corrente aplicada (mA)

A : Área da seção transversal da amostra (cm^2)

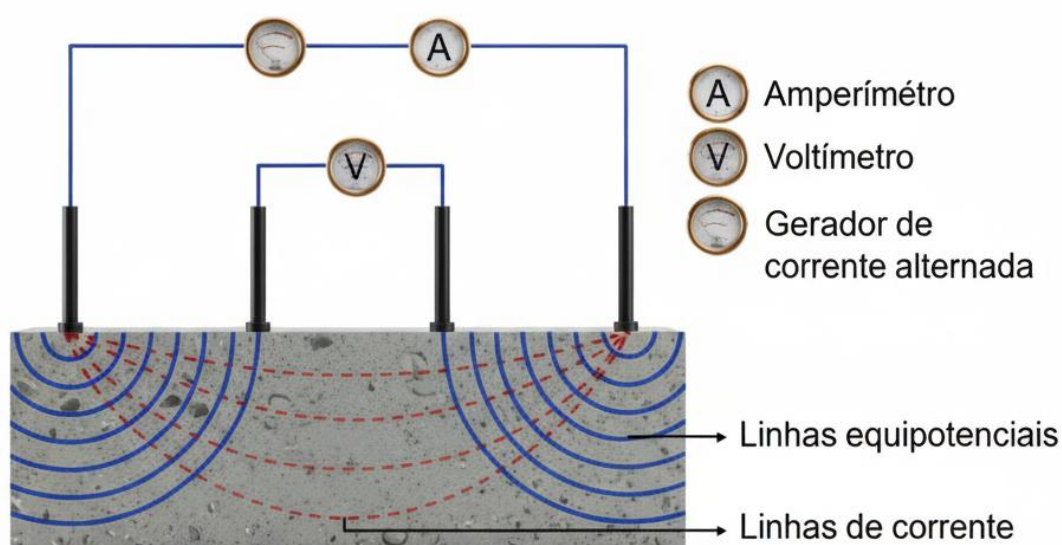
L : Distância entre os eletrodos internos (centímetros)

Foram tomadas medidas de corrente elétrica para diferenças de potencial que variavam de 10v em 10v, entre 10v e 230v.

4.4.2.2. Superficial

A determinação da resistividade elétrica superficial foi realizada utilizando o método dos quatro eletrodos de Wenner (Figura 56). O equipamento empregado para a medição consiste em um conjunto de quatro eletrodos dispostos linearmente, com espaçamento uniforme entre si. O ensaio seguiu as orientações estabelecidas pela norma ASTM G57-06 (2012b) adaptada a amostras de concreto. Durante a execução, os eletrodos, igualmente espaçados em 4 centímetros, foram posicionados em contato com a superfície lateral do corpo de prova de concreto.

Figura 56 – Esquema ilustrativo do ensaio de quatro pontos para medição de resistividade elétrica superficial.



Fonte: adaptado de Wosniack *et al.*, 2021.

No procedimento experimental, uma corrente alternada foi aplicada por meio dos eletrodos externos, enquanto a medição da diferença de potencial elétrico foi realizada pelos eletrodos internos. A resistência elétrica foi calculada com base na Lei de Ohm. Posteriormente, a resistividade elétrica foi determinada por meio da equação 02, considerando as dimensões e características específicas do corpo de prova.

$$\rho = 2 \times \pi \times \alpha \times R \quad \text{equação 02}$$

onde

ρ : Resistividade elétrica superficial ($\Omega \cdot \text{cm}$)

R : Resistência elétrica (Ω)

α : Espaçamento entre eletrodos (cm)

Conforme destacado por Costa e Azzi (2017), os valores de resistividade elétrica obtidos pelo método superficial são, em geral, aproximadamente o dobro daqueles obtidos pelo método de resistividade elétrica volumétrica para concretos que utilizam cimento CP IV.

4.4.3. Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade

A norma ABNT NBR 9779:2012 especifica o método de determinação da absorção de água por capilaridade em argamassas e concretos endurecidos. Este ensaio é importante para avaliar o desempenho do material à absorção de água, fornecendo dados relevantes sobre a sua durabilidade e proteção frente ao possível ingresso de agentes agressivos.

No presente estudo, o ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado com amostras retiradas previamente à execução dos serviços de limpeza e aplicação de proteção no concreto. Essa abordagem permitiu avaliar as propriedades do concreto após o processo de limpeza (3 amostras), e após a aplicação dos produtos de proteção (3 amostras com aplicação de verniz e 3 amostras com aplicação de dispersão silano-siloxano).

As amostras foram submetidas a um processo de secagem em estufa, realizado em temperatura controlada de 40°C, com o objetivo de evitar possíveis danos às microestruturas do concreto, especialmente a formação de microfissuras associadas à dilatação térmica dos agregados graúdos. A adoção desta temperatura moderada fundamenta-se na necessidade de preservar a integridade da rede de poros e evitar a desidratação química de fases sensíveis da matriz cimentícia, garantindo que o estado de saturação interna seja representativo das condições de campo para ensaios de transporte de massa (De Souza; Hooton; Bickley, 1997).

O procedimento de secagem foi conduzido ao longo de cinco dias, sendo realizadas duas pesagens sucessivas, em temperatura ambiente, após resfriamento das amostras, para verificar a constância da massa e garantir que as amostras estivessem secas o suficiente para

realização do ensaio. Após a obtenção da massa constante, as amostras foram mantidas em dessecador a temperatura ambiente até o início do ensaio.

A configuração do ensaio envolveu o posicionamento de cada corpo de prova em um recipiente de vidro semelhante a um aquário (Figura 57), de modo que a amostra ficasse parcialmente imersa em água. O corpo de prova foi apoiado sobre dois bastões de vidro, posicionados para manter uma das faces circulares em contato direto com a água, com o nível de submersão ajustado para 5 mm acima da face inferior, ao longo de sua geratriz, ou altura, e temperatura ambiente em 23°C. Esse arranjo seguiu os procedimentos detalhados da respectiva norma técnica.

Figura 57 – Disposição dos testemunhos dentro do recipiente para realização do ensaio de absorção de água por capilaridade conforme ABNT NBR 9779:2012.



Fonte: Autor, 2025.

As pesagens foram realizadas com uma balança de precisão (sensibilidade de 0,01 g) em intervalos de tempo específicos: 3, 6, 24, 48 e 72 horas. A cada intervalo, os corpos de prova foram retirados das bandejas, secos com um pano limpo, pesados em balança de precisão, e recolocados na solução, com reposição de água para manter o nível de submersão constante durante todo o experimento. Esse procedimento possibilitou o registro do aumento de massa ao longo do tempo, permitindo o cálculo da quantidade de água absorvida pelas amostras.

A absorção de água por capilaridade foi expressa como a quantidade de água absorvida por unidade de área de superfície exposta. Os resultados obtidos permitiram avaliar a taxa de absorção de água do concreto após a aplicação das técnicas de limpeza e proteção, contribuindo para a compreensão do comportamento dos tratamentos utilizados.

4.4.4. Ensaios de Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica

No estudo para caracterização do material, a determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica revela-se necessária para auxiliar a determinar algumas de suas propriedades físicas e mecânicas. Esses parâmetros servem como indicadores diretos da porosidade e da durabilidade do material, influenciando seu desempenho quando exposto às condições ambientais, com exposição à umidade e ciclos de intempéries. A norma ABNT NBR 9778:2005 estabelece os procedimentos padronizados para a execução desses ensaios em laboratório, garantindo resultados mais precisos e confiáveis.

A absorção de água reflete a capacidade do concreto em absorver e reter umidade em seus poros, fator que impacta diretamente a resistência a processos de deterioração, como penetração de agentes químicos agressivos e, consequentemente, a longevidade estrutural. Valores reduzidos de absorção são preferíveis em alguns casos, pois sinalizam menor porosidade e maior densidade do material, contribuindo para sua proteção. Complementarmente, o índice de vazios quantifica a proporção do volume de poros e cavidades em relação ao volume total da amostra de concreto. Um índice elevado pode indicar maior vulnerabilidade a entrada de água e gases, comprometendo a durabilidade e a estabilidade da estrutura ao longo do tempo. Já a massa específica é definida como a relação entre a massa do material e seu volume aparente, incluindo poros e vazios.

Conforme preconizado pela ABNT NBR 9778:2005, o procedimento para esses ensaios inicia-se com a secagem das amostras em estufa, até que atinjam massa constante, sob temperatura controlada em aproximadamente 105°C, eliminando toda a umidade residual. Em seguida, os corpos de prova são imersos em água por um período mínimo de 72h e então colocados em um recipiente com água que é levado a ebulição por um período de 5h, até alcançar saturação completa, preenchendo os vazios acessíveis e permitindo a medição da capacidade de absorção. Realizam-se pesagens das amostras nas condições seca (M_s) e saturada, esta última, em balança comum (M_{sat}) e em balança com pesagem hidrostática (M_i). Ambas as pesagens foram realizadas com uma balança de precisão (sensibilidade de 0,01 g).

No caso deste programa experimental, a etapa de saturação ocorreu anteriormente a etapa de secagem em estufa, a partir do teor de umidade da amostra acondicionada no

ambiente do laboratório, de forma a evitar danos causados pelo aumento da temperatura nas amostras durante a secagem, principalmente relacionados à fissuração.

Utilizando esses dados, aplicam-se as fórmulas normativas para determinar os parâmetros de interesse. A absorção de água A (em porcentagem) é calculada como a relação entre o ganho de massa pela imersão e a massa seca M_s do material:

$$A = \left(\frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s} \right) \times 100 \quad \text{equação 09}$$

O índice de vazios IV (em porcentagem) representa a fração dos vazios acessíveis pelo volume total aparente e é derivado da absorção de água:

$$IV = \left(\frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_{\text{sat}} - M_i} \right) \times 100 \quad \text{equação 10}$$

A massa específica seca ρ_s , em g/cm^3 , é obtida pela relação entre a massa seca e a diferença entre a massa saturada e a massa saturada medida em balança hidrostática:

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_{\text{sat}} - M_i} \quad \text{equação 11}$$

A massa específica aparente saturada ρ_{sat} , em g/cm^3 , segue procedimento análogo, utilizando a massa saturada superficialmente seca:

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{M_{\text{sat}}}{M_{\text{sat}} - M_i} \quad \text{equação 12}$$

Por fim, a massa específica real ρ_r , em g/cm^3 , que exclui os vazios do cálculo, é determinada pela massa seca dividida pelo volume dos sólidos, ajustado pela saturação:

$$\rho_r = \frac{M_s}{M_s - M_i} \quad \text{equação 13}$$

Essa metodologia assegura maior precisão aos resultados, fornecendo subsídios para a caracterização do material e para a análise da influência da umidade nas superfícies de concreto aparente em estratégias de conservação.

4.4.5. Ensaio de Permeância ao Vapor d'Água

O ensaio para a determinação das propriedades de transmissão de vapor d'água foi conduzido sob as diretrizes da norma ISO 12572:2016, com o objetivo de quantificar a resistência ao fluxo de vapor através do concreto. Esta avaliação é fundamental para o projeto de sistemas construtivos que controlam a umidade e previnem as condensações, evitando manifestações patológicas como o mofo, além de garantir durabilidade e habitabilidade. A escolha por utilizar discos cortados a partir dos testemunhos de concreto retirados das paredes do RU/UnB (Figura 58) permitiu que os resultados fossem representativos do material original em uso real, assegurando a fidelidade dos dados obtidos para a estrutura histórica analisada.

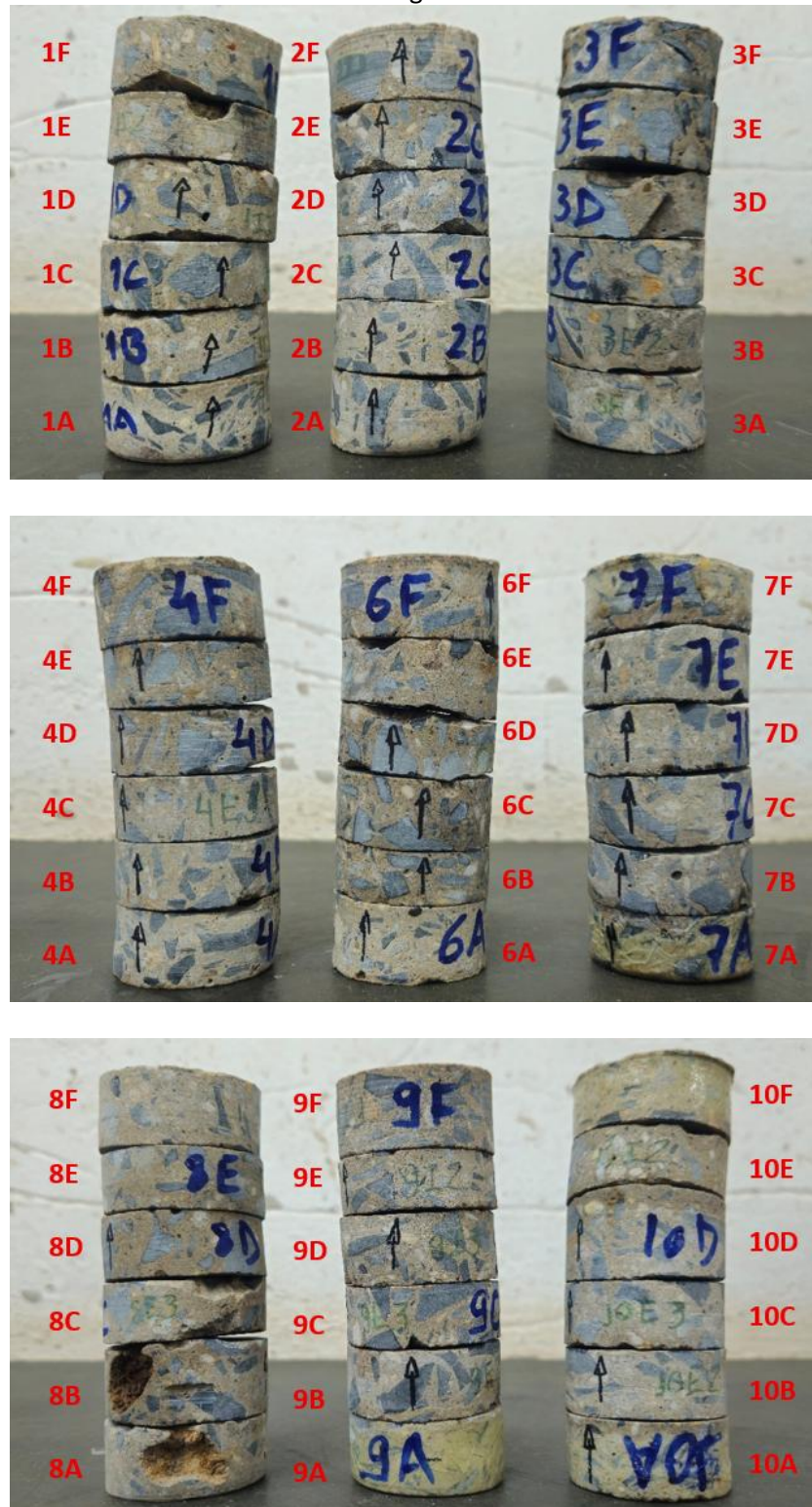
O estudo dividiu as amostras em três grupos experimentais: concreto natural (referência), concreto com aplicação de silano-siloxano, e concreto com aplicação de verniz. Foram testadas apenas três amostras para cada grupo, uma quantidade influenciada diretamente pela disponibilidade limitada de testemunhos extraídos da estrutura⁴, o que impossibilitou o atendimento aos critérios mínimos de amostragem estabelecidos no item 6.3 da norma, mas suficientes para os objetivos desta pesquisa.

No que tange à preparação das amostras, seguiu-se rigorosamente o item 6.1 da norma: os testemunhos foram fatiados em discos e posteriormente retificados em sua face interna, buscando-se uma padronização no dimensionamento em 50 mm de diâmetro e 20 mm de espessura. Os discos foram identificados por um número, referente ao identificador do testemunho do qual foi cortado e por uma letra, de A a F, sendo que A representa a face externa da amostra exposta ao ambiente e F, a face interna à edificação. As amostras utilizadas no ensaio foram os discos referentes às faces externas, sem e com aplicação de

⁴ Em edificações de valor arquitetônico, deve-se evitar o impacto visual causado pela quantidade elevada de extração de testemunhos. No caso da presente pesquisa de dissertação, de caráter exploratório e metodológico, não se justifica uma investigação exaustiva por meio de ensaios destrutivos.

produtos de proteção – totalizando 9 amostras –, e 3 (três) amostras representantes da face interna da estrutura (2F, 8F e 9F) – que apresentavam melhor integridade física a olho nu.

Figura 58 – Testemunhos cortados em discos para realização do ensaio de permeância ao vapor d'água.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 60 – Recipiente em plástico impresso em 3D para realização do ensaio de permeância ao vapor à esquerda e representação realista de corte da amostra à direita.



Fonte: elaborado pelo autor com auxílio de IA – ONE, 2026.

O ensaio seguiu a configuração de copo seco B (Tabela 2), ajustada para uma umidade relativa de 71% na câmara climatizada em função das particularidades do clima local. Esse gradiente de umidade induz o fluxo de vapor do ambiente externo em direção ao dessecante interno, simulando o comportamento do material quando a transferência é dominada pela difusão. Dentro da câmara de ensaio, não foi instalado nenhum mecanismo para promover a circulação do ar.

Tabela 2 – Condições de ensaio de permeância ao vapor d'água indicadas no item 7.1, tabela 1 da norma ISO 12572:2016.

Configuração	Condições de temperatura (°C) e umidade relativa (%)	Temperatura (°C)	Tolerâncias			
			Umidade relativa (%)			
			Estado seco		Estado úmido	
			Ponto	Tolerância	Ponto	Tolerância
A	23 – 0/50	23 ± 1	0	+5	50	±5
B	23 – 0/85 (71)	23 ± 1	0	+5	85	±5
C	23 – 50/93	23 ± 1	50	±5	93	±5
D	38 – 0/93	38 ± 1	0	+5	93	±3
E	23 – 50/100	23 ± 1	50	±5	100	

NOTA 1: Os testes de copo seco (condição A) fornecem informações sobre o desempenho de materiais em baixas umidades quando a transferência de umidade é dominada pela difusão de vapor. Os testes de copo úmido (condição C) fornecem orientação sobre o desempenho de materiais em condições de alta umidade. Em umidades mais altas, os poros dos materiais começam a se encher de água; isso aumenta o transporte de água líquida e reduz o transporte de vapor. Os testes nessa área, portanto, fornecem algumas informações sobre o transporte de líquidos dentro dos materiais. Isso é discutido mais detalhadamente na ISO 15148.

Tabela 2 – Condições de ensaio de permeância ao vapor d'água indicadas no item 7.1, tabela 1 da norma ISO 12572:2016 (continuação).

NOTA 2: A configuração E é usada para amostras de baixa resistência ($S_d \leq 0,1\text{m}$)

^a Soluções salinas saturadas, que regulam a umidade relativa no copo em algum valor menor que 100%, são usadas porque, com muitos materiais, há um perigo de condensação ocorrendo na parte inferior da amostra, o que interrompe o fluxo de vapor. No caso de materiais de resistência muito baixa com $S_d \leq 0,1\text{m}$, as taxas de fluxo de vapor são tão altas que a) a condensação é improvável e b) a solução salina saturada pode não permanecer em equilíbrio durante o repouso. Neste caso, água destilada deve ser usada no copo de teste. Mais informações sobre o uso de solução salina saturada são fornecidas em 9.6.

Nota A: condições de teste na configuração B destacada, pois será a configuração utilizada nos ensaios nesta pesquisa com ajuste de umidade relativa para 71%, indicado entre parênteses.

Fonte: ISO, 2016. Traduzido pelo autor.

A câmara de ensaio (Figura 61) foi estruturada a partir de uma estufa com dupla porta, composta por uma porta externa metálica e uma porta interna em vidro, a qual permitiu a inspeção visual das amostras durante o procedimento. Ambas as portas apresentavam sistema de vedação, assegurando o isolamento entre o ambiente interno da estufa e o ambiente externo do laboratório, de modo a reduzir trocas indesejadas de ar e vapor e contribuir para a estabilidade das condições de ensaio.

As amostras foram posicionadas no interior da câmara de ensaio, distribuídas nas prateleiras internas, permanecendo expostas à atmosfera controlada do equipamento ao longo de todo o ensaio. Para viabilizar a pesagem sem remoção das amostras do ambiente interno da câmara de ensaio, cada conjunto foi suspenso por fios de poliestireno. Os fios foram conduzidos por um furo localizado na parte superior da câmara, e conectados a uma balança apoiada sobre o equipamento, dotada de gancho para pesagem por baixo. Dessa forma, as determinações de massa puderam ser realizadas com mínima perturbação das condições internas, preservando a repetibilidade das medições e a representatividade do comportamento higroscópico observado.

O controle das condições ambientais internas durante o ensaio foi realizado por meio de um termohigrômetro instalado no interior da câmara de ensaio, utilizado para monitoramento contínuo (ou em intervalos definidos) da temperatura e da umidade relativa, parâmetros necessários à interpretação dos resultados de transporte de vapor e à verificação da constância das condições estabelecidas para o ensaio. A velocidade do ar dentro da câmara foi mantida em 0,00 m/s e a umidade relativa do ar interno foi mantida próxima a 71% por meio de uma solução salina de cloreto de sódio próxima ao ponto de saturação, com concentração de aproximadamente 26,4% em massa (ASTM, 2012a).

Figura 61 – Câmara de ensaio de permeância ao vapor, a partir da adaptação de uma estufa. Em destaque, esquema da dinâmica de transporte de vapor na amostra durante o ensaio de copo seco.



Fonte: elaborado pelo autor com auxílio de IA – ONE, 2026.

As amostras foram estabilizadas por sete dias em um ambiente com temperatura de 23°C e umidade relativa do ar de 50% até atingirem massa constante e, após a montagem nos copos, foram inseridas na câmara de ensaio e monitoradas por meio de pesagens realizadas pela parte superior da câmara: na primeira semana, as medições foram realizadas a cada dois dias; a partir da segunda semana, a frequência passou a ser diária, exceto aos domingos e feriados. Os conjuntos foram suspensos na balança por fios de polipropileno, material que não absorve umidade, assegurando que as variações de massa registradas fossem decorrentes apenas da passagem de vapor pelo concreto. O processo foi mantido sem a retirada das amostras da atmosfera controlada da câmara até que a taxa de ganho de massa apresentasse estabilidade total ou após a realização de 30 pesagens na balança de precisão (sensibilidade de 0,01 g).

Por fim, os dados coletados permitiram o cálculo de parâmetros para a caracterização do concreto estudado e dos métodos de proteção aplicados. Foram determinadas a

permeabilidade ao vapor de água (δ), expressa em kg/(m.s.Pa) (equação 03), e a espessura da camada de ar equivalente (S_d), que indica a espessura de uma camada de ar, em metros, com resistência equivalente à da amostra (equação 07). O fator de resistência à difusão do vapor de água (μ) foi obtido da relação adimensional entre a permeabilidade do ar e a do material (equação 06), fornecendo parâmetros sobre a capacidade de difusão de vapor do material estrutural avaliado.

$$\text{Permeabilidade ao Vapor de Água: } \delta = W \times d \quad \text{equação 03}$$

onde

$$\text{Permeabilidade ao Vapor de Água do Ar: } W = \frac{G}{A \times \Delta_p} \quad \text{equação 04}$$

$$\Delta_p = \phi \times 610,5 \times e^{\frac{17,269 \times \theta}{237,3 + \theta}} \quad \text{equação 05}$$

$$\text{Difusão de Vapor de Água: } \mu = \frac{\delta_{ar}}{\delta_{mat}} \quad \text{equação 06}$$

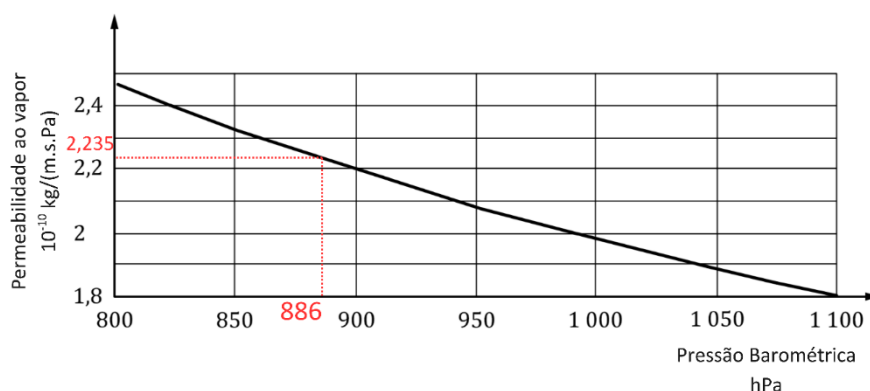
$$\text{Espessura de Ar Equivalente: } S_d = \mu \times d = \delta_{mat} \times Z \quad \text{equação 07}$$

onde

$$Z = \frac{1}{W} \quad \text{equação 08}$$

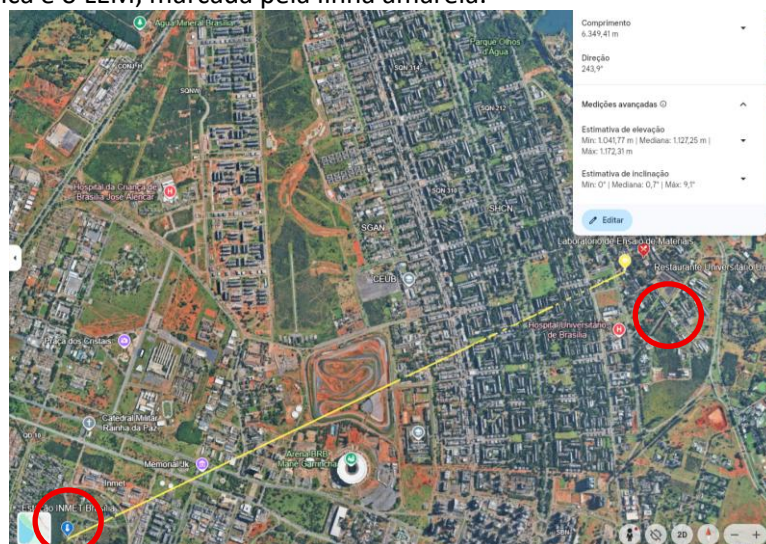
Para o cálculo do fator de resistência à difusão do vapor de água do material, foi considerada que a permeabilidade ao vapor de água do ar (W) e do material variam igualmente com a pressão barométrica. Por isso, o fator de resistência à difusão de vapor da água (μ) é considerado independente da pressão barométrica. Para isso, considera-se o valor de permeabilidade ao vapor de água do ar conforme o gráfico da Figura 62 para pressão barométrica média em Brasília igual a 88606 Pa, conforme dados da estação meteorológica convencional do INMET localizada a aproximadamente 6,5km do laboratório (Figura 63).

Figura 62 – Gráfico do fator de permeabilidade ao vapor de água do ar em função da pressão barométrica a 23°C.



Fonte: ISO 12572:2016.

Figura 63 – Distância em linha reta entre a estação meteorológica com equipamentos de medição de pressão barométrica e o LEM, marcada pela linha amarela.



Fonte: elaborado pelo autor com auxílio do Google® Earth, 2026.

4.4.6. Ensaio de Determinação de Profundidade de Carbonatação

A carbonatação do concreto é um fenômeno físico-químico resultante da difusão do dióxido de carbono (CO_2) atmosférico através dos poros da matriz, culminando na reação com os produtos de hidratação do cimento — notadamente o hidróxido de cálcio ou portlandita $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$. Este processo promove a redução do pH do eletrólito interno (de valores próximos a 12,5 para níveis inferiores a 9,0), o que desestabiliza a camada passivadora das armaduras. Consequentemente, a determinação da profundidade de carbonatação é um parâmetro crítico para o diagnóstico da durabilidade e para a estimativa da vida útil remanescente da estrutura (Helene, 1993).

O ensaio foi realizado por método colorimétrico, fundamentado na transição de cor do indicador químico fenolftaleína (solução alcoólica a 1%). O princípio baseia-se na variação do pH: em zonas com alcalinidade preservada ($\text{pH} > 9,0$ a $10,0$), o indicador assume coloração carmim/violácea; em regiões carbonatadas (pH reduzido), o concreto permanece incolor (ISO 1920-12, 2015).

Para este estudo, a determinação foi efetuada nos testemunhos 1, 3, 6, 7, 9 e 10. Diferentemente de métodos que utilizam o corte serrado, optou-se pela exposição de superfícies fraturadas. O fraturamento transversal das amostras é tecnicamente superior por evitar a contaminação da face de leitura com pó de serragem (que pode mascarar a frente real) e por garantir que o indicador reaja com uma superfície de matriz cimentícia recém-exposta e íntegra.

Após o fraturamento e a aspersão uniforme da solução, aguardou-se a estabilização visual da reação. A profundidade de carbonatação foi obtida pela medição da distância perpendicular entre a superfície externa (exposta ao ambiente) e a frente de cor carmim. As leituras foram realizadas com o auxílio de um paquímetro digital de precisão, efetuando-se múltiplas medições ao longo da seção transversal para mitigar a influência de heterogeneidades, como a presença de agregados graúdos que podem atuar como barreiras à difusão (efeito de parede).

Embora o método forneça uma estimativa pontual e dependa de fatores como a umidade no momento do ensaio, a utilização de superfícies recém fraturadas nos testemunhos selecionados confere maior confiabilidade aos dados obtidos, permitindo correlacionar a profundidade da frente com a espessura do revestimento nominal existente (Rilem, 1988).

4.5. ENSAIOS *IN LOCO* – ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (END) EM CAMPO

A realização de ensaios *in loco* em paredes de concreto de edificações é uma prática para avaliar suas propriedades diretamente no ambiente onde estão inseridas. Esses ensaios permitem uma análise realista das condições estruturais e de durabilidade, considerando fatores ambientais e construtivos que podem afetar o desempenho do concreto ao longo do tempo.

Os ensaios *in loco* têm como finalidade avaliar as características do concreto após sua aplicação em um contexto real. Isso pode incluir a resistência mecânica, a presença de fissuras, a uniformidade, bem como a penetração de umidade e a concentração de agentes agressivos, como cloretos e sulfatos.

4.5.1. Ensaio de Absorção de Água com Tubos de Karsten

O ensaio de absorção de água utilizando tubos Karsten foi conduzido *in loco* com o objetivo de avaliar a permeabilidade superficial do concreto aparente da edificação, permitindo estimar sua suscetibilidade à penetração de água, sobretudo em situações de chuva dirigida. Trata-se de um método que fornece uma indicação direta da porosidade e da resistência da superfície à penetração de água sob um gradiente hidráulico, parâmetros necessários para o entendimento da durabilidade do material em condições ambientais adversas. Para a campanha experimental, foram delimitadas duas áreas amostrais distintas na parede de concreto aparente (Figura 64), estruturadas para permitir a análise comparativa do substrato em diferentes condições de conservação e tratamento.

O ensaio foi estruturado em três etapas consecutivas, desenhadas para monitorar a evolução do desempenho higrotérmico da fachada:

- Etapa I (Estado Original): Caracterização do substrato envelhecido, mantendo-se a integridade da camada de sujidades e depósitos atmosféricos acumulados para estabelecer uma linha de base (estado de referência) do desempenho da fachada em sua condição atual.
- Etapa II (Após Limpeza): Avaliação do substrato após a preparação da superfície por limpeza mecânica com hidrojateamento, visando medir a capacidade de absorção da matriz cimentícia desobstruída.
- Etapa III (Após Tratamento): Medição após a aplicação de produtos de proteção, sendo aplicado verniz protetivo na Área 1 e dispersão de silano-siloxano na Área 2.

Figura 64 – Mapeamento dos locais de aplicação dos produtos protetores e realização do ensaio de absorção com tubos Karsten.



Fonte: Autor, 2026.

A preparação para a segunda etapa consistiu na limpeza mecânica por hidrojateamento, utilizando-se uma lavadora de alta pressão. A operação foi executada com pressão máxima de aproximadamente 2200 psi (15 MPa), mantendo-se uma distância média de 20 cm e variação angular do jato entre -45° e 45° em relação ao plano da parede.

Esta técnica é reconhecida por sua eficácia na remoção de contaminantes, sem induzir danos mecânicos à matriz cimentícia. A ausência de detergentes garantiu a neutralidade química da superfície, assegurando que os ensaios de absorção de água refletissem com precisão as propriedades originais do concreto, sem interferências externas (DER/SP, 2006).

Como requisito para garantir a repetibilidade e a representatividade das medições, cada ensaio foi realizado apenas após um período de três dias consecutivos sem chuvas. Adicionalmente, procedeu-se à conferência da umidade superficial, validando-se valores inferiores a 6% antes do início das atividades. Para este monitoramento, utilizou-se um higrômetro de superfície, posicionado firmemente contra o concreto nos pontos em que foram realizados os ensaios.

Para a execução, foram utilizados tubos Karsten verticais com gradiente hidráulico de 5 ml (Figura 65), fixados à superfície com massa para calafetar e adesivo à base de poliuretano (PU) (Figuras 66 e 67). Estes materiais conferiram vedação adequada e estanqueidade ao dispositivo, mesmo sobre as sujidades presentes na primeira etapa (sem limpeza), assegurando que somente a área testada permanecesse em contato com o líquido.

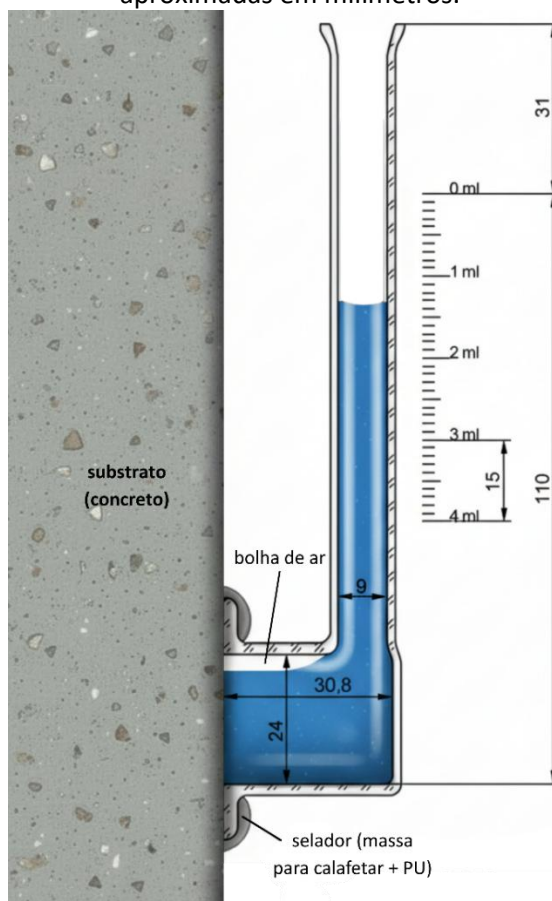
Uma vez fixado e preenchido até a marca de 0 ml, o nível da água foi monitorado a intervalos regulares de cinco minutos. Após cada leitura, o tubo era novamente completado até a marca inicial, mantendo-se constantes as condições de pressão exercida pela coluna d'água durante todo o período de observação.

Figura 65 – Imagem de cachimbo para permeabilidade, tubo de Karsten, de parede.



Fonte: Solotest®, 2025.

Figura 66 – Esquema ilustrativo do posicionamento do tubo de Karsten de parede, medidas aproximadas em milímetros.



Fonte: adaptado de Lauar *et al.*, 2017.

Figura 67 – Imagem da parede do RU, com sujidade: realização do ensaio com tubos Karsten fixados com PU e massa para calafetar.



Fonte: Autor, 2025.

Ao término das medições, a taxa de absorção de água foi determinada em termos de volume absorvido por unidade de área e por unidade de tempo. Esse indicador permitiu quantificar o comportamento de permeabilidade superficial do concreto e comparar o desempenho das diferentes condições avaliadas, fornecendo subsídios para o diagnóstico do estado de conservação e a avaliação dos tratamentos protetivos.

4.5.2. Avaliação de Resistência Mecânica Superficial por Esclerometria de Reflexão

O ensaio *in loco* com esclerômetro, também conhecido como martelo de Schmidt, é uma técnica amplamente utilizada para estimar a resistência à compressão do concreto em estruturas de concreto armado. Este método não destrutivo é valioso por sua simplicidade e rapidez, permitindo uma avaliação preliminar do estado do concreto sem causar danos significativos à estrutura.

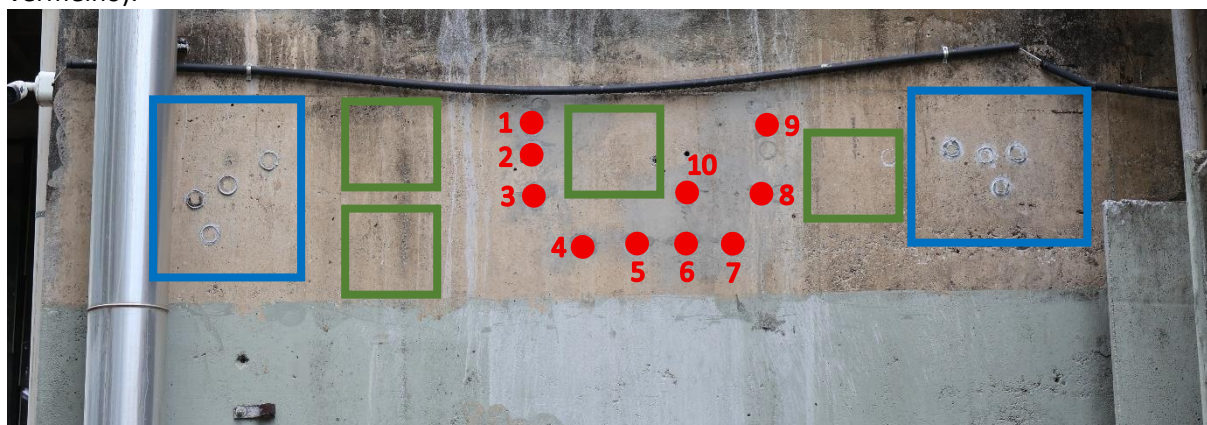
O ensaio de resistência é realizado conforme recomendações da norma ABNT NBR 7584:2012 – Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio, e foi focado em quatro áreas próximas a realização dos demais ensaios. Estes pontos proporcionam uma média representativa da área tratada como um

todo. O esclerômetro, ou durômetro, utilizado foi o modelo MTK-1015 da MetroTokyo®, com calibração certificada.

O principal objetivo do ensaio com esclerômetro é fornecer uma estimativa da resistência à compressão superficial do concreto, por meio não destrutivo. Esta informação pode ser usada para monitorar a integridade estrutural ao longo do tempo, detectar variações de qualidade no concreto e identificar áreas que possam necessitar de testes mais detalhados ou reforço.

As áreas de ensaio foram escolhidas por serem locais representativos da estrutura: livres de manifestações patológicas de extensão e/ou severidade significativas visíveis a olho nu; que não foram limpas; e não tiveram a aplicação de produto protetivo (Figura 68).

Figura 68 – Mapeamento dos locais de realização do ensaio de esclerometria (em verde), de realização do ensaio de absorção de água com tubos Karsten (em azul), e de retirada dos testemunhos (em vermelho).



Fonte: Autor, 2026.

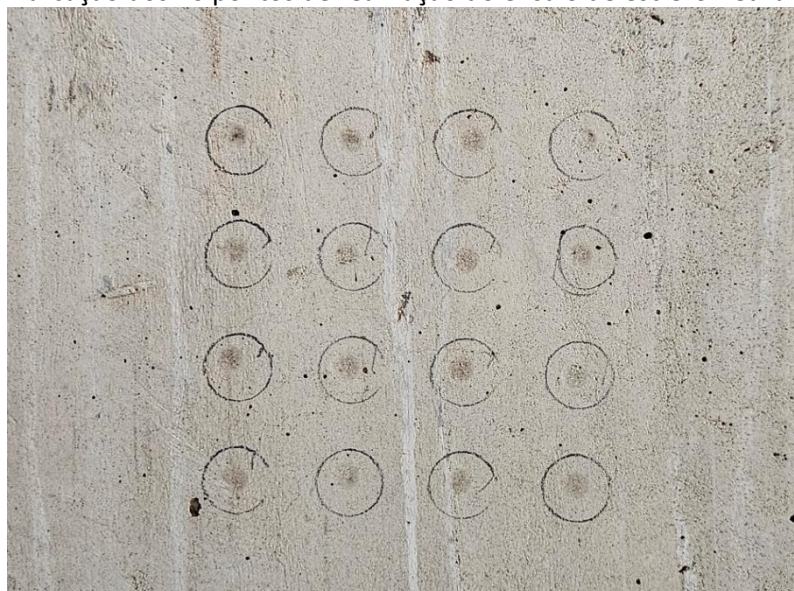
Antes de iniciar o ensaio, garantiu-se que o esclerômetro estivesse devidamente calibrado, o que garantiu a precisão das leituras e maior confiabilidade dos resultados. O esclerômetro foi então pressionado perpendicularmente contra a superfície do concreto (ângulo de 0°, paralelo ao solo), e o pistão interno liberado para impactar a superfície (Figura 69). A força do impacto provocou um recuo, que foi medido pelo esclerômetro em termos de índice de rebote. Para a coleta dessas informações, devem ser realizados ao menos 16 medições (Figura 70), de forma a se garantir o tratamento estatístico adequado indicado em norma.

Figura 69 – Realização do ensaio de esclerometria do concreto.



Fonte: Autor, 2025.

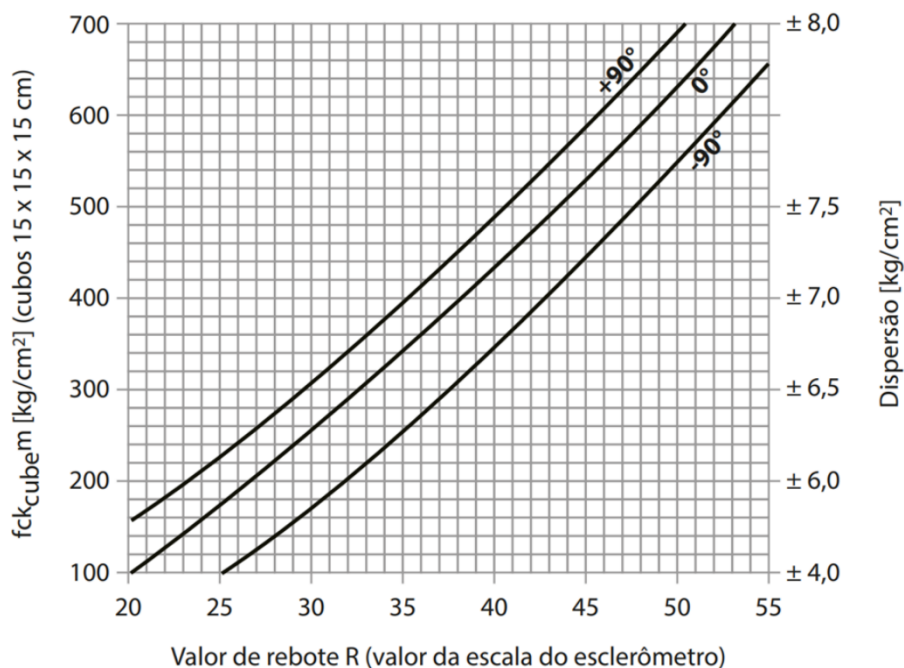
Figura 70 – Marcação dos 16 pontos de realização do ensaio de esclerometria do concreto.



Fonte: Autor, 2025.

Por fim, o índice de rebote médio é convertido em resistência à compressão do concreto usando curvas de correlação fornecidas pelo fabricante do esclerômetro, conforme gráfico da Figura 71.

Figura 71 – Gráfico de curva de conversão para o esclerômetro modelo MTK-1015 Metrotokyo®.



Fonte: Metrotokyo®, 2025.

4.6. Considerações Finais da Seção

Esta seção apresentou o conjunto de ensaios experimentais realizados para esta dissertação, estruturado de modo a articular o diagnóstico do concreto aparente e a análise de seu comportamento frente aos mecanismos de transporte de umidade e às propriedades correlatas.

Considerando a natureza heterogênea de concretos envelhecidos em estruturas reais, optou-se por combinar procedimentos *in loco* e em laboratório, permitindo, por um lado, registrar respostas do material sob condições reais de exposição e, por outro, obter parâmetros controlados e comparáveis para interpretação técnica dos resultados.

5. RESULTADOS

A presente seção dedica-se exclusivamente à apresentação dos resultados obtidos ao longo do programa experimental, contemplando os dados provenientes dos ensaios laboratoriais e das atividades realizadas *in loco*. O objetivo aqui é organizar e expor, de maneira clara e sistemática, os valores, registros e observações coletados durante a etapa experimental.

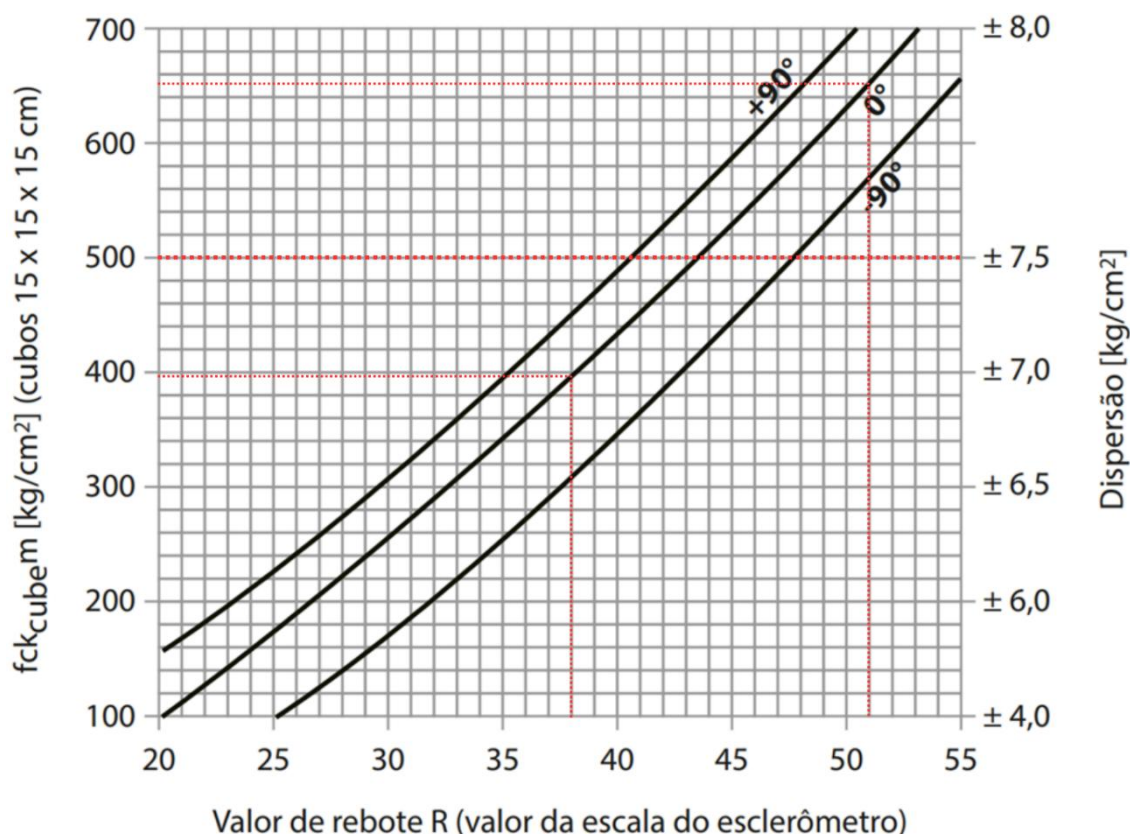
Os resultados são apresentados de modo a facilitar a compreensão do leitor e permitir a visualização integrada das informações produzidas, conforme os procedimentos e métodos estabelecidos na seção 4. São incluídos os dados referentes ao comportamento físico e mecânico dos testemunhos, ao desempenho dos diferentes tratamentos aplicados, aos produtos gerados pelas etapas de ensaios de caracterização do material e do desempenho dos produtos protetores e às condições de exposição.

5.1. RESISTÊNCIA MECÂNICA SUPERFICIAL POR ESCLEROMETRIA DE REFLEXÃO

Os ensaios de esclerometria (martelo de reflexão) foram realizados *in loco* em quatro áreas distintas da estrutura, com o objetivo de estimar a resistência à compressão superficial do concreto a partir dos índices de rebote obtidos em campo. Em cada área de ensaio, adotaram-se os procedimentos previstos na ABNT NBR 7584:2012, com a realização de 16 medições por ponto e posterior tratamento dos dados, de modo a assegurar a representatividade dos resultados e reduzir a influência de leituras discrepantes.

Concluída a etapa de coleta e depuração, os valores de índice de rebote remanescentes foram inseridos no gráfico de correlação disponibilizado pelo fabricante, permitindo a associação dos índices medidos aos correspondentes valores estimados de resistência à compressão (f_{ckm}). A partir desse procedimento, verificou-se que os valores de resistência estimados variaram entre 40 MPa e 65 Mpa (Figura 72), refletindo a dispersão observada entre as áreas avaliadas e as leituras consideradas válidas após o tratamento estatístico.

Figura 72 – Curva de conversão para o esclerômetro modelo MTK-1015 Metrotokyo®.



Fonte: Metrotokyo®, 2025.

Para fins de registro consolidado dos resultados, a resistência estimada à compressão superficial do concreto apresentou média de 50 MPa, com erro associado de $\pm 0,75$ MPa. Assim, o resultado global pode ser expresso como $50 \pm 0,75$ MPa, correspondendo ao intervalo de 49,25 MPa a 50,75 MPa, o qual sintetiza a estimativa obtida a partir do conjunto de medições realizadas nas quatro áreas ensaiadas.

5.2. DETERMINAÇÃO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os resultados obtidos no ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico das amostras de concreto são apresentados na Tabela 3, a qual reúne os dados geométricos, densidades calculadas e valores de módulo de elasticidade determinados pelo método de excitação por impulso. A tabela consolida, para cada testemunho, os valores medidos de diâmetro, altura, massa e densidade, conforme os procedimentos do ensaio.

Tabela 3 – Dados geométricos e resultados do ensaio de determinação do módulo de elasticidade por meio das frequências naturais.

CP	Altura média (cm)	Desvio padrão altura	Diâmetro médio (cm)	Desvio padrão diâmetro	Peso seco ambiente (g)	Módulo de elasticidade (GPa)	Densidade (g/cm ³)
1	14,197	0,002	4,997	0,015	586,50	25,02	2,10
2	14,493	0,045	5,007	0,015	614,75	30,95	2,16
3	14,430	0,001	4,993	0,021	618,83	31,99	2,19
4	14,497	0,001	4,997	0,021	622,33	32,64	2,19
5	12,516	0,007	5,000	0,017	520,92	27,22	2,12
6	13,254	0,011	4,990	0,010	538,51	23,28	2,07
7	14,222	0,004	5,003	0,006	604,25	29,72	2,16
8	13,291	0,006	4,990	0,010	526,46	23,79	2,02
9	13,433	0,002	5,007	0,012	560,66	26,05	2,13
10	13,685	0,021	4,997	0,031	563,95	27,88	2,10

27,85	2,12
Valores médios	

Fonte: Autor, 2026.

Com base nos valores obtidos, o módulo de elasticidade dinâmico apresentou:

- Valor mínimo: 23,28GPa
- Valor máximo: 32,64 GPa
- Valor médio: 27,85 GPa

Da mesma forma, a densidade aparente das amostras apresentou:

- Valor mínimo: 2,02 g/cm³
- Valor máximo: 2,19 g/cm³
- Valor médio: 2,12 g/cm³

5.3. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA

Os ensaios de determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica foram realizados em 26 amostras (com aproximadamente 1.020 cm³ no total) retiradas dos testemunhos extraídos da estrutura em estudo, seguindo os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 9778:2005. A Tabela 4, obtida a partir das medições, apresenta, para cada amostra, os valores de massa seca, massa saturada, massa hidrostática saturada e os demais parâmetros calculados segundo a norma.

Tabela 4 – Valores de Absorção, Índice de Vazios, Massa Específica Seca, Massa Específica Saturada e Massa Específica Real.

Código amostra	Ms (g)	Msat (g)	Mi (g)	Abs (%)	IV (%)	MespS (g/cm ³)	MespSat (g/cm ³)	MespR (g/cm ³)
1C	70,16	75,53	43,81	7,65	16,93	2,21	2,38	2,66
2B	83,30	88,41	52,04	6,13	14,05	2,29	2,43	2,67
2C	79,13	84,17	49,44	6,37	14,51	2,28	2,42	2,67
2D	75,92	82,07	47,10	8,10	17,59	2,17	2,35	2,63
2E	74,64	78,91	46,64	5,72	13,23	2,31	2,45	2,67
3B	79,07	83,29	49,36	5,34	12,44	2,33	2,46	2,66
3C	78,80	83,35	49,27	5,77	13,35	2,31	2,45	2,67
4B	78,32	82,83	49,03	5,76	13,34	2,32	2,45	2,67
4C	71,41	76,88	44,48	7,66	16,88	2,20	2,37	2,65
4D	78,53	83,01	49,02	5,71	13,18	2,31	2,44	2,66
4E	71,11	75,31	44,39	5,91	13,58	2,30	2,44	2,66
6B	66,54	70,94	41,69	6,61	15,04	2,28	2,43	2,68
6C	83,16	88,94	51,75	6,95	15,54	2,24	2,39	2,65
6D	68,32	73,50	42,47	7,58	16,69	2,20	2,37	2,64
7B	75,80	80,28	47,28	5,91	13,58	2,30	2,43	2,66
7C	83,52	88,41	52,31	5,86	13,55	2,31	2,45	2,68
7D	74,30	79,51	46,23	7,01	15,66	2,23	2,39	2,65
7E	79,12	84,36	49,22	6,62	14,91	2,25	2,40	2,65
8D	72,85	78,51	45,17	7,77	16,98	2,19	2,36	2,63
8E	71,32	77,52	44,14	8,69	18,57	2,14	2,32	2,62
9B	77,39	83,33	48,31	7,68	16,96	2,21	2,38	2,66
9E	66,24	70,69	41,42	6,72	15,20	2,26	2,42	2,67
10B	76,17	82,65	47,23	8,51	18,30	2,15	2,33	2,63
10C	79,22	84,28	49,19	6,39	14,42	2,26	2,40	2,64
10D	96,22	102,71	59,56	6,75	15,04	2,23	2,38	2,63
10E	76,64	82,54	47,55	7,70	16,86	2,19	2,36	2,64

Tabela 4 – Valores de Absorção, Índice de Vazios, Massa Específica Seca, Massa Específica Saturada e Massa Específica Real (continuação).

Abs (%)	IV (%)	MespS (g/cm ³)	MespSat (g/cm ³)	MespR (g/cm ³)
6,80	15,25	2,25	2,40	2,65
Valores médios				
0,95	1,74	0,06	0,04	0,02
Desvio Padrão				

LEGENDA

Ms	Massa seca
Msat	Massa saturada
Mi	Massa hidrostática saturada
MespS	Massa específica seca
MespSat	Massa específica saturada
MespR	Massa específica real
IV	Índice de Vazios
Abs	Absorção

Fonte: Autor, 2026.

As massas secas dos corpos de prova variaram entre 66,54 g e 78,53 g, enquanto as massas saturadas apresentaram valores entre 70,94 g e 83,01 g. As massas hidrostáticas saturadas oscilaram entre 41,69 g e 49,02 g. A partir desses dados, foram determinados os valores de absorção de água, índice de vazios e massa específica (seca, saturada e real) para cada amostra.

Para o conjunto das cinco determinações, obtiveram-se os seguintes valores médios dos parâmetros avaliados:

- Absorção de água média: 6,80% $\pm$ 0,95
- Índice de vazios médio: 15,25% $\pm$ 1,74
- Massa específica seca média: 2,25 g/cm³ $\pm$ 0,06
- Massa específica saturada média: 2,40 g/cm³ $\pm$ 0,04
- Massa específica real média: 2,65 g/cm³ $\pm$ 0,02

5.4. RESISTIVIDADE ELÉTRICA

No âmbito desta pesquisa, ambos os ensaios empregados para investigar esse comportamento, resistividade elétrica superficial e resistividade elétrica volumétrica, foram realizados nos testemunhos extraídos da edificação de modo a garantir melhor controle das

variáveis experimentais e permitir uma análise comparativa mais consistente entre diferentes métodos de leitura. A resistividade superficial oferece uma primeira apreciação do desempenho do concreto em sua camada externa, sensível às condições de umidade, enquanto a resistividade volumétrica permite avaliar a oposição global do material à passagem de corrente elétrica, integrando características internas que podem não ser perceptíveis em análises restritas à superfície.

A apresentação dos resultados segue a ordem da condução experimental: inicialmente são expostos os resultados referentes à resistividade elétrica superficial; e em seguida, são apresentados os resultados do ensaio de resistividade elétrica volumétrica, permitindo aprofundar a compreensão do comportamento eletroquímico dos testemunhos e complementar a análise.

5.4.1. Superficial

Os valores obtidos no ensaio de resistividade elétrica superficial apresentaram variação significativa entre os testemunhos avaliados. O menor valor registrado foi de 13,63 K Ω ·cm (CP6), enquanto o maior valor observado foi de 56,02 K Ω ·cm (CP3), resultando em uma amplitude superior a 310%. A média aritmética preliminar para o conjunto dos dez corpos de prova analisados foi de 32,85 K Ω ·cm.

Para a depuração e consolidação das medições (Tabela 5), aplicou-se um tratamento estatístico baseado na análise de covariância para identificar a dispersão dos dados em relação à média. Adotou-se um critério de refinamento iterativo, no qual os resultados foram sucessivamente descartados até que o conjunto de dados remanescente apresentasse um desvio padrão próximo a 10.

Este procedimento visou reduzir a influência de leituras discrepantes (outliers) e assegurar que o valor final consolidado refletisse a tendência central da amostra com maior estabilidade estatística, garantindo a representatividade necessária para a caracterização do material.

Tabela 5 – Valores de resistividade elétrica superficial calculados para cada um dos testemunhos e após análise estatística para convergência de valores por tolerância percentual.

Código Amostra	ρ médio (Kohm.cm)	convergentes ρ médio (Kohm.cm)
1	21,80	-
2	37,71	37,71
3	56,02	-
4	32,57	32,57
5	37,17	37,17
6	13,63	-
7	35,16	35,16
8	29,67	29,67
9	25,92	-
10	38,87	38,87
Valor médio	32,85	35,19
Desvio padrão	10,82	3,19

Fonte: Autor, 2026.

Os resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial, após a aplicação do critério de convergência de $\pm 10\%$ em torno da média, resultaram na manutenção de três testemunhos válidos: CP4 (32,57 k Ω ·cm), CP7 (35,16 k Ω ·cm) e CP8 (29,67 k Ω ·cm). Os demais corpos de prova foram desconsiderados por apresentarem valores fora da faixa de tolerância estabelecida. A média final consolidada para o conjunto de resultados convergentes foi de 32,47 k Ω ·cm.

5.4.2. Volumétrica

Os valores obtidos no ensaio de resistividade elétrica volumétrica apresentaram variações entre os testemunhos avaliados, com o menor valor registrado de 30,98 K Ω ·cm (CP1) e o maior de 59,11 K Ω ·cm (CP3), resultando em uma amplitude de aproximadamente 90,8%. A média aritmética preliminar para o conjunto total de amostras foi de 46,99 K Ω ·cm.

Para a depuração e consolidação dos dados (Tabela 8), aplicou-se um tratamento estatístico baseado na análise de covariância para avaliar a dispersão dos resultados. Adotou-se um critério de refinamento iterativo, no qual as medições foram sucessivamente descartadas até que o conjunto remanescente apresentasse um desvio padrão próximo a 10. Este procedimento foi fundamental para mitigar a influência de leituras discrepantes e

assegurar que o valor consolidado (Tabela 6) representasse a tendência central da amostra com maior estabilidade e rigor estatístico.

Tabela 6 – Valores de resistividade elétrica volumétrica calculados para cada um dos testemunhos e após análise estatística para convergência de valores por tolerância percentual.

Código Amostra	ρ médio (Kohm.cm)	convergentes ρ médio (Kohm.cm)
1	30,98	-
2	40,05	-
3	59,12	59,12
4	57,88	57,88
5	52,75	52,75
6	48,44	48,44
7	58,41	58,41
8	32,91	-
9	48,47	48,47
10	40,93	-
Valor médio	46,99	54,18
Desvio padrão	9,86	4,54

Fonte: Autor, 2026.

Os resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial, após a aplicação do critério de convergência por faixa de tolerância relativa de 10% em torno do valor médio, resultaram na manutenção de dois testemunhos válidos: CP6 (48,44 k Ω ·cm) e CP9 (48,47 k Ω ·cm). Os demais corpos de prova foram desconsiderados por apresentarem valores fora da faixa de tolerância estabelecida. A média final consolidada para o conjunto de resultados convergentes foi de 48,45 k Ω ·cm.

5.5. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Na avaliação da profundidade de carbonatação realizada por meio da aplicação de solução alcoólica de fenolftaleína nos testemunhos de concreto, observou-se que todas as amostras não fraturadas permaneceram sem alteração significativa de coloração após a aspersão do indicador (Figura 73). A superfície dos testemunhos não fraturados não apresentou a tonalidade rosada característica de regiões não carbonatadas, evidenciando que o material se encontrava inteiramente carbonatado.

Figura 73 – Amostras sem alteração de coloração após aplicação de solução de fenolftaleína.



Fonte: Autor, 2026.

Apenas pontos isolados, pertencentes a amostras distintas (Figura 74), exibiram coloração levemente rosada, porém de forma pontual e sem continuidade ao longo da seção analisada. No conjunto, os resultados indicavam que todos os testemunhos avaliados apresentaram ausência de regiões não carbonatadas quando submetidos ao ensaio com fenolftaleína.

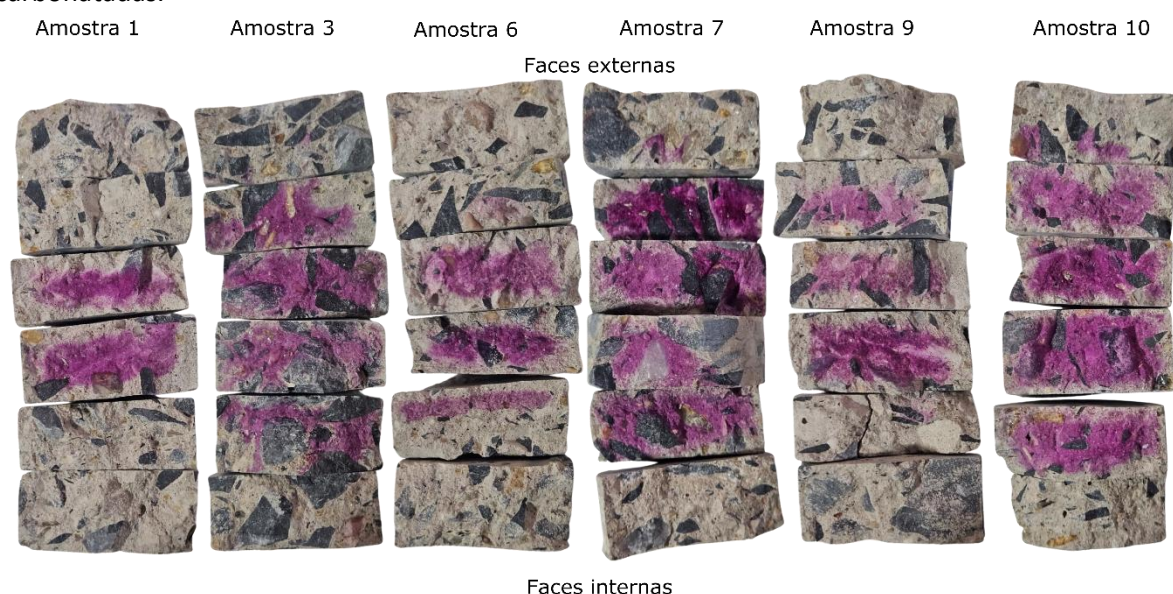
Figura 74 – Pontos esparsos de coloração rosada nas amostras indicando áreas não carbonatadas.



Fonte: Autor, 2026.

Entretanto, após a fratura de 6 amostras, observou-se que os testemunhos apresentaram um avanço parcial da frente de carbonatação (Figura 75). Diferentemente de um estado de carbonatação total, as amostras exibiram uma clara distinção cromática após a aplicação da fenolftaleína: as regiões das bordas permaneceram incolores, enquanto o núcleo central assumiu a coloração carmim/violácea característica, evidenciando a manutenção de um ambiente com pH elevado ($> 9,0$) no interior do material.

Figura 75 – Pontos esparsos de coloração rosada nas amostras indicando áreas não carbonatadas.



Fonte: Autor, 2026.

A exposição de faces internas recém-fraturadas permitiu a medição direta da frente de carbonatação, mostrando o avanço a partir da superfície externa original. Os resultados obtidos indicam que, embora o processo de carbonatação tenha avançado, a matriz cimentícia ainda preserva sua reserva alcalina nas zonas internas, o que não garante a passivação das armaduras, uma vez que já se ultrapassou a espessura de cobertura das armaduras adotado na construção.

As profundidades médias de carbonatação registradas para cada exemplar, medidas perpendicularmente à face exposta com o auxílio de um paquímetro, estão detalhadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores aproximados de profundidade de carbonatação nas faces interna e externa dos testemunhos.

Código da Amostra	Profundidade de Carbonatação (cm)	
	Face interna	Face externa
1	4,5	4,5
3	2,0	2,5
6	3,5	4,5
7	2,0	2,0
9	3,0	4,0
10	1,0	2,0

Fonte: Autor, 2026.

5.6. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade (Tabela 7) foram obtidos após 72 horas de exposição. As amostras foram divididas em três grupos: as de números 1, 2 e 4 tratadas com dispersão de silano-siloxano; as de números 7, 9 e 10 tratadas com verniz acrílico; e as demais, 3, 6 e 8, sem qualquer tratamento, servindo como referência. A Tabela 9 a seguir, apresentam-se os valores finais de massa de água absorvida total (em gramas) e o coeficiente de capilaridade (em g/cm²) para cada amostra.

Tabela 8 – Valores de massa total de água absorvida, em g, e coeficiente de capilaridade, em g/cm², por amostra e valor médio para cada conjunto de amostra (sem aplicação de produto de proteção, com aplicação de dispersão de silano-siloxano, e com aplicação de verniz acrílico).

Amostra	Massa de água absorvida total (g)	Capilaridade (g/cm ²)	Capilaridade média (g/cm ²)	Desvio padrão
1	11,43	0,58		
2	4,14	0,21		
3	3,80	0,19		
4	4,07	0,21		
6	12,10	0,62		
7	2,66	0,14		
8	4,26	0,22		
9	6,84	0,35		
10	4,68	0,24		
			0,21	0,23
			0,21	0,04
			0,19	1,01

- amostras com aplicação de dispersão aquosa de silano-siloxano
- amostras com aplicação de verniz acrílico
- amostras sem aplicação de produtos protetores

Fonte: Autor, 2026.

Os valores refletem o acúmulo total de água líquida absorvida ao longo do ensaio, calculado a partir das medições em intervalos de tempo (0, 3, 6, 24, 48 e 72 horas). O

coeficiente de capilaridade foi determinado pela relação entre a massa absorvida e a área de contato da amostra com a água.

Com base nos dados extraídos da planilha e nos agrupamentos definidos, as médias calculadas para o período final de 72 horas são as seguintes:

- Grupo Silano-Siloxano (Amostras 1, 2 e 4): Este grupo apresentou uma absorção média de massa de 6,55 g, resultando em um coeficiente de capilaridade médio de 0,21 g/cm².
- Grupo Verniz Acrílico (Amostras 7, 9 e 10): Obteve o menor índice de absorção entre os grupos tratados, com média de 4,73 g e coeficiente de capilaridade médio de 0,19 g/cm².
- Grupo Sem Tratamento (Amostras 3, 6 e 8): Como esperado, apresentou os maiores índices médios, com 6,72 g de massa absorvida e coeficiente de capilaridade de 0,21 g/cm².

Aplicou-se um tratamento estatístico baseado no refinamento iterativo dos dados, no qual os resultados discrepantes foram sucessivamente descartados até que o conjunto remanescente apresentasse um desvio padrão próximo a 1. Este procedimento visou mitigar a influência de valores atípicos e assegurar que a média final refletisse a tendência central da amostra com maior estabilidade e rigor estatístico.

5.7. PERMEÂNCIA AO VAPOR D'ÁGUA

Os resultados obtidos no ensaio de permeância ao vapor de água são apresentados na Tabela 10, na qual constam os valores determinados de δ (permeância), μ (fator de resistência à difusão de vapor) e Sd (espessura da camada de ar equivalente) para cada uma das amostras analisadas, após estabilização do fluxo de vapor através da amostra ou até o limite de 30 (trinta) pesagens. Conforme a sequência empregada no ensaio, foram avaliadas as amostras 1A, 2A, 3A, 4A, 6A, 7A, 8A, 9A, 2F, 8F e 9F, cujas condições de superfície diferiam conforme o tipo de tratamento aplicado: face interna sem tratamento, face externa sem tratamento, face externa com aplicação de verniz acrílico e face externa com aplicação de dispersão silano-siloxano. Para cada tipo de amostra, a Tabela 8 apresenta os valores individuais obtidos pelo método de ensaio.

Tabela 9 – Apresentação de resultados do ensaio de permeância ao vapor d'água.

Amostra	δ (kg/m.s.Pa)	μ	Sd (m)
1A	4,03E-11	5,54	1,27
2A	2,81E-11	7,96	1,72
3A	2,41E-11	9,29	2,15
4A	3,46E-11	6,47	1,43
6A	6,00E-11	3,72	0,86
7A	3,31E-11	6,75	1,43
8A	3,60E-11	6,22	1,38
9A	3,66E-11	6,10	1,43
10A	2,82E-11	7,92	1,72
2F	3,56E-11	6,28	1,38
8F	4,52E-11	4,94	1,07
9F	4,55E-11	4,91	1,07
Valores médios	3,43E-11	6,66	1,47
	3,27E-11	6,92	1,93
	4,00E-11	6,41	1,58
	4,21E-11	5,38	1,79
Desvio padrão	6,13E-12	1,22	0,23
	4,23E-12	0,92	0,17
	1,83E-11	2,79	0,65
	5,67E-12	0,78	0,17

LEGENDA		δ (kg/m.s.Pa)	Permeância
	– face externa de amostra com aplicação de dispersão aquosa de silano-siloxano	μ	Fator de resistência à difusão de vapor
	– face externa de amostra com aplicação de verniz acrílico		
	– face externa de amostra sem aplicação de produtos protetores		
	– face interna de amostra sem aplicação de produtos protetores	Sd (m)	Espessura da camada de ar equivalente

Fonte: Autor, 2026.

Adicionalmente, a tabela inclui uma linha final com a média geral dos valores de permeância ao vapor considerando todas as amostras ensaiadas, servindo como referência global para a interpretação e comparação dos resultados do conjunto analisado.

Os demais registros do ensaio, incluindo etapas de pesagem, variação de massa ao longo do tempo, condições ambientais e formulários emitidos durante o procedimento, podem ser consultados no Apêndice B.

5.8. ABSORÇÃO DE ÁGUA COM TUBOS KARSTEN

Os resultados referentes ao concreto sujo, sem qualquer tratamento de limpeza ou proteção, indicaram absorção média de 1,54 ml na área 1 e de 1,50 ml na área 2, considerando-se temperatura média de 31,6 °C e umidade relativa de 42% durante a execução do ensaio.

Para o concreto limpo apenas com hidrojateamento, a área 1 apresentou absorção média de 0,61 ml, tendo o ensaio sido conduzido sob temperatura média de 25,5 °C (abaixo da temperatura média dos demais ensaios) e umidade relativa de 43%. Na área 2, a absorção média registrada foi de 1,50 ml, com temperatura média de 31,0 °C e umidade relativa de 41% durante a realização do procedimento.

Quanto ao concreto tratado com verniz, avaliado na área 1, obteve-se absorção média de 0,99 ml, sob temperatura média de 30,5 °C e umidade relativa de 38% durante o ensaio. Já na área com tratamento com a dispersão a base de silano-siloxano, a absorção foi de 0,55 ml, com temperatura média de 32,8 e 38% de umidade relativa do ar.

Tabela 10 – Apresentação de resultados do ensaio de absorção de água com tubos Karsten.

Condição do substrato	Área amostral	Absorção média (ml)	Temperatura média (°C)	Umidade Relativa (%)
Sujo (sem tratamento)	1	1,54	31,6	42
Sujo (sem tratamento)	2	1,50	31,6	42
Limpo (hidrojateamento)	1	0,61	25,5	43
Limpo (hidrojateamento)	2	1,50	31,0	41
Tratado (dispersão silano-siloxano)	2	0,55	32,8	38
Tratado (verniz acrílico)	1	0,99	30,5	38

Fonte: Autor, 2026.

Observou-se visualmente que a superfície onde o verniz foi aplicado apresentou alteração de brilho imediatamente após a aplicação do produto, mudança de coloração (com aspecto mais amarelado) após alguns dias e modificação da textura, tornando-se mais lisa ao toque (Figuras 76 e 77).

Figura 76 – Área 01 de ensaio de absorção de água com tubos Karsten 10 minutos após a aplicação de verniz acrílico.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 77 - Área 01 de ensaio de absorção de água com tubos Karsten passado o tempo de secagem do verniz acrílico.



Fonte: Autor, 2025.

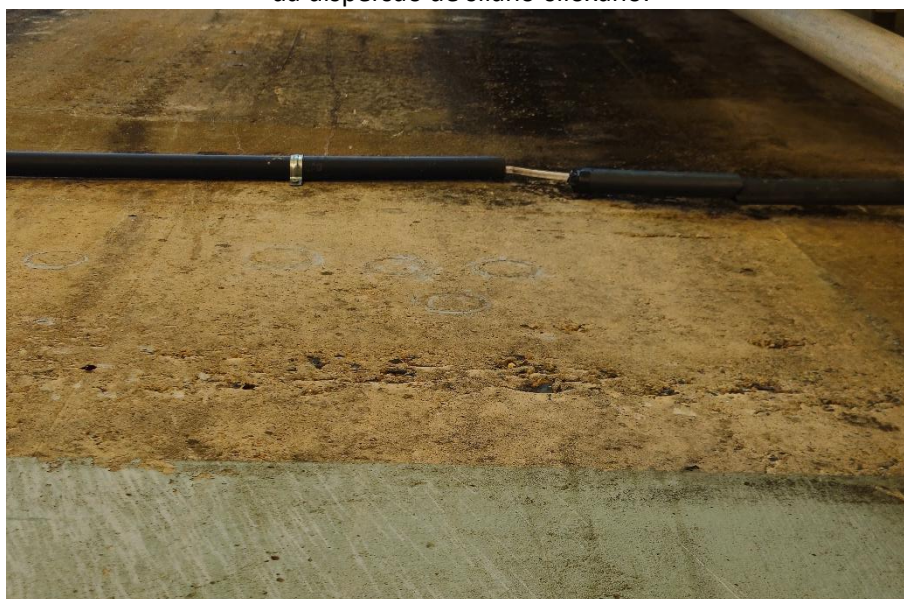
Por fim, no caso do concreto tratado com dispersão de silano-siloxano, avaliado na área 2, a absorção média observada foi de 0,55 ml, com temperatura média de 32,8°C e umidade relativa de 37% durante a realização do ensaio. Para essa superfície, não foram observadas alterações de cor, brilho ou textura após a aplicação do produto (Figuras 78 e 79).

Figura 78 – Área 02 de ensaio de absorção de água com tubos Karsten 10 minutos após a aplicação de dispersão de silano-siloxano.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 79 - Área 02 de ensaio de absorção de água com tubos Karsten passado o tempo de secagem da dispersão de silano-siloxano.



Fonte: Autor, 2025.

Os resultados dos ensaios de absorção e água líquida com tubos Karsten estão tabelados no Apêndice A.2.

6. DISCUSSÃO

A seção de discussão dos resultados organiza-se em duas subseções — caracterização do material e análise do desempenho dos produtos protetores. São analisados os dados experimentais obtidos na caracterização do substrato de concreto aparente da fachada noroeste da torre anexa ao Restaurante Universitário (RU/UnB), com comparativos à literatura de referência e normas técnicas. São examinadas as propriedades do material envelhecido naturalmente, contrastando sua heterogeneidade com parâmetros referenciais de concretos laboratoriais (produzidos em condições controladas).

Por fim, avalia-se o desempenho dos produtos protetores testados (verniz acrílico e dispersão hidrofugante silano-siloxano), destacando alterações nos mecanismos de transporte de massa e impactos na permeabilidade ao vapor de água, de forma a subsidiar as diretrizes e parâmetros técnicos para intervenção compatíveis com a conservação patrimonial.

6.1. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

No que se refere à caracterização do concreto por ensaios *in loco* e laboratoriais, com maior foco nos mecanismos de transporte de água líquida e vapor d'água, os resultados obtidos revelam uma variabilidade acentuada que distancia o material da amostra dos materiais em condições ideais de laboratório. Estruturas com mais de cinco décadas de exposição, como a fachada noroeste da torre anexa do RU/UnB, apresentam envelhecimento característico marcado por processos de degradação acumulada, o que compromete a homogeneidade e a isotropia esperadas. Sobretudo em função da presença de heterogeneidades macroestruturais, como torrões de argila incorporados à matriz cimentícia e volumes de vazios, o material envelhecido não pode ser tratado como homogêneo.

Para a caracterização do comportamento higrotérmico, conforme os métodos de ensaios padronizados pelas normas ABNT e ISO, essa condição é crítica, pois o transporte de água líquida e vapor depende fortemente da conectividade e da distribuição dos poros, bem como da presença de interfaces e inclusões com propriedades distintas, conforme preconizado pelos autores de referência, Isaia (2011), Salomão (2016) e Hall e Hoff (2023).

No conjunto dos ensaios não destrutivos, a esclerometria contribuiu para evidenciar diferenças locais de resistência mecânica superficial, conforme prescrito pela NBR 7584 (ABNT, 2012a). A resistência estimada à compressão superficial variou de 40 MPa a 65 MPa, com média de $50 \pm 0,75$ Mpa. O valor mínimo de 40 Mpa indica que a superfície possui boa integridade mecânica após mais de cinco décadas em uso. No entanto, a variabilidade medida de 40 Mpa a 65 Mpa é relevante, pois indica a existência de possíveis diferenças nas demais propriedades do material que afetam a interpretação higrotérmica e o planejamento de intervenções.

Embora a esclerometria seja influenciada por condições da superfície, carbonatação e rugosidade, sua aplicação em campo fornece um panorama inicial da variabilidade ao longo do pano de fachada e deve ser integrada a outros métodos para qualificar zonas com comportamento diferenciado, evitando interpretações unidimensionais em substratos expostos às condições ambientais.

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico por meio do sistema Sonelastic® forneceu dados adicionais sobre o comportamento mecânico e contribuiu para a avaliação da integridade estrutural do concreto, minimizando perdas materiais das amostras. Conforme a NBR 8522-2 (ABNT, 2021), os resultados indicaram módulo dinâmico médio de 27,85 GPa (mínimo de 23,28 GPa e máximo de 32,64 GPa, determinados por método de ressonância). Ainda, foi também determinada a densidade aparente média de $2,12 \text{ g/cm}^3$ (variação de $2,02 \text{ g/cm}^3$ a $2,19 \text{ g/cm}^3$). Assim, observa-se que o concreto estudado se situa abaixo da densidade padrão de concretos convencionais traçados em laboratório que, segundo Neville (2016), costumam variar entre $2,30 \text{ g/cm}^3$ e $2,50 \text{ g/cm}^3$.

Essas variações refletem a sensibilidade das propriedades do material a descontinuidades internas, fissuras e interfaces que impactam a difusividade do substrato, conforme já constataram Thomaz, Miyaji e Possan (2021). Ressalta-se que a variabilidade do módulo de elasticidade entre os testemunhos afeta o desempenho de produtos filmógenos, pois a variação de deformação da superfície pode gerar fissuras e romper a película protetora, gerando pontos de fragilidade na proteção aplicada.

A estrutura de poros, fator determinante para o desempenho e durabilidade, foi quantificada pelos ensaios de determinação de absorção de água e índice de vazios, incluindo-se ainda a determinação de massa específica (NBR 9778). Obteve-se índice de vazios médio

de 15,25% e absorção média de 6,80%, com massa específica seca média de 2,25 g/cm³, saturada média de 2,40 g/cm³ e real média de 2,65 g/cm³. Tais índices indicam uma porosidade elevada quando comparada a concretos de referência de boa qualidade, que geralmente apresentam vazios entre 10% e 12% (Mehta; Monteiro, 2014). Ainda segundo a classificação de durabilidade, concretos com absorção superior a 5% são considerados de alta permeabilidade, o que facilita o ingresso de água e agentes agressivos, aumentando o risco de biodeterioração e bolor (Coppola *et al.*, 2023; Souza; Ripper, 1998; Romani *et al.*, 2022), como é o caso do material analisado.

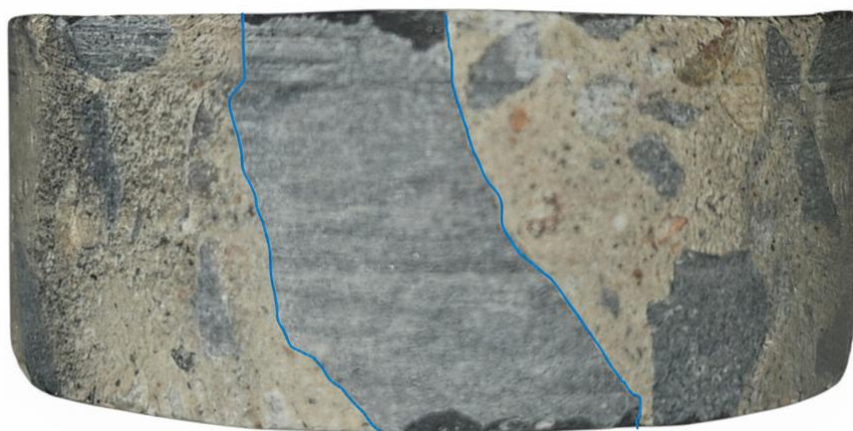
Em relação à massa aparente, o concreto estudado apresentou média de 2120 kg/m³. Observa-se uma boa correspondência entre os dados experimentais e os parâmetros da literatura de referência (Mehta; Monteiro, 2014; Bolina; Tutikian; Helene, 2019) que estabelece uma faixa de 2000 kg/m³ a 2400 kg/m³ para a massa aparente.

O ensaio de capilaridade (NBR 9779) forneceu a base para avaliar o ingresso de água por absorção capilar no substrato de referência. Ao final de 72 horas, o grupo sem tratamento protetivo apresentou absorção média de 4,03 g e capilaridade média de 0,21 g/cm². Esses valores corroboram a elevada porosidade discutida anteriormente e indicam uma cinética de absorção condizente com concretos de alta permeabilidade expostos a intempéries (Coppola *et al.*, 2023). A interpretação desses resultados laboratoriais é importante para relacionar a microestrutura ao transporte de umidade, permitindo comparações que subsidiam a escolha de tratamentos superficiais.

Quanto ao transporte de vapor (ISO 12572), o concreto sem tratamento apresentou permeância média entre $4,00 \times 10^{-11}$ kg/m·s·Pa e $4,21 \times 10^{-11}$ kg/m·s·Pa, situando-se uma ordem de grandeza acima da faixa de referência de $0,70 \times 10^{-12}$ kg/m·s·Pa a $13,00 \times 10^{-12}$ kg/m·s·Pa dos modelos teóricos de simulação higrotérmica (Freitas *et al.*, 2008). Essa permeabilidade elevada evidencia maior vulnerabilidade ao fluxo constante de umidade, sugerindo que o concreto ensaiado, após décadas de exposição e avanço da frente de carbonatação, desenvolveu microfissuras que facilitam os mecanismos de transporte. Para o diagnóstico, conforme esclarece Hall e Hoff (2023), a permeância ao vapor é decisiva para a análise do nível de proteção a ser dado à superfície, sem comprometer o equilíbrio higrotérmico, preservando a permeabilidade ao vapor natural e evitando aprisionamento de água líquida.

Entretanto, deve-se considerar que, em amostras cortadas em tamanho reduzido, a zona de transição interfacial (ITZ) entre os agregados e a matriz cimentícia pode exercer influência desproporcional sobre a permeabilidade ao vapor d'água. Essa região, tipicamente mais porosa e com maior conectividade capilar do que a pasta de cimento, pode atuar como um conjunto de caminhos preferenciais ao redor dos agregados, favorecendo o transporte de vapor (Figura 80).

Figura 80 – Exemplo de amostra em disco em que há um agregado de dimensão igual a altura da amostra e indicação de caminho preferencial para transporte de massa ao redor do agregado, em azul.



Fonte: Autor, 2026.

Em corpos de prova pequenos, a distribuição e o número de interfaces agregado–pasta interceptadas pela seção ensaiada passam a ter grande influência, elevando a sensibilidade do resultado às heterogeneidades locais (Neville, 2011; Mehta; Monteiro, 2014). Em situações específicas, um agregado de maior dimensão pode atravessar toda a altura do corpo de prova, de modo que a ITZ associada (ou uma microfissura preferencial desenvolvida ao longo dessa interface) constitua um trajeto contínuo da base ao topo da amostra, funcionando como um atalho para o transporte e elevando a permeabilidade medida (Scrivener; Crumby; Laugesen, 2004; Wong; Buenfeld, 2006). Assim, parte da dispersão e do aumento observado pode estar associada ao efeito de representatividade do volume amostrado, no qual a ITZ e eventuais descontinuidades locais passam a controlar a resposta do ensaio.

Adicionalmente, deve-se considerar que o processo de corte mecânico utilizado para a extração dos testemunhos pode introduzir alterações microestruturais na superfície das amostras. Essas modificações na interface de ensaio têm o potencial de interferir na rede de

poros superficial, possivelmente alterando a permeabilidade ao vapor d'água e influenciando os resultados experimentais de transporte gasoso.

Os ensaios *in loco* com tubos Karsten, complementados por medições de temperatura e umidade relativa do ar, reforçaram a influência do estado de superfície e do microclima. O concreto em sua condição original (sem qualquer tratamento de limpeza ou proteção) apresentou absorção média de 1,54 ml (Área 1) e 1,50 ml (Área 2). A resposta não uniforme ao hidrojateamento — com redução expressiva de absorção na Área 1 (0,61 ml) e manutenção do valor na Área 2 (1,50 ml) — reitera que a limpeza pode atuar de forma distinta conforme a profundidade da contaminação e a variabilidade intrínseca do substrato (DER/SP, 2006). Entretanto, pode-se também depreender que a cinética de absorção sob condições reais de exposição é influenciada pela temperatura e umidade relativa no momento do ensaio (Serralheiro *et al.*, 2017; ASTM, 2012a), reforçando que o diagnóstico deve considerar o estado de umidade de equilíbrio do substrato.

No ensaio de carbonatação por fenolftaleína, observou-se que a frente de avanço, embora não tenha atingido a totalidade da seção transversal dos testemunhos, ultrapassou a espessura correspondente ao revestimento nominal das armaduras. Esse achado representa uma alteração físico-química importante, na qual a redução do pH da solução dos poros na região do aço promove a despassivação das armaduras e modificações microestruturais na matriz cimentícia, influenciando as demais características do material.

A análise comparativa revelou que as profundidades de carbonatação nas faces externas, expostas diretamente às intempéries e variações cíclicas de umidade e CO₂, apresentaram-se maiores ou iguais às profundidades registradas nas faces internas. Estas últimas, voltadas para o interior do ambiente, encontravam-se protegidas por uma camada de massa corrida e pintura, que atuaram como uma barreira física adicional, retardando a difusão gasosa para o interior do concreto.

O fato de a frente de carbonatação ter superado a barreira física do revestimento indica que as armaduras perderam sua proteção alcalina natural, estabelecendo uma condição de risco à corrosão. Tal cenário serve como referência para a interpretação dos demais ensaios, caracterizando um concreto quimicamente alterado em sua camada funcional, com implicações severas para a durabilidade a longo prazo e a integridade estrutural.

Já a resistividade elétrica destacou-se como um dos parâmetros mais sensíveis à heterogeneidade macroestrutural do material. A resistividade superficial apresentou valor médio de 32,85 k Ω ·cm, com ampla variação entre 13,63 e 56,02 k Ω ·cm, enquanto a resistividade volumétrica resultou em média de 46,99 k Ω ·cm, variando de 30,98 a 59,12 k Ω ·cm. Essa elevada dispersão é compatível com a alternância de regiões com diferentes estados de umidade e conectividade de poros, em que inclusões de argila e vazios podem atuar como elementos de impedância, elevando a resistência ao fluxo de corrente, ou como barreiras isolantes locais (Azzi; Costa, 2017; Andrade, 2018).

À luz da literatura, resistividades na faixa de 10 a 50 k Ω ·cm são usualmente associadas a risco moderado de corrosão, enquanto valores acima de 50 k Ω ·cm tendem a indicar baixo risco, refletindo a ação conjunta de processos como carbonatação e dessecação, que reduzem a mobilidade iônica e dificultam a passagem de corrente no meio poroso (Andrade, 2018; Ribeiro *et al.*, 2018). Nesse contexto, os resultados obtidos sugerem um comportamento não uniforme do material, com coexistência de zonas potencialmente mais condutivas (associadas a maior umidade e porosidade conectada) e zonas mais resistivas (associadas a menor teor de água e maior efeito de barreira).

Observou-se ainda uma relação instável entre resistividade volumétrica e superficial, o que se afasta de correlações diretas propostas para materiais mais homogêneos, reforçando a necessidade de cuidado na interpretação dos resultados (Polder, 2001; Andrade, 2018). Além disso, a dispersão dos valores de resistividade elétrica superficial pode ter sido influenciada pelas dimensões das amostras empregadas no ensaio, considerando que a configuração do equipamento utiliza quatro eletrodos com distância de 4 cm entre eles, e que o diâmetro das amostras era de apenas 5 cm. Nesse sentido, é plausível que não tenha havido espaço geométrico suficiente para o estabelecimento adequado do campo elétrico e para a circulação da corrente elétrica pelo material, o que pode ter introduzido efeitos de borda e comprometido a repetibilidade, aumentando a variabilidade dos resultados superficiais.

A decisão técnica de utilizar tensões iguais ou superiores a 50 V foi necessária para mitigar fenômenos de polarização e garantir a confiabilidade do diagnóstico em um material com alternância de zonas isolantes e condutoras.

Em síntese, apesar de ter apresentado alta resistência mecânica, o concreto analisado apresentou características esperadas de envelhecimento, com carbonatação avançando após

a espessura de cobrimento das armaduras, além de elevada porosidade, configurando um material com comportamento potencialmente mais vulnerável à ação de agentes agressivos. Dessa forma, sua preservação demanda a adoção de estratégias de proteção específicas, definidas com critérios técnicos e compatíveis com a condição real do substrato, a fim de prolongar sua vida útil.

6.2. ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS PRODUTOS PROTETORES

A avaliação do desempenho dos sistemas de proteção permitiu contrastar o comportamento do substrato em sua condição original com as respostas obtidas após as intervenções de superfície, fundamentando a escolha técnica baseada no equilíbrio entre proteção hídrica e manutenção das propriedades higrotérmicas.

No ensaio de capilaridade (ABNT NBR 9779), os resultados revelam que ambos os tratamentos situaram o concreto em um patamar de coeficiente de absorção inferior ao valor de referência de $0,01 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ (Freitas *et al.*, 2008). O verniz acrílico promoveu a maior redução do transporte capilar ($0,19 \text{ g}/\text{cm}^2$), convertendo-se em um fluxo (coeficiente de sorptividade) de aproximadamente $0,0037 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ por atuar como uma barreira física contínua. Por outro lado, a dispersão de silano-siloxano apresentou uma redução mais discreta ($0,21 \text{ g}/\text{cm}^2$), com coeficiente de sorptividade de $0,0041 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$, desempenho este considerado tecnicamente relevante por superar o valor de referência sem comprometer a estética ou elevar a resistência à difusão de vapor de forma significativa.

Observou-se, contudo, que a amostra 01 do grupo tratado com a dispersão de silano-siloxano apresentou absorção superior às demais, sugerindo que danos microestruturais ou microfissuras podem comprometer a estanqueidade de tratamentos hidrofugantes. Todavia, a eficácia no bloqueio da água líquida não deve ser o único critério de seleção, pois o desempenho deve ser ponderado frente à permeabilidade ao vapor e à preservação da aparência, aspectos importantes para a conservação e o diagnóstico de durabilidade em substratos envelhecidos expostos às condições ambientais.

No que tange à permeabilidade ao vapor de água (ISO 12572), os resultados revelam que, mesmo após a aplicação dos tratamentos, o concreto do RU/UnB mantém uma capacidade de transporte de vapor significativamente elevada, situando-se em $3,27 \times 10^{-11}$

kg/m·s·Pa para o verniz acrílico e $3,43 \times 10^{-11}$ kg/m·s·Pa para a dispersão silano-siloxano. Esses valores são aproximadamente 10 vezes superiores aos modelos teóricos de referência, que variam entre $0,7 \times 10^{-12}$ kg/m·s·Pa e 13×10^{-12} kg/m·s·Pa (Freitas *et al.*, 2008), evidenciando que a permeabilidade do concreto envelhecido é tão elevada que os produtos aplicados não conseguem reduzi-la ao patamar de um concreto novo.

Entretanto, a análise da espessura da camada de ar equivalente (S_d) permite distinguir o comportamento dos sistemas: enquanto o verniz acrílico induziu um aumento para 1,93 m, indicando maior resistência à difusão do vapor devido à formação de película, a dispersão de silano-siloxano apresentou um S_d médio de 1,47 m. Este valor é inferior ao do verniz e ao da própria face externa sem tratamento (1,58 m), sinalizando uma compatibilidade superior com a natureza do concreto aparente.

Para o diagnóstico de conservação, essa distinção é importante, pois as intervenções em patrimônio moderno devem priorizar sistemas que não induzam a retenção de umidade interna, mitigando riscos como o destacamento de películas, a proliferação de microorganismos ou a aceleração de processos degradativos (Muñoz; Tognon, 2022; Croft, 2004).

A etapa *in loco* com tubos Karsten corroborou a influência do microclima e da técnica de proteção no desempenho final. Na área tratada com verniz acrílico, obteve-se a menor absorção de água, porém acompanhada de alterações visuais perceptíveis, como o incremento de brilho, amarelamento precoce e textura lisa, características que denunciam a presença de um produto filmógeno e alteram a leitura estética do concreto original. Em contraste, a dispersão silano-siloxano também reduziu a absorção de água, mas não evidenciou quaisquer alterações cromáticas ou de textura.

Essas análises comparativas mostram o alinhamento ao comportamento esperado para hidrofugantes penetrantes de alto desempenho, conforme recomendado por Cai (2020) e Iliushchenko *et al.* (2022). Essa distinção torna-se importante para a decisão de conservação, pois o balanço entre a proteção hídrica efetiva e a preservação da integridade estética é o que define a viabilidade da intervenção.

Os resultados indicam que, apesar de ambos os tratamentos reduzirem o transporte de água líquida, suas implicações para a conservação diferem: o verniz acrílico atua como barreira eficiente, mas altera a aparência e restringe a difusão de vapor, tornando-se menos

indicado ao patrimônio moderno; já o silano-siloxano oferece proteção hídrica equilibrada, preserva a permeabilidade ao vapor e não modifica o aspecto do concreto, mostrando maior compatibilidade com superfícies originais. Vale destacar que os vernizes acrílicos, por formarem filme, são mais suscetíveis aos processos acelerados de degradação, ocasionando inclusive variações cromáticas, geralmente dando ao concreto uma tonalidade de cinza amarelado.

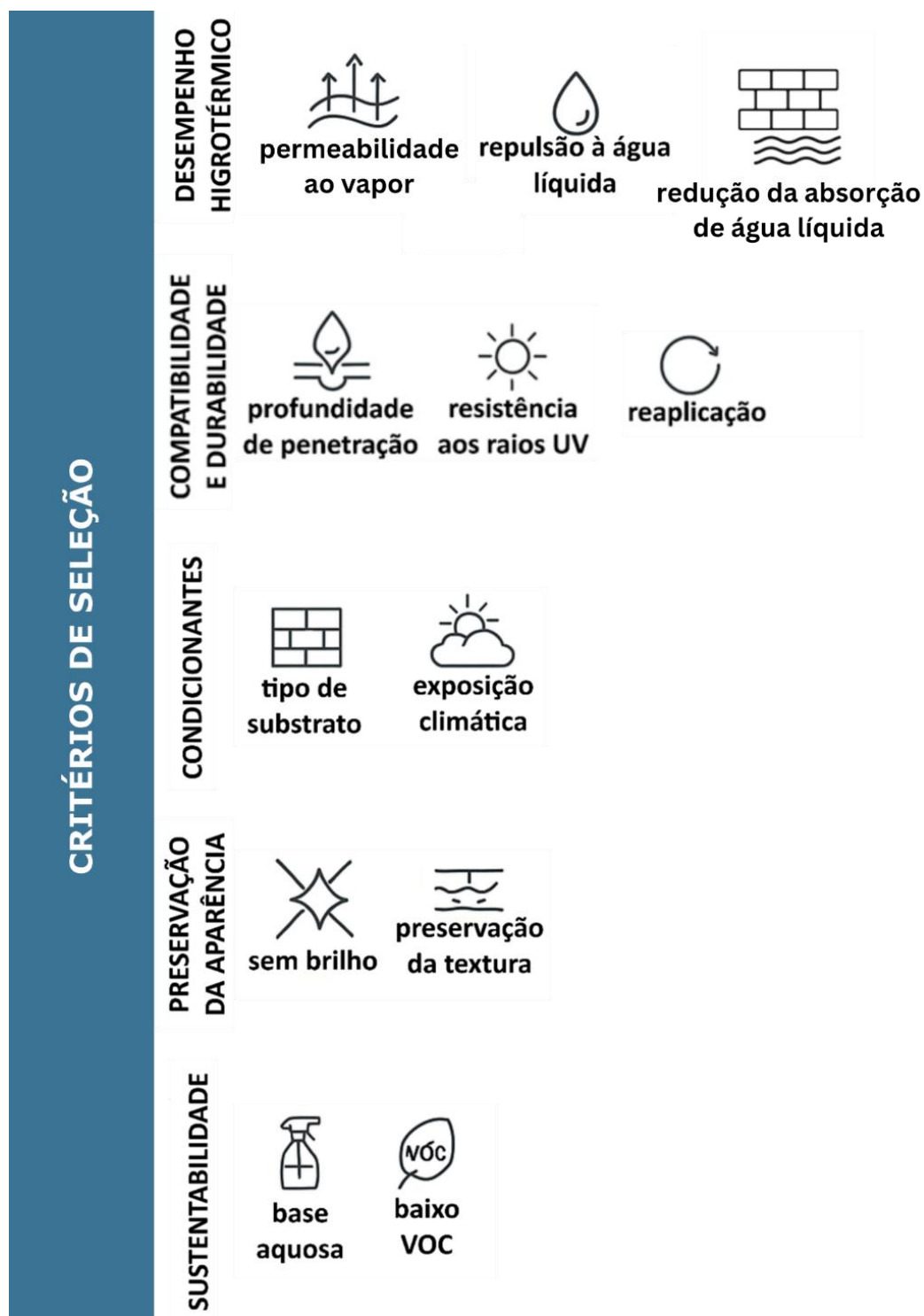
6.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS DA SEÇÃO

A investigação realizada no RU/UnB permitiu uma análise diagnóstica sobre o estado de conservação do concreto aparente em uma estrutura de relevante valor cultural do início da década de 1970. As atividades experimentais evidenciaram que a prioridade de intervenção deve recair sobre edificações de valor cultural que apresentam histórico de baixa manutenção, onde as manifestações patológicas não apenas degradam os valores estéticos e históricos do bem, mas comprometem diretamente a habitabilidade e a segurança dos usuários.

Apesar das dificuldades logísticas inerentes à realização de ensaios *in loco* em um ambiente de uso contínuo, os resultados obtidos fornecem subsídios consistentes para a definição de estratégias de recuperação. Ressalta-se que a metodologia adotada demonstrou ser viável e eficaz mesmo com a utilização de um número reduzido de amostras e testemunhos, sendo possível obter uma caracterização do material e validar o desempenho de produtos protetivos sem a necessidade de intervenções extensivas ou destrutivas em larga escala.

Diante do quadro identificado e dos resultados dos ensaios, recomenda-se a utilização da dispersão de silano-siloxano como medida protetiva prioritária, considerando os critérios sintetizados no diagrama da Figura 81. Esse produto demonstrou desempenho superior na redução da absorção de água, sem provocar alterações perceptíveis nas características visuais do concreto, preservando a integridade da matriz cimentícia. Ao retardar o avanço da penetração de água, em qualquer de suas formas, e de agentes agressivos, configura-se como o sistema de proteção mais adequado para assegurar a durabilidade e da autenticidade do patrimônio edificado da UnB.

Figura 81 – Diagrama representativo dos critérios de seleção de produtos de proteção.



Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

Adicionalmente, a implementação de um programa de monitoramento periódico torna-se indispensável para acompanhar a eficácia da proteção ao longo do tempo, visto que produtos hidrofugantes sofrem degradação natural por agentes ambientais. A

construção de um histórico técnico de inspeções prediais, fundamentado em mapas de danos e ensaios não destrutivos periódicos, permitirá que a gestão do *campus* antecipe ciclos de manutenção e evite a evolução de manifestações patológicas severas, consolidando uma cultura de conservação preventiva para o acervo da universidade.

Enfim, estabelecem-se 10 diretrizes principais para a o planejamento e execução de intervenções em superfícies de concreto da Arquitetura Moderna da UnB:

1. Realizar diagnóstico prévio detalhado da estrutura;
2. Efetuar o tratamento cuidadoso de fissuras e outros danos manifestos com base em projetos de recuperação;
3. Priorizar a mínima intervenção necessária para a conservação;
4. Executar ensaios laboratoriais e *in loco* para caracterização do substrato e comprovação de desempenho dos produtos protetores, inclusive com testes de aplicação em campo;
5. Selecionar materiais com base na compatibilidade com o substrato original;
6. Aplicar produtos protetores somente após a validação de sua eficácia e do tratamento das manifestações patológicas;
7. Implementar um monitoramento contínuo pós-intervenção, principalmente em relação ao ingresso de água e umidade na edificação;
8. Planejar e executar a manutenção programada e a limpeza regular de forma permanente;
9. Documentar todas as etapas do processo de investigação e intervenção; e
10. Revisar os procedimentos adotados para mitigar falhas e otimizar os processos.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A preservação do patrimônio arquitetônico moderno, especialmente das edificações construídas em concreto aparente, constitui um desafio complexo que demanda abordagens multidisciplinares e metodologicamente rigorosas. Por ser um material simultaneamente estrutural e expressivo, o concreto aparente exige estratégias que conciliem desempenho técnico, autenticidade e a permanência de seus valores culturais. Nesse contexto, esta pesquisa fundamentou-se na necessidade de estabelecer parâmetros técnico-científicos para intervenções conservativas em superfícies de concreto aparente, com foco na compreensão dos mecanismos higrotérmicos do material e na avaliação da eficácia de produtos de proteção capazes de preservar suas características físicas, estéticas e históricas.

A metodologia empregada combinou ensaios laboratoriais e *in loco*, permitindo caracterizar o comportamento de transporte de água e vapor e as condições que favorecem o surgimento e a evolução das manifestações patológicas, ampliando a capacidade diagnóstica e fornecendo subsídios empíricos relevantes para a definição de critérios e diretrizes de intervenção adequados.

Do ponto de vista teórico, o trabalho dialoga com abordagens crítico-conservadoras, especialmente aquelas desenvolvidas por Kühl (2006; 2007), que compreendem o edifício como documento histórico cuja conservação deve priorizar a mínima intervenção, a compatibilidade material e a manutenção de valores culturais. Sob essa perspectiva, a manutenção deixa de ser uma ação pontual e passa a integrar um programa contínuo de conservação preventiva, envolvendo rotinas de monitoramento, documentação, limpeza e pequenos reparos capazes de retardar processos de degradação e reduzir a necessidade de medidas corretivas invasivas.

Nesse sentido, a elaboração de manuais de uso, operação e manutenção das edificações, baseados nas diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 14037 (ABNT, 2021), devem contemplar as recomendações, diretrizes, orientações e especificações para garantir as boas práticas na conservação e manutenção das edificações. As ações de intervenção devem ser acompanhadas de registros sistemáticos e de um plano de manutenção contínua, com rotinas de limpeza, inspeções periódicas e pequenos reparos, de modo a prevenir a evolução de danos e reduzir a necessidade de medidas invasivas de grande escala.

Ao longo do estudo, foram analisados aspectos essenciais para embasar intervenções em superfícies, como porosidade, permeabilidade à água líquida, permeância ao vapor d'água e mecanismos de degradação associados ao concreto aparente. Esses parâmetros influenciam diretamente o desempenho do material e orientam a escolha de produtos e técnicas de intervenção compatíveis com a obra.

Os resultados obtidos demonstram que a compreensão dos mecanismos higrotérmicos do concreto é determinante para orientar decisões relacionadas à proteção e manutenção de superfícies expostas. Embora os ensaios tenham enfrentado limitações — como o número reduzido de testemunhos, adaptações metodológicas, curto período de observação e ausência de monitoramento prolongado — as análises realizadas permitiram caracterizar o concreto da fachada noroeste da torre anexa do RU/UnB, revelando as condições sob as quais ocorrem o ingresso de água e a progressão da carbonatação.

A comparação entre os diferentes produtos protetores evidenciou que sua aplicação pode contribuir significativamente para a redução da absorção de água e para a estabilização do comportamento higrotérmico da superfície, desde que exista compatibilidade com o substrato e adequação às condições ambientais da edificação. Esses resultados reforçam a necessidade de avaliações individualizadas, dado que a eficácia dos produtos depende diretamente das características específicas do concreto e do ambiente em que este se insere.

De forma ampla, o estudo contribui ao propor parâmetros técnico-científicos, demonstrar metodologias de análise, oferecer dados relevantes sobre o desempenho de produtos protetores e reforçar a importância de abordagens de conservação no tratamento do patrimônio moderno. Além disso, disponibiliza um protocolo adaptável a diferentes contextos, ampliando as possibilidades de aplicação prática.

O trabalho também abre caminho para pesquisas futuras voltadas às investigações comparativas entre soluções aplicadas em patrimônios modernos na UnB e no Brasil. Os resultados obtidos são fundamentais para alimentar *softwares* de simulação higrotérmica, como WUFI®, EnergyPlus® e Delphin®, permitindo extrapolar o comportamento experimental para diferentes cenários climáticos e soluções construtivas.

Por fim, reafirma-se que as diretrizes e parâmetros técnicos para intervenção no patrimônio em concreto aparente devem partir de um diagnóstico cuidadoso — com mapeamento de danos, ensaios não destrutivos e análise ambiental — e priorizar

compatibilidade material, mínima intervenção e preservação dos valores culturais da edificação. A aplicação de produtos protetores, como hidrofugantes, vernizes ou quaisquer outros, requer avaliação cuidadosa das condições de exposição e das propriedades e características do material, de forma a assegurar o desempenho adequado sem comprometer a permeabilidade do concreto ou induzir retenção hídrica, sobretudo em relação aos seguintes parâmetros: (1) coeficiente de capilaridade; (2) permeância ao vapor d'água; (3) absorção de água; e (4) porosidade.

Conclui-se que uma estratégia metodológica coerente é organizar a proteção como um processo incremental e continuado: diagnóstico, definição de critérios de compatibilidade, testes preliminares, seleção de produto ou sistema de proteção, aplicação controlada e monitoramento do desempenho. Esse encadeamento reduz riscos e assegura decisões tecnicamente rastreáveis e orientadas à conservação.

REFERÊNCIAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. **AASHTO TP 119-15**: Standard Method of Test for Resistivity of Concrete. Washington, DC: AASHTO, 2015.

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. **AASHTO T 358-21**: Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Washington, DC: AASHTO, 2021.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NB-1**: Cálculo e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro, 1940.

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Versão Corrigida. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 4 p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7584**: Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a. 14 p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012b. 7 p.

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015a.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7680-1**: Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro: ABNT, 2015b. 30 p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7680-2**: Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 2: Resistência à tração na flexão. Rio de Janeiro: ABNT, 2015c. 11 p.

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 14037**: Diretrizes para elaboração de manuais de uso, operação e manutenção das edificações — Requisitos para elaboração e apresentação dos conteúdos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8522-2**: Concreto Endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação – Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. 10 p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Projeto ABNT NBR ISO 10456**: Materiais e produtos de construção — Propriedades higrotérmicas — Valores e procedimentos de projeto tabulados para determinar valores térmicos declarados e de projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 56 p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118** Versão Corrigida 2:2024: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2024. 242 p.

ACI – American Concrete Institute. **ACI 201.2R-16**: Guide to durable concrete. Farmington Hills: ACI, 2016a.

ACI – American Concrete Institute. **ACI 562-16**: Code Requirements for Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures and Commentary. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2016b.

ANDRADE, C. Design and evaluation of service life through concrete electrical resistivity. **Revista ALCONPAT**, 2018, 8(3), 264–279. DOI: 10.21041/ra.v8i3.349.

ANELLI, R. (org.) *et al.* **Plano de gestão e conservação: Casa de Vidro, arquiteta Lina Bo Bardi**. São Paulo: Instituto Bardi Casa de Vidro, 2019.

ASTM – American Society for Testing Material International. **ASTM E104-02R12**: Standard practice for maintaining constant relative humidity by means of aqueous solutions. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012a. DOI: 10.1520/E0104-02R12.

ASTM – American Society for Testing Material International. **ASTM G57-06**: Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012b.

AUMENT, L. **Concrete: Case studies in conservation practice**. Catherine Croft and Susan Macdonald with Gail Ostergren, eds., Los Angeles: Getty Conservation Institute. 208 p. 2019.

AZEVÊDO, G.; NEVES, C.; LIRA, F. A paisagem do Plano Piloto de Brasília em suas escalas. In: III ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO – ENANPARQ, 2014, São Paulo. **Arquitetura, cidade e projeto: uma construção coletiva**. São Paulo: ENANPARQ, 2014.

AZZI, G. C.; COSTA, A. S. V. Resistividade elétrica do concreto: influência da carbonatação e da umidade. In: Congresso Brasileiro Do Concreto, 59., 2017, Bento Gonçalves. **Anais [...]**. São Paulo: IBRACON, 2017.

BAI, J. 10 - Durability of sustainable concrete materials. Editor(s): Jamal M. Khatib, In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, **Sustainability of Construction Materials**, Woodhead Publishing, 2009, Pages 239-253, ISBN 9781845693497, DOI: 10.1533/9781845695842.239

BANHAM, R. **Teoria e Design na Primeira Era Máquina**. São Paulo: Cosac Naify, 2018.

BENEVOLO, L. **História da Arquitetura Moderna**. São Paulo: Perspectiva, 2011.

BERG, S. A. 2005. **History of Reinforced Concrete to 1950: The Development of the Composite in Properties, Computation Models and Safety**. Ph.D. diss., KTH Royal Institute of Technology.

BIERRENBACH, A. C. de S. **Debates recentes sobre o restauro da Arquitetura Moderna na Itália**. Thésis. Rio de Janeiro, v.2, n.3, p. 137-157, jan./out. 2017.

BOMENY, H. Universidade de Brasília: filha da utopia de reparação. **Sociedade e Estado**, Brasília, v. 31, número especial, p. 1003-1028, 2016. DOI: 10.1590/S0102-69922016.OSPE0009.

BOLINA, F. L., TUTIKIAN, B. F., HELENE. P. **Patologia de estruturas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

BRANDI, C. **Teoria da restauração**. Cotia: Ateliê, 2004.

BRUAND, Y. **Arquitetura Contemporânea no Brasil**. São Paulo: Perspectiva, 2006.

BRUNELLI, A.; CALGARO, L.; SEMENZIN, E.; CAZZAGON, V.; GIUBILATO, E.; MARCOMINI, A.; BADETTI, E. Leaching of nanoparticles from nano-enabled products for the protection of cultural heritage surfaces: a review. **Environmental Science and European**, v. 33, p. 48, 2021.

BUSSELL, M. N. 2007. Conservation of concrete and reinforced concrete. In **Structures and Construction in Historic Building Conservation**, edited by Michael Forsyth, 192–210. Historic Building Conservation. Oxford: Blackwell.

CAI, W. Durability enhancement for cementitious materials through waterproofing by organosilicon chemistry. **ZKG Cement Lime Gypsum**, Gutersloh, Alemanha, n. 9, 2020.

CANZIANI, A.; QUIST, W. **CONCRETO Code Book: Study on Historic Concrete Conservation**. Delft, Países Baixos: Docomomo International; Delft University of Technology – Faculty of Architecture and the Built Environment, 2025. (Docomomo International book series, n. 02). DOI: 10.52200/docomomo.books.02.

CARVALHO, C. S. R. **Programa de conservação preventiva da Casa de Rui Barbosa**. Rio de Janeiro: Fundação Casa de Rui Barbosa, 2008.

CARVALHO, G.; OLIVEIRA, C. de A.; ZANONI, V. **Contribuição à conservação das fachadas de concreto aparente em edifícios de Arquitetura Moderna: mapa de danos como estratégia de monitoramento**. 4º Encontro de Conservação e Reabilitação de Edifícios. ENCORE 2020. Lisboa. LNEC. 3-6 novembro 2020.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: elaboração de mapas de potenciais de corrosão**. São Paulo: PINI, 1997.

CEN – European Committee For Standardization. **EN 1504-2:2004**: Products and systems for the protection and repair of concrete structures — Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity — Part 2: Surface protection systems for concrete. Pilsen: CEN, 2004.

CEN – European Committee For Standardization. **EN 1504-1:2005**: Products and systems for the protection and repair of concrete structures — Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity — Part 1: Definitions. Pilsen: CEN, 2005a.

CEN – European Committee For Standardization. **EN 1504-3:2005**: Products and systems for the protection and repair of concrete structures — Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity — Part 3: Structural and non-structural repair. Pilsen: CEN, 2005b.

CEN – European Committee For Standardization. **EN 1504-10:2017**: Products and systems for the protection and repair of concrete structures — Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity — Part 10: Site application of products and systems and quality control of the works. Pilsen: CEN, 2017.

COLLINS, P. **Concrete: The Vision of a New Architecture**. 2. ed. Montreal: McGill-Queen's University Press, 2004.

CONTIER, F. de A. **O edifício da FAUUSP e os materiais do Brutalismo**. X Seminário DOCOMOMO Brasil. Arquitetura Moderna e Internacional: conexões brutalistas 1955-75. Curitiba. 15-18 out. 2013. PUCPR.

COPPOLA, L.; BELLEZZE, T.; BELLI, A.; BIANCO, A.; BLASI, E.; CAPPELLO, M.; CAPUTO, D.; CHOUGAN, M.; COFFETTI, D.; COPPOLA, B. New Materials and Technologies for Durability and Conservation of Building Heritage. **Materials**, v. 16, p. 1190, 2023.

COSTA, L. 1987. **Brasília Revisitada**. Brasília: Diário Oficial do Distrito Federal – Decreto n. 10.829.

COSTA, J. M.; AZZI, S. S. Comparação da resistividade elétrica superficial e volumétrica do concreto em cimento Portland CP IV. **Construindo**, v. 9, n. 1, Belo Horizonte, 2017.

COSTA, L. **Relatório do Plano Piloto de Brasília**. 4. ed. Brasília: Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional; Secretaria de Estado de Cultura do Distrito Federal, 2018.

CROFT, C. **Concrete Architecture**. London: Laurence King. 2004.

CROFT, C.; MACDONALD, S. **Concrete: Case studies in conservation practice**. Conserving Modern Heritage. Getty Conservation Institute: 2019.

CURTIS, W. J. **Arquitetura Moderna desde 1900**. 3. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2008.

DE SOUZA, S. J.; HOOTON, R. D.; BICKLEY, J. A. Evaluation of Laboratory Drying Procedures Relevant to Field Conditions for Concrete Sorptivity Measurements. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 19, n. 2, p. 59-63, Dec. 1997.

DER/SP – Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. **ET-DE-C00/021**. Limpeza de substrato com aplicação de jato de água fria ou quente. Diretoria de Engenharia. Departamento de Estradas de Rodagem. Secretaria dos Transportes. 2006. 5 p.

DOCOMOMO. **Modern Heritage: Reuse, renovation and restoration**. Birkhauser, 2022.

DYER, T. **A durabilidade do concreto**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2015. ISBN 978-85-399-0608-6.

EKOLU, S.O. Implications of global CO2 emissions on natural carbonation and service lifespan of concrete infrastructures—Reliability analysis. **Cem. Concr. Compos.** 2020, 114, 103744.

FIB – Fédération Internationale du Béton. **Model Code for Service Life Design**. fib Bulletin 34. Lausanne: fib, 2006.

FICHER, S. **Guiarquitetura Brasília**. São Paulo: Empresa das Artes, 2000. p.66.

FICHER, S.; SCHLEE, A. R. **Guia de obras de Oscar Niemeyer: Brasília 50 anos**. Brasília: Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados, 2010.

FRAMPTON, K. **História crítica da Arquitetura Moderna**. 4. ed. – São Paulo: Martins Fontes – selo Martins, 2015.

FREITAS, V. P. de; TORRES, M. I.; GUIMARÃES, A. S. **Humidade ascensional**. 1. ed. Porto: FEUP Edições, 2008. ISBN 978-972-752-101-2.

GAUDETTE, P. E.; SLATON, D. **Preservation of Historic Concrete**. Preservation Briefs 15. Washington, DC: National Park Service, Heritage Preservation Services. 2007.

GUIMARÃES, M. O. **Cinquenta tons de cinza: Escalas de ação e de valorização do concreto aparente na Universidade de Brasília**. Teorias e práticas de intervenção no moderno. 13º Seminário DOCOMOMO, Salvador, Bahia, Brasil, outubro. 2019.

HALL, C.; HOFF, W. D. **Water Transport in Brick, Stone and Concrete**. Boca Raton: CRC Press, 2023. 472 p. ISBN 9781032033983.

HELENE, P. R. L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1992.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1993.

HERTZBERGER, H. **Lições de Arquitetura**. São Paulo: Gustavo Gili, 2011.

ICOMOS – International Council on Monuments and Sites. **Carta de Veneza: Carta Internacional sobre a Conservação e o Restauro de Monumentos e Sítios**. ICOMOS, 1964.

ICOMOS – International Council on Monuments and Sites. **The Burra Charter** (The Australia ICOMOS Charter for Places of Cultural Significance). Burra: ICOMOS, 2013.

ICOMOS – International Council on Monuments and Sites. **The Madrid Document** (Approaches for the conservation of twentieth century architectural heritage). Madrid: ICOMOS, 2014.

ICOMOS – International Council on Monuments and Sites. **The Cádiz Document**. InnovaConcrete Guidelines for Conservation of Concrete Heritage. International Scientific Committee on Twentieth Century Heritage (ISC20C). Valencia, Espanha: ICOMOS, 2021.

ILIUSHCHENKO, V.; KALINA, L.; HRUBY, P.; BILEK JR, V.; FLADR, J.; BILY, P.; BOJANOVSKY, J. The treatment of cementitious surface by selected silicate sealers. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2341, p. 012003, 2022.

Institution of Civil Engineers. **Historic Concrete**. Special issue. In: Institution of Civil Engineers. Structures and Buildings 116 (3–4). 1996.

ISAIA, G. C. (org.) *et al.* **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. 2 v.

ISO – International Organization for Standardization. **ISO 1920-12:2015**: Testing of concrete — Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete — Accelerated carbonation method. International Organization for Standardization. Geneva: ISO, 2015. 20p.

ISO – International Organization for Standardization. **ISO/FDIS 12572**: Hygrothermal performance of building materials and products — Determination of water vapour transmission properties — Cup method. Geneva: ISO, 2016. 28p.

ISO – International Organization for Standardization. **BS ISO 22185-1**: Diagnosing moisture damage in buildings and implementing countermeasures — Part 1: principles, nomenclature and moisture transport mechanisms. Geneva: ISO, 2021. 19p.

JONGE, W. de; DOOLAR, A. **The Fair Face of Concrete: Conservation and Repair of Exposed Concrete**. Preservation Technology Dossier 2. Eindhoven: DOCOMOMO International / Eindhoven University of Technology. 1998.

KAMINSKI, M. G.; ZANONI, V. A. G. Intervenção nas fachadas da Biblioteca Central da UnB: Análise das estratégias para conservação do concreto aparente. **Revista DOCOMOMO Brasil**, [S. l.], v. 8, n. 12, p. e190, 2025. DOI: 10.59804/rdb.2025.v8.190.

KOSMATKA, S. H.; WILSON, M. L. **Design and control of concrete mixtures**. 16. ed. Skokie: Portland Cement Association, 2016.

KÜHL, B. M. O tratamento das superfícies arquitetônicas como problema teórico da restauração. **Anais do Museu Paulista**, São Paulo, v. 12, n. 1, p. 309-330, jan./dez. 2004.

KÜHL, B. M. História e Ética na Conservação e na Restauração de Monumentos Históricos. **Revista CPC**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 16-40, abr. 2006.

KÜHL, B. M. Cesare Brandi e a teoria da restauração. **Pós: Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP**, São Paulo, n. 21, p. 198-211, jun. 2007.

KÜHL, B. M. **Preservação do patrimônio arquitetônico da industrialização: problemas teóricos do restauro**. Cotia: Ateliê Editorial. 2018.

LAUAR, M. T.; ISHIHARA, M. K.; FASSONI, D. P.; MENDES, B. C.; LOPES, M. M. S.; MENDES, T. S. G. **COMPARATIVO DE PERMEABILIDADE ENTRE TINTAS ACRÍLICA E À BASE DE SOLO EM ARGAMASSA DE CAL**, p. 2034-2043. In: *72º Congresso Anual da ABM*, São Paulo, 2017. ISSN: 2594-5327, DOI 10.5151/1516-392X-30602.

LE CORBUSIER. **Por uma Arquitetura**. São Paulo: Perspectiva, 2004.

LEITÃO, F. (org.) *et al.* **Brasília 1960–2010: passado, presente e futuro**. Brasília: Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente, 2009.

LOOS, A. **Ornamento e Crime**. São Paulo: Cosac Naify, 1989.

MACDONALD, S. **Concrete: Building Pathology**. Oxford: Blackwell Science. 2003.

MAHER, Al-Jabari. **3 - Concrete durability problems: physicochemical and transport mechanisms**, Editor(s): Maher Al-Jabari, In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Integral Waterproofing of Concrete Structures, Woodhead Publishing, 2022, Pages 69-107, ISBN 9780128243541, DOI: 10.1016/B978-0-12-824354-1.00003-9

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. (ed.). **Handbook on nondestructive testing of concrete**. 2. ed. Boca Raton; London; New York; Washington, D.C.: CRC Press, 2004. ISBN 0-8493-1485-2.

MARQUES, A. P.; FLORES, A. R. (2016). Intervenção em pré-existência: estudo de caso do SESC Fábrica da Pompéia (2014). **Disciplinarum Scientia | Artes, Letras E Comunicação**, 14(1), 7–16.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; REICHERT, T. A. **Impact of climate change on the service life of concrete structures**. In *Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures*; Woodhead Publishing: Sawston, UK, 2024; pp. 47–84.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 4ª ed. McGraw-Hill Education, New York, 2014.

MEIRA, G. de S.; GUEDES, J. V. F.; BIAS, E. d. S. UAV-Embedded Sensors and Deep Learning for Pathology Identification in Building Façades: A Review. **Drones**, 2024, 8, 341. DOI: 10.3390/drones8070341

MORAES, V. D. de. **Estudo sobre hidrofugantes como método de proteção da superfície do concreto aparente de patrimônio da Arquitetura Moderna**. 2023. 283 f. Dissertação (mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

MORETH, A. C. M.; FUENTES, M. del C. A. Conexões brutalistas na arquitetura da Universidade de Brasília. In: **SEMINÁRIO DOCOMOMO BRASIL**, 10., 2013, Curitiba. Anais... Curitiba: PUCPR, 2013.

MOURA, A. de D. P.; LIRA, F. B.; MELO, C. E. L. de. Análise da integridade de fachadas de concreto aparente do patrimônio moderno. Pós. Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP, São Paulo, v. 32, n. 61, e227362, 2025. DOI: 10.11606/issn.2317-2762.posfauusp.2025.227362.

MUÑOZ, R.; TOGNON, M. Restauro do concreto aparente do patrimônio moderno: aspectos técnicos de casos práticos. **Cadernos PROARQ** 38. Pgs. 153-172. 2022.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete technology**. 2. ed. Harlow: Pearson, 2010.

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. 5. ed. Harlow: Pearson, 2011.

ODGERS, D. **Practical Building Conservation: Concrete**. Farnham: English Heritage / Ashgate. 2012.

OLIVEIRA, A. L. A. de; PANTOJA, J. da C.; BUZAR, M. A. R.; MORAIS, R. S. G. de A. O legado de Galbinski: As premissas de projeto das edificações monumentais da biblioteca central e do restaurante universitário da Universidade de Brasília. **LUMEN ET VIRTUS**, São José dos Pinhais, Vol. XV Núm. XXXIX, p.1823-1837, 2024.

OMM – ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL. **State of the Global Climate 2024**. Geneva: WMO, 2025. 1368. ISBN 978-92-63-11368-9.

PEIXOTO, A.; MELO, C. E. L. de; LIRA, F. B. O conceito de integridade na conservação da arquitetura moderna. **Thésis**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 12, p. 27-45, dez. 2021. DOI: 10.51924/revthesis.2021.v6.337.

PELLEGRINI, A. C. SESC Pompeia: o patrimônio na intervenção. In: ANTICOLI, Audrey Migliani; CRITELLI, Fernanda; CHIARELLI, Silvia Raquel; OSSANI, Tais (org.). **Arquiteturas do patrimônio moderno paulista: reconhecimento, intervenção, gestão**. São Paulo: DOCOMOMO SP; Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2017. p. 78–92. ISBN 978-85-88157-16-3.

PINHEIRO, M. L. B.; OLIVEIRA, C. T. de A. **Subsidies for a Conservation Management Plan. Vilanova Artigas Building (School of Architecture and Urbanism of the University of São Paulo - FAUUSP)**. Keeping It Modern - Getty Foundation. São Paulo, 2017.

PINTO, F. L. H. **O concreto aparente como atributo na conservação da arquitetura moderna**. Orientador: Fernando Diniz Moreira. 2012. 177 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Urbano) – Centro de Artes e Comunicação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

POLDER, R. B. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 15, p. 125-131, 2001.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2010.

POSSAN, E.; ALVES, H.; HELENE, P.; BILESKY, P.; CARRAZEDO, R.; CURTI, R. Módulo de elasticidade dinâmico do concreto: por que utilizar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 62., 2020, Florianópolis, SC. **Anais do 62º Congresso Brasileiro do Concreto (CBC2020)**. São Paulo: IBRACON, 2020. ISSN 2175-8182.

PRUDON, T. H. M. Confronting concrete realities. **Progressive Architecture** 62 (11): 131–37. 1981.

PRUDON, T. H. M. **Preservation of modern architecture**. 1. ed. John Wiley and Sons Inc., 2008.

RIBEIRO, D. **Corrosão e degradação em estruturas de concreto**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

RILEM. **CPC-18**: Measurement of hardened concrete carbonation depth. RILEM Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials, 1988.

RILEM. **TC 154-EMC**: Electrochemical Techniques for Measuring Corrosion in Concrete - Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. RILEM Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials, 1992.

RILEM. **Test No. II.4**: Measurement of water absorption under low pressure. In: RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials. London: E & FN Spon, 1994. p. 36-37.

ROMANI, M.; WARSCHIED, T.; NICOLE, L.; MARCON, L.; DI MARTINO, P.; SUZUKI, M. T.; LEBARON, P.; LAMI, R. Current and future chemical treatments to fight biodeterioration of outdoor building materials and associated biofilms: Moving away from ecotoxic and towards efficient, sustainable solutions. **Science of The Total Environment**, v. 802, p. 149846, 2022.

SALOMÃO, M. C. F. **Estudo da estrutura das argamassas de revestimento e sua influência nas propriedades de transporte de água**. 2016. 248 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil). Publicação E.DT-06A/16. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 2016.

SCHLEE, A. R.; MEDEIROS, A. E.; FERREIRA, O. L. Preservar e intervir no patrimônio moderno. O caso de Brasília. In: Seminário DOCOMOMO Brasil, 7., 2007, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: DOCOMOMO, 2007.

SCHLEE, A. R. TRÈS BRUT. Nem tão vitrineira, nem tão tola... In: **Seminário DOCOMOMO Brasil**, 10., 2013, Curitiba. Arquitetura moderna e internacional: conexões brutalistas 1955-75. Curitiba: PUCPR, 2013.

SCHLEE, A. R. *et al.* **Registro arquitetônico da Universidade de Brasília**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2014. 152 p.

SCRIVENER, K. L.; CRUMBIE, A. K.; LAUGESSEN, P. The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. **Interface Science**, v. 12, p. 411–421, 2004.

SERRALHEIRO *et al.* Methodology for service life prediction of architectural concrete facades, Construct. **Build. Mater.** 133 (2017) 261–274. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.079

SILVA, C. M. M. de A. e. **Durabilidade de concretos produzidos com agregados de resíduo de concreto submetidos a tratamentos com cimento Portland e moagem**. 2019. 162 f. Dissertação (mestrado). Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

SILVA, L. S.; ZANONI, V. A. G.; PAZOS, V. C.; SANTOS, L. M. A.; JUCÁ, T. R. P. **Fotogrametria com imagens adquiridas com drones: do plano de voo ao modelo 3D**. 1. ed. Brasília: LaSUS FAU: Editora da Universidade de Brasília -UnB, 2021.

SOUZA, V. C. de; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1998.

STEIN, C. **Greening Modernism: Preservation, Sustainability, and the Modern Movement**. New York: W. W. Norton & Company, 2010.

THE CONCRETE SOCIETY. **Repair of concrete structures with reference to BS EN 1504**. Camberley: The Concrete Society, 2009. (CCIP-046). ISBN 978-1-904482-56-7.

THOMAZ, W. A.; MIYAJI, D. Y.; POSSAN, E. Comparative study of dynamic and static Young's modulus of concrete containing basaltic aggregates. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, 2021. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00645.

UnB – UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. **Plano Diretor do Campus Darcy Ribeiro**. Brasília, 2023.

WONG, H. S.; BUENFELD, N. R. Patch microstructure in cement-based materials: Fact or artefact? **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 5, p. 990–997, 2006.

WOSNIACK, L. M.; REAL, L. V.; SILVA, M. D.; MACIOSKI, G.; HOPPE FILHO, J.; MEDEIROS, M. H. F. de. Resistividade elétrica do concreto pelo ensaio de migração de cloretos: comparação com o método dos quatro eletrodos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 321-340, jul./set. 2021. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. DOI: 10.1590/s1678-86212021000300554.

ZANONI, V. A. G. **Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília**. Tese de doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

APÊNDICE A – Resultados de ensaios *in loco*

Tabela 9.Ap.A1. Resultados Parciais do Ensaio de Esclerometria.

Nº medição	Valor aferido	Valor médio aferido	Valor aferido ±10%	Valor médio corrigido	Valor aferido corrigido ±10%	Valor médio corrigido	Valor aferido corrigido ±10%	Valor de resistência correspondente	Valor médio de resistência correspondente
1	46,0	41,4	-	41,0	-	41,0	-	-	45,4
2	43,0		43,0		43,0		43,0	49,0	
3	42,5		42,5		42,5		42,5	48,0	
4	34,5		-		-		-	-	
5	39,0		39,0		39,0		39,0	42,0	
6	41,5		41,5		41,5		41,5	46,0	
7	43,5		43,5		43,5		43,5	50,0	
8	43,0		43,0		43,0		43,0	49,0	
9	38,0		38,0		38,0		38,0	40,0	
10	41,0		41,0		41,0		41,0	45,0	
11	41,5		41,5		41,5		41,5	46,0	
12	42,0		42,0		42,0		42,0	47,0	
13	40,0		40,0		40,0		40,0	44,0	
14	49,0		-		-		-	-	
15	40,0		40,0		40,0		40,0	44,0	
16	38,0		38,0		38,0		38,0	40,0	

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 9.Ap.A1. Resultados Parciais do Ensaio de Esclerometria (continuação).

Nº medição	Valor aferido	Valor médio aferido	Valor aferido ±10%	Valor médio corrigido	Valor aferido corrigido ±10%	Valor médio corrigido	Valor aferido corrigido ±10%	Valor de resistência correspondente	Valor médio de resistência correspondente
17	40,0	44,0	40,0	43,1	40,0	42,8	40,0	44,0	48,8
18	43,5		43,5		43,5		43,5	50,0	
19	41,0		41,0		41,0		41,0	45,0	
20	42,0		42,0		42,0		42,0	47,0	
21	44,5		44,5		44,5		44,5	52,0	
22	42,0		42,0		42,0		42,0	47,0	
23	40,0		40,0		40,0		40,0	44,0	
24	49,0		-		-		-	-	
25	41,5		41,5		41,5		41,5	46,0	
26	43,0		43,0		43,0		43,0	49,0	
27	47,5	44,0	47,5	43,1	-	42,8	-	-	
28	46,5		46,5		46,5		46,5	56,0	
29	45,5		45,5		45,5		45,5	54,0	
30	41,0		41,0		41,0		41,0	45,0	
31	46,0		46,0		46,0		46,0	55,0	
32	51,0		-		-		-	-	

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 9.Ap.A1. Resultados Parciais do Ensaio de Esclerometria (continuação).

Nº medição	Valor aferido	Valor médio aferido	Valor aferido ±10%	Valor médio corrigido	Valor aferido corrigido ±10%	Valor médio corrigido	Valor aferido corrigido ±10%	Valor de resistência correspondente	Valor médio de resistência correspondente
33	45,5	43,8	45,5	43,5	45,5	43,5	45,5	54,0	50,0
34	46,0		46,0		46,0		46,0	55,0	
35	45,5		45,5		45,5		45,5	54,0	
36	44,5		44,5		44,5		44,5	52,0	
37	44,0		44,0		44,0		44,0	51,0	
38	46,5		46,5		46,5		46,5	56,0	
39	48,5		-		-		-	-	
40	40,0		40,0		40,0		40,0	44,0	
41	46,0		46,0		46,0		46,0	55,0	
42	41,5		41,5		41,5		41,5	46,0	
43	40,5		40,5		40,5		40,5	44,0	
44	43,5		43,5		43,5		43,5	50,0	
45	40,5		40,5		40,5		40,5	44,0	
46	44,5		44,5		44,5		44,5	52,0	
47	42,5		42,5		42,5		42,5	48,0	
48	41,0		41,0		41,0		41,0	45,0	

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 9.Ap.A1. Resultados Parciais do Ensaio de Esclerometria (continuação).

Nº medição	Valor aferido	Valor médio aferido	Valor aferido ±10%	Valor médio corrigido	Valor aferido corrigido ±10%	Valor médio corrigido	Valor aferido corrigido ±10%	Valor de resistência correspondente	Valor médio de resistência correspondente
49	47,0	46,3	47,0	46,3	47,0	46,3	47,0	57,0	55,7
50	48,5		48,5		48,5		48,5	60,0	
51	47,0		47,0		47,0		47,0	57,0	
52	43,0		43,0		43,0		43,0	49,0	
53	50,0		50,0		50,0		50,0	63,0	
54	50,5		50,5		50,5		50,5	65,0	
55	50,0		50,0		50,0		50,0	63,0	
56	44,0		44,0		44,0		44,0	51,0	
57	46,5		46,5		46,5		46,5	56,0	
58	43,0		43,0		43,0		43,0	49,0	
59	47,5		47,5		47,5		47,5	58,0	
60	42,0		42,0		42,0		42,0	47,0	
61	46,0		46,0		46,0		46,0	54,5	
62	45,0		45,0		45,0		45,0	53,0	
63	46,0		46,0		46,0		46,0	55,0	
64	45,0		45,0		45,0		45,0	53,0	

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 10.Ap.A2. Resultados Parciais do Ensaio de Absorção de Água por Tubos Karsten e Medição de Temperatura e Umidade Relativa do Ar.

	ABSORÇÃO (ml)											
Área e Aspecto	ÁREA 01 SUJA						ÁREA 02 SUJA					
Tempo (min)	A	B	C	D	°C	% UR	A	B	C	D	°C	% UR
0	0,00	0,00	0,00	0,00	32,2	39	0,00	0,00	0,00	0,00	27,9	48
5	0,30	0,20	0,10	0,30			0,40	0,30	0,30	0,30		
10	0,20	0,20	0,10	0,45			0,20	0,15	0,10	0,15		
15	0,10	0,25	0,20	0,20			0,20	0,10	0,10	0,10		
20	0,05	0,10	0,20	0,20			0,15	0,10	0,10	0,10		
25	0,10	0,10	0,10	0,20			0,15	0,10	0,10	0,10		
30	0,05	0,10	0,10	0,20	32,7	38	0,15	0,10	0,10	0,10	30,9	45
35	0,05	0,10	0,05	0,20			0,15	0,10	0,10	0,10		
40	0,05	0,05	0,00	0,20			0,10	0,10	0,10	0,10		
45	0,05	0,10	0,10	0,20			0,20	0,05	0,10	0,10		
50	0,05	0,10	0,00	0,10			0,10	0,05	0,10	0,10		
55	0,05	0,05	0,10	0,15			0,10	0,05	0,10	0,10		
60	0,05	0,05	0,05	0,15	32,8	39	0,10	0,05	0,05	0,05	32,9	43
0	0,00	0,00	0,00	0,00			0,00	0,00	0,00	0,00		
5	0,30	0,20	0,10	0,30			0,40	0,30	0,30	0,30		
10	0,50	0,40	0,20	0,75			0,60	0,45	0,40	0,45		
15	0,60	0,65	0,40	0,95			0,80	0,55	0,50	0,55		
20	0,65	0,75	0,60	1,15			0,95	0,65	0,60	0,65		
25	0,75	0,85	0,70	1,35			1,10	0,75	0,70	0,75		
30	0,80	0,95	0,80	1,55			1,25	0,85	0,80	0,85		
35	0,85	1,05	0,85	1,75			1,40	0,95	0,90	0,95		
40	0,90	1,10	0,85	1,95			1,50	1,05	1,00	1,05		
45	0,95	1,20	0,95	2,15			1,70	1,10	1,10	1,15		
50	1,00	1,30	0,95	2,25			1,80	1,15	1,20	1,25		
55	1,05	1,35	1,05	2,40			1,90	1,20	1,30	1,35		
60	1,10	1,40	1,10	2,55			2,00	1,25	1,35	1,40		
ABSORÇÃO ACUMULADA (ml)												
Absorção acumulada média (ml)	1,54						1,50					

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 10.Ap.A2. Resultados Parciais do Ensaio de Absorção de Água por Tubos Karsten e Medição de Temperatura e Umidade Relativa do Ar (continuação).

	ABSORÇÃO (ml)											
Área e Aspecto	ÁREA 01 LIMPA						ÁREA 02 LIMPA					
Tempo (min)	A	B	C	D	°C	% UR	A	B	C	D	°C	% UR
0	0,00	0,00	0,00	0,00	23,2	46	0,00	0,00	0,00	0,00	28,9	41
5	0,30	0,20	0,10	0,15			0,30	0,20	0,35	0,25		
10	0,00	0,10	0,10	0,10			0,15	0,30	0,20	0,20		
15	0,00	0,10	0,05	0,10			0,10	0,05	0,20	0,15		
20	0,00	0,00	0,05	0,05			0,10	0,05	0,10	0,10		
25	0,05	0,10	0,05	0,10			0,10	0,10	0,10	0,10		
30	0,00	0,00	0,00	0,05	26,1	42	0,10	0,10	0,20	0,10	30,4	42
35	0,00	0,10	0,05	0,10			0,05	0,05	0,30	0,10		
40	0,00	0,00	0,00	0,05			0,10	0,10	0,20	0,10		
45	0,00	0,00	0,00	0,00			0,05	0,05	0,20	0,10		
50	0,05	0,10	0,00	0,10			0,10	0,05	0,15	0,05		
55	0,00	0,00	0,05	0,05			0,10	0,05	0,10	0,05		
60	0,00	0,00	0,00	0,05	27,3	40	0,05	0,05	0,10	0,05	33,8	39
0	0,00	0,00	0,00	0,00			0,00	0,00	0,00	0,00		
5	0,30	0,20	0,10	0,15			0,30	0,20	0,35	0,25		
10	0,30	0,30	0,20	0,25			0,45	0,50	0,55	0,45		
15	0,30	0,40	0,25	0,35			0,55	0,55	0,75	0,60		
20	0,30	0,40	0,30	0,40			0,65	0,60	0,85	0,70		
25	0,35	0,50	0,35	0,50			0,75	0,70	0,95	0,80		
30	0,35	0,50	0,35	0,55			0,85	0,80	1,15	0,90		
35	0,35	0,60	0,40	0,65			0,90	0,85	1,45	1,00		
40	0,35	0,60	0,40	0,70			1,00	0,95	1,65	1,10		
45	0,35	0,60	0,40	0,70			1,05	1,00	1,85	1,20		
50	0,40	0,70	0,40	0,80			1,15	1,05	2,00	1,25		
55	0,40	0,70	0,45	0,85			1,25	1,10	2,10	1,30		
60	0,40	0,70	0,45	0,90			1,30	1,15	2,20	1,35		
ABSORÇÃO ACUMULADA (ml)												
Absorção acumulada média (ml)	0,61						1,50					

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 10.Ap.A2. Resultados Parciais do Ensaio de Absorção de Água por Tubos Karsten e Medição de Temperatura e Umidade Relativa do Ar (continuação).

	ABSORÇÃO (ml)											
Área e Aspecto	ÁREA 01 VERNIZ						ÁREA 02 SILANO/SILOXANO					
Tempo (min)	A	B	C	D	°C	% UR	A	B	C	D	°C	% UR
0	0,00	0,00	0,00	0,00	29,0	38	0,00	0,00	0,00	0,00	32,8	38
5	0,30	0,10	0,15	0,25			0,00	0,10	0,20	0,05		
10	0,05	0,10	0,10	0,20			0,05	0,10	0,00	0,10		
15	0,05	0,10	0,10	0,20			0,05	0,10	0,05	0,10		
20	0,00	0,05	0,10	0,15			0,05	0,05	0,00	0,05		
25	0,05	0,05	0,10	0,10			0,05	0,10	0,05	0,10		
30	0,00	0,05	0,10	0,10	31,1	38	0,05	0,00	0,00	0,05	33,0	36
35	0,00	0,05	0,10	0,10			0,05	0,10	0,00	0,05		
40	0,05	0,05	0,10	0,10			0,00	0,00	0,05	0,05		
45	0,00	0,05	0,10	0,10			0,05	0,05	0,00	0,05		
50	0,05	0,05	0,10	0,10			0,00	0,00	0,00	0,05		
55	0,00	0,00	0,00	0,05			0,05	0,10	0,05	0,05		
60	0,05	0,05	0,10	0,05	31,3	39	0,00	0,00	0,00	0,00	32,6	38
0	0,00	0,00	0,00	0,00			0,00	0,00	0,00	0,00		
5	0,30	0,10	0,15	0,25			0,00	0,10	0,20	0,05		
10	0,35	0,20	0,25	0,45			0,05	0,20	0,20	0,15		
15	0,40	0,30	0,35	0,65			0,10	0,30	0,25	0,25		
20	0,40	0,35	0,45	0,80			0,15	0,35	0,25	0,30		
25	0,45	0,40	0,55	0,90			0,20	0,45	0,30	0,40		
30	0,45	0,45	0,65	1,00			0,25	0,45	0,30	0,45		
35	0,45	0,50	0,75	1,10			0,30	0,55	0,30	0,50		
40	0,50	0,55	0,85	1,20			0,30	0,55	0,35	0,55		
45	0,50	0,60	0,95	1,30			0,35	0,60	0,35	0,60		
50	0,55	0,65	1,05	1,40			0,35	0,60	0,35	0,65		
55	0,55	0,65	1,05	1,45			0,40	0,70	0,40	0,70		
60	0,60	0,70	1,15	1,50			0,40	0,70	0,40	0,70		
ABSORÇÃO ACUMULADA (ml)												
Absorção acumulada média (ml)	0,99						0,55					

Legenda de cores:

- amostra com aplicação de dispersão aquosa de silano-siloxano
- amostra com aplicação de verniz
- amostra limpa sem aplicação de produtos protetores
- amostra suja sem aplicação de produtos protetores

Fonte: Autor, 2026.

APÊNDICE B – Resultados de ensaios de laboratório

Tabela 11.Ap.B1. Resultados Parciais do Ensaio de Resistividade Elétrica Volumétrica.

	CP01				CP02				CP03				CP04				CP05			
~V	V	mA	R	ρ	V	mA	R	ρ	V	mA	R	ρ	V	mA	R	ρ	V	mA	R	ρ
0	0,00	0,00	22402,93	30984,05	0,00	0,00	29562,58	40051,05	0,00	0,00	43446,78	59118,20	0,00	0,00	42737,30	57884,03	0,00	0,00	33624,44	52749,63
10	10,12	0,52	19461,54	26916,00	9,90	0,27	36666,67	49675,59	9,97	0,18	55388,89	75367,86	10,01	0,18	55611,11	75320,52	10,03	0,24	41791,67	65562,28
20	20,54	0,97	21175,26	29286,13	19,94	0,60	33233,33	45024,15	20,16	0,41	49170,73	66906,80	20,03	0,42	47690,48	64592,70	20,75	0,54	38425,93	60282,14
30	29,83	1,43	20860,14	28850,31	30,02	0,93	32279,57	43732,00	30,03	0,63	47666,67	64860,21	29,96	0,65	46092,31	62428,11	29,95	0,81	36975,31	58006,43
40	41,00	1,89	21693,12	30002,36	40,20	1,29	31162,79	42219,00	40,00	0,88	45454,55	61850,17	40,00	0,90	44444,44	60196,22	39,90	1,13	35309,73	55393,50
50	49,90	2,20	22681,82	31369,76	49,70	1,61	30869,57	41821,74	50,10	1,12	44732,14	60867,19	49,90	1,14	43771,93	59285,36	50,10	1,43	35034,97	54962,44
60	59,80	2,64	22651,52	31327,85	60,00	1,95	30769,23	41685,81	60,10	1,36	44191,18	60131,10	60,10	1,39	43237,41	58561,40	59,80	1,72	34767,44	54542,76
70	70,10	3,11	22540,19	31173,89	70,00	2,29	30567,69	41412,76	69,80	1,58	44177,22	60112,10	70,00	1,61	43478,26	58887,61	69,90	2,02	34603,96	54286,29
80	80,10	3,55	22563,38	31205,95	80,40	2,71	29667,90	40193,73	79,90	1,82	43901,10	59736,39	80,30	1,85	43405,41	58788,93	79,80	2,32	34396,55	53960,91
90	90,10	4,01	22468,83	31075,19	90,90	3,09	29417,48	39854,47	90,00	2,05	43902,44	59738,21	90,30	2,09	43205,74	58518,50	90,10	2,63	34258,56	53744,42
100	100,00	4,44	22522,52	31149,45	101,00	3,42	29532,16	40009,84	100,30	2,29	43799,13	59597,63	100,50	2,34	42948,72	58170,39	100,00	2,93	34129,69	53542,26
110	110,00	4,89	22494,89	31111,23	110,10	3,73	29517,43	39989,88	109,90	2,52	43611,11	59341,80	109,70	2,56	42851,56	58038,80	110,00	3,23	34055,73	53426,23
120	120,10	5,35	22448,60	31047,21	120,50	4,08	29534,31	40012,76	120,00	2,75	43636,36	59376,16	120,10	2,80	42892,86	58094,73	120,10	3,55	33830,99	53073,65
130	130,10	5,80	22431,03	31022,92	129,80	4,41	29433,11	39875,64	130,10	2,99	43511,71	59206,54	130,30	3,04	42861,84	58052,72	130,20	3,86	33730,57	52916,12
140	139,60	6,23	22407,70	30990,65	140,00	4,75	29473,68	39930,62	140,00	3,23	43343,65	58977,87	139,80	3,27	42752,29	57904,35	140,00	4,16	33653,85	52795,76
150	150,30	6,71	22399,40	30979,17	149,80	5,10	29372,55	39793,60	149,60	3,45	43362,32	59003,27	150,30	3,53	42577,90	57668,15	150,30	4,49	33474,39	52514,23
160	160,10	7,16	22360,34	30925,14	159,90	5,44	29393,38	39821,83	159,90	3,69	43333,33	58963,83	160,30	3,77	42519,89	57589,58	160,20	4,80	33375,00	52358,31
170	170,00	7,61	22339,03	30895,67	170,00	5,79	29360,97	39777,91	169,90	3,94	43121,83	58676,03	170,30	4,01	42468,83	57520,42	170,90	5,12	33378,91	52364,44
180	180,10	8,07	22317,22	30865,51	180,10	6,14	29332,25	39739,00	180,20	4,18	43110,05	58660,00	179,80	4,24	42405,66	57434,86	180,60	5,44	33198,53	52081,46
190	190,10	8,52	22312,21	30858,57	189,80	6,47	29335,39	39743,26	189,70	4,41	43015,87	58531,86	190,30	4,49	42383,07	57404,27	190,40	5,76	33055,56	51857,17
200	199,80	8,97	22274,25	30806,07	200,00	6,84	29239,77	39613,71	199,90	4,65	42989,25	58495,63	200,40	4,73	42367,86	57383,67	199,90	6,09	32824,30	51494,38
210	209,80	9,43	22248,14	30769,97	209,90	7,19	29193,32	39550,79	210,10	4,90	42877,55	58343,64	210,40	4,98	42249,00	57222,67	210,00	6,40	32812,50	51475,87
220	220,30	9,91	22230,07	30744,98	219,60	7,54	29124,67	39457,77	220,10	5,14	42821,01	58266,71	220,10	5,21	42245,68	57218,18	220,90	6,74	32774,48	51416,22
230	230,00	10,37	22179,36	30674,85	230,50	7,93	29066,83	39379,42	230,10	5,38	42769,52	58196,64	230,00	5,47	42047,53	56949,81	229,40	7,04	32585,23	51119,32
240	238,30	10,74	22188,08	30686,90	238,50	8,21	29049,94	39356,53	238,00	5,57	42728,90	58141,38	237,30	5,64	42074,47	56986,29	238,90	7,34	32547,68	51060,43

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 11.Ap.B1. Resultados Parciais do Ensaio de Resistividade Elétrica Volumétrica (continuação).

	CP06				CP07				CP08				CP09				CP10			
~V	V	mA	R	ρ	V	mA	R	ρ	V	mA	R	ρ	V	mA	R	ρ	V	mA	R	ρ
0	0,00	0,00	32695,58	48436,41	0,00	0,00	42306,88	58409,06	0,00	0,00	22279,93	32914,41	0,00	0,00	33159,58	48469,21	0,00	0,00	28525,17	40927,33
10	9,94	0,25	39760,00	58901,90	9,88	0,18	54888,89	75779,83	9,99	0,35	28542,86	42166,71	9,96	0,24	41500,00	60660,36	10,23	0,27	37888,89	54362,19
20	20,08	0,55	36509,09	54085,89	20,25	0,42	48214,29	66564,85	20,04	0,76	26368,42	38954,39	20,08	0,54	37185,19	54353,41	19,87	0,58	34258,62	49153,56
30	30,12	0,86	35023,26	51884,72	29,93	0,65	46046,15	63571,52	30,06	1,19	25260,50	37317,65	30,03	0,84	35750,00	52255,61	29,96	0,92	32565,22	46723,90
40	40,00	1,19	33613,45	49796,17	39,90	0,90	44333,33	61206,79	40,00	1,66	24096,39	35597,88	39,94	1,14	35035,09	51210,63	40,10	1,29	31085,27	44600,50
50	50,00	1,50	33333,33	49381,20	50,00	1,14	43859,65	60552,82	50,10	2,10	23857,14	35244,44	50,10	1,47	34081,63	49816,97	50,10	1,64	30548,78	43830,76
60	60,10	1,81	33204,42	49190,23	60,00	1,38	43478,26	60026,27	60,00	2,54	23622,05	34897,13	60,00	1,77	33898,31	49549,00	60,10	1,99	30201,01	43331,78
70	69,90	2,11	33127,96	49076,96	70,00	1,62	43209,88	59655,74	70,00	2,99	23411,37	34585,90	70,10	2,08	33701,92	49261,95	70,30	2,34	30042,74	43104,69
80	79,90	2,43	32880,66	48710,59	80,10	1,86	43064,52	59455,06	80,00	3,45	23188,41	34256,51	80,00	2,38	33613,45	49132,62	80,40	2,71	29667,90	42566,88
90	89,90	2,74	32810,22	48606,24	90,00	2,10	42857,14	59168,75	90,00	3,92	22959,18	33917,88	90,10	2,69	33494,42	48958,64	90,00	3,06	29411,76	42199,39
100	100,20	3,06	32745,10	48509,77	99,80	2,34	42649,57	58882,18	100,00	4,38	22831,05	33728,58	100,60	3,01	33421,93	48852,68	99,80	3,42	29181,29	41868,70
110	110,30	3,36	32827,38	48631,67	110,20	2,60	42384,62	58516,38	110,30	4,86	22695,47	33528,30	110,10	3,30	33363,64	48767,47	109,80	3,78	29047,62	41676,92
120	120,20	3,67	32752,04	48520,06	119,90	2,83	42367,49	58492,74	120,00	5,32	22556,39	33322,83	120,30	3,62	33232,04	48575,13	119,90	4,17	28753,00	41254,20
130	130,10	3,98	32688,44	48425,84	130,10	3,08	42240,26	58317,08	130,00	5,80	22413,79	33112,17	130,00	3,92	33163,27	48474,59	129,80	4,53	28653,42	41111,33
140	139,90	4,28	32686,92	48423,58	140,00	3,32	42168,67	58218,25	140,50	6,31	22266,24	32894,19	139,90	4,22	33151,66	48457,63	140,00	4,93	28397,57	40744,24
150	150,10	4,59	32701,53	48445,22	150,80	3,59	42005,57	57993,07	150,00	6,77	22156,57	32732,17	150,20	4,54	33083,70	48358,29	149,90	5,31	28229,76	40503,47
160	160,20	4,91	32627,29	48335,25	160,20	3,81	42047,24	58050,61	159,70	7,26	21997,25	32496,79	159,90	4,85	32969,07	48190,74	160,20	5,70	28105,26	40324,85
170	170,00	5,23	32504,78	48153,75	170,40	4,06	41970,44	57944,57	170,00	7,78	21850,90	32280,60	169,90	5,16	32926,36	48128,30	170,20	6,09	27947,45	40098,43
180	180,00	5,53	32549,73	48220,34	180,10	4,29	41981,35	57959,63	180,00	8,29	21712,91	32076,74	179,90	5,47	32888,48	48072,94	180,30	6,49	27781,20	39859,89
190	190,20	5,86	32457,34	48083,47	190,60	4,56	41798,25	57706,84	190,40	8,81	21611,80	31927,38	190,00	5,79	32815,20	47965,82	189,90	6,86	27682,22	39717,87
200	199,90	6,16	32451,30	48074,53	200,30	4,80	41729,17	57611,47	201,10	9,37	21462,11	31706,24	200,40	6,11	32798,69	47941,69	200,00	7,25	27586,21	39580,12
210	210,10	6,48	32422,84	48032,36	210,00	5,04	41666,67	57525,18	210,00	9,82	21384,93	31592,21	210,10	6,42	32725,86	47835,23	209,80	7,65	27424,84	39348,59
220	220,30	6,80	32397,06	47994,17	220,10	5,29	41606,81	57442,53	220,10	10,34	21286,27	31446,46	219,50	6,72	32663,69	47744,37	220,20	8,07	27286,25	39149,74
230	229,80	7,10	32366,20	47948,45	230,00	5,54	41516,25	57317,51	230,20	10,86	21197,05	31314,66	230,10	7,06	32592,07	47639,68	230,20	8,46	27210,40	39040,92
240	237,00	7,32	32377,05	47964,53	238,00	5,73	41535,78	57344,47	237,80	11,25	21137,78	31227,09	237,70	7,29	32606,31	47660,49	237,90	8,70	27344,83	39233,79

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 12.Ap.B2. Resultados Parciais do Ensaio de Resistividade Elétrica Superficial.

CP01					CP02					CP03					CP04					CP05				
~V	V	mA	R	ρ	~V	V	mA	R	ρ	~V	V	mA	R	ρ	~V	V	mA	R	ρ	~V	V	mA	R	ρ
0	0,000	0,00	867,35	21798,95	0	0,000	0,00	1500,40	37709,10	0	0,000	0,00	2229,07	56022,63	0	0,000	0,00	1295,88	32569,06	0	0,000	0,00	1478,96	37170,43
10	0,099	0,01	9900,00	248814,14	10	0,051	0,01	5100,00	128176,98	10	0,127	0,03	4233,33	106395,27	10	0,039	0,01	3900,00	98017,69	10	0,102	0,02	5100,00	128176,98
20	0,076	0,03	2533,33	63669,61	20	0,092	0,03	3066,67	77073,74	20	0,237	0,07	3385,71	85092,28	20	0,057	0,02	2850,00	71628,31	20	0,137	0,05	2740,00	68863,71
30	0,086	0,07	1228,57	30877,37	30	0,156	0,07	2228,57	56010,11	30	0,360	0,12	3000,00	75398,22	30	0,087	0,04	2175,00	54663,71	30	0,189	0,09	2100,00	52778,76
40	0,103	0,10	1030,00	25886,72	40	0,201	0,09	2233,33	56129,79	40	0,470	0,17	2764,71	69484,64	40	0,113	0,06	1883,33	47333,33	40	0,249	0,14	1778,57	44700,38
50	0,154	0,16	962,50	24190,26	50	0,263	0,14	1878,57	47213,65	50	0,578	0,22	2627,27	66030,57	50	0,143	0,09	1588,89	39933,13	50	0,311	0,18	1727,78	43423,79
60	0,209	0,22	950,00	23876,10	60	0,305	0,17	1794,12	45091,09	60	0,691	0,27	2559,26	64321,20	60	0,174	0,11	1581,82	39755,43	60	0,380	0,24	1583,33	39793,51
70	0,387	0,44	879,55	22105,39	70	0,317	0,19	1668,42	41931,99	70	0,794	0,33	2406,06	60470,90	70	0,205	0,14	1464,29	36801,51	70	0,450	0,29	1551,72	38999,08
80	0,471	0,54	872,22	21921,34	80	0,382	0,24	1591,67	40002,95	80	0,919	0,39	2356,41	59223,05	80	0,229	0,16	1431,25	35971,24	80	0,513	0,33	1554,55	39069,99
90	0,549	0,63	871,43	21901,39	90	0,426	0,27	1577,78	39653,88	90	1,017	0,44	2311,36	58090,90	90	0,260	0,19	1368,42	34392,17	90	0,596	0,39	1528,21	38407,98
100	0,631	0,74	852,70	21430,76	100	0,469	0,30	1563,33	39290,85	100	1,124	0,50	2248,00	56498,40	100	0,288	0,22	1309,09	32901,04	100	0,627	0,42	1492,86	37519,59
110	0,681	0,78	873,08	21942,82	110	0,504	0,33	1527,27	38384,55	110	1,244	0,55	2261,82	56845,69	110	0,320	0,24	1333,33	33510,32	110	0,709	0,48	1477,08	37123,15
120	0,753	0,87	865,52	21752,82	120	0,553	0,37	1494,59	37563,26	120	1,362	0,62	2196,77	55210,96	120	0,348	0,27	1288,89	32393,31	120	0,804	0,54	1488,89	37419,86
130	0,850	0,98	867,35	21798,81	130	0,602	0,41	1468,29	36902,22	130	1,467	0,67	2189,55	55029,45	130	0,377	0,30	1256,67	31583,48	130	0,865	0,60	1441,67	36233,04
140	0,921	1,07	860,75	21632,95	140	0,655	0,45	1455,56	36582,10	140	1,578	0,72	2191,67	55082,59	140	0,403	0,32	1259,38	31651,55	140	0,938	0,65	1443,08	36268,48
150	1,012	1,17	864,96	21738,75	150	0,686	0,48	1429,17	35918,88	150	1,682	0,78	2156,41	54196,50	150	0,441	0,36	1225,00	30787,61	150	1,017	0,70	1452,86	36514,28
160	1,094	1,28	854,69	21480,64	160	0,734	0,51	1439,22	36171,44	160	1,774	0,84	2111,90	53077,96	160	0,465	0,38	1223,68	30754,54	160	1,088	0,75	1450,67	36459,23
170	1,156	1,36	850,00	21362,83	170	0,771	0,54	1427,78	35883,97	170	1,882	0,88	2138,64	53749,79	170	0,489	0,41	1192,68	29975,39	170	1,143	0,80	1428,75	35908,40
180	1,199	1,42	844,37	21221,24	180	0,801	0,57	1405,26	35318,12	180	1,986	0,93	2135,48	53670,56	180	0,516	0,43	1200,00	30159,29	180	1,207	0,85	1420,00	35688,49
190	1,272	1,51	842,38	21171,42	190	0,827	0,60	1378,33	34641,29	190	2,093	0,98	2135,71	53676,35	190	0,551	0,46	1197,83	30104,65	190	1,283	0,91	1409,89	35434,40
200	1,337	1,58	846,20	21267,39	200	0,878	0,64	1371,88	34478,98	200	2,174	1,03	2110,68	53047,16	200	0,582	0,49	1187,76	29851,54	200	1,349	0,96	1405,21	35316,74
210	1,404	1,67	840,72	21129,56	210	0,907	0,69	1314,49	33036,81	210	2,261	1,08	2093,52	52615,86	210	0,605	0,51	1186,27	29814,33	210	1,445	1,03	1402,91	35259,04
220	1,465	1,74	841,95	21160,61	220	0,955	0,70	1364,29	34288,24	220	2,303	1,12	2056,25	51679,20	220	0,632	0,54	1170,37	29414,62	220	1,492	1,06	1407,55	35375,52
230	1,536	1,83	839,34	21095,02	230	0,991	0,73	1357,53	34118,56	230	2,458	1,19	2065,55	51912,84	230	0,659	0,57	1156,14	29056,98	230	1,591	1,11	1433,33	36023,60

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 12.Ap.B2. Resultados Parciais do Ensaio de Resistividade Elétrica Superficial (continuação).

CP06					CP07					CP08					CP09					CP10				
~V	V	mA	R	ρ	~V	V	mA	R	ρ	~V	V	mA	R	ρ	~V	V	mA	R	ρ	~V	V	mA	R	ρ
0	0,000	0,00	542,30	13629,52	0	0,000	0,00	1398,96	35159,70	0	0,000	0,00	1180,46	29668,19	0	0,000	0,00	1031,42	25922,46	0	0,000	0,00	1546,54	38868,81
10	0,046	0,01	4600,00	115610,61	10	0,044	0,01	4400,00	110584,06	10	0,066	0,03	2200,00	55292,03	10	0,036	0,02	1800,00	45238,93	10	0,102	0,03	3400,00	85451,32
20	0,038	0,01	3800,00	95504,42	20	0,085	0,03	2833,33	71209,43	20	0,112	0,06	1866,67	46914,45	20	0,087	0,06	1450,00	36442,47	20	0,199	0,09	2211,11	55571,28
30	0,036	0,02	1800,00	45238,93	30	0,123	0,06	2050,00	51522,12	30	0,171	0,11	1554,55	39069,99	30	0,148	0,11	1345,45	33814,96	30	0,270	0,14	1928,57	48470,29
40	0,041	0,03	1366,67	34348,08	40	0,166	0,09	1844,44	46355,94	40	0,219	0,15	1460,00	36693,80	40	0,208	0,17	1223,53	30750,65	40	0,422	0,23	1834,78	46113,12
50	0,044	0,05	880,00	22116,81	50	0,200	0,12	1666,67	41887,90	50	0,278	0,20	1390,00	34934,51	50	0,220	0,19	1157,89	29101,07	50	0,541	0,31	1745,16	43860,69
60	0,048	0,06	800,00	20106,19	60	0,238	0,15	1586,67	39877,28	60	0,343	0,26	1319,23	33155,89	60	0,275	0,24	1145,83	28797,93	60	0,648	0,39	1661,54	41759,02
70	0,046	0,07	657,14	16515,80	70	0,276	0,18	1533,33	38536,87	70	0,389	0,30	1296,67	32588,79	70	0,334	0,31	1077,42	27078,50	70	0,841	0,51	1649,02	41444,38
80	0,056	0,09	622,22	15638,15	80	0,322	0,21	1533,33	38536,87	80	0,449	0,36	1247,22	31346,11	80	0,406	0,39	1041,03	26163,83	80	0,972	0,60	1620,00	40715,04
90	0,061	0,11	554,55	13937,25	90	0,359	0,24	1495,83	37594,39	90	0,490	0,40	1225,00	30787,61	90	0,483	0,46	1050,00	26389,38	90	1,059	0,67	1580,60	39724,74
100	0,066	0,12	550,00	13823,01	100	0,404	0,28	1442,86	36262,96	100	0,545	0,46	1184,78	29776,83	100	0,563	0,54	1042,59	26203,21	100	1,131	0,74	1528,38	38412,34
110	0,072	0,14	514,29	12925,41	110	0,449	0,32	1403,13	35264,38	110	0,601	0,51	1178,43	29617,21	110	0,641	0,62	1033,87	25984,01	110	1,254	0,81	1548,15	38909,21
120	0,076	0,15	506,67	12733,92	120	0,500	0,36	1388,89	34906,59	120	0,654	0,56	1167,86	29351,45	120	0,717	0,70	1024,29	25743,11	120	1,339	0,88	1521,59	38241,75
130	0,089	0,18	494,44	12426,74	130	0,550	0,40	1375,00	34557,52	130	0,685	0,59	1161,02	29179,54	130	0,770	0,76	1013,16	25463,44	130	1,526	0,97	1573,20	39538,72
140	0,095	0,20	475,00	11938,05	140	0,595	0,43	1383,72	34776,70	140	0,774	0,67	1155,22	29033,94	140	0,841	0,83	1013,25	25465,83	140	1,650	1,07	1542,06	38756,10
150	0,110	0,23	478,26	12020,01	150	0,634	0,47	1348,94	33902,46	150	0,829	0,72	1151,39	28937,56	150	0,895	0,88	1017,05	25561,14	150	1,605	1,08	1486,11	37350,05
160	0,126	0,25	504,00	12666,90	160	0,677	0,51	1327,45	33362,48	160	0,886	0,78	1135,90	28548,22	160	0,949	0,94	1009,57	25373,37	160	1,739	1,14	1525,44	38338,45
170	0,131	0,27	485,19	12194,03	170	0,709	0,54	1312,96	32998,36	170	0,953	0,84	1134,52	28513,69	170	1,023	1,02	1002,94	25206,66	170	1,751	1,17	1496,58	37613,19
180	0,139	0,29	479,31	12046,38	180	0,736	0,57	1291,23	32452,10	180	1,012	0,90	1124,44	28260,37	180	1,094	1,09	1003,67	25224,97	180	1,871	1,25	1496,80	37618,69
190	0,153	0,31	493,55	12404,22	190	0,788	0,60	1313,33	33007,67	190	1,070	0,95	1126,32	28307,40	190	1,158	1,16	998,28	25089,41	190	1,852	1,28	1446,88	36363,93
200	0,142	0,32	443,75	11152,65	200	0,838	0,65	1289,23	32401,90	200	1,138	1,01	1126,73	28317,88	200	1,260	1,27	992,13	24934,85	200	2,009	1,36	1477,21	37126,23
210	0,150	0,33	454,55	11423,97	210	0,898	0,69	1301,45	32708,99	210	1,184	1,06	1116,98	28072,80	210	1,317	1,33	990,23	24887,08	210	2,127	1,44	1477,08	37123,15
220	0,164	0,36	455,56	11449,36	220	0,928	0,72	1288,89	32393,31	220	1,197	1,13	1059,29	26622,91	220	1,398	1,42	984,51	24743,36	220	2,308	1,53	1508,50	37912,66
230	0,173	0,38	455,26	11442,01	230	0,973	0,75	1297,33	32605,54	230	1,342	1,19	1127,73	28342,97	230	1,469	1,47	999,32	25115,64	230	2,445	1,63	1500,00	37699,11

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 13.Ap.B3. Resultados do Ensaio de Módulo de Elasticidade.

CP	Altura média (cm)	Diâmetro médio (cm)	Peso seco condições ambiente (g)	Módulo de elasticidade (GPa)	Densidade (g/cm ³)
1	14,197	4,997	586,50	25,02	2,10
2	14,493	5,007	614,75	30,95	2,16
3	14,430	4,993	618,83	31,99	2,19
4	14,497	4,997	622,33	32,64	2,19
5	12,516	5,000	520,92	27,22	2,12
6	13,254	4,990	538,51	23,28	2,07
7	14,222	5,003	604,25	29,72	2,16
8	13,291	4,990	526,46	23,79	2,02
9	13,433	5,007	560,66	26,05	2,13
10	13,685	4,997	563,95	27,88	2,10
Média				27,85	2,12
Máximo				32,64	2,19
Mínimo				23,28	2,02

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 14.Ap.B4. Resultados do Ensaio de Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica.

Código amostra	Massa seca (g) Ms	Massa saturada (g) Msat	Massa hidrostática saturada (g) Mi	Absorção (%)	Índice de Vazios (%)	Massa específica seca (g/cm ³)	Massa específica saturada (g/cm ³)	Massa específica real (g/cm ³)
1C	70,160	75,530	43,810	7,654	16,929	2,212	2,381	2,663
2B	83,300	88,410	52,040	6,134	14,050	2,290	2,431	2,665
2C	79,130	84,170	49,440	6,369	14,512	2,278	2,424	2,665
2D	75,920	82,070	47,100	8,101	17,587	2,171	2,347	2,634
2E	74,640	78,910	46,640	5,721	13,232	2,313	2,445	2,666
3B	79,070	83,290	49,360	5,337	12,437	2,330	2,455	2,661
3C	78,800	83,350	49,270	5,774	13,351	2,312	2,446	2,668
4B	78,320	82,830	49,030	5,758	13,343	2,317	2,451	2,674
4C	71,410	76,880	44,480	7,660	16,883	2,204	2,373	2,652
4D	78,530	83,010	49,020	5,705	13,180	2,310	2,442	2,661
4E	71,110	75,310	44,390	5,906	13,583	2,300	2,436	2,661
6B	66,540	70,940	41,690	6,613	15,043	2,275	2,425	2,678
6C	83,160	88,940	51,750	6,950	15,542	2,236	2,392	2,648
6D	68,320	73,500	42,470	7,582	16,694	2,202	2,369	2,643
7B	75,800	80,280	47,280	5,910	13,576	2,297	2,433	2,658
7C	83,520	88,410	52,310	5,855	13,546	2,314	2,449	2,676
7D	74,300	79,510	46,230	7,012	15,655	2,233	2,389	2,647
7E	79,120	84,360	49,220	6,623	14,912	2,252	2,401	2,646
8D	72,850	78,510	45,170	7,769	16,977	2,185	2,355	2,632
8E	71,320	77,520	44,140	8,693	18,574	2,137	2,322	2,624
9B	77,390	83,330	48,310	7,675	16,962	2,210	2,379	2,661
9E	66,240	70,690	41,420	6,718	15,203	2,263	2,415	2,669
10B	76,170	82,650	47,230	8,507	18,295	2,150	2,333	2,632
10C	79,220	84,280	49,190	6,387	14,420	2,258	2,402	2,638
10D	96,220	102,710	59,560	6,745	15,041	2,230	2,380	2,625
10E	76,640	82,540	47,550	7,698	16,862	2,190	2,359	2,635
				6,802	15,246	2,249	2,401	2,653
Valores médios								

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 15.Ap.B5. Resultados Parciais do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade.

Amostra	Tempo transcorrido (h)						
	0	3	6	24	48	72	
1	578,19	579,48	580,66	584,93	587,86	589,62	Massa total amostra (g) Massa de água absorvida (g)
	0,00	1,29	2,47	6,74	9,67	11,43	
2	610,10	610,92	611,63	613,13	613,75	614,24	
	0,00	0,82	1,53	3,03	3,65	4,14	
3	614,89	616,62	616,98	617,73	618,39	618,69	
	0,00	1,73	2,09	2,84	3,50	3,80	
4	617,74	618,66	619,41	620,91	621,52	621,81	
	0,00	0,92	1,67	3,17	3,78	4,07	
6	528,52	536,35	537,04	538,82	539,90	540,62	
	0,00	7,83	8,52	10,30	11,38	12,10	
7	602,12	603,25	603,45	603,92	604,47	604,78	
	0,00	1,13	1,33	1,80	2,35	2,66	
8	521,46	524,48	524,63	525,17	525,53	525,72	
	0,00	3,02	3,17	3,71	4,07	4,26	
9	555,27	558,20	558,68	560,15	561,39	562,11	
	0,00	2,93	3,41	4,88	6,12	6,84	
10	558,91	561,43	561,85	562,48	563,17	563,59	
	0,00	2,52	2,94	3,57	4,26	4,68	

Legenda de cores:

- amostras com aplicação de dispersão aquosa de silano-siloxano
- amostras com aplicação de verniz
- amostras sem aplicação de produtos protetores

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 16.Ap.B6. Resultados Parciais do Ensaio de Permeância/Permeabilidade ao Vapor.

	Altura R1 (mm)	Altura R2 (mm)	Altura R3 (mm)	Altura R4 (mm)	Altura média (mm)	Peso estabilizado 23°C UR50% (g)
1A	23,22	23,07	22,88	22,70	22,97	91,15
2A	21,62	21,89	21,38	21,45	21,59	88,05
3A	23,09	23,32	23,03	23,04	23,12	94,48
4A	22,41	22,03	21,89	22,28	22,15	88,94
6A	23,34	22,80	23,07	23,15	23,09	83,74
7A	21,15	21,30	21,46	20,94	21,21	87,62
8A	22,18	21,90	22,16	22,26	22,13	81,80
9A	23,67	23,50	23,57	23,20	23,49	90,90
10A	21,70	21,69	21,77	21,68	21,71	83,21
2F	22,10	21,73	21,70	22,01	21,89	91,74
8F	21,62	21,66	21,95	21,75	21,75	86,30
9F	21,79	21,92	22,04	21,80	21,89	86,79

- face externa de amostras com aplicação de dispersão aquosa de silano-siloxano
- face externa de amostras com aplicação de verniz na face externa
- face externa de amostras sem aplicação de produtos protetores
- face interna de amostras sem aplicação de produtos protetores

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 16.Ap.B6. Resultados Parciais do Ensaio de Permeância/Permeabilidade ao Vapor (continuação).

Nº pesagem	Data e hora	1A		2A		3A		°C	% UR
		g	kg/s	g	kg/s	g	kg/s		
P0	15/12/25 12:00	0,168950	-	0,156480	-	0,171110	-	23,4	68
P1	17/12/25 15:40	0,169270	1,72E-09	0,166110	5,18E-08	0,171750	3,44E-09	22,9	72
P2	22/12/25 11:10	0,169280	2,41E-11	0,166560	1,08E-09	0,172020	6,49E-10	22,5	73
P3	23/12/25 11:15	0,169960	7,84E-09	0,166610	5,77E-10	0,172110	1,04E-09	22,4	73
P4	24/12/25 11:20	0,169250	8,19E-09	0,166610	0,00E+00	0,171980	1,50E-09	22,2	74
P5	26/12/25 12:10	0,169530	1,59E-09	0,166540	3,98E-10	0,172100	6,83E-10	22,5	72
P6	29/12/25 11:30	0,169710	7,01E-10	0,166820	1,09E-09	0,172250	5,84E-10	22,8	72
P7	30/12/25 10:15	0,169780	8,55E-10	0,166830	1,22E-10	0,172260	1,22E-10	22,8	73
P8	31/12/25 10:10	0,169840	6,97E-10	0,166900	8,13E-10	0,172340	9,29E-10	22,5	72
P9	2/1/26 10:45	0,169970	7,43E-10	0,167070	9,72E-10	0,172470	7,43E-10	22,8	71
P10	3/1/26 8:30	0,170180	2,68E-09	0,167030	5,11E-10	0,172460	1,28E-10	22,5	71
P11	5/1/26 10:45	0,170210	1,66E-10	0,167110	4,42E-10	0,172580	6,63E-10	22,4	72
P12	6/1/26 9:15	0,170220	1,23E-10	0,167220	1,36E-09	0,172590	1,23E-10	22,4	72
P13	7/1/26 9:50	0,170250	3,39E-10	0,167250	3,39E-10	0,172650	6,78E-10	23	70
P14	8/1/26 8:15	0,170350	1,24E-09	0,167280	3,72E-10	0,172660	1,24E-10	22,5	72
P15	9/1/26 9:45	0,170420	7,63E-10	0,167290	1,09E-10	0,172690	3,27E-10	22,6	72
P16	10/1/26 11:10	0,170510	9,84E-10	0,167320	3,28E-10	0,172730	4,37E-10	22,4	68
P17	11/1/26 11:00	0,170560	5,83E-10	0,167370	5,83E-10	0,172770	4,66E-10	23,2	71
P18	12/1/26 11:00	0,170590	3,47E-10	0,167430	6,94E-10	0,172790	2,31E-10	22,3	69
P19	13/1/26 11:00	0,170640	5,79E-10	0,167470	4,63E-10	0,172850	6,94E-10	23,3	68
P20	14/1/26 11:00	0,170690	5,79E-10	0,167510	4,63E-10	0,172900	5,79E-10	22,7	71
P21	15/1/26 11:00	0,170800	1,27E-09	0,167550	4,63E-10	0,172950	5,79E-10	22,8	71
P22	16/1/26 11:00	0,170840	4,63E-10	0,167590	4,63E-10	0,172990	4,63E-10	22,7	69
P23	17/1/26 11:00	0,170920	9,26E-10	0,167630	4,63E-10	0,173040	5,79E-10	22,8	72
P24	18/1/26 11:00	0,170960	4,63E-10	#VALOR!	#VALOR!	0,173070	3,47E-10	22,9	71
P25	19/1/26 11:00	0,171010	5,79E-10	#VALOR!	#VALOR!	0,173100	3,47E-10	23,3	71
P26	20/1/26 11:00	0,171060	5,79E-10	#VALOR!	#VALOR!	0,173130	3,47E-10	23,1	71
P27	21/1/26 11:00	0,171120	6,94E-10	#VALOR!	#VALOR!	0,173170	4,63E-10	23	69
P28	22/1/26 11:00	0,171180	6,94E-10	#VALOR!	#VALOR!	0,173200	3,47E-10	23	70
P29	23/1/26 11:00	0,171230	5,79E-10	#VALOR!	#VALOR!	0,173230	3,47E-10	22,9	71
P30	24/1/26 11:00	0,171280	5,79E-10	#VALOR!	#VALOR!	0,173260	3,47E-10	22,8	70

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 16.Ap.B6. Resultados Parciais do Ensaio de Permeância/Permeabilidade ao Vapor (continuação).

Nº pesagem	Data e hora	4A		6A		7A		°C	% UR
		g	kg/s	g	kg/s	g	kg/s		
P0	15/12/25 12:00	0,164700	-	0,163120	-	0,164900	-	23,4	68
P1	17/12/25 15:40	0,166180	7,96E-09	0,163620	2,69E-09	0,165780	4,73E-09	22,9	72
P2	22/12/25 11:10	0,166000	4,33E-10	0,164110	1,18E-09	0,164820	2,31E-09	22,5	73
P3	23/12/25 11:15	0,166340	3,92E-09	0,164380	3,11E-09	0,165650	9,57E-09	22,4	73
P4	24/12/25 11:20	0,166510	1,96E-09	0,164290	1,04E-09	0,165660	1,15E-10	22,2	74
P5	26/12/25 12:10	0,166770	1,48E-09	0,164410	6,83E-10	0,165870	1,19E-09	22,5	72
P6	29/12/25 11:30	0,166960	7,40E-10	0,164620	8,18E-10	0,165900	1,17E-10	22,8	72
P7	30/12/25 10:15	0,166720	2,93E-09	0,164760	1,71E-09	0,166000	1,22E-09	22,8	73
P8	31/12/25 10:10	0,166990	3,14E-09	0,164680	9,29E-10	0,165900	1,16E-09	22,5	72
P9	2/1/26 10:45	0,167320	1,89E-09	0,165050	2,12E-09	0,166150	1,43E-09	22,8	71
P10	3/1/26 8:30	0,167440	1,53E-09	0,165060	1,28E-10	0,166150	0,00E+00	22,5	71
P11	5/1/26 10:45	0,167530	4,98E-10	0,165200	7,74E-10	0,166250	5,53E-10	22,4	72
P12	6/1/26 9:15	0,167560	3,70E-10	0,165320	1,48E-09	0,166270	2,47E-10	22,4	72
P13	7/1/26 9:50	0,167580	2,26E-10	0,165370	5,65E-10	0,166340	7,91E-10	23	70
P14	8/1/26 8:15	0,167650	8,67E-10	0,165480	1,36E-09	0,166360	2,48E-10	22,5	72
P15	9/1/26 9:45	0,167660	1,09E-10	0,165510	3,27E-10	0,166380	2,18E-10	22,6	72
P16	10/1/26 11:10	0,167710	5,46E-10	0,165600	9,84E-10	0,166440	6,56E-10	22,4	68
P17	11/1/26 11:00	0,167780	8,16E-10	0,165670	8,16E-10	0,166480	4,66E-10	23,2	71
P18	12/1/26 11:00	0,167830	5,79E-10	0,165730	6,94E-10	0,166510	3,47E-10	22,3	69
P19	13/1/26 11:00	0,167860	3,47E-10	0,165810	9,26E-10	0,166530	2,31E-10	23,3	68
P20	14/1/26 11:00	0,167880	2,31E-10	0,165900	1,04E-09	0,166550	2,31E-10	22,7	71
P21	15/1/26 11:00	0,167960	9,26E-10	0,165980	9,26E-10	0,166570	2,31E-10	22,8	71
P22	16/1/26 11:00	0,167990	3,47E-10	0,166060	9,26E-10	0,166620	5,79E-10	22,7	69
P23	17/1/26 11:00	0,168020	3,47E-10	0,166140	9,26E-10	0,166650	3,47E-10	22,8	72
P24	18/1/26 11:00	0,168050	3,47E-10	0,166220	9,26E-10	0,166670	2,31E-10	22,9	71
P25	19/1/26 11:00	0,168110	6,94E-10	0,166300	9,26E-10	0,166710	4,63E-10	23,3	71
P26	20/1/26 11:00	0,168160	5,79E-10	#VALOR!	#VALOR!	0,166760	5,79E-10	23,1	71
P27	21/1/26 11:00	0,168200	4,63E-10	#VALOR!	#VALOR!	0,166810	5,79E-10	23	69
P28	22/1/26 11:00	0,168250	5,79E-10	#VALOR!	#VALOR!	0,166860	5,79E-10	23	70
P29	23/1/26 11:00	0,168300	5,79E-10	#VALOR!	#VALOR!	0,166900	4,63E-10	22,9	71
P30	24/1/26 11:00	0,168350	5,79E-10	#VALOR!	#VALOR!	0,166950	5,79E-10	22,8	70

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 16.Ap.B6. Resultados Parciais do Ensaio de Permeância/Permeabilidade ao Vapor (continuação).

Nº pesagem	Data e hora	8A		9A		10A		°C	% UR
		g	kg/s	g	kg/s	g	kg/s		
P0	15/12/25 12:00	0,150360	-	0,167860	-	0,156850	-	23,4	68
P1	17/12/25 15:40	0,160680	5,55E-08	0,167960	5,38E-10	0,157000	8,06E-10	22,9	72
P2	22/12/25 11:10	0,160800	2,89E-10	0,168480	1,25E-09	0,157370	8,90E-10	22,5	73
P3	23/12/25 11:15	0,160820	2,31E-10	0,168810	3,81E-09	0,157700	3,81E-09	22,4	73
P4	24/12/25 11:20	0,160720	1,15E-09	0,168740	8,07E-10	0,157990	3,34E-09	22,2	74
P5	26/12/25 12:10	0,161220	2,84E-09	0,168850	6,26E-10	0,157090	5,12E-09	22,5	72
P6	29/12/25 11:30	0,161100	4,67E-10	0,168890	1,56E-10	0,158530	5,61E-09	22,8	72
P7	30/12/25 10:15	0,161130	3,66E-10	0,168990	1,22E-09	0,158560	3,66E-10	22,8	73
P8	31/12/25 10:10	0,161120	1,16E-10	0,169000	1,16E-10	0,158870	3,60E-09	22,5	72
P9	2/1/26 10:45	0,161160	2,29E-10	0,169200	1,14E-09	0,158730	8,00E-10	22,8	71
P10	3/1/26 8:30	0,161310	1,92E-09	0,169250	6,39E-10	0,158830	1,28E-09	22,5	71
P11	5/1/26 10:45	0,161370	3,32E-10	0,169370	6,63E-10	0,158860	1,66E-10	22,4	72
P12	6/1/26 9:15	0,161440	8,64E-10	0,169470	1,23E-09	0,158880	2,47E-10	22,4	72
P13	7/1/26 9:50	0,161440	0,00E+00	0,169480	1,13E-10	0,158950	7,91E-10	23	70
P14	8/1/26 8:15	0,161540	1,24E-09	0,169510	3,72E-10	0,158950	0,00E+00	22,5	72
P15	9/1/26 9:45	0,161600	6,54E-10	0,169580	7,63E-10	0,159020	7,63E-10	22,6	72
P16	10/1/26 11:10	0,161640	4,37E-10	0,169650	7,65E-10	0,159040	2,19E-10	22,4	68
P17	11/1/26 11:00	0,161680	4,66E-10	0,169710	6,99E-10	0,159050	1,17E-10	23,2	71
P18	12/1/26 11:00	0,161720	4,63E-10	0,169750	4,63E-10	0,159100	5,79E-10	22,3	69
P19	13/1/26 11:00	0,161770	5,79E-10	0,169790	4,63E-10	0,159150	5,79E-10	23,3	68
P20	14/1/26 11:00	0,161820	5,79E-10	0,169850	6,94E-10	0,159210	6,94E-10	22,7	71
P21	15/1/26 11:00	0,161880	6,94E-10	0,169920	8,10E-10	0,159260	5,79E-10	22,8	71
P22	16/1/26 11:00	0,161930	5,79E-10	0,169970	5,79E-10	0,159290	3,47E-10	22,7	69
P23	17/1/26 11:00	0,161980	5,79E-10	0,170050	9,26E-10	0,159320	3,47E-10	22,8	72
P24	18/1/26 11:00	0,162030	5,79E-10	0,170110	6,94E-10	0,159370	5,79E-10	22,9	71
P25	19/1/26 11:00	0,162080	5,79E-10	0,170160	5,79E-10	0,159420	5,79E-10	23,3	71
P26	20/1/26 11:00	0,162130	5,79E-10	0,170210	5,79E-10	0,159470	5,79E-10	23,1	71
P27	21/1/26 11:00	#VALOR!	#VALOR!	0,170250	4,63E-10	0,159520	5,79E-10	23	69
P28	22/1/26 11:00	#VALOR!	#VALOR!	0,170300	5,79E-10	0,159540	2,31E-10	23	70
P29	23/1/26 11:00	#VALOR!	#VALOR!	0,170350	5,79E-10	0,159580	4,63E-10	22,9	71
P30	24/1/26 11:00	#VALOR!	#VALOR!	0,170400	5,79E-10	0,159620	4,63E-10	22,8	70

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 16.Ap.B6. Resultados Parciais do Ensaio de Permeância/Permeabilidade ao Vapor (continuação).

Nº pesagem	Data e hora	2F		8F		9F		°C	% UR
		g	kg/s	g	kg/s	g	kg/s		
P0	15/12/25 12:00	0,169540	-	0,166390	-	0,165220	-	23,4	68
P1	17/12/25 15:40	0,169760	1,18E-09	0,166580	1,02E-09	0,166690	7,90E-09	22,9	72
P2	22/12/25 11:10	0,169500	6,25E-10	0,166000	1,39E-09	0,166280	9,86E-10	22,5	73
P3	23/12/25 11:15	0,170430	1,07E-08	0,166160	1,85E-09	0,167050	8,88E-09	22,4	73
P4	24/12/25 11:20	0,169940	5,65E-09	0,166200	4,61E-10	0,167250	2,31E-09	22,2	74
P5	26/12/25 12:10	0,169970	1,71E-10	0,166320	6,83E-10	0,167500	1,42E-09	22,5	72
P6	29/12/25 11:30	0,170070	3,89E-10	0,166490	6,62E-10	0,168020	2,02E-09	22,8	72
P7	30/12/25 10:15	0,170260	2,32E-09	0,166570	9,77E-10	0,168310	3,54E-09	22,8	73
P8	31/12/25 10:10	0,170160	1,16E-09	0,166620	5,81E-10	0,168250	6,97E-10	22,5	72
P9	2/1/26 10:45	0,170360	1,14E-09	0,166750	7,43E-10	0,168450	1,14E-09	22,8	71
P10	3/1/26 8:30	0,170360	0,00E+00	0,166840	1,15E-09	0,168570	1,53E-09	22,5	71
P11	5/1/26 10:45	0,170470	6,08E-10	0,166980	7,74E-10	0,168640	3,87E-10	22,4	72
P12	6/1/26 9:15	0,170520	6,17E-10	0,167040	7,41E-10	0,168690	6,17E-10	22,4	72
P13	7/1/26 9:50	0,170610	1,02E-09	0,167110	7,91E-10	0,168740	5,65E-10	23	70
P14	8/1/26 8:15	0,170610	0,00E+00	0,167160	6,20E-10	0,168790	6,20E-10	22,5	72
P15	9/1/26 9:45	0,170630	2,18E-10	0,167220	6,54E-10	0,168850	6,54E-10	22,6	72
P16	10/1/26 11:10	0,170740	1,20E-09	0,167290	7,65E-10	0,168940	9,84E-10	22,4	68
P17	11/1/26 11:00	0,170800	6,99E-10	0,167320	3,50E-10	0,169020	9,32E-10	23,2	71
P18	12/1/26 11:00	0,170840	4,63E-10	0,167410	1,04E-09	0,169070	5,79E-10	22,3	69
P19	13/1/26 11:00	0,170890	5,79E-10	0,167470	6,94E-10	0,169120	5,79E-10	23,3	68
P20	14/1/26 11:00	0,170960	8,10E-10	0,167530	6,94E-10	0,169190	8,10E-10	22,7	71
P21	15/1/26 11:00	0,170990	3,47E-10	0,167580	5,79E-10	0,169260	8,10E-10	22,8	71
P22	16/1/26 11:00	0,171040	5,79E-10	0,167640	6,94E-10	0,169330	8,10E-10	22,7	69
P23	17/1/26 11:00	0,171090	5,79E-10	0,167710	8,10E-10	0,169390	6,94E-10	22,8	72
P24	18/1/26 11:00	0,171150	6,94E-10	0,167790	9,26E-10	0,169450	6,94E-10	22,9	71
P25	19/1/26 11:00	0,171210	6,94E-10	0,167870	9,26E-10	0,169510	6,94E-10	23,3	71
P26	20/1/26 11:00	0,171250	4,63E-10	0,167940	8,10E-10	0,169590	9,26E-10	23,1	71
P27	21/1/26 11:00	0,171310	6,94E-10	0,168000	6,94E-10	0,169650	6,94E-10	23	69
P28	22/1/26 11:00	0,171360	5,79E-10	0,168050	5,79E-10	0,169710	6,94E-10	23	70
P29	23/1/26 11:00	0,171410	5,79E-10	0,168120	8,10E-10	0,169770	6,94E-10	22,9	71
P30	24/1/26 11:00	0,171460	5,79E-10	0,168190	8,10E-10	0,169830	6,94E-10	22,8	70

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 16.Ap.B6. Resultados Parciais do Ensaio de Permeância/Permeabilidade ao Vapor (continuação).

G (kg/s)																									
3,87E-09	3,67E-09	3,84E-09	2,41E-09	9,18E-10	1,14E-09	1,03E-09	8,82E-10	8,11E-10	9,10E-10	5,26E-10	6,90E-10	7,81E-10	7,83E-10	6,51E-10	6,14E-10	6,72E-10	6,48E-10	7,64E-10	7,41E-10	7,41E-10	6,02E-10	6,48E-10	6,02E-10	6,25E-10	6,25E-10
1,08E-08	6,29E-10	4,37E-10	4,85E-10	6,79E-10	7,02E-10	5,72E-10	8,19E-10	7,24E-10	6,04E-10	5,24E-10	5,01E-10	3,46E-10	4,17E-10	4,35E-10	5,06E-10	5,33E-10	5,09E-10	4,63E-10	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!
1,46E-09	8,91E-10	7,85E-10	7,63E-10	6,12E-10	5,01E-10	5,17E-10	5,17E-10	4,67E-10	3,43E-10	3,83E-10	3,38E-10	4,06E-10	3,17E-10	4,31E-10	4,82E-10	5,10E-10	5,09E-10	5,79E-10	5,09E-10	4,63E-10	4,17E-10	4,17E-10	3,70E-10	3,70E-10	3,70E-10
3,15E-09	1,71E-09	2,21E-09	2,05E-09	2,03E-09	2,05E-09	2,00E-09	1,48E-09	9,03E-10	6,99E-10	4,14E-10	4,24E-10	5,13E-10	5,83E-10	4,79E-10	5,04E-10	5,80E-10	4,86E-10	4,40E-10	4,40E-10	5,32E-10	4,63E-10	4,86E-10	5,32E-10	5,79E-10	5,56E-10
1,74E-09	1,37E-09	1,47E-09	1,04E-09	1,25E-09	1,14E-09	1,13E-09	1,09E-09	1,01E-09	8,62E-10	9,02E-10	9,44E-10	8,11E-10	8,37E-10	7,49E-10	8,92E-10	8,81E-10	9,03E-10	9,49E-10	9,49E-10	9,26E-10	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!
3,58E-09	2,66E-09	2,44E-09	7,62E-10	1,02E-09	7,86E-10	8,73E-10	6,78E-10	6,04E-10	3,68E-10	4,11E-10	4,32E-10	4,76E-10	3,87E-10	3,84E-10	3,86E-10	3,02E-10	3,24E-10	3,24E-10	3,24E-10	3,70E-10	4,40E-10	4,40E-10	4,86E-10	5,32E-10	5,56E-10
1,20E-08	9,97E-10	1,01E-09	9,89E-10	8,05E-10	6,19E-10	5,92E-10	6,91E-10	6,68E-10	8,70E-10	6,18E-10	6,39E-10	5,59E-10	6,52E-10	5,20E-10	5,05E-10	5,56E-10	5,79E-10	6,02E-10	6,02E-10	6,02E-10	5,79E-10	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!
1,41E-09	1,33E-09	1,32E-09	5,85E-10	6,52E-10	6,55E-10	7,57E-10	7,59E-10	7,59E-10	6,04E-10	6,29E-10	6,49E-10	5,42E-10	6,12E-10	6,31E-10	6,17E-10	6,26E-10	6,02E-10	6,94E-10	7,41E-10	7,18E-10	6,71E-10	6,48E-10	5,79E-10	5,56E-10	5,56E-10
2,79E-09	3,75E-09	3,65E-09	3,61E-09	3,10E-09	2,33E-09	1,24E-09	1,22E-09	6,56E-10	4,96E-10	3,93E-10	4,04E-10	3,78E-10	3,35E-10	4,51E-10	4,37E-10	5,09E-10	5,56E-10	5,09E-10	5,09E-10	4,86E-10	4,86E-10	5,32E-10	5,09E-10	4,86E-10	4,63E-10
3,67E-09	3,51E-09	3,85E-09	1,94E-09	1,04E-09	1,00E-09	1,05E-09	7,06E-10	6,77E-10	4,48E-10	4,92E-10	6,11E-10	6,27E-10	5,16E-10	6,32E-10	7,51E-10	5,80E-10	5,56E-10	5,79E-10	6,02E-10	5,79E-10	6,02E-10	6,25E-10	6,25E-10	6,02E-10	5,79E-10
1,08E-09	1,01E-09	9,26E-10	6,73E-10	7,29E-10	8,22E-10	8,45E-10	7,98E-10	8,40E-10	8,15E-10	7,16E-10	7,14E-10	6,36E-10	6,86E-10	7,01E-10	7,09E-10	6,72E-10	7,41E-10	6,94E-10	7,41E-10	7,87E-10	8,33E-10	8,33E-10	7,87E-10	7,64E-10	7,41E-10
4,30E-09	3,12E-09	3,64E-09	2,00E-09	1,77E-09	1,79E-09	1,46E-09	8,75E-10	8,49E-10	7,44E-10	5,68E-10	6,88E-10	7,51E-10	7,54E-10	7,45E-10	7,77E-10	7,42E-10	7,18E-10	7,41E-10	7,64E-10	7,41E-10	7,64E-10	7,41E-10	7,41E-10	7,41E-10	7,41E-10

Fonte: Autor, 2026.

APÊNDICE C – Resumo de Ensaios de Caracterização do Material e Comparação de Desempenho de Produtos Protetores

Tabela 16.Ap.C1. Tabela resumo dos resultados dos ensaios de caracterização de concreto de resistência mecânica de 50 MPa e desempenho de produtos protetores, e comparativo com valores de referência.

		Estado do Concreto			
		Concreto novo	Concreto Envelhecido (~50 anos)	Concreto com verniz acrílico	Concreto com hidrofugante silano-siloxano
Ensaio	Módulo de Elasticidade (NBR 8522-2)	48 a 52 GPa (Mehta e Monteiro, 2014)	27,85 GPa	-	-
	Absorção de Água (NBR 9778)	3% a 5% (Helene, 1993)	6,80%	-	-
	Índice de Vazios (NBR 9778)	8% a 11% (Mehta e Monteiro, 2014)	15,25%	-	-
	Massa Específica Real (NBR 9778)	2,40 a 2,60 g/cm ³ (Neville, 2011)	2,65 g/cm ³	-	-
	Resistividade Elétrica Superficial (ASTM G57-06)	17,50 kohm.cm (Azzi e Costa, 2017)	35,19 kohm.cm	-	-
	Resistividade Elétrica Volumétrica (AASHTO TP 119)	7,70 kohm.cm (Azzi e Costa, 2017)	54,18 kohm.cm	-	-
	Absorção de Água por Capilaridade (NBR9779)	0,32 g/cm ² (Moraes, 2023)	0,21 g/cm ²	0,19 g/cm ²	0,21 g/cm ²
	Absorção de Água com Tubos Karstern (~31,5 °C e UR ~40%) (RILEM, 1994)	-	3,32 kg/m ²	2,19 kg/m ²	1,22 kg/m ²
	Permeância ao Vapor d' Água (ISSO 12572)	Permeância	0,70E-12 e 13,00E-12 kg/m·s·Pa (Freitas <i>et al.</i> , 2008)	4,00E-11 kg/m·s·Pa	3,27E-11 kg/m·s·Pa
		Fator de Resistência à Difusão de Vapor	60 a 130 (ABNT, 2022)	6,41	6,92
				6,92	6,66

Fonte: Autor, 2026.

ANEXO A – Fichas técnicas dos produtos aplicados na pesquisa

Tabela 17.An.A – Especificações técnicas dos produtos de proteção utilizados na pesquisa.

Descrição do produto	Dispersão hidrofugante base água para proteção de superfícies de concreto e bases minerais contra o ingresso de água e agentes deletérios dispersos em água, desenvolvido através de nanotecnologia silano-siloxano	Verniz acrílico monocomponente disperso em água para pintura de proteção e acabamento superficial do concreto e demais superfícies minerais
Densidade	1,00 kg/L	1,02 kg/L
Consumo	200 – 400 ml/m ² por demão	150 – 200 ml/m ² por demão
Condições de aplicação		
Temperatura do ar e do substrato	$\geq 8 \leq 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\geq 8 \leq 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Temperatura do material	$\geq 15 \leq 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\geq 15 \leq 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Umidade relativa do ar	$\leq 85\%$	$\leq 85\%$
Umidade do substrato	$\leq 6\%$	$\leq 6\%$
Temperatura acima do ponto de orvalho	T + 3 °C	T + 3 °C
Resistência a chuva	4 horas (após aplicação)	Não informado
Tempo para secagem	Não informado	60min
Tempo para exposição à chuva	Não informado	2 – 4h após aplicação a 20 °C
Resistência à difusão de CO₂ (contra dióxido de carbono)	Não informado	75m
Resistência à difusão de água (contra o vapor de água)	Não informado	0,2m
Áreas de aplicação	• Áreas internas ou externas (fachadas) • Concreto arquitetônico e aparente • Fachadas • Rejuntamentos • Superfícies de base mineral tais como tijolos, pedras naturais, cerâmicas <i>et cetera</i> • Telhas cerâmicas, concreto ou de fibrocimento • Ornamentos arquitetônicos base mineral	• Proteção corretiva e preventiva para novas estruturas de concreto • Fachadas em concreto aparente • Pré-fabricados ou pré-moldados • Superfícies de base mineral, tais como tijolos, pedras naturais ou cerâmicas • Toque final para reabilitação de estruturas de concreto tanto para áreas internas e externas

Vantagens

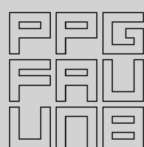
- Dispersão aquosa à base de silano-siloxano
- Não contém solventes
- Não forma película e não amarela
- Solúvel em água facilitando a limpeza das ferramentas
- Combinável com verniz acrílico base água (MC-Color Proof Pure)
- Reduz a formação de fungos, bolores e mofos
- Excelente propriedade de repelência à água
- Não altera a aparência original do concreto
- Nanotecnologia integrada à fórmula
- Não agride o meio ambiente
- Aberto à difusão de vapor
- Reduz a absorção de dissoluções agressivas ao concreto, como cloreto e sais diluídos em água
- Aberto a difusão de vapor
- Retarda a carbonatação do concreto
- Diminui a absorção de água do concreto
- Proporciona acabamento incolor com baixa intensidade de brilho
- Cenários de exposição avaliados pelo REACH: contato periódico com a água, inalação periódica, aplicação
- Aumenta a resistência à geada e aos sais de gelo-degelo
- Evita manchas e eflorescências nas superfícies de concreto
- Verniz acrílico base água (não contém cheiro)
- Pronto para uso, monocomponente
- Certificado de acordo com a EN 1504 parte 2 para o princípio 1, procedimento 1.2*

*Para o Princípio 1 (PI): Proteção contra o ingresso.

Procedimento 1.2: impregnação (I).

Nota: Informações dadas pelos fabricantes. Não há nas especificações técnicas informações acerca dos teores de sólidos nem de teor de ingredientes ativos.

Fonte: MC-Bauchemie®, 2025.



Universidade de Brasília