

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO

VANESSA DANTAS DE MORAES

**ESTUDO SOBRE HIDROFUGANTES COMO MÉTODO DE PROTEÇÃO DA
SUPERFÍCIE DO CONCRETO APARENTE DE PATRIMÔNIO DA ARQUITETURA
MODERNA**

São Paulo
2023

VANESSA DANTAS DE MORAES

**ESTUDO SOBRE HIDROFUGANTES COMO MÉTODO DE PROTEÇÃO DA
SUPERFÍCIE DO CONCRETO APARENTE DE PATRIMÔNIO DA ARQUITETURA
MODERNA**

Versão Corrigida

EXEMPLAR REVISADO E ALTERADO EM RELAÇÃO À
VERSÃO ORIGINAL SOB RESPONSABILIDADE DA AUTORA
E ANUÊNCIA DA ORIENTADORA.

A versão original, em formato digital, ficará arquivada na
biblioteca da faculdade. São Paulo, 23 de novembro de 2023.

Dissertação de mestrado apresentada ao programa de Pós-
Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da
Universidade de São Paulo - USP como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:
Tecnologia da Arquitetura

Linha de Pesquisa:
Tecnologia da Construção

Orientadora:
Profa. Dra. Claudia T. de Andrade Oliveira

São Paulo
2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

E-mail da autora: vanessa.dantas.moraes@alumni.usp.br

Moraes, Vanessa Dantas de

Estudo sobre hidrofugantes como método de proteção da superfície do concreto aparente de patrimônio da arquitetura moderna. São Paulo:2023. 282 f. il.

Dissertação (Mestrado – Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura) – FAU USP

Orientadora: Profa. Dra. Claudia Terezinha de Andrade Oliveira

1. Hidrofugante
2. Silano
3. Siloxano
4. Concreto aparente.
5. Conservação do concreto.
6. Arquitetura moderna.
7. Brutalismo.

Nome: Moraes, Vanessa Dantas de

Título: Estudo sobre hidrofugantes como método de proteção da superfície do concreto aparente de patrimônio da arquitetura moderna.

Dissertação de Mestrado submetida ao programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAUUSP), como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Aprovada em: 18 de outubro de 2023.

Banca Examinadora

Profa. Dra. Claudia Terezinha de Andrade Oliveira – Presidente.

Instituição: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.

Julgamento: Aprovada.

Prof. Dr. Flávio Leal Maranhão.

Instituição: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Julgamento: Aprovada.

Profa. Dra. Vanda Alice Garcia Zanoni.

Instituição: Universidade de Brasília.

Julgamento: Aprovada.

Dedico este trabalho à minha
família.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, sem o qual sua realização não seria possível.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pela disponibilização dos espaços do Hall Tecnológico da Engenharia Civil para a moldagem corpos de prova utilizados neste estudo e realização dos ensaios de resistência à compressão axial, bem como às assistências do professor Flavio Maranhão, dos pesquisadores do Departamento de Construção Civil Renan Andrade e Ellen Moura e do técnico de ensaios Jurandir de Jesus.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pela disponibilização do Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência (LME) e do equipamento goniômetro para a realização de ensaios e à assistência do professor Vanderley John e da técnica pesquisadora Daniele Pessutto.

À ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) pela disponibilização dos espaços para o rompimento dos corpos de prova por compressão diametral e a assistência de Henrique Lazaro dos Santos.

À Seção Técnica de Modelos, Ensaios e Experimentações Construtivas da FAUUSP (STMEEC, antigo LAME) pela disponibilização dos espaços para a impregnação hidrofóbica, secagem e armazenamento dos corpos de prova e realização de ensaios de absorção por capilaridade com tubos de Karsten, e à assistência do chefe do laboratório, Emílio Leocádio Júnior.

À Viapol, à Sika e à Wacker pelo fornecimento de amostras dos produtos hidrofugantes necessários à realização deste trabalho. Agradeço também ao Thiago Alves (Sika) e ao Pedro Marani (Wacker) por toda a assistência prestada com relação ao fornecimento dos produtos e ao esclarecimento das dúvidas relativas a eles.

À minha colega de pós-graduação Tatiana Regina da Silva Simão pelos esclarecimentos, sugestões, trocas e conversas.

À minha orientadora, Claudia Terezinha de Andrade Oliveira, pela paciência, orientação, ensinamentos, experiência passada e por ter aceitado essa missão.

À Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo por minha formação e por me permitir a possibilidade de realizar este trabalho.

Ao meu pai, por ser um herói.

"Ensinar é um exercício de imortalidade. De alguma forma continuamos a viver naqueles cujos olhos aprenderam a ver o mundo pela magia da nossa palavra. O professor, assim, não morre jamais..." (Alves, 1994, p.4).

Moraes, V. D. **Estudo sobre hidrofugantes como método de proteção da superfície do concreto aparente do patrimônio da arquitetura moderna**. 2023. 282 f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

RESUMO

A pesquisa, de natureza aplicada, é voltada à tecnologia de proteção do concreto aparente por hidrofugação, com enfoque nas atuais limitações e possibilidades desta tecnologia, visando estender a vida útil dos elementos da edificação a serem protegidos, de modo a manter as características das superfícies arquitetônicas do patrimônio moderno como expressão plástica do material. O objetivo é analisar o efeito do hidrofugante em superfícies de concreto aparente, por meio da comparação de produtos com quatro diferentes composições e consistências: (A) silano e siloxano (~2 a 2,5% de ingrediente ativo) em solvente orgânico; (b) emulsão aquosa de silano e siloxano (sem indicação de ingrediente ativo); (C) emulsão aquosa de silano (99% de ingrediente ativo); (D) creme de silano (80% de ingrediente ativo) à base de água. Foram realizados ensaios na superfície de concreto aparente de um pilar do edifício Vilanova Artigas, para medir a absorção de água com tubos de Karsten e diferença de cor com colorímetro tristímulo, antes e após a aplicação dos produtos. Em laboratório foram realizados ensaios para a medição da absorção por capilaridade, verificação da profundidade de penetração dos produtos e medição do ângulo de contato da água com as superfícies dos corpos de prova impregnados. A diferença de cor medida indica que os produtos testados não alteram a percepção visual da superfície do concreto aparente. Os produtos à base de silanos e siloxanos apresentaram o pior desempenho relativamente à absorção de água e profundidades de penetração imperceptíveis, embora tenham proporcionado os maiores ângulos de contato da água com a superfície hidrofugada (médias de 100,17° e 108,93°, em comparação aos valores de 74,43° e 77,70°, dos hidrofugantes C e D, respectivamente) e o “efeito gota” na superfície do pilar. Os produtos concentrados em silano apresentaram o desempenho mais satisfatório, com boa repelência à água e profundidades de penetração notáveis (as maiores medidas foram de 6mm e 12mm, dos hidrofugantes C e D respectivamente). Este trabalho conclui que os produtos mais

eficazes na redução da absorção de água do substrato de concreto armado aparente do edifício estudado são aqueles menos diluídos e mais concentrados em silanos em comparação com os produtos muito diluídos à base da mistura de silanos e siloxanos. Maiores ângulos de contato da água com a superfície hidrofugada, ou a presença do “efeito gota” não indicam, necessariamente, produtos mais adequados ou de melhor desempenho. A maior profundidade de penetração dos hidrofugantes à base de silano sugere maior durabilidade da proteção da superfície. Não há uma fórmula pronta, cada situação deve ser analisada caso a caso, pois a escolha do produto ideal deve estar condicionada a diversos fatores como peculiaridades e requisitos de cada tipo de substrato, condições ambientais e fatores econômicos para que o sistema de impregnação atinja desempenho satisfatório e durabilidade.

Palavras-chave: Hidrofugante. Silano. Siloxano. Concreto aparente. Conservação do concreto. Arquitetura moderna. Brutalismo.

Moraes, V. D. **Study on water repellents as a method of protecting the surface of exposed concrete of modern architecture heritage**. 2023. 282 f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

ABSTRACT

The research, which is of applied nature, is focused on the protection technology of exposed concrete by water repellent, focusing on the current limitations and possibilities of this technology, aiming to extend the service life of the building elements to be protected, to maintain the architectural features of modern heritage as a plastic expression of the material. The objective is to analyze the effect of the water repellent agent on exposed concrete surfaces, by comparing products with four different compositions and consistencies: (A) silane and siloxanes (~2 to 2.5% of active ingredient) in organic solvent; (B) aqueous emulsion of silane and siloxanes (without indication of active ingredient); (C) aqueous silane emulsion (99% active ingredient); (D) water-based silane cream (80% active ingredient). Tests were made on the exposed concrete surface of a pillar of the Vilanova Artigas building, to measure the water absorption with Karsten tubes and the color difference with a tristimulus colorimeter before and after the application of the products. In the laboratory, tests were made to measure capillary absorption, verify the depth of penetration of the products and measure the contact angle of the water with the surfaces of the impregnated specimens. The measured color difference indicates that the tested products do not alter the visual perception of the exposed concrete surface. The products based on silanes and siloxanes showed the lowest performance in terms of water absorption and imperceptible penetration depths, although they provided the greatest contact angles of water with the water repellent surface (averages of 100.17° and 108.93°, compared to the values of 74.43° and 77.70°, for waterproofing agents C and D, respectively) and the “beading effect” on the surface of the pillar. The products concentrated in silane showed the most satisfactory performance, with good water repellency and notable penetration depths (the largest measurements were 6mm and 12mm, for water repellents C and D, respectively). This work concludes that the most effective products in reducing the water absorption of the exposed reinforced concrete

substrate of the studied building are those less diluted and more concentrated in silanes in comparison with the very diluted products based on the mixture of silanes and siloxanes. Greater contact angles of water with the water repellent surface, or the presence of the “beading effect” does not necessarily indicate more suitable or better performing products. The greater depth of penetration of silane-based water repellents suggests greater durability of surface protection. There is no ready-made formula, each situation must be analyzed on a case-by-case basis, as the choice of the ideal product must be conditioned to several factors such as the peculiarities and requirements of each type of substrate, environmental conditions, and economic factors for the impregnation system to achieve satisfactory performance and durability.

Keywords: Water repellent. Silane. Siloxane. Apparent concrete. Concrete conservation. Modern architecture. Brutalism.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. ...	26
Figura 2 - Reparos com aspecto destoante da superfície original das empenas do edifício Vilanova Artigas nas fachadas sudoeste e sudeste.	27
Figura 3 - Palácio do Itamaraty, Oscar Niemeyer, 1970.....	31
Figura 4 – Igreja da Pampulha, Oscar Niemeyer, 1943.	32
Figura 5 - Sesc Pompéia, Lina Bo Bardi, 1982.....	32
Figura 6 – MASP (Museu de Arte de São Paulo Assis Chateaubriand), Lina Bo Bardi, 1968.	33
Figura 7 - National Theatre, Denys Lasdun, 1976.....	33
Figura 8 - Habitat 67, Moshe Safdie, 1967.....	34
Figura 9 - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP, Vilanova Artigas e Carlos Cascaldi, 1969.....	37
Figura 10 - Tribunal de Contas do Município de São Paulo, Plinio Croce, Aflalo e Gasperini, 1976.....	37
Figura 11 - Casa no Butantã, Paulo Mendes da Rocha e João de Gennaro, 1964...38	
Figura 12 - Vestiários do São Paulo Futebol Clube, Artigas e Cascaldi, 1960.....	38
Figura 13 - Sede do Anhembi Tênis Clube, Artigas e Cascaldi, 1961.....	39
Figura 14 – Residência Dr. Celso Silveira Mello, Paulo Mendes da Rocha e João de Gennaro, 1962.	39
Figura 15 –A imagem ilustra a superfície da empena com as marcas dos moldes durante a realização de ensaios de verificação da taxa de corrosão nas armaduras da empena por equipe do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).	40
Figura 16 - Endo Pharmaceutical Building, Paul Rudolph. 1964 O arquiteto procurou deixar a superfície texturizada.....	41
Figura 17 - Salk Institute of Biological Studies, Louis Kahn, 1965. O arquiteto optou por uma superfície lisa e monolítica.	41
Figura 18 - Marina City, Bertrand Goldberg, 1964.....	42
Figura 19 - Raymond Hilliard Center, Bertrand Goldberg, 1966.....	42

Figura 20 - Promontory Apartments Building, Mies Van Der Rohe, 1949.	44
Figura 21 - Revestimento da superfície de concreto com componentes cerâmicos na ópera de Sydney e interior em concreto aparente, Jørn Utzon, Sydney, Australia, 1973.	48
Figura 22 - Superfície modificada com martelo texturizador (<i>bush hammer</i>), Barbican Center, Chamberlin, Powell & Bon, Londres, Reino Unido, 1976.....	48
Figura 23 - Concreto nervurado com agregado exposto.	49
Figura 24 - Concreto marcado por fôrmas.	49
Figura 25 - Superfície de concreto imitando a textura da pedra. Palais d'Iéna, Auguste Perret, Paris, França, 1937-46.	50
Figura 26 – Exemplo de martelo texturizador de pedras e concretos (<i>bush hammer</i>).	50
Figura 27 – Armadura corroída na empena nordeste. Imagem à esquerda mostra evidência de produto de corrosão (coloração alaranjada) sobre barra de aço, inclusive na interface com o concreto carbonatado. Imagem à direita é uma ampliação, evidenciando parte das barras envolvidas por argamassa de reparo que foi fraturada para inspeção da armadura. Parte da argamassa de reparo não está carbonatada (indicada pela área com alteração de cor após aspersão de solução de fenolftaleína).	52
Figura 28 – Armaduras de pele corroídas expostas durante intervenção de reparo nas empenas.....	52
Figura 29 - Armaduras corroídas em uma viga de cobertura.	53
Figura 30 - Mecanismo de congelamento da parede e destacamento de camadas devido ao ingresso de água por meio de partes não tratadas de elementos do telhado.....	54
Figura 31 - Vigas de cobertura antes da instalação dos rufos.....	55
Figura 32 - Vigas de cobertura com rufo e poliureia.....	55
Figura 33 – Comparação entre superfície de concreto original e sem reparo (esquerda) e superfície com reparo (direita).....	56
Figura 34 – Teste realizado na empena nordeste em área impregnada com hidrofugante à base de silano e siloxano indica que a superfície não é umedecida.....	58
Figura 35 - Fachada sudoeste com mancha de umidade logo acima do canto superior direito do pilar. Imagem foi registrada no dia 19/05/2017, após precipitação de moderada intensidade, porém com 8 horas de duração.	59

Figura 36 – Termoimagem registrada entre 10h e 11h no dia 10/06/2017 na empena sudoeste em superfície não sombreada, após 36 horas de chuva de intensidade moderada. Temperatura ambiente de 20°C, umidade relativa de 70%.	59
Figura 37 - Mancha de umidade à direita na fachada sudeste.....	60
Figura 38 - Mancha de umidade na fachada sudeste.	60
Figura 39 - Mancha de umidade próxima aos galhos de árvore na fachada nordeste.	61
Figura 40 – Inauguração da Estação Oscar Freire.....	62
Figura 41 - Concreto aparente com proteção superficial.....	62
Figura 42 – Representação esquemática da ascensão capilar (esquerda) com água e depressão capilar (direita) com mercúrio.	64
Figura 43 – Ilustração esquemática da influência do raio na ascensão capilar.....	65
Figura 44 - Ascensão capilar em um tijolo.....	66
Figura 45 - Ascensão capilar na base de uma parede.	66
Figura 46 - Capela Mariënburghkapel, Nijmegen, na Holanda.....	67
Figura 47 - Representação esquemática da absorção capilar na superfície do concreto. Após adentrar nos poros da superfície, a água é adsorvida na superfície dos capilares, em seguida preenche os capilares menores e por último preenche os capilares maiores.	68
Figura 48 – Mecanismos predominantes de transporte de umidade em materiais porosos. (a) difusão de vapor, (b) difusão superficial (com difusão de vapor) e (c) transporte capilar.	69
Figura 49 - Curva de armazenamento de umidade. A_L = saturação livre, o ponto até o qual o capilar absorverá água. A_{80} = saturação na umidade relativa de 80%	70
Figura 50 - Variáveis que afetam a relação entre a intensidade da chuva dirigida incidente e a resposta das fachadas à água que entra em contato com a superfície.....	71
Figura 51 - Possíveis comportamentos do fluido após o impacto da chuva dirigida no substrato de material poroso.	72
Figura 52 – Influência de características do substrato na aderência de partículas e sujidades.	73
Figura 53 - Fatores que influenciam a penetração de umidade pelas chuvas.....	74

Figura 54 - Levantamento de área da fachada noroeste sombreada por árvore do entorno. A hachura tracejada cinza indica áreas de reparo estrutural, a hachura tracejada verde representa áreas apenas sombreadas e a hachura sólida verde representa áreas em que os galhos da árvore estão em contato com a empena.....	75
Figura 55 - Gotas de água sobre a folha de lótus.	78
Figura 56 - Folha de lótus (a), papilas da superfície da folha (b) e túbulos cerosos da superfície da folha (c).....	79
Figura 57 - Gotas de água sobre a superfície de uma folha de lótus.....	79
Figura 58 - Diferentes ângulos de contato entre a água e o substrato para superfícies hidrofílicas e hidrofóbicas. À esquerda, o menor ângulo de contato entre a gota de água e o substrato implica o molhamento da superfície.....	81
Figura 59 - Gota aderida à folha de uma rosa.....	83
Figura 60 – Representação da histerese.	83
Figura 61 - Efeito da rugosidade da superfície no ângulo de contato.	85
Figura 62 – The Obelisk, Cleopatra’s Needle, Central Park, Nova York.	86
Figura 63 - Detalhe da superfície do obelisco no Central Park.	87
Figura 64 - Fachada do Theatro Municipal de São Paulo.	88
Figura 65 - Degradação do Arenito Itararé na fachada frontal do Theatro Municipal de São Paulo.....	88
Figura 66 - Cristo Redentor.....	89
Figura 67 - Ponte Fürstenland, em St. Gallen, na Suíça, recebeu tratamento hidrofugante em forma de creme para proteger contra os efeitos da carbonatação e sais de degelo.....	90
Figura 68 - Ópera de Sydney, Jørn Utzon.....	91
Figura 69 - Ponte Kap Shui Mun, Hong Kong.	91
Figura 70 - Ponte de Tsing Ma, Hong Kong.	92
Figura 71 - Stonecutters Bridge, Hong Kong.....	92
Figura 72 - Tipos de tratamento superficial: (a) tratamento hidrofóbico que reveste a superfície dos poros (b) bloqueador de poros (c) formador de película superficial e (d) cobertura cimentícia.....	93
Figura 73 - Tratamento com verniz antipichação antes (esquerda) e após (direita) a aplicação.	98

Figura 74 – Grupos alquila apolares (metil e octil) são responsáveis pela repelência à água e os grupos alcoxi (R–O–) reagem com a matriz inorgânica do substrato.....	100
Figura 75 - Exemplo de alquiltrialcoxisilano, em que OR' representa um grupo alcoxi.	101
Figura 76 - Efetividade do silano em substratos inorgânicos.	103
Figura 77 - Exemplo de alquilalcoxisiloxano, em que OR' representa um grupo alcoxi.	104
Figura 78 - Etiltrietoxisilano.	106
Figura 79 - Isobutiltrimetoxisilano.....	106
Figura 80 - Isobutiltrietoxisilano.....	107
Figura 81 - Trimetoxioctilsilano.....	107
Figura 82 - Trietoxioctilsilano.....	107
Figura 83 - Polidimetilsiloxano.....	108
Figura 84 - Estrutura fundamental dos silicones. “R” representa um grupo alquila.	108
Figura 85 - À esquerda, alquiltrialcoxisilano e à direita representação esquemática de uma resina de silicone, em que R pode ser um grupo etoxi, metoxi, metil, fenil ou octil.	109
Figura 86 - Condensação das moléculas de silano e reação com o substrato. As linhas tracejadas não são ligações, representam as reações ocorridas.	110
Figura 87 - Representação esquemática da substituição de uma camada de água adsorvida na superfície do concreto por uma resina de silicone. As linhas tracejadas não representam ligações.....	111
Figura 88 - Representação esquemática da corrosão da barra de aço.....	113
Figura 89 - Carbonatação parcial do concreto em estrutura porosa não saturada..	115
Figura 90 - Propriedades a serem verificadas antes da aplicação do hidrofugante.	119
Figura 91 - Diferentes profundidades de penetração para diferentes dosagens de creme hidrofugante com 80% de teor de sólidos.	125
Figura 92 - Diferentes profundidades de penetração para diferentes teores de umidade.....	125
Figura 93 – Creme hidrofugante logo após a aplicação, depois de 30 minutos e depois de 2 horas.	127

Figura 94 - Variáveis que têm influência na profundidade de penetração.....	130
Figura 95 - Características esperadas dos hidrofugantes.	133
Figura 96 - Recomendações quanto ao preparo da superfície antes, durante e após a aplicação do hidrofugante.	139
Figura 97 - Trincha para a aplicação do hidrofugante.	140
Figura 98 - Rolo para a aplicação do hidrofugante.....	140
Figura 99 - Aplicação do hidrofugante com <i>spray airless</i>	141
Figura 100 - Aplicação de hidrofugante com <i>spray airless</i>	141
Figura 101 - Aplicação de hidrofugante com pulverizador de baixa pressão.	142
Figura 102 - Hidrofugante A, líquido transparente.....	148
Figura 103 - Hidrofugante B, líquido branco.....	148
Figura 104 - Hidrofugante C, líquido incolor.	149
Figura 105 - Hidrofugante D, creme branco.	149
Figura 106 - Corpos de prova produzidos para os ensaios.	151
Figura 107 - Corpos de prova utilizados nos ensaios.....	151
Figura 108 - Indicação do pilar 2 em vermelho e da orientação das empenas na implantação do edifício Vilanova Artigas.....	152
Figura 109 - Indicação do pilar 2 em vermelho em planta de vigas e pilares do edifício Vilanova Artigas.	153
Figura 110 - Pilar em que foram realizados os ensaios ao centro da imagem.	153
Figura 111 - Detalhe da superfície de uma área do pilar em uma área de 25x25cm, em que é possível observar e ter a dimensão de poros e orifícios.....	155
Figura 112 - Imagem ilustrando orifícios de até 1cm.....	155
Figura 113 - Resto de inseto retirado de orifício na superfície do pilar.	156
Figura 114 - Teia de aranha retirada de orifício na superfície do concreto.	156
Figura 115 - Superfície do pilar próxima a vegetação com biofilme e sujeira.	157
Figura 116 - Biofilme e sujeira na base do pilar.	157
Figura 117 - Instrumentos utilizados para a limpeza da área de ensaio do pilar: vaporizador, borrifador de água e escova de aço.	158

Figura 118 – Faixa da face leste do pilar após a limpeza.	158
Figura 119 - Área do hidrofugante A.	159
Figura 120 - Área do hidrofugante B.	159
Figura 121 - Área do hidrofugante C.	160
Figura 122 - Área do hidrofugante D.	160
Figura 123 - Spray manual utilizado para a aplicação dos produtos líquidos.	162
Figura 124 - Pincel utilizado para a aplicação do creme hidrofugante. Ao centro da imagem, o orifício da superfície foi preenchido com o produto.	162
Figura 125 - Área do creme hidrofugante escurecida, minutos após a aplicação e início da secagem. Nota-se ao centro um ponto branco, um orifício que foi preenchido com o creme. Também é perceptível na parte inferior da imagem que o creme chegou a escorrer pois o substrato não absorveu toda a quantidade aplicada.	163
Figura 126 - Área do creme hidrofugante horas após a aplicação.	164
Figura 127 - Corpos de prova e spray utilizado para aplicação dos hidrofugantes líquidos.	164
Figura 128 - Aplicação do creme hidrofugante em corpo de prova.	165
Figura 129 - Aplicação do creme hidrofugante.	165
Figura 130 - Colorímetro tristímulo.	166
Figura 131 - Leitura de cor do colorímetro.	167
Figura 132 - Valores RGB retornados pelo colorímetro.	167
Figura 133 – Valores do espaço de cores CIELAB retornados pelo colorímetro. ...	168
Figura 134 - Espaço de cor CIELAB	168
Figura 135 - Lado do colorímetro que encosta na superfície.	170
Figura 136 - Delimitação da área para medições com colorímetro.	170
Figura 137 – Modelo de tubo de Karsten para utilização em superfície vertical (esquerda) e para utilização em superfície horizontal (direita) segundo a recomendação técnica do comitê RILEM de 1980.	172
Figura 138 - Tubo de Karsten utilizado nos ensaios.	175
Figura 139 - Fixação do tubo de Karsten com plastilina, com má aderência e vazamento.	176

Figura 140 - Aplicação da plastilina em excesso para a fixação do tubo alterou a área de absorção.....	176
Figura 141 - Aplicação de silicone acético no tubo de Karsten.	177
Figura 142 - A massa de calafetar normalmente é vendida em tiras da largura da borda do tubo de Karsten.	178
Figura 143 - Massa de calafetar de mais fácil remoção.	178
Figura 144 - Massa de calafetar mais aderente, de difícil remoção.	179
Figura 145 - Distribuição da massa de calafetar na borda do tubo de Karsten.	180
Figura 146 - Tubo de Karsten pressionado sobre a superfície para a fixação, mantendo-se o cuidado para não o quebrar.	180
Figura 147 - Aplicação da massa de fixação no entorno do tubo de Karsten.	181
Figura 148 - Utilização de seringa para preenchimento dos tubos de Karsten.	181
Figura 149 - Preenchimento do tubo de Karsten com pisseta.....	182
Figura 150 - Formação de bolha dentro de tubo de Karsten.	182
Figura 151 – Medição da absorção com tubos de Karsten em uma das áreas de ensaio.....	183
Figura 152 - Marcas deixadas pela massa de calafetar logo após o ensaio com tubos de Karsten.	184
Figura 153 - Marca e restos deixados pela massa de calafetar logo após o ensaio com tubos de Karsten.	184
Figura 154 - Marcas da massa de calafetar esbranquiçadas, dias após o ensaio com tubos de Karsten.	185
Figura 155 - Marca da massa de calafetar esbranquiçada, dias após ensaio com tubo de Karsten.	185
Figura 156 - Marca da massa de calafetar dias após o ensaio com tubo de Karsten, imagem ilustra a facilidade de remoção.	186
Figura 157 - Ensaio de resistência à compressão axial.	188
Figura 158 - Medições das absorções nos corpos de prova com os hidrofugantes A e B.....	189
Figura 159 - Marca a 5mm da superfície de absorção do corpo de prova.	190
Figura 160 - Recipiente com bastões de silicone para apoiar a superfície de absorção dos corpos de prova.....	191

Figura 161 - Corpos de prova em recipientes preenchidos com água até a marca de 5mm.	191
Figura 162 - Balança utilizada para pesagem dos corpos de prova.....	192
Figura 163 - Rompimento por compressão diametral do corpo de prova.....	193
Figura 164 - Seção do corpo de prova após ser molhada com água. A área escura representa a que absorveu água e área mais clara (nas bordas) representa a penetração do hidrofugante, onde não houve absorção.	194
Figura 165 - Ângulo de contato e equação de Young.	195
Figura 166 -Goniômetro contendo o corpo de prova onde é depositada a gota de água a partir da qual é feita a medição do ângulo de contato.	196
Figura 167 - Deposição de gota de água no corpo de prova por meio de uma agulha. Ao lado esquerdo a câmera que capta a imagem utilizada no software e ao lado direito a iluminação da gota.	196
Figura 168 - Ângulo de contato entre a gota de água e o substrato.....	197
Figura 169 - Imagem enviada ao software de medição do ângulo de contato.	197
Figura 170 - Imagem enviada ao software de medição do ângulo de contato. No software, a linha horizontal (verde) deve ser posicionada no limite da superfície de apoio da gota, representada dentro da área preta e é a base do ângulo medido. Neste caso, como a superfície é irregular, há uma área sombreada acima da linha. As linhas verde e vermelha são de elaboração própria para ilustração do procedimento.	197
Figura 171 - Efeito de superfície/efeito pérola/ “ <i>beading effect</i> ” observado no pilar após a aplicação do hidrofugante B. A água se deposita na superfície na forma de gotículas tendentes ao formato esférico.....	200
Figura 172 - Área do hidrofugante A: molhamento e escurecimento do entorno. ...	201
Figura 173 - Área do hidrofugante B: molhamento e escurecimento abaixo.....	202
Figura 174 - Área do hidrofugante C: molhamento e escurecimento abaixo.....	202
Figura 175 - Gotículas na área do hidrofugante A.....	203
Figura 176 - Gotículas na área do hidrofugante B.....	203
Figura 177 - Gotículas superficiais na área do hidrofugante B e logo abaixo molhamento da superfície.	204
Figura 178 - Na área do hidrofugante C embora houvesse pouco molhamento, foi pouco perceptível a formação de gotículas superficiais, como nos hidrofugantes A e B.....	204

Figura 179 - Na área do hidrofugante D não houve formação de gotículas superficiais e não há diferença na aparência do molhamento da superfície hidrofugada e não hidrofugada.	205
Figura 180 - Superfícies de ensaio dos hidrofugantes A, B, C e D, em que foram tomadas as medidas com o colorímetro. A imagem mostra que são superfícies heterogêneas.	206
Figura 181 - Área do hidrofugante A.	207
Figura 182 - Área do hidrofugante C.	207
Figura 183 - Área do hidrofugante B.	207
Figura 184 - Área do hidrofugante D.	207
Figura 185 - Superfície após a aplicação dos 4 hidrofugantes.	208
Figura 186 - 1ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante A.	222
Figura 187 - 2ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante A.	223
Figura 188 - 3ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante A.	223
Figura 189 - Detalhe da borda do corpo de prova impregnado com hidrofugante A. Praticamente não houve penetração visível e em alguns trechos aparentemente de apenas um milímetro.	224
Figura 190 - 1ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante B.	224
Figura 191 - 2ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante B.	225
Figura 192 - 3ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante B.	225
Figura 193 - Detalhe da borda do corpo de prova impregnado com hidrofugante B. Não foi observada penetração.	226
Figura 194 - 1ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante C.	226
Figura 195 - 2ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante C.	227
Figura 196 - 3ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante C.	227

Figura 197 - Detalhe da borda do corpo de prova impregnado com hidrofugante C. A profundidade de penetração máxima observada foi de 6mm.....	228
Figura 198 - 1ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante D.	228
Figura 199 - 2ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante D.	229
Figura 200 - 3ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante D.	229
Figura 201 - Detalhe da borda do corpo de prova impregnado com hidrofugante D. A profundidade de penetração máxima observada foi de 12mm.....	230
Figura 202 - Detalhe da borda do corpo de prova impregnado com hidrofugante D. A profundidade de penetração máxima observada foi de 12mm.....	230
Figura 203 - Ângulos de contato medidos no corpo de prova impregnado com o hidrofugante A.	232
Figura 204 - Ângulos de contato medidos no corpo de prova impregnado com o hidrofugante B.	232
Figura 205 - Ângulos de contato medidos no corpo de prova impregnado com o hidrofugante C.....	232
Figura 206 - Ângulos de contato medidos no corpo de prova impregnado com o hidrofugante D.....	232
Figura 207 - Ângulos de contato medidos no corpo de prova de referência.	233

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Independência entre o "efeito gota" e a absorção de água.	82
Gráfico 2 – Ângulos de contato para hidrofugantes à base de polisiloxanos com adição de nanopartículas de sílica aplicados em superfícies de argamassa, cerâmica e madeira.	84
Gráfico 3 - Profundidade de carbonatação em concreto tratado e não tratado com hidrofugantes após 7 ,28 e 72 dias de carbonatação acelerada.	117
Gráfico 4 - Profundidade de penetração do hidrofugante em função do tempo de contato com o substrato e da porosidade (representada pela relação água-cimento).	124
Gráfico 5 - Profundidade de penetração do hidrofugante em função da umidade relativa e do tempo de contato com o substrato.	124
Gráfico 6 - Perfis de penetração de três hidrofugantes diferentes. O tempo no eixo x é a duração do contato no tratamento. A profundidade de penetração foi medida quatro meses depois.	125
Gráfico 7 - Profundidade de penetração em função de diferentes umidades relativas para hidrofugantes em forma de creme, gel e líquido.	129
Gráfico 8 - Relação entre diferentes produtos e profundidades de penetração.	129
Gráfico 9 – Absorção em função do tempo para as três medições com tubo de Karsten A1, A2 e A3 na área do hidrofugante A.	211
Gráfico 10 - Absorção em função do tempo para as três medições com tubo de Karsten B1, B2 e B3 na área do hidrofugante B.	211
Gráfico 11 - Absorção em função do tempo para as três medições com tubo de Karsten C1, C2 e C3 na área do hidrofugante C.	212
Gráfico 12 - Absorção em função do tempo para as três medições com tubo de Karsten D1, D2 e D3 na área do hidrofugante D.	212
Gráfico 13 – Absorção total ao final do ensaio com tubo de Karsten, antes e após a aplicação dos hidrofugantes no pilar.	213
Gráfico 14 - Absorção em função do tempo para as três medições com tubo de Karsten A1, A2 e A3 no corpo de prova com o hidrofugante A.	215
Gráfico 15 - Absorção em função do tempo para as três medições com tubo de Karsten B1, B2 e B3 no corpo de prova com o hidrofugante B.	216
Gráfico 16 - Absorção em função do tempo para as três medições com tubo de Karsten C1, C2 e C3 no corpo de prova com o hidrofugante C.	216

Gráfico 17 - Absorção em função do tempo para as três medições com tubo de Karsten D1, D2 e D3 no corpo de prova com o hidrofugante D.....	217
Gráfico 18 - Absorção total ao final do ensaio com tubo de Karsten antes e após a aplicação dos hidrofugantes nos corpos de prova.	217
Gráfico 19 - Ensaio 1, ascensão de água por capilaridade. Absorção observada apenas no corpo de prova de referência e no corpo de prova impregnado com o hidrofugante B.	218
Gráfico 20 - Ensaio 2, ascensão de água por capilaridade. Absorção observada no corpo de prova de referência e nos corpos de prova impregnados com os hidrofugantes A e B.....	219
Gráfico 21 - Ensaio 3, ascensão de água por capilaridade. Absorção observada no corpo de prova de referência e nos corpos de prova impregnados com os hidrofugantes A e B.....	219
Gráfico 22 - Absorção capilar total na superfície de referência e nas superfícies com hidrofugantes.....	220
Gráfico 23 - Profundidade de penetração máxima observada em cada hidrofugante.	222

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Recomendações quanto ao cobrimento da armadura segundo a norma NB1: Cálculo e execução de obras de concreto armado (1960)	46
Tabela 2 - Recomendações quanto ao cobrimento da armadura segundo a norma NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – procedimento (2014). ..	46
Tabela 3 - Comparação entre propriedades de alguns sistemas de proteção superficial do concreto. Nível de proteção A = alto, M = médio, B = baixo.....	99
Tabela 4 - Produtos Dow Corning ordenados de acordo com sua hidrofobicidade.	106
Tabela 5 - Profundidade de penetração e redução da absorção de água em função da dosagem e da porosidade do concreto.	126
Tabela 6 - Características de desempenho para hidrofugantes segundo os princípios definidos na norma NP EN 1504-9.....	135
Tabela 7 - Requisitos de desempenho para a impregnação hidrofóbica segundo a norma NP EN 1504-2.....	136
Tabela 8 - Propriedades da superfície a serem verificadas antes e durante a aplicação para que seja assegurada a qualidade da impregnação hidrofóbica segundo a norma europeia EN 1504.....	145
Tabela 9 - Condições do entorno a serem verificadas antes e durante a aplicação para que seja assegurada a qualidade da impregnação hidrofóbica segundo a norma europeia EN 1504.	145
Tabela 10 - Propriedades do tratamento hidrofóbico a serem verificadas após a aplicação para que seja assegurada a qualidade da impregnação hidrofóbica segundo a norma europeia EN 1504.	146
Tabela 11 - Características dos materiais usados na moldagem dos corpos de prova.	150
Tabela 12 - Relação entre avaliação visual e ΔE no concreto.....	171
Tabela 13 - Relação entre ângulo de contato e a hidrofobicidade do substrato segundo a norma estadunidense ASTM D7334-08.	198
Tabela 14 - Modas antes e após a aplicação dos hidrofugantes e cálculo do ΔE . ..	209
Tabela 15 - Ângulos medidos com o goniômetro.	231

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	26
2.	A CONSERVAÇÃO DO CONCRETO APARENTE EM EDIFICAÇÕES COM SIGNIFICADO HISTÓRICO E CULTURAL	31
2.1.	O Brutalismo da Escola Paulista e o edifício da FAU-USP	36
2.2.	A conservação das empenas da FAUUSP.....	51
3.	O CONCEITO DE ABSORÇÃO CAPILAR E O EFEITO DA CHUVA DIRIGIDA EM SUPERFÍCIES POROSAS	64
4.	HIDROFUGANTES.....	78
4.1.	A utilização de hidrofugante como forma de proteção superficial	86
4.2.	Categorias de materiais para a proteção superficial	93
4.3.	Propriedades químicas dos hidrofugantes	100
4.4.	Carbonatação e corrosão e relação com hidrofugantes.....	113
4.5.	Recomendações quanto à escolha do hidrofugante	118
4.6.	Durabilidade dos sistemas de hidrofugação.....	120
4.7.	Profundidade de penetração dos hidrofugantes.....	122
4.8.	Concentração do hidrofugante	131
4.9.	Recomendações quanto ao desempenho dos hidrofugantes	132
4.10.	Recomendações quanto ao preparo do substrato.....	137
4.11.	Formas de aplicação do hidrofugante.....	140
4.12.	Controle da qualidade da aplicação segundo a norma europeia EN 1504	144
5.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	147
5.1.	Materiais utilizados.....	147
5.2.	Ensaios	152
5.2.1.	Ensaios realizados in situ.....	152
5.2.2.	Ensaios em corpos de prova.....	187

6.	RESULTADOS	200
6.1.	Resultado dos ensaios in situ.....	200
6.1.1.	Efeito de superfície	200
6.1.2.	Resultados das medições com colorímetro tristímulo ...	206
6.1.3.	Resultados dos ensaios com tubos de Karsten no pilar	211
6.2.	Resultados dos ensaios com corpos de prova.....	214
6.2.1.	Ensaio de resistência à compressão axial	214
6.2.2.	Resultado da medição de absorção de água utilizando tubos de Karsten	215
6.2.3.	Resultado do ensaio de absorção por capilaridade segundo a norma ABNT NBR 9779:2012	218
6.2.4.	Resultado dos ensaios de penetração do hidrofugante no substrato	221
6.2.5.	Resultados das medições de ângulo de contato	231
7.	CONCLUSÕES	234
7.1.	Sugestões para a continuidade da pesquisa.....	239
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	241
	APÊNDICE A – RELAÇÃO ENTRE A COLUNA DE ÁGUA NO TUBO DE KARSTEN E VELOCIDADE DE VENTO	260
	APÊNDICE B – MEDIÇÕES REALIZADAS COM O COLORÍMETRO TRISTÍMULO	264
	APÊNDICE C – MEDIÇÕES DE ABSORÇÃO COM TUBO DE KARSTEN NO PILAR	272
	APÊNDICE D – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	276
	APÊNDICE E – MEDIÇÕES DE ABSORÇÃO COM TUBO DE KARSTEN NOS CORPOS DE PROVA	277
	APÊNDICE F – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE SEGUNDO A NORMA NBR 9779:2012	281

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a cobertura e as empenas do edifício Vilanova Artigas (**Figura 1**) – sede da FAUUSP (Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo) – atingiram precário estado de conservação devido a fatores como a falta de manutenção preventiva, vulnerabilidade do concreto aparente às condições de exposição, deterioração natural, características construtivas e técnicas de intervenção corretivas invasivas. Esses fatores comprometeram técnica e esteticamente a edificação.

Como apontado por Oliveira et al. (2017), a falta de estudo detalhado, o desconhecimento do comportamento de alguns materiais nas condições existentes, a dificuldade de controle dos atributos cromáticos da argamassa de reparo e a falta de rigor nos procedimentos e na cronologia de execução dos serviços foram os principais desafios encontrados nas atividades de recuperação das empenas da edificação durante a intervenção ocorrida entre 2012 e 2015. A **Figura 2** mostra o resultado das atividades de recuperação.

Figura 1 - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.



Fonte: Kon (2010).

Figura 2 - Reparos com aspecto destoante da superfície original das empenas do edifício Vilanova Artigas nas fachadas sudoeste e sudeste.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

A partir desse contexto, grupos de pesquisa da FAUUSP uniram-se em torno do objetivo de sistematizar subsídios para um plano de gestão da conservação da edificação. As pesquisas foram financiadas pelo programa Keeping It Modern¹, entre outubro de 2015 e dezembro de 2017. Trata-se de uma iniciativa da fundação Getty, com o objetivo de incentivar práticas de preservação da arquitetura moderna por meio do financiamento de pesquisas e projetos. O relatório final do projeto pode ser acessado em Pinheiro (2017). A escolha do tema desta pesquisa foi motivada por esse projeto.

Após a reforma, as empenas continuaram a apresentar manifestações patológicas, em especial manchas de umidade. O produto utilizado na hidrofugação da superfície das empenas não demonstrou eficácia, uma vez que as manchas continuaram a aparecer em alguns pontos ainda durante o prazo de vida útil do produto indicado pelo construtor. Além das questões técnicas, há ainda o agravante do modelo de gestão de edifícios públicos não abranger a prática da manutenção

1

https://www.getty.edu/foundation/initiatives/current/keeping_it_modern/report_library/vilanova_artigas.html

preventiva, uma vez que, neste caso, o hidrofugante selecionado deveria ter sido reaplicado a cada dois anos.

OBJETIVO DA PESQUISA:

Analisar o efeito do hidrofugante em superfícies de concreto aparente no contexto da conservação de patrimônio da arquitetura moderna, por meio da comparação entre produtos com diferentes composições e consistências.

JUSTIFICATIVA:

O estudo de um material para a proteção superficial é justificado pelo fato de o edifício constituir-se em um importante exemplar da arquitetura moderna paulista e brasileira, tendo sido tombado pelo Condephaat² em 1982 e pelo Conpresp³ em 1991, sendo de grande relevância a sua conservação.

Para o patrimônio da arquitetura moderna em concreto aparente, ainda são escassas as publicações científicas que comprovem a eficácia do tratamento com hidrofugante, considerando as dificuldades de aplicação e as características do concreto das superfícies a serem protegidas. Para o patrimônio em pedra, que tem protocolos e métodos de conservação, os estudos científicos sobre hidrofugação e outros processos de proteção e consolidação têm sido aprofundados nos últimos anos, como indicam Grossi e Lama (2018) e Sierra-Fernandez et al (2017), inclusive por meio do estudo da utilização de nanopartículas em produtos consolidantes e hidrofugantes voltados à proteção de monumentos pétreos.

A utilização de hidrofugantes como alternativa para a proteção da superfície em edificações da arquitetura moderna apresenta-se como uma possibilidade viável porque produz alterações discretas na percepção visual do concreto aparente e limita o ingresso de água, contribuindo para a redução do risco de corrosão e para a desaceleração da corrosão em curso.

² Conselho de Defesa do Patrimônio Histórico, Arqueológico, Artístico e Turístico, órgão subordinado à Secretaria da Cultura do Estado de São Paulo.

³ Conselho Municipal de Preservação do Patrimônio Histórico Cultural e Ambiental da Cidade de São Paulo, vinculado à Secretaria Municipal de Cultura.

ABORDAGEM METODOLÓGICA:

A pesquisa é de natureza aplicada e voltada à tecnologia de proteção do concreto aparente por hidrofugação, com enfoque nas atuais limitações e possibilidades desta tecnologia, visando estender a vida útil dos elementos da edificação a serem protegidos, de modo a manter as características das superfícies arquitetônicas do patrimônio moderno como expressão plástica do material.

A revisão da literatura buscou trazer conceitos e exemplares da arquitetura moderna - ilustrando como o significado das superfícies segundo o autor do projeto norteia e fundamenta a atribuição de valores culturais da obra e a definição de métodos e materiais de conservação - e caracterizar os hidrofugantes quanto ao histórico de uso, propriedades, composição, características e requisitos de desempenho, formas de aplicação e de controle da qualidade. A bibliografia sobre o tema ainda é escassa, especialmente em relação ao comportamento ao longo do tempo desses produtos sobre o concreto aparente; a maior parte das campanhas e pesquisas sobre hidrofugação são feitas em monumentos pétreos.

O programa experimental compreende análises quantitativas e qualitativas com o intuito de buscar evidências do efeito dos produtos em condições reais de uso, considerando as restrições de intervenção no patrimônio arquitetônico, que requer técnicas pouco invasivas. Foram utilizados 4 hidrofugantes com diferentes composições, concentrações e consistências:

- Composição de silano e siloxano com baixo teor de sólidos (~2 ou 2,5%) disperso em solvente orgânico (aguarrás) e teor de ingrediente ativo não informado pelo fabricante;
- Emulsão branca de silano e siloxano dispersa em água com teores de sólidos e de ingrediente ativo não informados pelo fabricante;
- Emulsão monocomponente de silano com 99% de ingrediente ativo disperso em água;
- Creme hidrofugante de silano com 80% de ingrediente ativo à base de água.

Em uma primeira etapa foi selecionado um dos pilares externos do edifício Vilanova Artigas e os produtos foram aplicados em áreas pré-determinadas. Então, foram realizados ensaios que possibilitaram a avaliação da alteração da aparência de cor e da absorção por capilaridade com tubos de Karsten em cada área. A seguir, a

ação dos hidrofugantes foi analisada comparativamente por meio de ensaios laboratoriais em corpos de prova, a fim de determinar a absorção de água por capilaridade, profundidade de penetração e alteração do ângulo de contato da gota de água com o substrato. Os métodos experimentais e a forma de análise dos resultados são descritos no capítulo Programa Experimental. Foi imprescindível para /realização deste trabalho o contato com os fabricantes e sua colaboração.

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No **capítulo 2** é feita a contextualização das edificações de interesse a esta pesquisa e são estabelecidos os vínculos entre as áreas do conhecimento que aportam recursos para a efetivação da conservação. Evidencia-se que é importante conhecer três categorias de dados:

- As condições físicas da edificação e histórico recente de intervenções, em especial na superfície a ser protegida;
- O contexto da gestão das obras e da gestão da manutenção e operação da edificação, que está relacionado a práticas sociais enraizadas na práxis do tratamento da coisa pública;
- Os valores culturais do patrimônio que devem ser preservados.

O **capítulo 3** aborda o conceito de absorção capilar e chuva dirigida, demonstrando como são variáveis que impactam na absorção pelo substrato.

O **capítulo 4** apresenta a definição de hidrofugante, exemplos de utilização, suas propriedades químicas, características e formas de aplicação e de controle da qualidade.

O **capítulo 5** descreve o programa experimental, apresentando os materiais utilizados e ensaios realizados.

O **capítulo 6** apresenta e analisa os resultados dos ensaios.

O **capítulo 7** apresenta as conclusões e sugestões para a continuidade da pesquisa.

2. A CONSERVAÇÃO DO CONCRETO APARENTE EM EDIFICAÇÕES COM SIGNIFICADO HISTÓRICO E CULTURAL

O concreto é o material mais utilizado na era moderna. Inicialmente, sua produção era majoritariamente artesanal e sua expressão arquitetônica era utilitarista ou imitação de materiais tradicionais, como a pedra. Com a industrialização do concreto e do cimento e das técnicas de produção ao longo dos séculos XIX e XX tiveram início processos de construção em larga escala totalmente industrializados. O concreto proporcionou uma solução econômica frente aos desafios da construção durante o pós-guerra (MacDonald; Gonçalves, 2020, p.5). A partir de então, muitas edificações em concreto aparente reconhecidamente de valor histórico e cultural foram produzidas explorando as possibilidades oferecidas pelo material (**Figura 3** à **Figura 8**).

Figura 3 - Palácio do Itamaraty, Oscar Niemeyer, 1970.



Fonte: César ([2017?]).

Figura 4 – Igreja da Pampulha, Oscar Niemeyer, 1943.



Fonte: Arruda (2009).

Figura 5 - Sesc Pompéia, Lina Bo Bardi, 1982.



Fonte: Kok (2009).

Figura 6 – MASP (Museu de Arte de São Paulo Assis Chateaubriand), Lina Bo Bardi, 1968.



Fonte: Kok (2008).

Figura 7 - National Theatre, Denys Lasdun, 1976.



Fonte: Richardson (2009).

Figura 8 - Habitat 67, Moshe Safdie, 1967.



Fonte: Prudence (2014).

Inicialmente, não era comum considerar as manifestações patológicas que as edificações construídas em concreto poderiam apresentar ou a necessidade de manutenção preventiva. O material foi tido como eterno, infalível, sem necessidade de nenhum tipo de manutenção (MacDonald, 2003, p.06-07). Com o tempo, as edificações apresentaram problemas como fissuras, infiltração de água e corrosão das armaduras, evidenciando a vulnerabilidade do material.

O concreto oferece propriedades atraentes, particularmente economia, durabilidade e liberdade projetual, que o tornaram o material de construção mais amplamente utilizado. O concreto é essencial para edifícios públicos modernos e industriais, estradas, túneis e pontes.

Até alguns anos atrás, pensava-se que o concreto era resistente a todos os efeitos nocivos. Os muitos exemplos de danificações demonstraram o contrário: o concreto é vulnerável. As estruturas de concreto estão em perigo (Hager, 1998, p.206, tradução nossa).

Atualmente, os profissionais que trabalham no campo do restauro reconhecem a dificuldade envolvida na conservação e recuperação estrutural do patrimônio em concreto armado aparente. Em apresentação no evento *Conserving concrete: live roundtable discussion for the launch of conservation principles for concrete of cultural significance*, ocorrido em 2020, Barnabas Calder expressa seu ponto de vista sobre o tema:

Monumental e semelhante à pedra, celebrando a adesão de pessoas comuns a uma arquitetura de qualidade e robustez que fora reservada à elite nos séculos anteriores, o concreto aparente era honesto em sua clareza simples acerca do que é feito um edifício e como ele se apresenta. Também tinha uma aparência barata [...]. Talvez seu apelo mais importante para os clientes do governo tenha sido a promessa de que não precisava de manutenção, de que, uma vez construído, nunca mais precisaria de pintura, reforma ou substituição de qualquer outra superfície de sacrifício [...]. É claro que não é verdade que o concreto não seja reparável, mas em sua necessidade de reparo, ele retorna às suas verdadeiras raízes. O concreto era o grande material da era da máquina, celebrado por seus projetistas e odiado por seus detratores devido às suas qualidades mecanistas, repetitivas e industriais. No entanto, a realidade sempre foi mais complexa, mais confusa e mais artesanal. E assim é seu reparo (Conserving..., 2020, 5min34s – 6min52s, tradução nossa).

Assim, muitas dessas obras necessitam ou necessitarão de reparos. No entanto, o conhecimento sobre o comportamento das estruturas no longo prazo ainda está em evolução e a conservação desses edifícios enfrenta diversos desafios, como a falta de reconhecimento do seu valor cultural e a necessidade de balancear requisitos de conservação com métodos padronizados de reparo.

As práticas de manutenção e conservação devem considerar as diferentes tipologias de fachadas e acabamentos e a adoção de estratégias adequadas a cada caso. É preciso que as intervenções retenham o significado da edificação por meio de princípios básicos fundamentados nas melhores práticas de reparo e conservação (MacDonald; Gonçalves, 2020, p.5).

2.1. O Brutalismo da Escola Paulista e o edifício da FAU-USP

O Brutalismo da Escola Paulista foi uma tendência arquitetônica e estética que permeou os trabalhos de arquitetos paulistas a partir da década de 1950, e tem como algumas de suas principais características, segundo Zein (2005):

- Preferência por volumes conformados em monobloco e horizontalidade;
- Vãos livres;
- Estruturas em concreto armado, algumas vezes protendido;
- Poucas aberturas nos elementos verticais;
- Iluminação zenital;
- Ênfase na austeridade e homogeneidade da solução arquitetônica;
- Ênfase na construtividade da obra, no didatismo e clareza da solução estrutural;
- Opção por superfícies em concreto armado ou em alvenaria de tijolos ou blocos de concreto aparentes, *valorizando a rugosidade da textura obtida por sua manufatura*;
- Sombreamento das aberturas laterais de iluminação por brises ou outros dispositivos, com frequente ausência de cor ou predominância da cor natural do concreto.

A **Figura 9** à **Figura 14** apresentam exemplares dessa escola⁴.

⁴ Ver lista de obras brutalistas em ZEIN (2005).

Figura 9 - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP, Vilanova Artigas e Carlos Cascaldi, 1969.



Fonte: Stankuns (2010).

Figura 10 - Tribunal de Contas do Município de São Paulo, Plínio Croce, Aflalo e Gasperini, 1976.



Fonte: Aflalo/Gasperini Arquitetos ([20--?]).

Figura 11 - Casa no Butantã, Paulo Mendes da Rocha e João de Gennaro, 1964.



Fonte: Kon (2014).

Figura 12 - Vestiários do São Paulo Futebol Clube, Artigas e Cascaldi, 1960.



Fonte: Cecco Jr ([20--?]).

Figura 13 - Sede do Anhembi Tênis Clube, Artigas e Cascaldi, 1961.



Fonte: Valente ([20--?]).

Figura 14 – Residência Dr. Celso Silveira Mello, Paulo Mendes da Rocha e João de Gennaro, 1962.



Fonte: Scarabello ([196-?]).

Uma das características mais marcantes do brutalismo paulista é a preferência por superfícies de concreto aparente marcadas pelas marcas dos moldes, revelando os materiais e o processo construtivo, o que também é conhecido como o princípio da *verdade dos materiais*.

Definir o Brutalismo não é uma tarefa fácil. Na arquitetura, de uma maneira geral, está ligado à expressão dos materiais utilizados em seu estado natural. O que se espera desta arquitetura é que, através de sua apreciação, seja possível identificar os materiais que concretizam o projeto arquitetônico através da edificação. A arquitetura brutalista demonstra os materiais utilizados e a técnica que permite sua execução. Interna e externamente procura distinguir vedação e estrutura, levando o uso de revestimentos a uma categoria de dissimulação. Não existe um critério seletivo do que deva ou não estar à vista e onde o rigor pode chegar à exposição das canalizações. O Brutalismo se caracteriza pela expressão dos materiais em detrimento de superfícies bem-acabadas, onde a ideia de beleza é associada à verdade construtiva. A edificação deve ser honesta, demonstrando seus materiais assim como a técnica construtiva adotada (Sanvitto, 2013, p.6).

O projeto do edifício Vilanova Artigas é um dos exemplares dessa escola: a edificação evidencia os princípios da continuidade espacial, o elogio das formas estruturais, a verdade dos materiais e o desenvolvimento das forças produtivas através da superação tecnológica (Contier, 2013). A verdade dos materiais é um dos princípios norteadores do projeto, segundo o qual deveriam ser explicitados os materiais e técnicas construtivas e deveria ser eliminado aquilo que fosse considerado supérfluo. A **Figura 15** ilustra as marcas espaçadas em 30 centímetros deixadas pelos moldes de madeira, conferindo à face externa das empenas rusticidade e constituindo-se em elementos de explicitação da técnica construtiva.

Figura 15 –A imagem ilustra a superfície da empena com as marcas dos moldes durante a realização de ensaios de verificação da taxa de corrosão nas armaduras da empena por equipe do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).



Fonte: Adaptado de Conserva FAU (2017).

Assim como no Brasil, obras internacionais da arquitetura moderna em concreto aparente produzidas ao longo do século XX procuraram explorar a flexibilidade e as formas não convencionais proporcionadas pelo material, explicitando

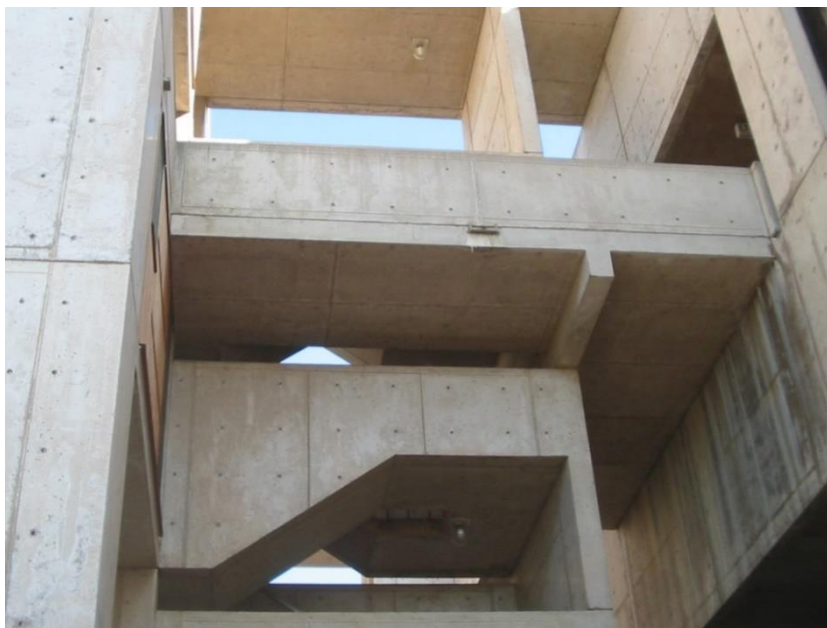
sua natureza por meio de diferentes acabamentos e texturas. Entre os exemplares internacionais cujas superfícies expressam importantes aspectos projetuais, estão o *Endo Pharmaceuticals Building* (**Figura 16**), de Paul Rudolph (1962); o *Salk Institute of Biological Studies* (**Figura 17**), de Louis Kahn (1965) e obras do arquiteto Bertrand Goldberg como o *Marina City* (**Figura 18**) e o *Raymond Hilliard Center* (**Figura 19**).

Figura 16 - Endo Pharmaceutical Building, Paul Rudolph. 1964 O arquiteto procurou deixar a superfície texturizada.



Fonte: Rudolph (1967).

Figura 17 - Salk Institute of Biological Studies, Louis Kahn, 1965. O arquiteto optou por uma superfície lisa e monolítica.



Fonte: Pang (2003).

Figura 18 - Marina City, Bertrand Goldberg, 1964.



Fonte: Sforza (2017).

Figura 19 - Raymond Hilliard Center, Bertrand Goldberg, 1966.



Fonte: Sforza (2017).

A explicitação da textura do material e das marcas dos moldes em muitas dessas obras foi uma opção projetual do arquiteto. Bertrand Goldberg afirmou que optou por uma superfície lisa no concreto do *Marina City*, enquanto nas torres do *Raymond Hilliard Center* preferiu superfícies texturizadas:

Nós podemos fazer um concreto muito melhor com as fôrmas mais lisas que nós tivermos. Então o que deveríamos fazer? É uma questão de descobrir um vocabulário que nos agrada. No momento nós usamos a textura porque não temos outra forma que nos agrada. Nós não precisamos de textura nas torres do Marina City devido à vivacidade do padrão das varandas, enquanto as paredes sólidas das torres do Raimond Hilliard Center demandavam alguma textura (Wesley e Klotz, 1973⁵, p.143 apud Sforza, 2017, p.57, tradução nossa).

Com o tempo, as edificações apresentaram necessidade de reparos devido a manifestações patológicas como fissuras, deslocamentos e corrosão das armaduras, mas nem sempre houve um consenso sobre como tratar as superfícies em concreto aparente das obras da arquitetura moderna. Como exemplo, na década de 1970, o concreto das torres do *Marina City* foi reparado com epóxi e coberto com um revestimento acrílico impermeabilizante que alterou sua cor de cinza para marrom claro, uma opção prioritariamente estética. Hoje parece haver um entendimento maior de que o aspecto original das superfícies deve ser preservado (Sforza, 2017).

Uma abordagem diferente pode ser observada nos reparos realizados no *Promontory Apartments Building (Figura 20)*, de Mies Van Der Rohe, na década de 1990. Nesse caso, houve a preocupação de que os trabalhos de reparo fossem compatíveis não só com relação ao desempenho como com a aparência dos materiais existentes. Nesse edifício, notou-se que reparos anteriores foram realizados sem essa preocupação, uma vez que a argamassa de reparo foi aplicada sobre a armadura corroída, sem que o concreto original no entorno desta fosse removido, ou seja, sem compatibilidade com o material original. Esses reparos eram visualmente perceptíveis ao nível da rua (Gaudette; Hunderman, 1997).

⁵ John Wesley and Heinrich Klotz, *Conversations with Architects* (New York: Praeger, 1973), 143.

Figura 20 - Promontory Apartments Building, Mies Van Der Rohe, 1949.



Fonte: Teemu008 (2010).

Durante as intervenções realizadas no edifício foram realizadas a revisão da documentação disponível, inspeções visuais e físicas e análise laboratorial dos materiais da edificação. Com o fim de aproximar ao máximo os materiais de reparo do concreto original, foram elaborados protótipos e testadas diversas misturas de argamassa, e optou-se por utilizar concreto ao invés de uma argamassa modificada com polímeros, que resultaria em trechos mais escuros e de menor compatibilidade com a superfície. Como proteção final, optou-se por um hidrofugante à base de silanos, uma vez que produtos formadores de filme podem alterar a permeabilidade

ao vapor de água⁶, a textura, a refletância e o aspecto geral do substrato (Gaudette; Hunderman, 1997).

São vários os fatores que levam às manifestações patológicas comumente observadas nos edifícios modernos em concreto aparente, entre eles estão fatores locais, como a umidade relativa, a exposição das superfícies à chuva e a íons cloreto presentes no aerossol marinho ou em sais de degelo. Outros fatores são associados às especificações de projeto, aspectos construtivos, despreparo da mão de obra e podem resultar de gestão inadequada da obra. Em muitos casos, revelam o desconhecimento do comportamento do material a longo prazo à época da construção.

Entre as especificações de projeto à época, destacam-se a pequena espessura de cobrimento das armaduras, a textura da superfície marcada pela madeira das fôrmas no seu estado bruto; elementos esbeltos com geometrias complexas e ausência de proteções superficiais. Das características do processo construtivo destacam-se a dificuldade de moldagem de estruturas de concreto aparente e a adoção de espaçadores rudimentares e em pequena quantidade. A resistência do concreto quando comparada com valores atualmente adotados também era geralmente mais baixa, e não havia aditivos plastificantes ou fluidificantes que pudessem reduzir a relação água/cimento. Disso decorrem problemas como a maior porosidade, presença de irregularidades e descontinuidades na superfície do concreto, além de alterações nas disposições construtivas da armadura (Oliveira et al., 2020, p.64).

Uma das principais causas das manifestações patológicas observadas em edifícios modernos é a espessura pequena e irregular do cobrimento das armaduras, algo típico de grande parte das obras modernas em concreto aparente. À época da construção dessas obras não havia técnica adequada para materializar a expressão plástica que os autores desejavam e ainda não era totalmente conhecido o impacto da pequena espessura de cobrimento na durabilidade do concreto estrutural. Isso fica evidente quando da comparação entre as especificações da norma NB1 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1960) e da norma NBR 6118 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014, p.20). A **Tabela 1** e **Tabela 2** apresentam recomendações quanto ao cobrimento da armadura segundo as normas NB1 e NBR 6118, respectivamente.

⁶ Como descrito em Baroghel-Bouny (2007), a permeabilidade ao vapor de água de materiais porosos a uma determinada temperatura é uma propriedade usada no campo da construção para descrever o comportamento higrotérmico de elementos construtivos ou para avaliar a suscetibilidade de condensação de água no interior desses elementos construtivos.

Tabela 1 – Recomendações quanto ao cobrimento da armadura segundo a norma NB1: Cálculo e execução de obras de concreto armado (1960)

Todas as barras da armadura, principal ou não, devem ter cobrimento de concreto nunca menor do que:

- ▶ Em lajes e paredes no interior dos edifícios..... 1 cm
- ▶ Em lajes e paredes ao ar livre..... 1,5 cm
- ▶ Em vigas, pilares e arcos no interior dos edifícios..... 1,5 cm
- ▶ Em vigas, pilares e arcos ao ar livre..... 2 cm
- ▶ Em peças em contato com o solo..... 2 cm

Neste último caso exige-se, junto à armadura calculada para resistir a esforços de tração, se o solo não for rochoso, a interposição de uma camada de concreto simples, não computada no cálculo, com espessura mínima de 5cm.

Em lajes no interior dos edifícios, permite-se que 0,5cm do cobrimento exigido seja feito com emboço

Medidas especiais: medidas especiais de proteção devem ser tomadas sempre que elementos da estrutura se achem expostos à ação prejudicial de agentes externos, tais como ácidos, álcalis, águas agressivas, óleos e gases nocivos, altas e baixas temperaturas.

Os coeficientes de segurança deverão, nesses casos, ser multiplicados por 1,2 (ou as tensões admissíveis reduzidas na mesma proporção, se se fizer o cálculo pelo estágio II)

Fonte: Vanessa de Moraes (2023), com base em Associação Brasileira de Normas Técnicas (1960).

Tabela 2 - Recomendações quanto ao cobrimento da armadura segundo a norma NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – procedimento (2014).

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1 da norma)			
		I	II	III	IV ⁴
		Cobrimento nominal (mm) ¹			
Concreto armado	Laje ³	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
Concreto protendido ²	Todos	30	35	45	55

¹O cobrimento nominal corresponde à soma do cobrimento mínimo com o valor de Δc , que corresponde à *tolerância de execução*, que nesta tabela tem o valor de 10mm.

²Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

³Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

⁴Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: Vanessa de Moraes (2023), com base em Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014).

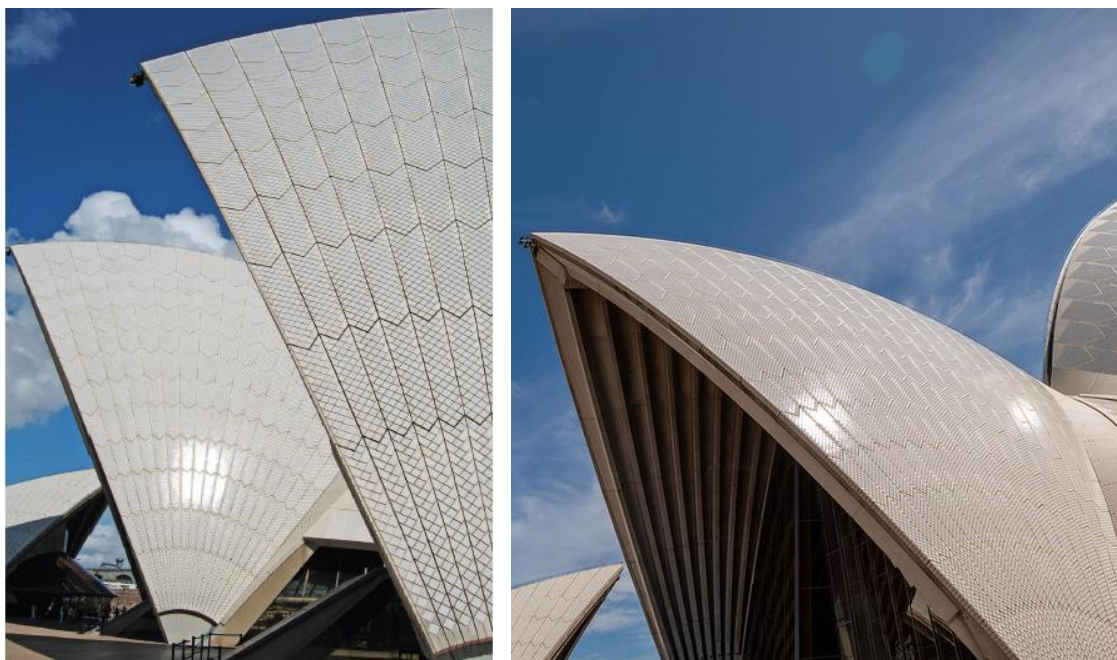
Entre as alterações, nota-se que a norma mais recente incluiu as classes de agressividade que devem ser consideradas quando da especificação das espessuras de cobrimento das armaduras, que apresentam valores superiores aos mínimos recomendados na primeira norma. A norma ABNT NBR 6118 considera que para que seja garantido o cobrimento mínimo (c_{\min}), o projeto e a execução devem considerar o comprimento nominal (c_{nom}), que equivale ao cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução (Δc).

Os aspectos construtivos e princípios norteadores dos projetos de edificações da arquitetura moderna devem ser considerados quando da proposição de um material e/ou sistema de proteção superficial das empenas. Para além de aspectos de desempenho e durabilidade, é preciso avaliar previamente como a aplicação de diferentes materiais pode impactar o significado dos elementos da edificação como patrimônio cultural e a aparência final das superfícies.

Restaurar as superfícies de concreto aparente de um edifício histórico pode constituir-se em uma atividade praticamente artesanal. Isso porque não se limita à reposição de trechos destacados e à proteção da superfície do material. Além de garantir a compatibilidade estética, é preciso considerar que em muitos projetos o arquiteto propositadamente determina texturas superficiais específicas, por diversas razões, como proporcionar dinamismo a uma superfície monótona, por exemplo. A **Figura 21** à **Figura 25** ilustram diferentes acabamentos em superfícies de concreto. A **Figura 26** ilustra um exemplo de martelo texturizador.

Na Ópera de Sydney, mesmo que as conchas estejam revestidas com componentes cerâmicos (**Figura 21**), existem áreas em concreto aparente nesses elementos suscetíveis às condições ambientais. Assim, a depender do caso, a manutenção e a conservação de estruturas de concreto podem ser bastante complexas.

Figura 21 - Revestimento da superfície de concreto com componentes cerâmicos na ópera de Sydney e interior em concreto aparente, Jørn Utzon, Sydney, Austrália, 1973.



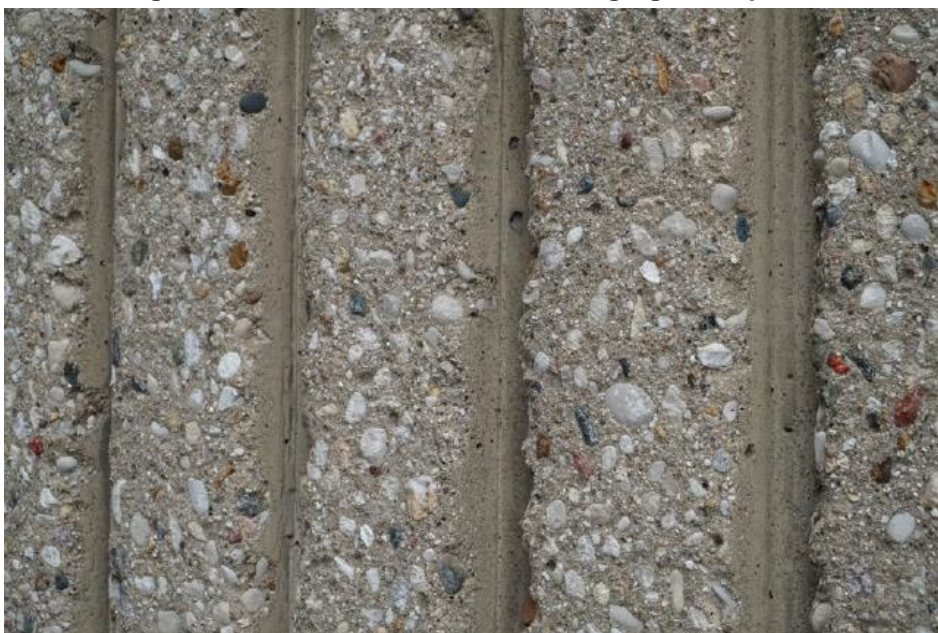
Fonte: O'Beirne (2006) apud MacDonald e Gonçalves (2020, p.10) e Edwardhblake (2022).

Figura 22 - Superfície modificada com martelo texturizador (*bush hammer*), Barbican Center, Chamberlin, Powell & Bon, Londres, Reino Unido, 1976.



Fonte: Gonçalves (2019) apud MacDonald e Gonçalves (2020, p.10).

Figura 23 - Concreto nervurado com agregado exposto.



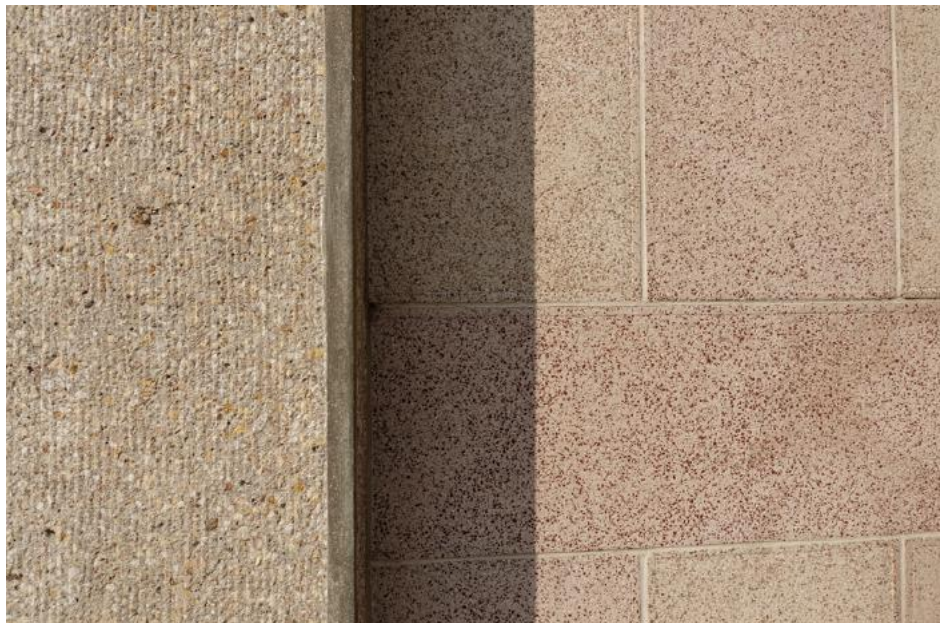
Fonte: Gonçalves (2019) apud MacDonald e Gonçalves (2020, p.10).

Figura 24 - Concreto marcado por fôrmas.



Fonte: Gonçalves (2019) apud MacDonald e Gonçalves (2020, p.10).

Figura 25 - Superfície de concreto imitando a textura da pedra. Palais d'Iéna, Auguste Perret, Paris, França, 1937-46.



Fonte: Gonçalves (2018) apud MacDonald e Gonçalves (2020, p.10).

Figura 26 – Exemplo de martelo texturizador de pedras e concretos (*bush hammer*).



Fonte: Flassig (2007).

2.2. A conservação das empenas da FAUUSP

Estruturas de concreto armado estão sujeitas a diversos danos estruturais relacionados ao ingresso de água: corrosão das armaduras devido à ação combinada com cloretos ou a carbonatação do concreto; fissuras resultantes de expansão e retração do material; danos devidos ao congelamento e descongelamento da água presente no interior do material; aparecimento de sais e eflorescências; lixiviação da pasta de cimento; manchas de produtos da corrosão das armaduras; acúmulo de sujeira, manchas e crescimento biológico como fungos, musgos, líquens e algas (Wacker, [20--b?]).

Ao longo dos anos a cobertura e as empenas do edifício Vilanova Artigas foram afetadas por problemas diretamente relacionados à infiltração de água e gás carbônico no concreto e ao envelhecimento do sistema de impermeabilização da cobertura. A pequena espessura do recobrimento das armaduras na face externa das empenas resultou no avanço da frente de carbonatação até sua posição, mais notadamente das armaduras de controle de fissuração. A carbonatação (**Figura 27**), que leva à despassivação do aço, combinada com a penetração de água por falta de proteção favoreceu o surgimento de manifestações patológicas típicas do concreto armado, como a corrosão de armaduras (**Figura 28** e **Figura 29**) e os consequentes destacamentos de material.

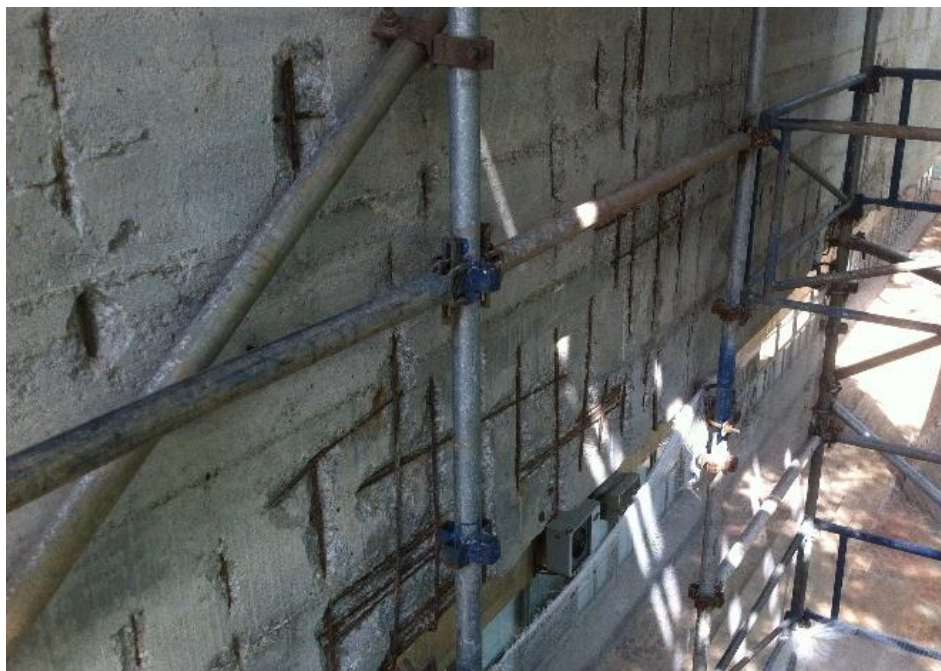
A **Figura 27** ilustra trechos carbonatados e a armadura corroída na empena nordeste, problemas que provavelmente ocorrem em outras partes da fachada (Oliveira et al. 2017). Após a aspersão de solução de fenolftaleína, a coloração rosa indicou as regiões não carbonatadas, enquanto a região carbonatada não apresentou alteração de cor. A profundidade de carbonatação na argamassa de reparo variou de 15 a 25mm, revelando que o trecho escarificado estava quase totalmente carbonatado. Foi verificado que a armadura não estava envolvida pela argamassa de reparo, apresentava indícios de corrosão e seu entorno estava carbonatado. A umidade superficial medida foi de 4,5% e a corrente de corrosão medida com o equipamento COrrMap foi de 0,9 a 2,3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Figura 27 – Armadura corroída na empena nordeste. Imagem à esquerda mostra evidência de produto de corrosão (coloração alaranjada) sobre barra de aço, inclusive na interface com o concreto carbonatado. Imagem à direita é uma ampliação, evidenciando parte das barras envolvidas por argamassa de reparo que foi fraturada para inspeção da armadura. Parte da argamassa de reparo não está carbonatada (indicada pela área com alteração de cor após aspersão de solução de fenolftaleína).



Fonte: Claudia Oliveira (2007).

Figura 28 – Armaduras de pele corroídas expostas durante intervenção de reparo nas empenas.



Fonte: Claudia Oliveira (2009).

Figura 29 - Armaduras corroídas em uma viga de cobertura.

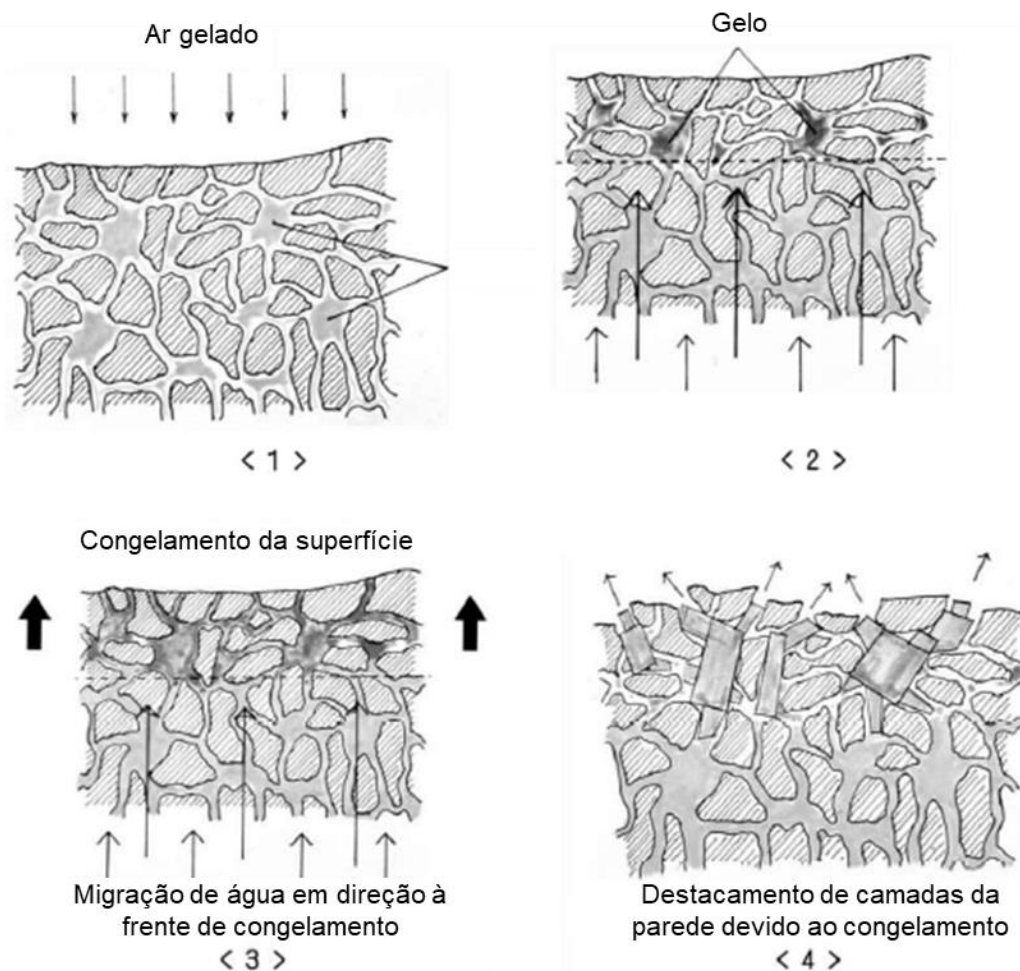


Fonte: Claudia Oliveira (2009).

Além dos reparos localizados, é necessário que seja feita uma análise sistêmica do edifício, identificando e eliminando todas as possíveis fontes de umidade quando da execução de um tratamento superficial. Assim, por exemplo, não basta que uma parede seja protegida da chuva em sua superfície externa, é necessário que seja verificado se a água pode ingressar de outras formas, como ascensão capilar a partir do solo ou a infiltrações provenientes da cobertura.

Como exemplo, os pesquisadores Nishiura, Murakami e Fukuda (2017) relatam uma intervenção em edifício histórico de pedra no Japão que teve superfícies externas protegidas com hidrofugante. Dois anos após a impregnação hidrofóbica, camadas da parede se destacaram devido a presença de água congelada em seu interior. Embora as paredes estivessem impregnadas, a água penetrou por meio de partes não tratadas de elementos do telhado e, em contato com o ar gelado da superfície exterior, congelou e expandiu, causando os deslocamentos (**Figura 30**).

Figura 30 - Mecanismo de congelamento da parede e destacamento de camadas devido ao ingresso de água por meio de partes não tratadas de elementos do telhado.



Fonte: Nishiura, Murakami e Fukuda (2017).

Situação similar foi identificada no perímetro do edifício Vilanova Artigas. A falta de proteção no topo das empenas e das vigas de cobertura facilitou a penetração da água da chuva no concreto, aumentando o teor de umidade no material (**Figura 31**). Esse foi um dos fatores que contribuiu para a lixiviação da pasta de cimento e o agravamento da corrosão das armaduras.

Figura 31 - Vigas de cobertura antes da instalação dos rufos.



Fonte: Claudia Oliveira (2007).

Em 2010, foram instalados rufos de chapa de alumínio no topo das empenas e todas as vigas invertidas da cobertura do edifício Vilanova Artigas. Entre os anos de 2013 e 2014, a solução de proteção se estendeu às faces laterais das vigas (**Figura 32**), por onde a água também poderia ingressar: as superfícies foram revestidas com uma proteção contínua de poliureia, o mesmo material usado na impermeabilização da laje de cobertura (informação verbal).⁷

Figura 32 - Vigas de cobertura com rufo e poliureia.



Fonte: Claudia Oliveira (2015).

⁷ Informação fornecida pela Profa. Dra. Claudia Oliveira da FAUUSP, que participou das obras.

As intervenções realizadas entre novembro de 2012 e abril de 2015 objetivaram sanar as manifestações patológicas identificadas e foram executadas por uma empresa sem tradição na conservação de bens tombados. Dessa forma, embora tenham sido bem-sucedidas do ponto de vista estrutural e da segurança dos usuários, não houve atendimento aos requisitos estéticos de um patrimônio histórico.

Destaca-se que a obra foi realizada em um momento crítico, uma vez que muitos trechos do concreto armado estavam se desprendendo da superfície externa das empenas, expondo os usuários do edifício ao risco de ferimentos e expondo parte da estrutura do edifício a novos ciclos de deterioração. O resultado das intervenções respondeu satisfatoriamente ao objetivo de restituir os níveis aceitáveis dos requisitos de segurança ao uso e segurança estrutural, no entanto, não atendeu aos requisitos estéticos de um edifício tombado (Oliveira et al.,2017, p.233).

Um dos problemas apresentados após as intervenções foi a criação de uma imagem fragmentada do edifício:

Um dos problemas que emerge da última intervenção, que merece especial atenção, é o dos reparos feitos nas empenas que, além de questões de desempenho e adequação – marcas de corrosão da armadura metálica já aparecem na superfície – criou também uma imagem do edifício fragmentada. As empenas da FAU, mesmo sendo brutalistas, deixando explícitas as marcas do processo construtivo que lhes deu origem, sempre ofereceram uma imagem unitária e coerente do edifício, algo que se perdeu na última obra (Kühl et al., 2017, p. 11).

A **Figura 33** ilustra a diferença entre a superfície do concreto original, sem reparos e a superfície com argamassa reparo, relativamente à textura e à tonalidade.

Figura 33 – Comparação entre superfície de concreto original e sem reparo (esquerda) e superfície com reparo (direita).



Fonte: Equipe Conserva FAU (2016).

Segundo Castro e Oliveira (2017), a utilização de uma única formulação de argamassa de reparo industrializada nos 2.934 m² das empenas do edifício foi uma das causas de incompatibilidade entre os acabamentos e o concreto original. A técnica utilizada desconsidera a heterogeneidade do material, que é causada pelas diferentes etapas de concretagem e pelo próprio envelhecimento da edificação. O brilho e a textura lisa da argamassa industrializada aplicada - bem como o formato dos reparos – evidenciam a inadequação estética dos materiais e técnicas empregados.

De acordo com Castro et al. (2016) a aplicação de argamassa de reparo com espessura superior à estipulada pelo fabricante, a utilização de adesivos acrílicos, e inversões na ordem das tarefas são condições de execução que comprometeram técnica e esteticamente a superfície das empenas. Além disso, a escassez de documentos e o desconhecimento das técnicas e dos materiais construtivos à época da construção da edificação dificultaram a caracterização e o desenvolvimento de soluções compatíveis com o material original e a definição de métodos de intervenção adequados para a sua recuperação.

No campo específico e técnico da conservação do concreto na arquitetura do século XX [...] é comum a falta de informações detalhadas sobre as propriedades do concreto de edifícios a serem restaurados. Não era comum, à época de sua construção, o registro das especificações e procedimentos adotados de forma detalhada ou ainda a elaboração de *as built* (Castro, 2018, p.31).

O memorial de licitação previa a aplicação de hidrofugante à base de silano e siloxano diluído em solvente e posterior aplicação de verniz acrílico puro, sem estireno. O hidrofugante foi aplicado (**Figura 34**), porém houve conflitos na ordem de execução das atividades, pois era prevista uma etapa de tratamento da superfície prévia para atenuar a variação cromática dos reparos anteriores, etapa esta que não foi realizada em parte das empenas (informação verbal).⁸

A decisão de não aplicar verniz acrílico nas empenas foi tomada pela direção da FAUUSP a partir de recomendações de professores da faculdade. Essa recomendação foi baseada na evidente alteração da aparência das empenas com a formação de um filme contínuo. A falta de estudos aprofundados sobre o método de aplicação do verniz nas superfícies em questão (com fissuras e irregularidades de superfície) e as implicações, ainda desconhecidas, na manutenção (frequência e custo de reaplicação do verniz) também

⁸ Informação fornecida pela Profa. Dra. Claudia Oliveira da FAUUSP.

contribuíram para esta decisão naquele momento (Oliveira et al., 2017, p. 236).

Figura 34 – Teste realizado na empena nordeste em área impregnada com hidrofugante à base de silano e siloxano indica que a superfície não é umedecida.



Fonte: Claudia Oliveira (2013).

Embora o hidrofugante tenha sido aplicado, observou-se que alguns trechos das empenas absorviam água após a ação das chuvas, o que indica que o produto não apresentou o desempenho esperado. A concentração de umidade na superfície da empena foi maior em regiões próximas às árvores. A **Figura 35** à **Figura 39** ilustram esses efeitos.

A **Figura 36** ilustra o espectro de radiação infravermelha emitida pela superfície da empena no mesmo local ilustrado na **Figura 35**. A coloração púrpura está associada à área com maior teor de umidade em comparação à área adjacente. Embora a superfície do concreto - após 48h de cessada a chuva - não apresentasse sinais de umidade detectáveis na inspeção visual sem instrumentos, a utilização da câmera que capta a radiação infravermelha possibilitou essa identificação.

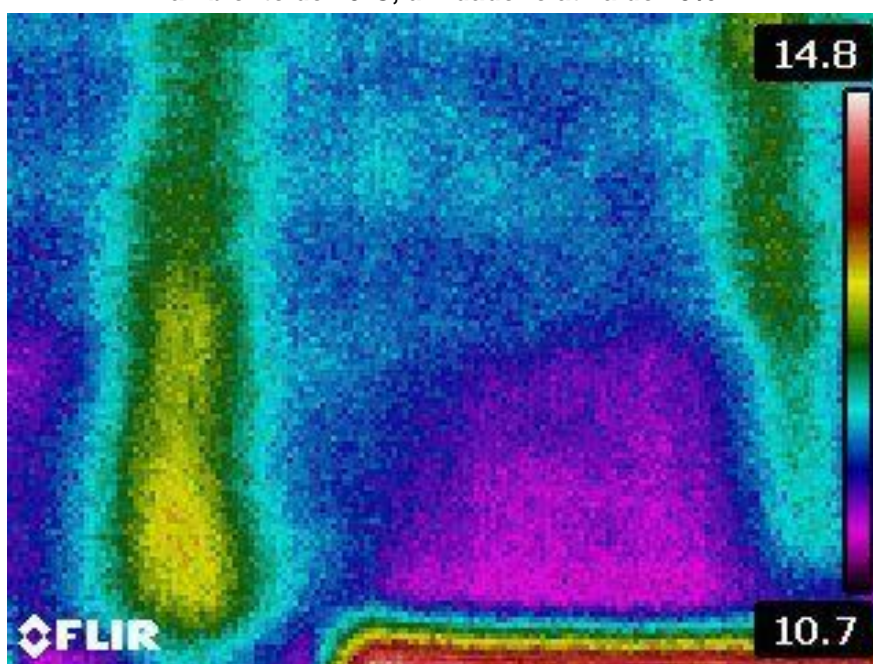
Os registros sugerem que o hidrofugante não limitou a entrada de água da chuva na superfície do concreto e que vestígios de umidade superficial propiciada pela chuva de moderada intensidade, ao menos em alguns pontos, persistiu por mais de 48 horas. No termoimagem, a cor verde na região à esquerda representa a junta de dilatação da empena preenchida com material polimérico e por isso não mostra sinais de umidade. A cor verde à direita sugere a existência de uma região também menos suscetível ao umedecimento, provavelmente devido à ação do hidrofugante (Oliveira et al., 2017).

Figura 35 - Fachada sudoeste com mancha de umidade logo acima do canto superior direito do pilar. Imagem foi registrada no dia 19/05/2017, após precipitação de moderada intensidade, porém com 8 horas de duração.



Fonte: Claudia Oliveira (2017).

Figura 36 – Termoimagem registrada entre 10h e 11h no dia 10/06/2017 na empena sudoeste em superfície não sombreada, após 36 horas de chuva de intensidade moderada. Temperatura ambiente de 20°C, umidade relativa de 70%.



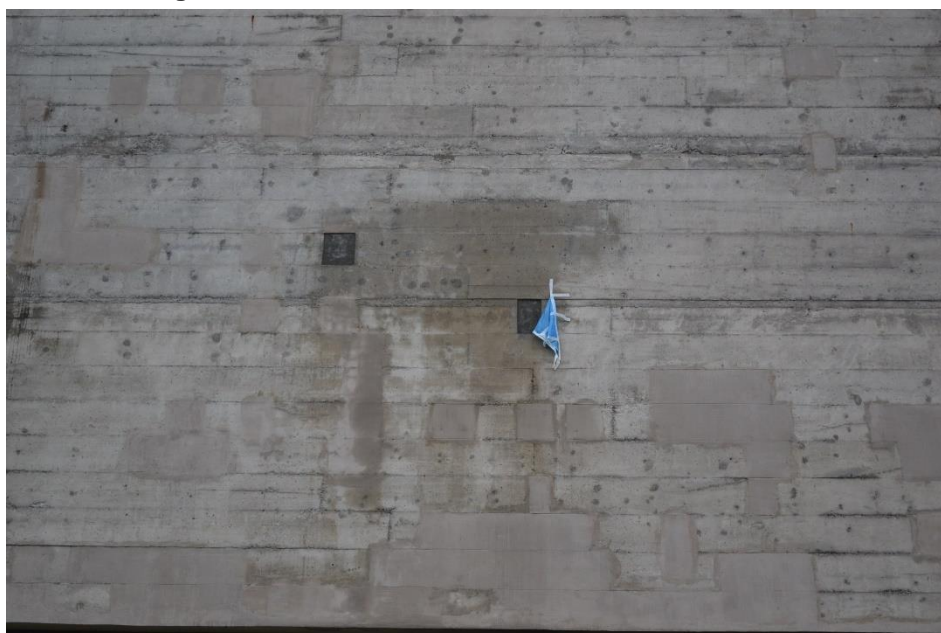
Fonte: Claudia Oliveira (2017).

Figura 37 - Mancha de umidade à direita na fachada sudeste.



Fonte: Claudia Oliveira (2017).

Figura 38 - Mancha de umidade na fachada sudeste.



Fonte: Claudia Oliveira (2017).

Figura 39 - Mancha de umidade próxima aos galhos de árvore na fachada nordeste.



Fonte: Claudia Oliveira (2017).

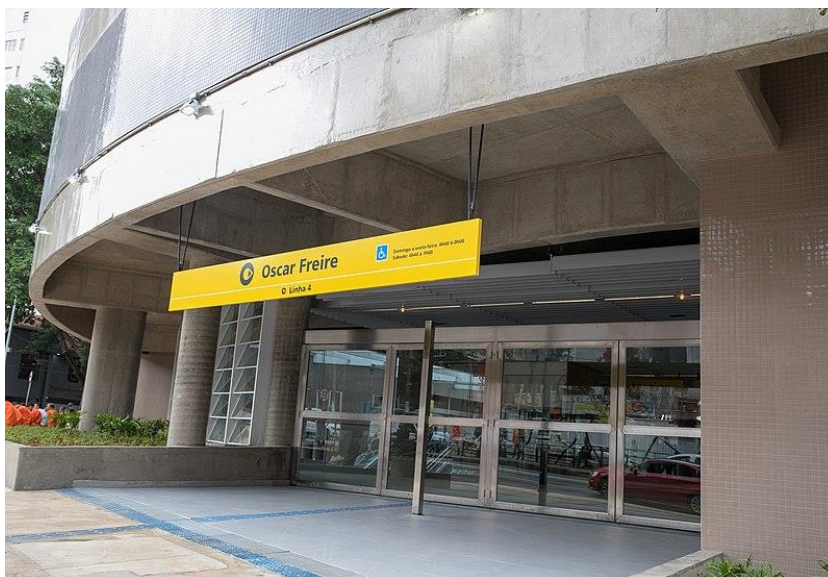
De acordo com experimentos feitos por Castro (2018), produtos que formam película alteram a percepção visual da superfície, não somente por seu brilho associado aos vernizes como pelo risco de escurecimento das áreas em que são aplicados. Isso foi constatado por meio de dados objetivos da percepção da cor, obtidos com colorímetro tristímulo, comparando superfícies sem e com aplicação de hidrofugante e verniz fosco. O trabalho de Castro (2018) aponta ainda que a eficácia da película formada pelo verniz depende de um preparo prévio que garanta uma superfície contínua, o que dificilmente seria viável sem estucamento, conforme indica o trecho a seguir:

[...] a eficácia da película na proteção do concreto depende do sistema especificado para a aplicação, que, normalmente, requer o preparo da superfície com o uso de produtos de impregnação que colmatam fissuras superficiais. Caso contrário, a proteção de superfície não resultará em película contínua, anulando os benefícios esperados no controle do ingresso de agentes nocivos ao concreto armado. Quando o sistema não é especificado ou aplicado corretamente, a consequente descontinuidade da película ainda pode acentuar as diferenças na aparência da cor, pelo umedecimento de áreas mais permeáveis à chuva, em contraste com as áreas protegidas do ingresso da água (Castro, 2018, p. 58).

A princípio, pode-se considerar que em edificações com estrutura de concreto armado aparente a solução de proteção com estucamento recoberto com verniz – solução que altera significativamente a aparência das superfícies – teria menor

impacto. Tais obras usualmente não exploram a textura superficial do material com fins estéticos e arquitetônicos e tampouco costumam apresentar como requisito a conservação de valores históricos e patrimoniais de um edifício tombado; são obras de engenharia para as quais a proteção da superfície tem o objetivo principal de impedir a penetração de água no concreto, e, por consequência, diminuir o risco da ocorrência de mecanismos de degradação da estrutura. A **Figura 40** e **Figura 41** ilustram exemplos desse tipo edificação.

Figura 40 – Inauguração da Estação Oscar Freire.



Fonte: Governo do Estado de São Paulo (2018).

Figura 41 - Concreto aparente com proteção superficial.



Fonte: Chaves (2016, p.14).

Cabe destacar que mesmo nesses casos a utilização de produtos formadores de película pode ser prejudicial, uma vez que qualquer fissura ou rompimento pode comprometer o sistema de proteção, facilitando o ingresso e o acúmulo de umidade e agravando a deterioração da estrutura. Em edificações da arquitetura moderna de interesse histórico do século XX, como o edifício Vilanova Artigas, a solução com estucamento e aplicação de verniz não é recomendada porque requer alteração significativa de características superficiais da edificação e pode comprometer ou descaracterizar sua proposta e significado arquitetônicos originais.

Nesse contexto, os hidrofugantes despontam como uma alternativa viável de proteção superficial para o edifício estudado. De acordo com Wacker ([20—b?]), o reparo de estruturas de concreto pode ser até dez vezes mais caro que a manutenção preventiva com impregnação hidrofóbica. Assim, além de proporcionar maior durabilidade dos elementos da edificação, o uso do hidrofugante pode reduzir os custos associados à sua conservação.

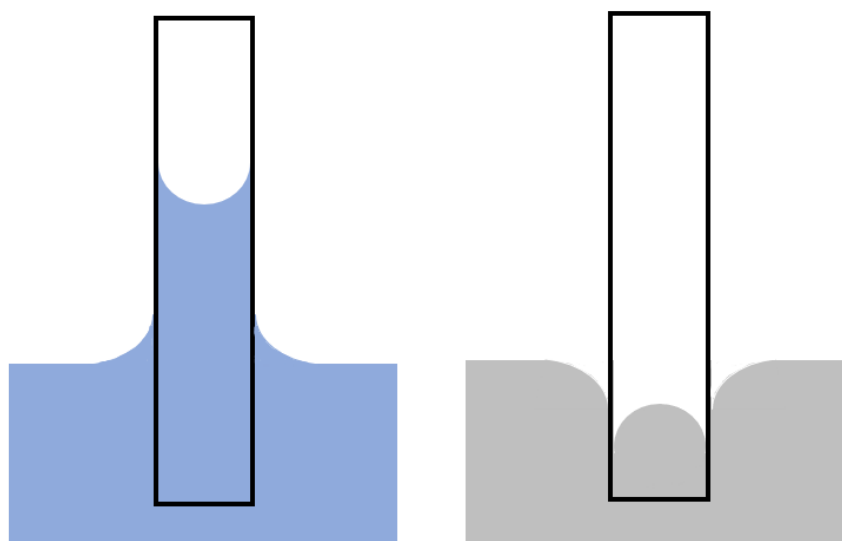
Este capítulo procurou contextualizar e retratar a edificação de forma sistêmica, apontando aspectos culturais e programáticos que foram definidores do projeto. Os critérios e requisitos para o reparo e conservação do patrimônio histórico em concreto armado devem diferir daqueles considerados para obras de infraestrutura e engenharia, uma vez que é preciso preservar a intenção dos projetistas e as próprias características da edificação como testemunho da expressão cultural, estética e artística visada. Em particular, isso significa muitas vezes preservar a textura, a cromaticidade e a tonalidade da superfície e não apenas limitar-se à realização de reparos para garantir a sobrevivência do edifício.

3. O CONCEITO DE ABSORÇÃO CAPILAR E O EFEITO DA CHUVA DIRIGIDA EM SUPERFÍCIES POROSAS

O fenômeno da absorção capilar é comumente descrito como a ascensão de um líquido dentro de um tubo devido às diferenças entre a tensão superficial do líquido (forças coesivas) e as forças de atração molecular entre o líquido e a superfície do tubo (forças adesivas). Nessas circunstâncias, as tensões de coesão do líquido são menores do que a tensão que o atrai à superfície, o que explica esse comportamento. A absorção capilar ocorre independente das forças da gravidade, ou seja, pode ocorrer no mesmo sentido ou não.

Quando as forças de adesão são grandes, como as ligações de hidrogênio ou dipolo-dipolo entre a água e o vidro, a tendência é que ocorra ascensão capilar. Caso o líquido seja mercúrio, as ligações entre os átomos do mercúrio são metálicas, a interação com as superfícies do vidro ocorrerá por forças de Van der Waals e ocorrerá depressão capilar (**Figura 42**). Superfícies compostas por moléculas polares apresentam alta energia superficial e são hidrofílicas, enquanto superfícies compostas por moléculas apolares apresentam baixa energia superficial e são hidrofóbicas (Petri, 2021).

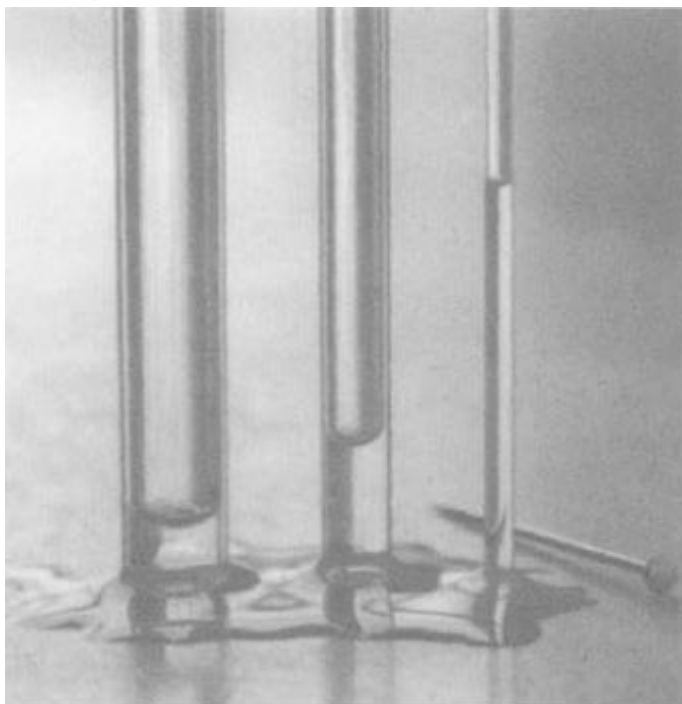
Figura 42 – Representação esquemática da ascensão capilar (esquerda) com água e depressão capilar (direita) com mercúrio.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

De acordo com Petri (2021), “a capilaridade é a tendência de líquidos subirem (ou descerem) em tubos finos capilares, resultante do balanço entre o trabalho de adesão e coesão e da diferença de pressão entre os dois lados da superfície curva”. A tendência de absorção de água por capilaridade por um material é denominada sortividade. A superfície curva é designada como menisco e quanto menor for o raio do capilar, maior será a diferença de pressão entre o lado côncavo e o lado convexo e maior será a curvatura do menisco, o que fará com que aumente a ascensão dentro do tubo. Capilares mais finos absorvem água em maior profundidade (**Figura 43**).

Figura 43 – Ilustração esquemática da influência do raio na ascensão capilar.



Fonte: Gennes, Brochard-Wyart, Quéré (2004).

Na construção civil, a absorção capilar ocorre quando líquido adentra em substratos verticais ou horizontais de materiais inorgânicos porosos como pedras, cerâmicas, argamassas e concretos por meio de sua estrutura de poros capilares. Esses materiais são hidrofílicos e quando utilizados em elementos da edificação podem apresentar problemas como umidade ascendente (**Figura 44 à Figura 46**), manchas, eflorescências, formação de biofilmes e fissurações.

Figura 44 - Ascensão capilar em um tijolo.



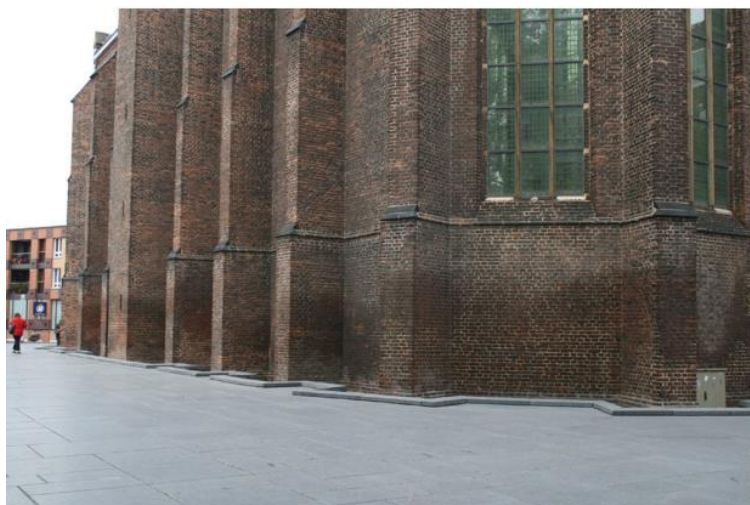
Fonte: Hankwang (2011).

Figura 45 - Ascensão capilar na base de uma parede.



Fonte: Buildingscience (2021).

Figura 46 - Capela Mariënburghkapel, Nijmegen, na Holanda.



Fonte: Lubelli, Van Hees e Bolhuis (2018).

Por um lado, a hidrofobicidade ou hidrofiliçidade estão associadas à facilidade com que a água adere à superfície dos poros e tem relação com a natureza do material. Por outro lado, a estrutura, a geometria e a disposição dos poros desempenham um papel importante nos processos de absorção capilar. Como exemplo, em poros mais finos a água pode se conectar de uma superfície à superfície oposta do poro com maior facilidade. A sucção capilar pode ser cessada caso o espaço entre os poros seja interrompido ou se torne muito grande. Em algumas situações, em elementos da edificação como paredes é possível utilizar técnicas para interromper a absorção capilar, como membranas de plástico, vazios entre a parede externa e interna e materiais mais porosos (Little, Ferraro e Arregi, 2015). Essas técnicas não se aplicam ao edifício estudo de caso deste trabalho.

Segundo Mohammad (2018, p. 486), a absorção por capilaridade depende da estrutura dos poros e de sua interconectividade na pasta de cimento, e em teoria, quanto menor o seu diâmetro, maior a sucção, de modo que a redução do tamanho dos poros do concreto por meio da redução da relação água/cimento não necessariamente proporciona menor absorção. A interconectividade entre os poros, por exemplo, é um fator que pode favorecer a absorção de água.

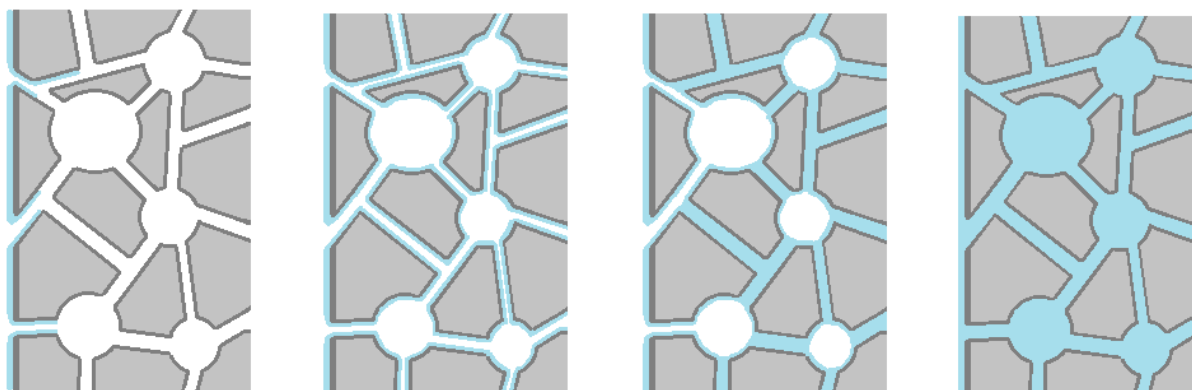
A diminuição do conteúdo livre de água na mistura reduz o tamanho e a continuidade dos poros capilares, o que pode ser alcançado com aditivos redutores de água. A redução da capilaridade por si só não necessariamente reduz a absorção pela superfície e pode inclusive aumentar uma vez que a sucção capilar aumenta com a diminuição do diâmetro dos poros. A

permeabilidade⁹ do concreto à água é reduzida devido à maior descontinuidade capilar (Dransfield, 2003, p. 4/25, tradução nossa).

Experimentos realizados por Wang et al. (2022) indicaram que com o aumento na reação água/cimento (a/c) e o conseqüente aumento da porosidade do material e da *interconectividade* entre os poros, mais rápida é a absorção de água durante o período inicial da absorção. De acordo com Bertolini et al. (2004), embora em teoria a ação capilar seja mais intensa com a diminuição do tamanho dos poros, o transporte de água será mais lento devido ao aumento da fricção; em geral concretos mais porosos absorvem maior quantidade de água e em maior velocidade que concretos mais densos.

De acordo com Bertolini et al. (2004), a água contida nos poros capilares consiste na maior parte da água do concreto, sendo a principal influência na corrosão das armaduras, e a absorção por capilaridade é influenciada por fatores como: tensão superficial, viscosidade, densidade do líquido e ângulo de contato com as paredes dos capilares. A princípio, a umidade é adsorvida na superfície, e depois, com o aumento da umidade relativa, a água condensa e preenche os poros, iniciando pelos menores e se movendo para aqueles de maior dimensão (**Figura 47**).

Figura 47 - Representação esquemática da absorção capilar na superfície do concreto. Após adentrar nos poros da superfície, a água é adsorvida na superfície dos capilares, em seguida preenche os capilares menores e por último preenche os capilares maiores.

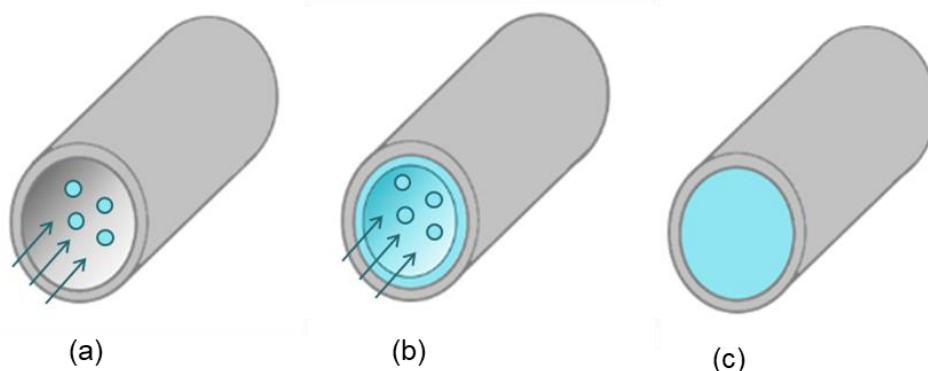


Fonte: Vanessa de Moraes (2023).

⁹ Em Claisse (2014, p. 3), permeabilidade é definida como a propriedade do concreto que mede a rapidez com que um fluido se desloca no meio submetido a um gradiente de pressão estabelecida, por exemplo, pela água atuando em estruturas como barragens e túneis. Claisse (2014) pontua que, em literatura o termo permeabilidade é utilizado para designar, genericamente o deslocamento do fluido (comumente água), sem considerar as condições específicas que determinam a sua penetração e o seu transporte no concreto. Nesta dissertação, o termo “permeabilidade” foi mantido quando usado pelos autores das obras tomadas como referência para a pesquisa.

O concreto pode absorver substâncias gasosas e líquidas por outros processos como permeação (devido a diferenças de pressão), difusão (devido a diferenças de concentração) e migração (devido a diferenças de potencial elétrico) (Bertolini et al, 2004). Três mecanismos de transporte de umidade são observáveis em materiais porosos: difusão de vapor, difusão superficial e transporte capilar (**Figura 48**), sendo este último o predominante. Quanto maior a umidade, maior a tendência de transporte capilar e menor a pressão de vapor.

Figura 48 – Mecanismos predominantes de transporte de umidade em materiais porosos. (a) difusão de vapor, (b) difusão superficial (com difusão de vapor) e (c) transporte capilar.



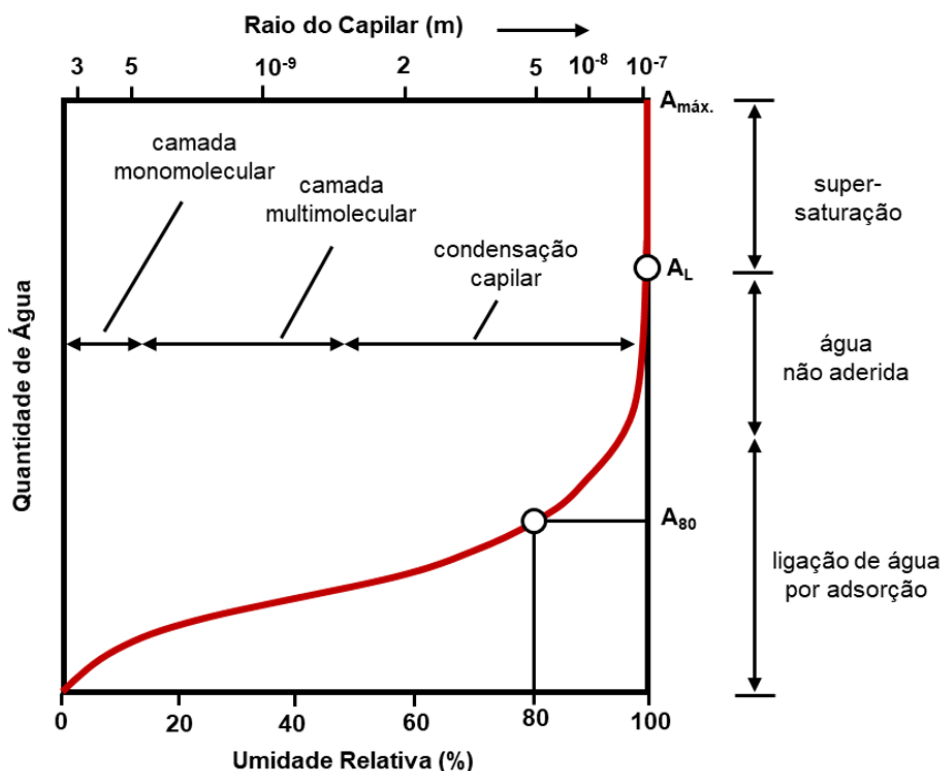
Fonte: Vanessa de Moraes (2023).

A difusão de vapor consiste no movimento de moléculas de água na forma gasosa; tais moléculas, ao entrar em contato com a superfície dos poros por adsorção podem passar de vapor para líquido devido às forças de atração com o material (e não por influência da temperatura como ocorre na condensação). Isso só é possível ocorrer se o material for hidrofílico e é favorecido quanto maior for a umidade relativa. Em quantidade suficiente, as moléculas de água podem formar um filme e proporcionar a difusão superficial, em que a água se move de regiões úmidas para regiões secas (Little, Ferraro e Arregi, 2015). A relação da difusão superficial e da difusão de vapor com a atuação dos hidrofugantes requer estudos e ensaios.

A **Figura 49** ilustra a curva de armazenamento de umidade (*moisture storage function*), um gráfico que correlaciona a quantidade de umidade presente nos poros com seu raio em diferentes condições de umidade relativa, indicando o mecanismo de transporte prevalente. A curva de armazenamento de umidade ilustra, para cada

valor de umidade relativa, uma quantidade de umidade específica em uma situação de equilíbrio (Little, Ferraro, Arregi, 2015).

Figura 49 - Curva de armazenamento de umidade. A_L = saturação livre, o ponto até o qual o capilar absorverá água. A_{80} = saturação na umidade relativa de 80%



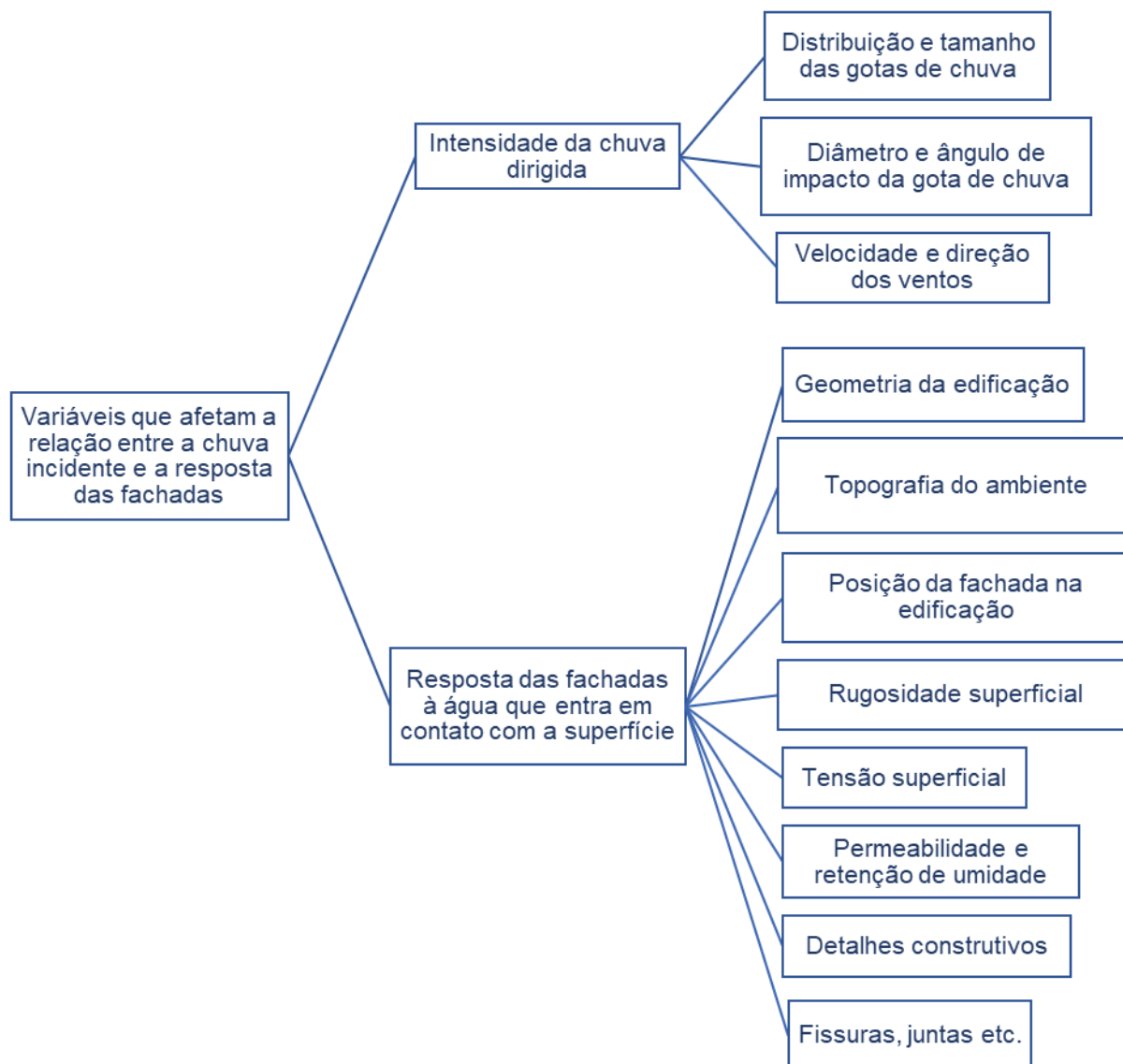
Fonte: Adaptado de Little, Ferraro e Arregi (2015).

A curva de armazenamento de umidade relaciona a umidade relativa e a quantidade de água presente nos poros, e pode ser dividida em três fases. Na primeira fase (ligação de água por adsorção) moléculas de vapor condensam nas superfícies dos poros, e estes não são preenchidos ainda; a difusão de vapor ocorre no centro e a difusão superficial ocorre ao longo das paredes dos poros. Na segunda fase (água não aderida) os capilares são preenchidos e o transporte capilar substitui a difusão de vapor e difusão superficial. Na terceira fase (supersaturação) todos os poros (inclusive os poros sem saída ou poros fechados) estão preenchidos (Little, Ferraro, Arregi, 2015).

Nas superfícies das empenas utilizadas nos ensaios realizados neste trabalho, o principal mecanismo de ingresso de umidade no concreto é a absorção capilar, seja em decorrência da umidade presente no ar, seja devido à água da chuva dirigida. Pouco se sabe sobre o impacto e os mecanismos de penetração da chuva dirigida em

superfícies de edificações. Segundo Blocken et al. (2009), os estudos acerca do tema concentram-se na relação entre intensidade da chuva dirigida incidente e a resposta das fachadas à água que entra em contato com a superfície, que pode ser afetada por diversas variáveis, como mostra a **Figura 50**.

Figura 50 - Variáveis que afetam a relação entre a intensidade da chuva dirigida incidente e a resposta das fachadas à água que entra em contato com a superfície.



Fonte: Vanessa de Moraes (2023), com base em Blocken et al. (2009).

De acordo com Blocken et al. (2009), após o contato da chuva dirigida com a superfície podem ocorrer diversos fenômenos, o que torna o estudo dessa interação complexo (**Figura 51**). A água pode respingar, aderir, ser absorvida, escoar e evaporar. Muitos fatores determinam o comportamento do fluido no substrato, como a pressão dos ventos, pressão hidrostática, gravidade e tensão superficial.

Figura 51 - Possíveis comportamentos do fluido após o impacto da chuva dirigida no substrato de material poroso.



Fonte: Adaptado de Blocken et al. (2009).

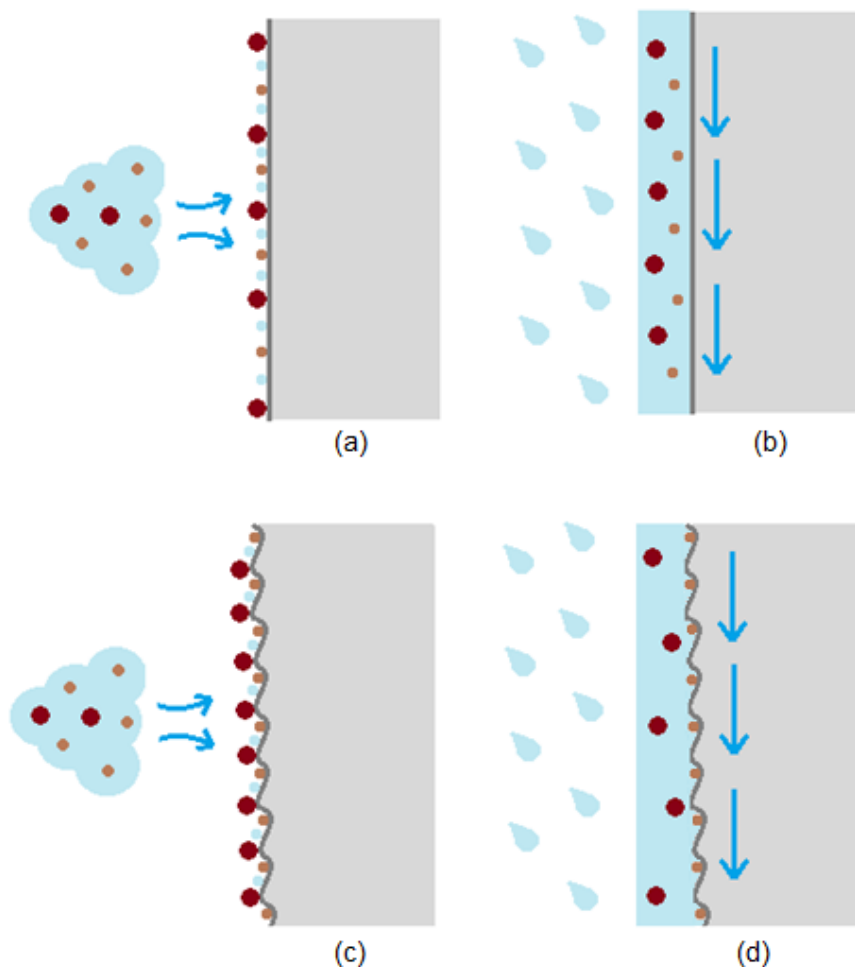
Petrucci (2000) destaca a importância da direção e intensidade dos ventos e da posição, geometria e entorno da edificação para a determinação dos mecanismos de atuação da chuva dirigida. Tais fatores podem determinar a lavagem e absorção de água nas fachadas, manchas e deposição de sujeira. Por exemplo, água proveniente da chuva dirigida tende a ser mais absorvida no topo e nos cantos da edificação, uma vez que a inclinação da chuva é maior em comparação a áreas próximas à base, onde a inclinação tende a ser quase paralela à superfície. Nesses locais também tende a haver maior lavagem e menor acúmulo de sujeira, uma vez que a ação das chuvas e os ventos são mais intensos em partes mais altas da edificação, levando mais partículas do que nas partes inferiores, onde se acumula sujeira.

A natureza do material tem relação direta com a absorção de água, que é influenciada por fatores como a rugosidade e a porosidade do substrato. Quando a quantidade de água incidente é maior do que a aquela absorvida por capilaridade pelo material, a água começa a escoar. *O escoamento sobre a superfície é favorecido quando a absorção é impossibilitada ou dificultada, o que proporciona a lavagem do*

substrato e a remoção de partículas. Quando a ação das chuvas é menos intensa e/ou partículas são trazidas por vento e umidade (ao ser condensada), a aderência de sujidades na superfície é favorecida (Petrucci, 2000).

A **Figura 52** representa a influência da umidade e da água na deposição de partículas/sujeira, comparando superfícies lisa e rugosa e desconsiderando a absorção de água pelo substrato, que é um fator que também pode interferir na aderência de sujidades, uma vez que a água absorvida carrega partículas. Nas imagens (a) e (c), água, partículas maiores e menores são aderidas à superfície por meio de ventos, umidade e chuvas de baixa intensidade. Nas imagens (b) e (d), a superfície é lavada e carrega as partículas. A imagem (d) mostra que água e partículas menores adentram no substrato e são de difícil remoção, enquanto as partículas maiores são lavadas com a água da chuva.

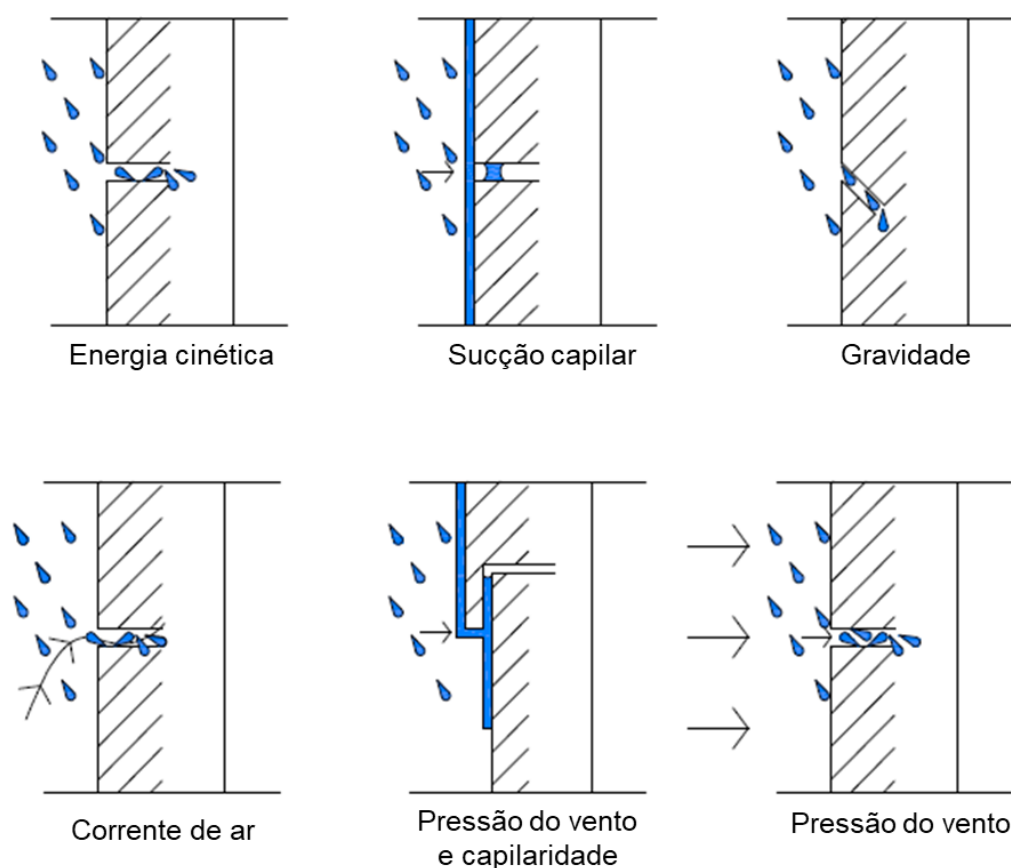
Figura 52 – Influência de características do substrato na aderência de partículas e sujidades.



Fonte: Vanessa de Moraes (2023).

De acordo com Grimm¹⁰ (1982 apud Melo Júnior, 2010), as seguintes condições são necessárias para que haja penetração em fachadas de edificações: lâmina de água escorrendo na superfície; aberturas que possibilitem a passagem de água, como poros ou fissuras; pressão de vento (quanto maior for, maior a absorção), sucção capilar ou ação gravitacional. Além desses aspectos, a rugosidade da superfície tem influência na velocidade do escoamento e a porosidade afeta a absorção pelo substrato. A **Figura 53** esquematiza os fatores que podem ter influência na penetração. A imagem indica que a sucção capilar ocorre quando é formada uma lâmina de água sobre a superfície.

Figura 53 - Fatores que influenciam a penetração de umidade pelas chuvas.



Fonte: Garden¹¹ (1963) apud Melo Junior (2010).

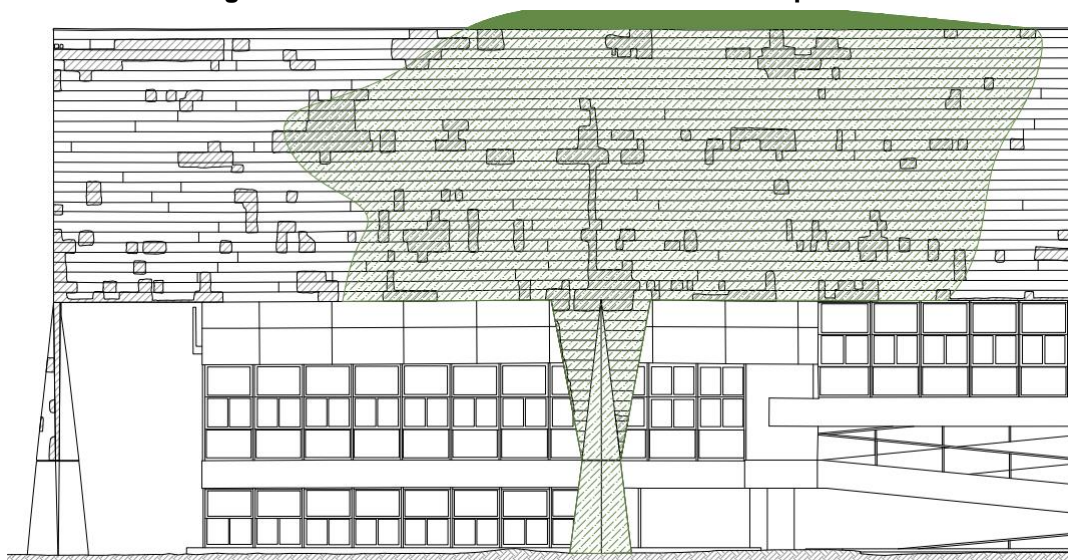
¹⁰ GRIMM, C. T. A driving rain index for masonry walls. In: *Masonry: materials, properties and performance*. ASTM STP 778, J. G. Borchelt, Ed., American Society for Testing and Materials, 1982, p. 171-177.

¹¹ GARDEN, G.K. Rain Penetration and its Control. National Research Council Canada. CBD 40, 5 p., 1963.

Considerando a intensidade e o impacto da água da chuva nas superfícies, é importante não só que seja selecionado um material de proteção superficial que evite a absorção por capilaridade, mas que tenha durabilidade compatível com os ciclos de manutenção preventiva viabilizados pelo modelo de gestão do edifício.

Oliveira et al (2017) apresentam um levantamento detalhado das condições do entorno das empenas do edifício Vilanova Artigas, como localização da massa arbórea e o registro das séries históricas de umidade relativa do ar, temperatura ambiente, pluviosidade, velocidade e direção do vento. Além disso, foi feito o mapeamento das áreas de reparo com escaneamento a laser e das áreas adjacentes à vegetação que permanecem sombreadas (**Figura 54**).

Figura 54 - Levantamento de área da fachada noroeste sombreada por árvore do entorno. A hachura tracejada cinza indica áreas de reparo estrutural, a hachura tracejada verde representa áreas apenas sombreadas e a hachura sólida verde representa áreas em que os galhos da árvore estão em contato com a empena.



Fonte: Oliveira et al. (2017).

O levantamento mostra que algumas áreas estão mais suscetíveis a umidade e manifestações patológicas do que outras, o que está intrinsecamente relacionado a fatores do entorno como a posição da edificação, orientação das fachadas, condições climáticas e a massa arbórea do entorno.

Em superfícies próximas à vegetação e sombreadas, apesar de haver menor impacto da chuva dirigida, o concreto fica úmido por mais tempo (**Figura 39**), potencializando o acúmulo de biofilme e sujeira e agravando as condições que levam à corrosão das armaduras. Ao provocar a repelência à água pelo substrato, o

hidrofugante pode proporcionar não só a menor absorção, mas também o escoamento e a formação de uma camada de água que “lave” a superfície.

Embora a normatização nacional não abranja métodos de medição de quantidade de chuva dirigida incidente nas fachadas de edificações, existem algumas equações semiempíricas¹² discriminadas em normas e métodos internacionais, como apresentam Zanoni, Sánchez e Bauer (2018). Esses cálculos se utilizam de coeficientes relacionados à forma, altura, posição da edificação, características do terreno, pluviosidade e velocidade dos ventos e podem fornecer resultados em litros/m². Os coeficientes destinam-se a ajustar as condições de exposição em campo aberto para uma situação específica. A equação a seguir apresenta o método de cálculo da intensidade da chuva dirigida incidente na fachada segundo a norma ASHRAE 160:2009 (Zanoni, Sánchez, Bauer, 2018).

$$R_{bv} = F_e \times F_d \times F_c \times V \times \cos \theta \times R_h$$

$$R_{bv} = \text{deposição da chuva no plano vertical da parede} \left(\frac{mm}{m^2 \times h} \right)$$

$$F_E = \text{fator de exposição à chuva}$$

$$F_D = \text{fator de deposição da chuva}$$

$$F_c = \text{constante empírica} \left(\frac{0,2s}{m^3} \right)$$

$$V = \text{média horária da velocidade do vento a 10m de altura} \left(\frac{m}{s} \right)$$

$$\theta = \text{ângulo entre a direção do vento e a normal à fachada}$$

$$R_h = \text{intensidade da precipitação no plano horizontal} \left(\frac{mm}{h} \right)$$

O fator F_E depende das características ao redor do edifício e de sua altura. O fator de deposição F_D considera três diferentes situações para a fachada: protegida por beirais, não protegida e sujeita a escoamentos.

Assim, a absorção de água pelas empenas está condicionada a fatores externos e intrínsecos ao material. Entre os fatores externos, pode-se citar a intensidade e direção da chuva dirigida, dos ventos, forma de incidência na superfície

¹² Métodos semiempíricos “usam equações de cálculo embasadas teoricamente na física das construções e com uso de coeficientes que são determinados a partir de medições experimentais in situ” (ZANONI, SÁNCHEZ E BAUER, 2018).

exposta, umidade relativa, posição da edificação e a presença de vegetação no entorno. Entre fatores intrínsecos ao material estão a quantidade, dimensões e estruturas dos poros do concreto, rugosidade superficial, fissuras e detalhes construtivos. Considerando essas condicionantes, destaca-se que a absorção capilar é o transporte predominante de água no concreto das empenas, pois preenche os poros com uma rapidez e quantidade significativamente maiores que outras formas de transporte como a difusão (Maranhão, 2009).

Segundo Maranhão (2009), além da quantidade, dimensão e estrutura dos poros, outro fator que condiciona a absorção de água em materiais silicosos e porosos é a molhabilidade do material, fator ligado à energia livre de superfície e ao ângulo de contato formado na interface sólido-líquido. Quando a superfície tem maior tensão superficial do que a água, constitui-se como hidrofílica; quando a tensão superficial é menor do que a água, constitui-se como hidrofóbica. Assim, enquanto há fatores externos e intrínsecos ao material que afetam a absorção de água e que não podem ser alterados, o hidrofugante pode alterar a energia livre de superfície ou tensão superficial, reduzindo a absorção capilar, a principal forma de ingresso de água nas empenas do edifício em análise.

4. HIDROFUGANTES

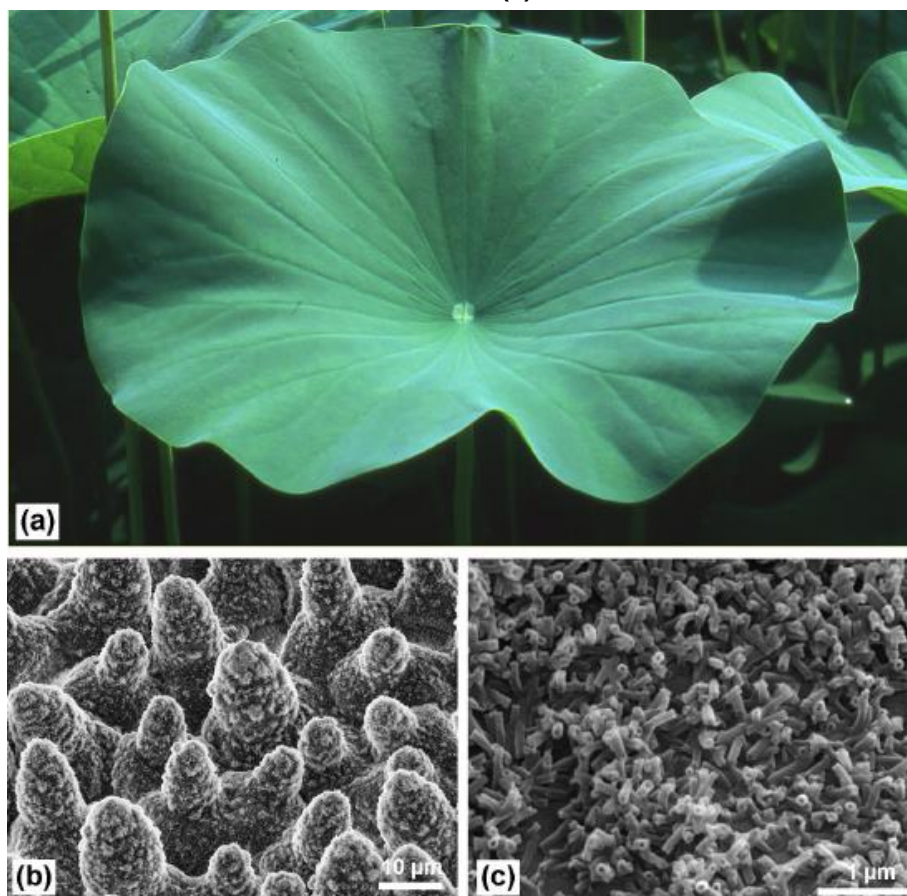
Na natureza, algumas plantas têm propriedades hidrofóbicas em suas folhas, como a folha de lótus, originando o chamado “Efeito de Lótus”, expressão utilizada para designar superfícies com propriedades super-hidrofóbicas. A hidrofobicidade da folha de lótus advém da composição geométrica e química de sua microestrutura (**Figura 55, Figura 56 e Figura 57**). As folhas têm uma superfície rugosa, de modo que as células epidérmicas da folha formam papilas de diferentes alturas, o que diminui a superfície de contato com a água. Por outro lado, toda a superfície das papilas é recoberta por uma camada de cristais de cera compostos por túbulos que contém grupos metil apolares - incompatíveis com a água, que é uma substância polar (Ensikat et al., 2011). Essas duas características reunidas modificam o ângulo de contato da água com a folha, fazendo com que as gotas não molhem a superfície, mas rolem sobre ela, arrastando consigo partículas de sujeira. Nesse caso específico, pode-se dizer que a superfície adquire propriedades hidrofóbicas e autolimpantes.

Figura 55 - Gotas de água sobre a folha de lótus.



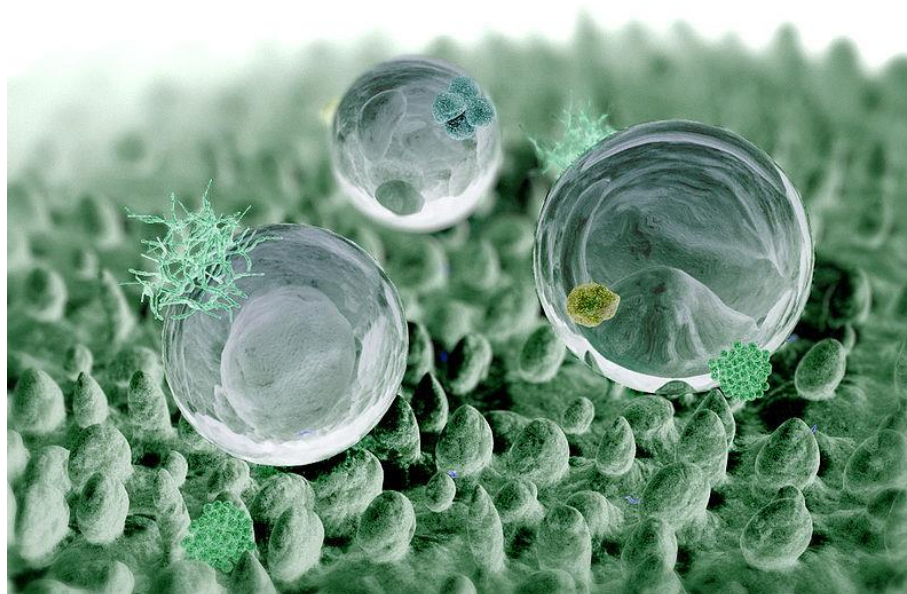
Fonte: Trottmann (2019).

Figura 56 - Folha de lótus (a), papilas da superfície da folha (b) e túbulos cerosos da superfície da folha (c).



Fonte: Ensikat et al (2011).

Figura 57 - Gotas de água sobre a superfície de uma folha de lótus.



Fonte: Superhydrophobic... (2017).

O hidrofugante tem efeito semelhante ao observado nas folhas de lótus, porque altera o ângulo de contato entre a água e o substrato por proporcionar uma tensão superficial inferior à da água, conferindo ao substrato propriedades hidrofóbicas (Esteves, 2014). Em geral, líquidos com uma tensão superficial abaixo da tensão superficial crítica do substrato molharão a superfície (Arkles; Pan; Kim, 2009).

Diz-se que uma superfície está molhada se um líquido se espalha sobre a superfície uniformemente sem a formação de gotículas. Quando o líquido é a água e se espalha sobre a superfície sem a formação de gotículas, diz-se que a superfície é hidrofílica. Em termos de energia, isso implica que as forças associadas com a interação da água com a superfície são maiores que as forças coesivas da água. As gotículas de água são formadas em superfícies hidrofóbicas, o que implica que as forças de coesão da água são maiores do que as forças de interação da água com a superfície.

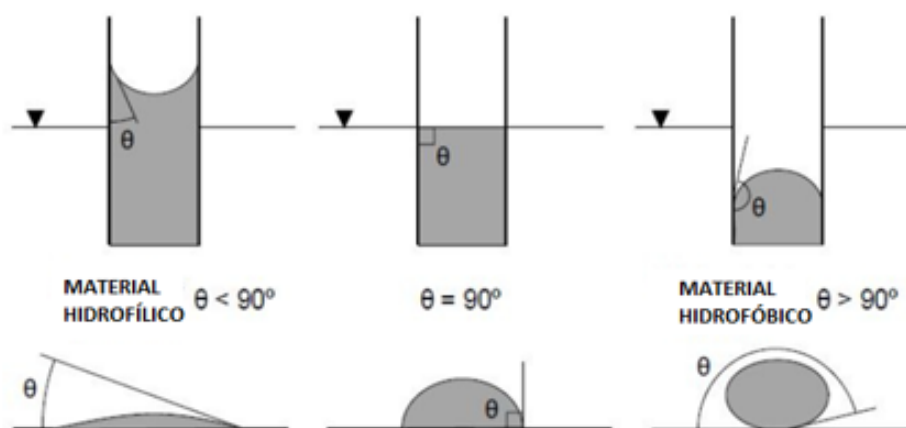
Praticamente, hidrofobicidade e hidrofiliabilidade são termos relativos. Um método simples e quantitativo para definir o relativo grau de interação de um líquido com uma superfície sólida é o ângulo de contato da gotícula com o substrato. Se o ângulo de contato for menor do que 30° a superfície é designada hidrofílica, uma vez que as forças de interação entre a água e a superfície quase igualam às forças coesivas da água e esta não escorrega. Se a água se espalha pela superfície e o ângulo de contato for menor que 10° , com frequência a superfície é designada como super-hidrofílica desde que não esteja absorvendo água, se dissolvendo na água ou reagindo com a água. Em uma superfície hidrofóbica, a água forma gotículas distintas. À medida que a hidrofobicidade aumenta, o ângulo de contato das gotículas com a superfície aumenta. Superfícies com ângulos de contato maiores que 90° são designadas como hidrofóbicas. O máximo ângulo de contato teórico para a água em uma superfície lisa é de 120° . Superfícies microtexturizadas ou micropadronizadas com asperezas hidrofóbicas podem exibir ângulos de contato aparentes superiores a 150° e estão associadas à super-hidrofobicidade e ao "Efeito de Lótus" (Arkles, 2006).

Para uma temperatura de 20°C , a água apresenta uma tensão superficial aproximada de $72,75 \text{ mN/m}$ (Vargaftik; Volkov; Voljak, 1983). Um comportamento superficial hidrofóbico geralmente ocorre quando a tensão superficial crítica do substrato é menor que 35 mN/m e um comportamento hidrofílico é observado em substratos com tensão superficial crítica maior que 45 mN/m . Alguns exemplos de tensão superficial proporcionada por silanos modificadores de substratos são: metiltrimetoxisilano ($22,5 \text{ mN/m}$); etiltrimetoxisilano (27 mN/m) e propiltrimetoxisilano ($28,5 \text{ mN/m}$) (Arkles; Pan; Kim, 2009).

Em contato com materiais porosos e não saturados como o concreto, a água é transportada dentro dos poros por ação capilar e o coeficiente de absorção depende de características como tensão superficial, viscosidade, densidade do líquido, ângulo de contato entre o líquido e as paredes dos poros e raio dos poros. No concreto

normal, o ângulo de contato é menor que 90° devido à atração molecular entre a água e a pasta de cimento, caracterizando um comportamento hidrofílico; neste caso a gota de água se esparrama por uma superfície plana e o concreto absorve a água. Quando o concreto é protegido com o hidrofugantes convencionais, as forças de atração entre a superfície e o líquido são reduzidas e o ângulo de contato é maior que 90° ; neste caso a gota toma forma de uma esfera e o crescimento capilar é negativo (Polder; Borsje; Vries, 2001). Como exemplo comparativo, em um tubo de laboratório imerso em água em que o líquido se comporta de maneira hidrofílica, o nível dentro do tubo fica acima do líquido circundante e quando o líquido se comporta de maneira hidrofóbica, fica abaixo do líquido circundante. Isso pode ser observado na **Figura 58**.

Figura 58 - Diferentes ângulos de contato entre a água e o substrato para superfícies hidrofílicas e hidrofóbicas. À esquerda, o menor ângulo de contato entre a gota de água e o substrato implica o molhamento da superfície.



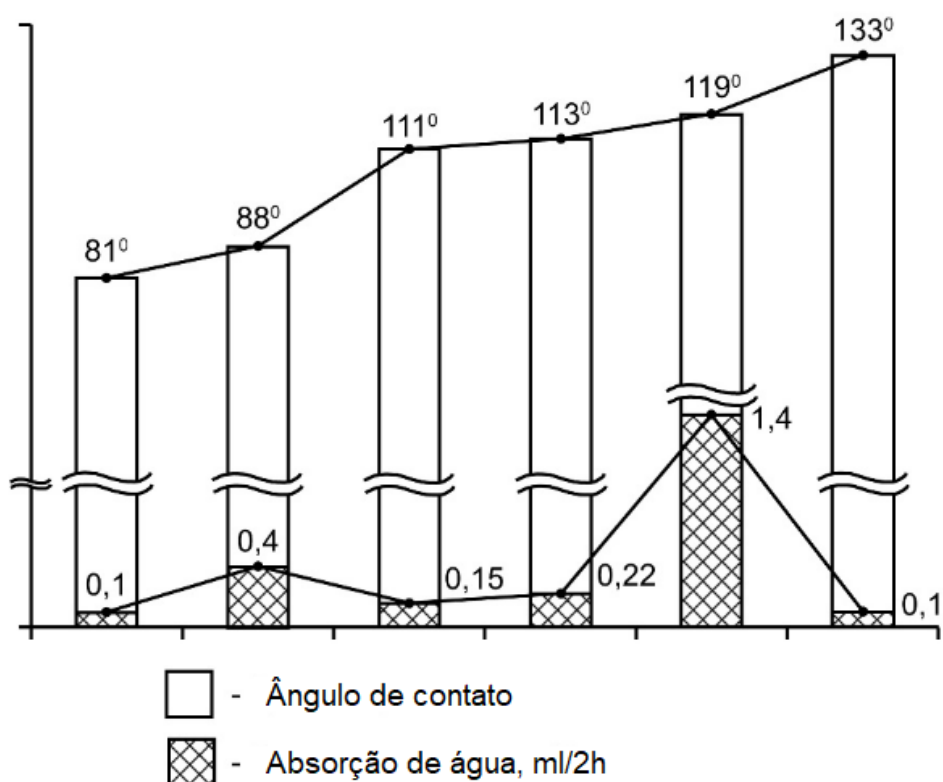
Fonte: Adaptado de Málaga (2015).

Por outro lado, estudos indicam que o ângulo de contato isoladamente pode não ser a melhor referência para avaliar o efeito de um determinado hidrofugante na capacidade de absorção de água de uma superfície. Segundo Pavlov e Prostiakova (2010), embora o chamado “efeito gota” (quando a água forma grandes ângulos de contato com a superfície) seja comumente utilizado para caracterizar a superfície como hidrofóbica, não considera condições naturais que levam à absorção, como ventos e a pressão de chuva inclinada na superfície.

Os autores (Pavlov; Prostiakova, 2010) conduziram uma série de experimentos com o objetivo de verificar a correlação entre o ângulo de contato e a absorção de água, medida com método dos tubos de Karsten. Foram utilizados seis cubos de concreto tratados com diferentes hidrofugantes e em cada um foi medida a absorção

e o valor do ângulo de contato. Como mostra o **Gráfico 1**, os resultados não indicaram uma correlação entre o ângulo de contato e a absorção verificada. Nesse estudo, os pesquisadores não apresentaram a composição dos hidrofugantes analisados (*organosilicon fluids* ou silicones organofuncionais), apenas concluíram que não há correlação entre o ângulo de contato e a absorção de água determinada por meio do método do tubo de Karsten.

Gráfico 1 - Independência entre o "efeito gota" e a absorção de água.



Fonte: Adaptado de Pavlov e Prostiakova (2010).

Segundo Karapanagiotis, Chatzigrigoriou e Manoudis (2020), nem sempre é correto associar a repelência à água a um grande ângulo de contato, uma vez em que há superfícies como as de pétalas de rosas, super-hidrofóbicas e com ângulos de contato superiores a 150°, em que se observa que a gota não rola sobre a superfície mesmo quando esta é invertida (**Figura 59**). Um conceito mais apropriado para descrever a molhabilidade da superfície seria o da histerese do ângulo de contato.

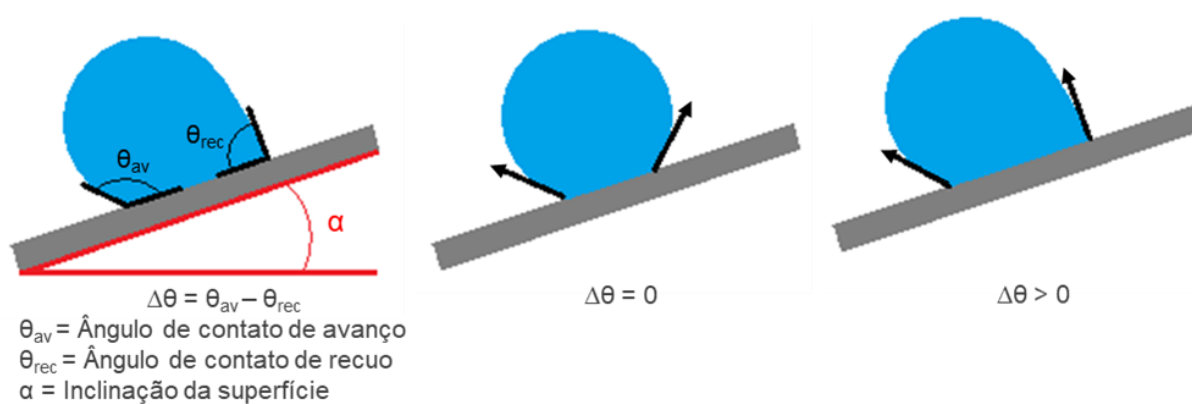
Figura 59 - Gota aderida à folha de uma rosa.



Fonte: Bardini (2016).

Uma das definições de histerese descreve o fenômeno como a diferença entre o ângulo de contato de avanço e o ângulo de contato de recuo - que são os valores máximo e mínimo que o ângulo de contato pode ter na superfície quando essa está inclinada na iminência de seu deslocamento - e está associada à facilidade com que a gota de no máximo $10 \mu\text{l}$ desliza (**Figura 60**). Uma histerese menor que 10° e um ângulo de contato maior que 150° (baixa histerese e alto ângulo de contato) caracterizam uma superfície super-hidrofóbica (Rangel, 2014).

Figura 60 – Representação da histerese.

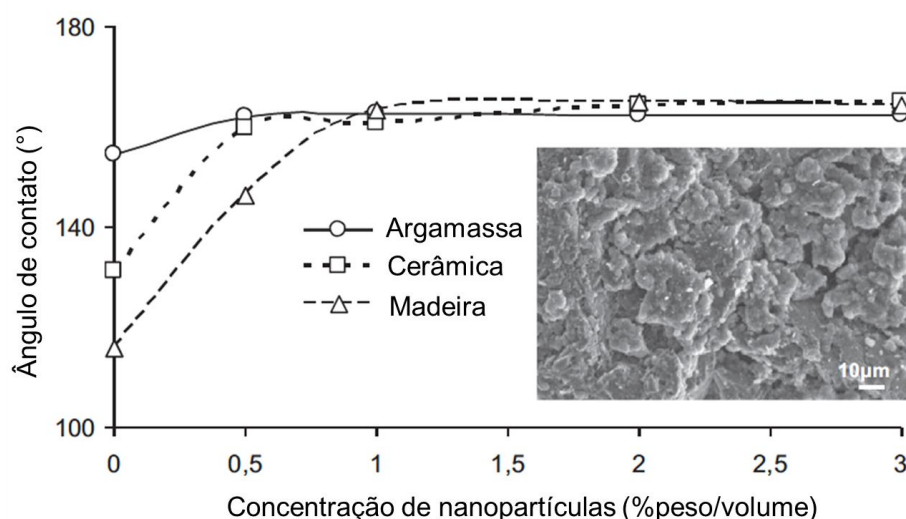


Fonte: Vanessa de Moraes (2023).

Segundo Arkles, Pan e Kim (2009), avanços na compreensão da histerese do ângulo de contato e da cinética, bem como a tensão superficial crítica do substrato proporcionam um entendimento mais preciso sobre o comportamento da água.

A rugosidade é um fator que pode ter influência direta no ângulo de contato da água com a superfície. Em um experimento, Karapanagiotis, Chatzigrigoriou e Manoudis (2020) adicionaram nanopartículas de sílica (SiO_2) a soluções de silano e siloxano para que a impregnação hidrofóbica tornasse a superfície mais rugosa. Foi aplicada solução hidrofugante com nanopartículas de sílica a três tipos de substrato (argamassa, cerâmica e madeira) e observou-se que o ângulo de contato aumenta com a concentração em peso por volume das nanopartículas, até que seja atingido um valor estável (**Gráfico 2**).

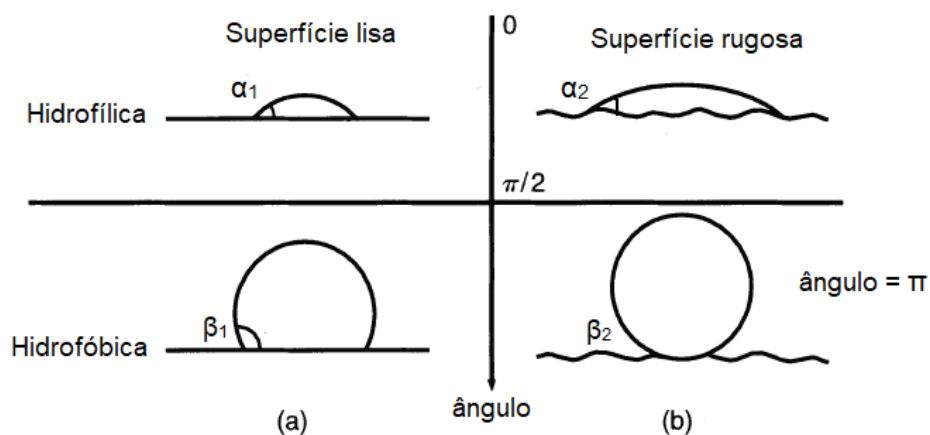
Gráfico 2 – Ângulos de contato para hidrofugantes à base de polisiloxanos com adição de nanopartículas de sílica aplicados em superfícies de argamassa, cerâmica e madeira.



Fonte: Karapanagiotis, Chatzigrigoriou e Manoudis (2020).

Segundo Gennes et al. (2003), a rugosidade é um fator que pode potencializar as características originais hidrofílicas ou hidrofóbicas de uma superfície, conforme ilustra a **Figura 61**. A rugosidade torna a superfície hidrofílica mais hidrofílica e a superfície hidrofóbica mais hidrofóbica. Para Petrucci (2000), superfícies rugosas e porosas como as de alguns substratos inorgânicos favorecem a deposição de sujeira.

Figura 61 - Efeito da rugosidade da superfície no ângulo de contato.



Fonte: Adaptado de Gennes et al. (2003, p. 24).

Assim, existem vários fatores que podem interferir no ângulo de contato, e embora essa característica possa ser um indicativo da molhabilidade, não é uma garantia de que o substrato apresentará maior ou menor absorção de água. A superfície pode apresentar um elevado ângulo de contato e ainda assim podem ocorrer maiores absorções.

4.1. A utilização de hidrofugante como forma de proteção superficial

A necessidade de proteger as superfícies de edificações e materiais de construção porosos de agentes externos de deterioração foi identificada há muitos séculos pelo homem, já desde a antiguidade. Na idade média a prática de pintura de esculturas de pedra se disseminou, em especial no norte da Europa; embora a policromia fosse aplicada por outras razões, também tinha a função de proteger a pedra. No renascimento e no período barroco, receitas para o brilho e polimento do mármore eram detalhadas em tratados, e análises confirmaram o uso de óleos, ceras e outros materiais. Na idade moderna, em especial durante a primeira metade do século XIX, óleo e cera foram utilizados como repelentes à água. Superfícies de edificações também foram protegidas ao longo da história com “camadas de sacrifício”, como gesso, reboco ou pintura (com base em revisão bibliográfica feita por Charola, 1995). Como exemplo, cera de parafina foi aplicada ao obelisco localizado no Central Park conhecido como “a agulha de Cleópatra” (*Cleopatra’s Needle*), monumento de 3500 anos em granito de 21 metros de altura (Sain-Baird, 2018), ilustrado nas **Figura 62** e **Figura 63**.

Figura 62 – The Obelisk, Cleopatra’s Needle, Central Park, Nova York.



Fonte: Sidders (2023a).

Figura 63 - Detalhe da superfície do obelisco no Central Park.



Fonte: Sidders (2023b).

Atualmente, são encontrados produtos hidrofugantes à venda para a aplicação nos mais variados substratos inorgânicos porosos, como alvenarias de tijolo, concreto, edifícios e monumentos pétreos. A Wacker Chemie AG, uma empresa fundada em 1914 que fabrica, entre outros, produtos hidrofugantes, tem produtos recomendados para fachadas para diversos materiais, como mármore, granito, calcário, tijolo cerâmico, concreto etc. (Wacker, [20--a?]). É comum a realização de estudos com hidrofugantes visando a aplicação em monumentos e edifícios pétreos, como mostra o estudo realizado sobre o Arenito Itararé do Theatro Municipal de São Paulo (Grossi e Lama, 2018), ilustrado na **Figura 64** e na **Figura 65**.

Figura 64 - Fachada do Theatro Municipal de São Paulo.



Fonte: Ogata (2017).

Figura 65 - Degradação do Arenito Itararé na fachada frontal do Theatro Municipal de São Paulo.



Fonte: Grossi e Lama (2022).

O Cristo Redentor (**Figura 66**) é um monumento mundialmente conhecido inaugurado em 1931, localizado no Morro do Corcovado, na cidade do Rio de Janeiro. Tem a estrutura composta de concreto e argamassa armada revestida com mosaico em tesselas de pedra sabão verde cintilante. Com o tempo, a escultura se deteriorou, e os mosaicos e pedaços de concreto gradualmente se soltaram, o que estava associado à corrosão das armaduras. Para que futuros danos fossem evitados, a estátua foi extensamente renovada em 1990 e hidrofugante foi utilizado como forma de proteção (Meyer, 1997).

Figura 66 - Cristo Redentor.



Fonte: De Paula ([2021?]).

Entre os produtos hidrofugantes, Wacker ([20--a?]) apresenta opções para a aplicação em superfícies de infraestruturas, fachadas, elementos de edificações e aditivos hidrofugantes para mistura do concreto como proteção contra o ingresso de água. Estudos recentes têm apontado para a “hidrofugação integral” como uma forma de reduzir os custos de manutenção e prolongar a vida útil do material.

Para proporcionar uma proteção abrangente de longa duração, também é necessário tornar o interior do objeto alvo hidrofóbico e converter a sua totalidade em uma massa hidrofóbica. Isso é especialmente crítico para materiais compostos por cimento, uma vez que a água está sempre presente dentro da matriz cimentícia – tanto como um constituinte químico do processo de hidratação ou proveniente de fontes externas. Além disso, a natureza porosa e hidrofílica da matriz a torna suscetível a deteriorações resultantes do processo de transporte de água, prejudicando significativamente a durabilidade do material (Cai, 2020, p.2, tradução nossa).

Nos Estados Unidos e na Europa os hidrofugantes para a proteção de edifícios são comercializados desde a metade do século XX (Charola, 2001), e seu uso tem sido feito como forma de proteção superficial em pontes. Desde os anos 90 tratamentos hidrofóbicos são usados para o tratamento de estruturas rodoviárias de concreto no Reino Unido (Bertolini et al., 2004).

Desde 1986 um agente hidrofóbico denominado isobutiltrimetoxisilano (100% puro) é utilizado em pontes no Reino Unido para evitar a penetração de cloretos. Agências estadunidenses e o departamento de transportes da Alemanha utilizaram agentes hidrofóbicos em pontes sujeitas à penetração por cloretos (De Vries e Polder, 1997). A ponte Fürstenland em St. Gallen, na Suíça (**Figura 67**), após sofrer carbonatação e efeitos dos sais de degelo, é um dos exemplos de estrutura de concreto que recebeu tratamento com creme hidrofugante (Hager, 1998).

Figura 67 - Ponte Fürstenland, em St. Gallen, na Suíça, recebeu tratamento hidrofugante em forma de creme para proteger contra os efeitos da carbonatação e sais de degelo.



Fonte: Kleis (2009).

No início dos anos 1990, por meio de um teste, identificou-se o ingresso significativo de íons cloreto nas conchas de concreto da Ópera de Sydney (**Figura 68**). Com o objetivo de interromper o processo, foi aplicado hidrofugante à base de isobutiltriétoxissilano em toda a superfície exposta do material e foi recomendado o uso contínuo de silanos para proporcionar uma vida útil maior ao concreto exposto à água salgada (McAuliffe, 2019).

Figura 68 - Ópera de Sydney, Jørn Utzon.



Fonte: Spragg (2015).

A **Figura 69**, **Figura 70** e **Figura 71** mostram pontes de concreto armado que receberam proteção superficial com hidrofugante. Nesses exemplos foi utilizado creme hidrofugante à base de silano (Wacker, [20--c?]).

Figura 69 - Ponte Kap Shui Mun, Hong Kong.



Fonte: 圍棋一級 (2011).

Figura 70 - Ponte de Tsing Ma, Hong Kong.



Fonte: Leung (2011).

Figura 71 - Stonecutters Bridge, Hong Kong.



Fonte: Wacker ([20--c?]).

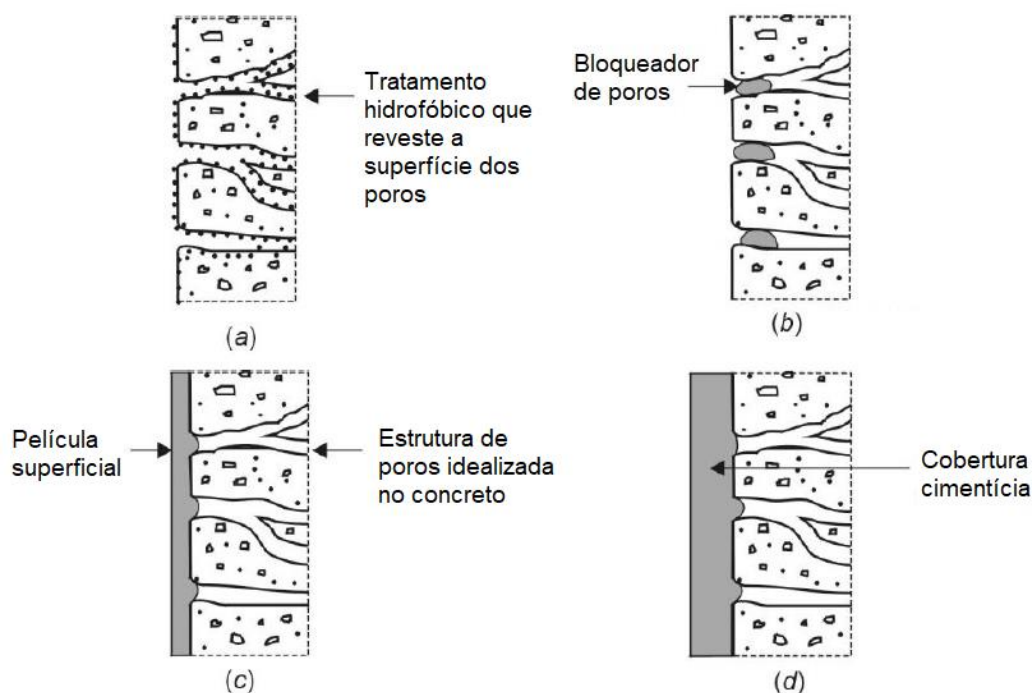
Embora os hidrofugantes de superfície sejam tradicionalmente utilizados em pontes por serem estruturas que não admitem falhas e que muitas vezes estão sujeitas a agressividade do ambiente como o ataque de cloretos, é preciso considerar as vantagens que a extensão de sua aplicação traria à durabilidade de edificações de concreto armado e a redução dos custos de manutenção proporcionada pela proteção superficial.

4.2. Categorias de materiais para a proteção superficial

A busca por sistemas de proteção superficial para materiais de construção objetiva melhorar sua resistência às intempéries e desempenho a longo prazo, prolongando sua vida útil. Como a maioria dos danos em materiais inorgânicos e porosos em edificações está relacionada à água, a proteção visa impedir ou reduzir a absorção no material. Em estruturas de concreto armado, especificamente, se ocorrer a despassivação da armadura devido à carbonatação ou ao ingresso de cloretos, a água e o oxigênio podem provocar corrosão.

Atualmente, existem diversas categorias de produtos destinados à proteção superficial de materiais porosos e os tratamentos são classificados em quatro categorias principais de acordo com seu mecanismo de proteção: tratamentos hidrofóbicos que revestem a superfície dos poros, tratamentos que preenchem os poros (bloqueador de poros), revestimentos orgânicos que formam um filme contínuo (película superficial) e coberturas cimentícias, conforme a **Figura 72** (Bertolini et al., 2004).

Figura 72 - Tipos de tratamento superficial: (a) tratamento hidrofóbico que reveste a superfície dos poros (b) bloqueador de poros (c) formador de película superficial e (d) cobertura cimentícia.



Fonte: Adaptado de Bertolini et al. (2004).

Os tratamentos hidrofóbicos que revestem as superfícies dos poros (a) penetram no substrato e reagem com o substrato silicoso ou similares, nessa categoria encontram-se os hidrofugantes. A norma europeia EN 1504¹³ define impregnação hidrofóbica como segue:

Tratamento do concreto destinado a produzir uma superfície repelente à água. A superfície interior dos poros e capilares fica revestida, mas os poros não ficam preenchidos. Não há película sobre a superfície do concreto e não há praticamente alteração na sua aparência (Comité Europeu de Normalização, 2008, p.13).

Esses produtos se destacam das outras categorias por não alterarem substancialmente a aparência da superfície, uma vez que não formam filme e o tratamento é incolor. Ao ligar-se quimicamente às paredes dos poros e sendo constituídos por moléculas de hidrocarboneto repelentes à água, proporcionam hidrofobicidade. Como os poros não estão bloqueados, o vapor de água e outros gases podem permear o material, permitindo que o concreto “respire”.

Os poros do concreto permanecem desobstruídos após o tratamento com hidrofugante, de modo que o vapor de água e a difusão de gases não são significativamente influenciados. Assim, as propriedades naturais do concreto são mantidas e mesmo quando a superfície é danificada (formação de fissuras), permanece adequadamente protegida. Como resultado, o tratamento com hidrofugante proporciona uma vida útil maior. Essas são claras vantagens em relação a proteções formadoras de filme, que descascam facilmente à medida que não permitem a passagem da água. Além disso, um filme danificado rapidamente leva à danificação do concreto, à medida que a água e substâncias agressivas facilmente podem penetrar (Wacker, [20--b?], p.8, tradução nossa).

Embora não proporcionem boa proteção à água sob pressão hidrostática, como apontado por Medeiros, Gomes e Helene (2006) e Oliveira (2013) os hidrofugantes apresentam boa resistência à penetração de água por capilaridade.

A água pode penetrar sob influência de uma certa pressão, mas, também, pode ser absorvida por meio poroso sob a influência das chamadas forças capilares. Os tratamentos repelentes de água são destinados a suprimir essas forças. Assim, ao invés de bloquear os poros, os produtos hidrorrepelentes apenas alteram a tensão superficial das paredes dos poros, verificando-se que a água só pode penetrar nos poros se for exercida uma

¹³ European Committee for Standardization. EN 1504: Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures – Definitions, Requirements, Quality Control and Evaluation of Conformity. Part 1-9. Brussels, 2005.

suficiente pressão externa ou se houver uma sob pressão interna suficiente (Oliveira, 2013, p.24).

Ao penetrar o substrato, o produto fica sombreado e protegido da radiação ultravioleta. A durabilidade a longo prazo é alcançada se a penetração é suficientemente elevada para proteger as moléculas da radiação UV. O desempenho desses produtos depende de propriedades do substrato como porosidade, teor de umidade, quantidade de material aplicado e profundidade de penetração.

Sabe-se que os hidrofugantes podem reduzir a absorção de água no concreto em valores entre 70% e 90%, conseqüentemente reduzindo a absorção de cloretos (De Vries e Polder, 1997), uma informação relevante uma vez que a maioria das pesquisas com hidrofugantes está focada no controle do ingresso de íons cloreto em razão dos prejuízos causados às estruturas de concreto armado devido à corrosão das armaduras. Segundo Bertolini et al. (2004) os hidrofugantes reduzem a absorção capilar para 10% a 20% do concreto não tratado. Em experimento realizado por Basheer e Cleland (2011) a redução da absorção de água e cloretos relativamente às amostras de referência foi de até 99%.

Para hidrofugantes à base de silanos ou siloxanos, a diminuição da difusão de vapor de água é inferior a 10%. Por outro lado, o hidrofugante pode reduzir a velocidade de secagem do substrato em paredes com umidade ascensional ou decorrente de penetrações através de fissuras, resultando em uma redução do potencial de evaporação (secagem) de até 90% - o que pode representar um problema em paredes muito úmidas ou sujeitas à ação de gelo e degelo (Oliveira, 2013, p.34).

O coeficiente de difusão de umidade para um concreto tratado com hidrofugante é perto de constante e não tão dependente da umidade relativa quanto para o concreto não impregnado. Diferentemente do concreto não-impregnado, em que a sucção capilar desempenha uma importante função no transporte de umidade com uma umidade relativa alta, o transporte de vapor é o mecanismo de transporte dominante mesmo com uma umidade relativa alta em concretos tratados com hidrofugante. Também pode ser concluído que o transporte de vapor em concretos tratados com hidrofugante é altamente reduzido em comparação com o concreto não tratado com hidrofugante (Johansson, 2006, p. 31, tradução nossa).

Segundo Weber¹⁴ (1985, p.135-140 apud Charola, 1995, p.13), algumas das principais propriedades dos hidrofugantes são:

- Ligam-se ao substrato mineral em que são aplicados;
- Não colorem a superfície;
- São resistentes à radiação ultravioleta e ao intemperismo;
- Reduzem a absorção de água da superfície;
- Reduzem somente em parte, em torno de 5% a 8%, a permeabilidade ao vapor de água
- Diminuem a impregnação de sujeira no substrato;

De acordo com o fabricante Wacker ([20--b?]) entre as principais vantagens dos hidrofugantes estão:

- Redução na absorção de água;
- Formam barreiras contra o ingresso de cloretos, proporcionando proteção contra a corrosão de armaduras;
- Permeabilidade ao vapor de água;
- Profundidade de penetração;
- Resistência à radiação ultravioleta;
- As superfícies não ficam brilhantes, pegajosas ou amareladas;
- Resistência a álcalis;
- Uso seguro;
- Compatibilidade ambiental;

Além de diminuir a impregnação de sujeira na superfície, é provável que a aplicação do hidrofugante, após a limpeza do substrato, também reduza a proliferação de micro-organismos. Isso ocorre em elementos e fachadas em que há a presença de água e a condensação superficial da umidade do ar, quando a temperatura da superfície atinge a temperatura de orvalho. Outros fatores que têm influência na proliferação de micro-organismos são exposição da fachada a ventos, a orientação solar, temperatura, pH do substrato, quantidade de nutrientes e oxigênio (Sato et al., 2002).

¹⁴ Weber, H. (1985) Steinkonservierung. Sindelfingen: Expert Verlag, pp. 135-140.

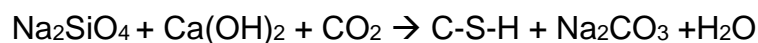
Para o desenvolvimento dos fungos emboloradores e de organismos fototróficos como algas e cianobactérias nas paredes de edificações, a umidade relativa na região superficial deve estar acima de um valor crítico e a temperatura superficial também deve ser favorável ao crescimento destes micro-organismos. A maioria dos micro-organismos se desenvolve em temperaturas acima de 4°C, abaixo deste valor, mesmo com umidades elevadas não há proliferação. Quanto mais longo o período em que a umidade relativa permanece acima do valor crítico, maior é a taxa de proliferação e, portanto, é mais visível a ocorrência do problema e quanto mais elevada for a umidade relativa ou a temperatura, menor é o tempo necessário para o estabelecimento das colônias (Sato et al., 2002, p. 1192).

O tratamento hidrofugante também tem potencial contribuição no combate aos efeitos da chuva ácida e na redução de manchas e eflorescências. Entre algumas de suas vantagens estão o aumento da durabilidade do concreto, redução da frequência de manutenções e a contribuição para o isolamento térmico da superfície¹⁵. Algumas limitações são a proteção de materiais com uma estrutura muito aberta e/ou fissuras, uso preferencial em superfícies verticais e possível comprometimento da proteção de áreas com muita exposição, como próximas a árvores, que favoreçam desenvolvimentos biológicos na superfície devido à presença de produtos biodegradáveis e nutrientes (Oliveira, 2013).

Estudos apresentados por Wittmann, Zhang e Akira (2010), apontam que, como têm propriedades hidrofóbicas, tornando o concreto mais seco, os hidrofugantes podem reduzir a taxa de corrosão das armaduras, aumentando significativamente a vida útil do concreto armado. Produtos à base de **silanos** e **siloxanos** são exemplares desse tipo de tratamento, como será visto mais adiante.

Os **bloqueadores de poros (b)** são produtos compostos por silicatos que penetram nos poros do concreto e reagem com seus constituintes solúveis, em particular com o hidróxido de cálcio. Os produtos resultantes são insolúveis, logo, bloqueiam os poros do material. O silicato de sódio é um dos produtos utilizados para esse fim. De acordo com Medeiros et al. (2012), esse tratamento forma uma camada menos porosa na superfície, modificando a absorção de água. Sua penetração no concreto é superficial, exceto em concretos mais porosos. De acordo com Bertolini et al. (2004), ocorre uma reação com o CO₂ e a formação de carbonatos alcalinos que causam eflorescências:

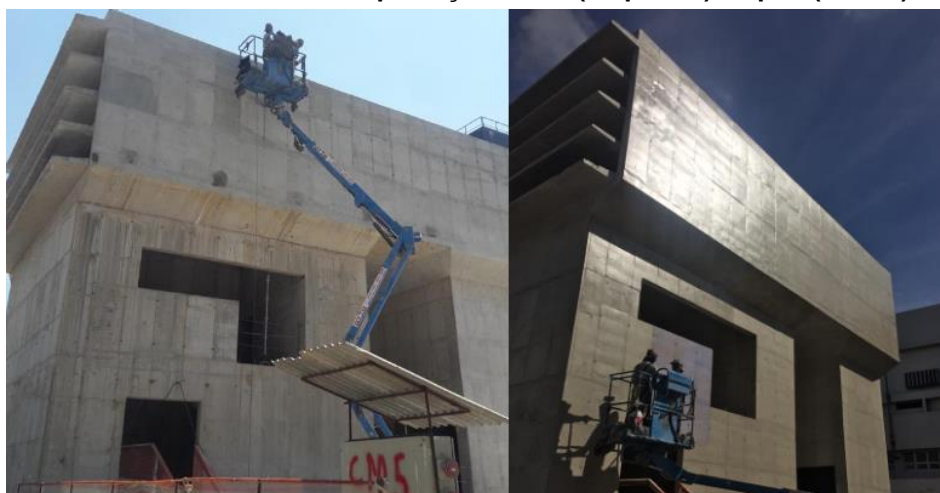
¹⁵ A presença de umidade na superfície favorece as trocas térmicas.



A eficiência dos bloqueadores de poros em barrar o ingresso de água é relativamente baixa porque eles formam essencialmente gel de C-S-H que é hidrofílico. Por outro lado, os poros bloqueiam a passagem do vapor de água presente dentro do concreto, assim, o risco de danos decorrentes de congelamento pode aumentar, particularmente em um concreto poroso e mecanicamente fraco (Bertolini et al., 2004).

Os produtos **formadores de película (c)** (**Figura 73**) formam um filme contínuo sobre a superfície, impedindo não só o ingresso de água, mas também a difusão de gases e vapor de água e normalmente alteram o aspecto do substrato. Entre os exemplares dessa categoria estão a resina epóxi, verniz poliuretânico, verniz acrílico, tinta látex vinílica (PVA), tinta látex acrílica e tinta texturizada acrílica.

Figura 73 - Tratamento com verniz antipichação antes (esquerda) e após (direita) a aplicação.



Fonte: Policleto Engenharia ([20--]).

De acordo com Bertolini et al. (2004), os revestimentos orgânicos que formam um filme polimérico contínuo têm de 100 a 300µm de espessura e podem ser constituídos a partir de diversos tipos de polímeros (como acrilato, poliuretano e epóxi), pigmentos e aditivos e são adequados para a aplicação por meio de solventes e diluentes. A eficiência desse tipo de tratamento depende da ausência de poros e imperfeições e aumenta na proporção de sua espessura. Sua aplicação requer uma

preparação minuciosa da superfície, porque uma ligação duradoura com o substrato é essencial para a eficiência do revestimento.

Segundo Medeiros et al. (2012), caso a estrutura de concreto apresente fissuras após a pintura, a película se rompe. Como esse tipo de revestimento não permite que o concreto seque caso esteja úmido, pode haver a deterioração do filme superficial e a formação de bolhas devido à pressão de vapor da umidade interna. Outra característica desses produtos é que alteram o brilho e a cor da do substrato. Pode haver problemas como o escurecimento, amarelecimento e a descamação da película.

As **coberturas cimentícias (d)** são produtos que aderem bem ao substrato, porém não absorvem as movimentações da base, podendo fissurar. Têm baixa permeabilidade e alteram completamente a aparência final da superfície revestida, e podem ser aplicadas com várias opções de pigmentos e texturas. Segundo Bertolini et al. (2004) as coberturas cimentícias variam de camadas de menos de 10mm de espessura aplicadas com métodos manuais como pincel ou trincha até camadas de vários centímetros de espessura aplicadas como reboco ou concreto projetado com spray. Uma comparação entre as propriedades de alguns dos sistemas de proteção é apresentada na **Tabela 3**.

Tabela 3 - Comparação entre propriedades de alguns sistemas de proteção superficial do concreto. Nível de proteção A = alto, M = médio, B = baixo.

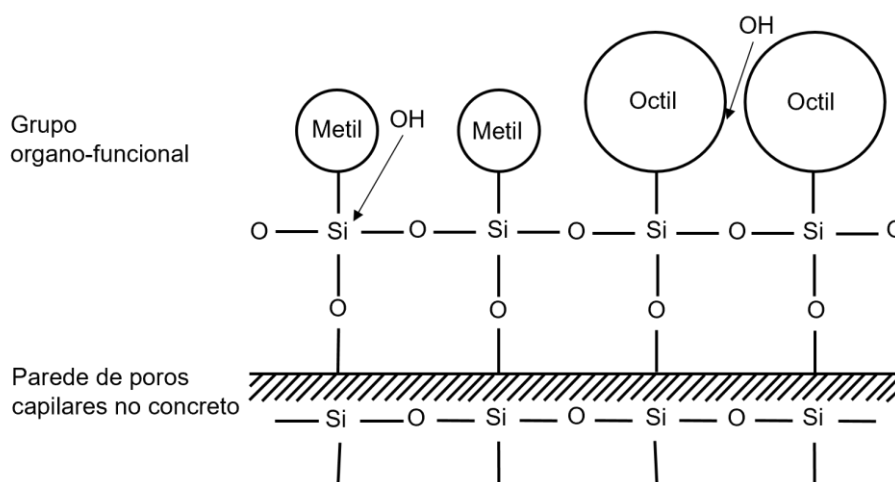
Sistema de proteção	Película (sim/não)	Proteção			Aplicação			Durabilidade		
		Resistência à penetração de CO ₂	Resistência à permeabilidade ao vapor	Resistência à penetração de Cl ⁻	Compatibilidade com substrato úmido	Facilidade de aplicação	Resistência aos álcalis	Durabilidade frente a UV	Vida útil da resina	Facilidade de repintura
Acrílica	Sim	A	M	M	A	A	M	M	M	A
Poliuretano	Sim	A	B	A	B	B	A	M	A	B
Epóxi	Sim	A	B	A	B	B	A	B	A	B
Silicones (silano/siloxano)	Não	B	A	A	M	A	A	A	A	A

Fonte: Adaptado de Kazmierczak (2011).

4.3. Propriedades químicas dos hidrofugantes

Entre os hidrofugantes mais utilizados na construção civil, estão aqueles à base de silanos, siloxanos e a mistura de ambos (Maranhão e Loh, 2010). Esses compostos químicos são formados pela combinação do átomo de silício com grupos alquila¹⁶ apolares, que são responsáveis pela repelência à água, e grupos alcoxi¹⁷, que se ligam aos silicatos do concreto (**Figura 74**).

Figura 74 – Grupos alquila apolares (metil e octil) são responsáveis pela repelência à água e os grupos alcoxi (R–O–) reagem com a matriz inorgânica do substrato.



Fonte: Adaptado de Maranhão e Loh (2010).

A atração molecular entre a água e o concreto pode ser enfraquecida com a impregnação do concreto com agentes hidrofóbicos, como os hidrofugantes. Desse grupo, silanos e siloxanos são os mais importantes para o concreto. Silanos são moléculas pequenas com um átomo de silício. Suas moléculas contêm grupos orgânicos alcoxi ligados aos átomos de silício, que podem reagir com os silicatos do concreto para formarem ligações estáveis. Adicionalmente, silanos e siloxanos contêm grupos orgânicos alquila que têm propriedades hidrofóbicas. Após a reação do substrato com os grupos alcoxi, os grupos alquila sobressaem-se das superfícies dos poros. Como resultado, as moléculas de água são repelidas, o ângulo de contato é maior do que 90° e idealmente a água não é mais absorvida por sucção capilar. Na realidade, a absorção capilar é reduzida para 10-20% do concreto não tratado. Como os poros ficam desobstruídos, o tratamento com silicatos hidrofugantes não bloqueia o transporte de vapor de água (Polder; Borsje; Vries, 2001, p.229, tradução nossa).

¹⁶ Grupos alquila são cadeias de carbono e hidrogênio monovalentes formadas pela remoção de um átomo de hidrogênio de um carbono saturado (FELTRE, 2004).

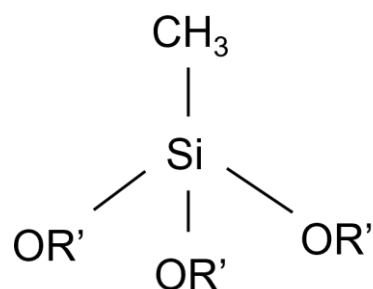
¹⁷ Grupos alcoxi são grupos alquila ligados ao átomo de oxigênio. O radical alcoxi é R–O–. (FELTRE, 2004).

O nome “silano” é originalmente utilizado para designar hidretos de silício saturado, análogos aos alcanos¹⁸, compostos pela fórmula geral $\text{Si}_n\text{H}_{2n+2}$, que podem ser divididos entre silanos, oligosilanos ou polisilanos. Derivados de hidrocarbonetos e outros são também com frequência denominados vagamente de silanos (International Union of Pure and Applied Chemistry, 2014).

Silano, SiH_4 , é o composto mais simples de silício e fornece a base da nomenclatura para toda a química do silício. Compostos são nomeados como derivados de silanos. Os substituintes, sejam inorgânicos ou orgânicos, são prefixos. Exemplos são triclrossilano, HSiCl_3 ; dissilano, H_3SiSiH_3 ; metildiclorossilano, $\text{CH}_3\text{SiHCl}_2$; metilsilano, CH_3SiH_3 ; dietilsilano, $(\text{CH}_2\text{H}_5)_2\text{SiH}_2$; e trietilsilano, $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{SiH}$ (Arkles, 1997, p.38, tradução nossa).

Quando utilizado na indústria da construção civil, o termo “silano” refere-se aos alquiltrialcoxissilanos (**Figura 75**), moléculas monoméricas que contêm um átomo de silício associado a um grupo alquila apolar responsável pela hidrofugação e a três grupos alcoxi que podem reagir com o substrato. Normalmente, silanos são líquidos transparentes, de baixa viscosidade, com diferentes volatilidades e proporções variadas de ligações alcoxi (Mayers, 1998).

Figura 75 - Exemplo de alquiltrialcoxissilano, em que OR' representa um grupo alcoxi.



Fonte: Maranhão (2009).

De acordo com o American Concrete Institute os silanos podem ser definidos como segue:

Silanos são compostos de silício, carbono, hidrogênio e oxigênio de baixo peso molecular em soluções puras – com 100% de teor de silanos ativos – ou diluídas em solvente ou água. A faixa de concentração comum situa-se entre 20% e 100%. Os silanos reagem com o concreto alcalino e a umidade

¹⁸ Alcanos (ou hidrocarbonetos parafínicos) são hidrocarbonetos acíclicos e saturados, isto é, que tem cadeias abertas e apresentam apenas ligações simples entre seus carbonos. Exemplo: $\text{CH}_3\text{--CH}_2\text{--CH}_3$ (FELTRE, 2004).

atmosférica para formar uma camada hidrofóbica. Silanos com longos grupos alquila resistentes a álcalis como isobutiltrialcoxissilanos e octiltrialcoxissilanos têm boas propriedades hidrofóbicas. Silanos normalmente estão disponíveis em soluções com aguarrás mineral¹⁹, solventes de hidrocarbonetos aromáticos ou água (American Concrete Institute, 2014, p.58, tradução nossa).

Segundo McAuliffe (2019) para proporcionar o efeito da hidrofobicidade em concretos mais densos, as moléculas de silano devem ser alquilsilanos e os grupos alcoxi devem ser ou etoxi ou metoxi. Os grupos alquila mais comuns são isobutil, octil e isooctil, sendo que o grupo isobutil é o de tamanho ideal para a repelência à água, resistência aos álcalis e máxima profundidade de penetração, sendo essa menor em concretos mais densos. Algumas vezes também são utilizados grupos hexil. Grupos alquila maiores proporcionam maior ângulo de contato da água com a superfície. Silanos com grupos alcoxi etoxi são preferíveis por serem menos tóxicos que os metoxi e porque os radicais etoxi têm cura mais lenta e por isso penetram mais no substrato.

Embora sua baixa viscosidade ajude o silano a penetrar na superfície tratada, sua volatilidade faz com que haja grandes perdas durante a aplicação – as moléculas de silano têm tamanho entre 1×10^{-6} e $1,5 \times 10^{-6}$ mm de diâmetro (Sohawon e Beushausen, 2018) - por essa razão, os alquilalcoxissilanos normalmente não são diluídos antes do uso. Por outro lado, sua aplicação em concentrações mais elevadas torna os produtos mais caros (Oliveira, 2013). Outra desvantagem dos silanos intrínseca à sua natureza monomérica é o tempo de reação extremamente longo necessário para a formação da resina de silicone. Sob condições desfavoráveis como altas temperaturas, ventos e correntes de ar, silanos com longo tempo de reação formam quantidades insignificantes de produto (Mayers, 1998). A **Figura 76** representa a efetividade do silano em substratos inorgânicos.

¹⁹ Aguarrás é comumente referida como *mineral spirit* na literatura estrangeira.

Figura 76 - Efetividade do silano em substratos inorgânicos.

SUBSTRATOS	
<p>EXCELENTE</p> <p>↑</p> <p>BOM</p> <p>↑</p> <p>RUIM</p> <p>↑</p> <p>MUITO RUIM</p>	Sílica
	Quartzo
	Vidro
	Alumínio (AlO(OH))
	Aluminossilicatos (ex. argila)
	Silício
	Cobre
	Estanho (SnO)
	Talco
	Óxidos inorgânicos (Fe ₂ O ₃ , TiO ₂ , CrO ₃)
	Aço, ferro
	Amianto
	Níquel
	Zinco
	Mármore, calcário (CaCO ₃)
Gesso (CaSO ₄)	
Barita (BaSO ₄)	
Grafite	
Negro de fumo	

Fonte: Adaptado de Arkles (2006).

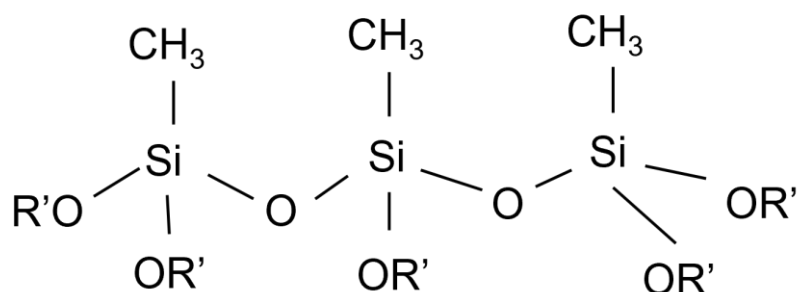
Silanos são ideais para concretos mais densos, de menores poros e de maior qualidade devido às suas vantagens como menor tamanho das moléculas (da ordem de 10 Å), baixa tensão superficial e cura lenta, que o farão ter maior profundidade de penetração que qualquer outro produto e proporcionar melhor proteção a longo prazo. Nesse caso, diferentemente de produtos formadores de filme superficial, a proteção do concreto não está na integridade do filme, mas é quase totalmente dependente da integridade do concreto. Tais características tornam a utilização desses produtos ideal para situações mais críticas como tabuleiros de pontes (McAuliffe, 2019).

Segundo a International Union of Pure and Applied Chemistry (2014), o termo “siloxano” designa hidretos saturados de silício-oxigênio com cadeias ramificadas ou não de átomos alternados de silício e oxigênio, sendo cada átomo de silício separado dos seus átomos de silício vizinhos mais próximos por um átomo de oxigênio. A estrutura geral dos siloxanos não ramificados é $H_3Si[OSiH_2]_nOSiH_3$. Um exemplo de

siloxano ramificado é $\text{H}_3\text{Si}[\text{OSiH}_2]_n\text{OSiH}[\text{OSiH}_2\text{OSiH}_3]_2$. Por extensão, derivados de grupos alquila também são incluídos.

Na construção civil o termo é utilizado para denotar alquilalcoxisiloxanos (**Figura 77**). A expressão se popularizou porque entre **três e seis** unidades monoméricas de moléculas de alquilalcoxisilanos ocorre uma reação de condensação envolvendo a formação de ligações siloxano para produzir moléculas de alquilalcoxisiloxanos oligoméricos. Assim, siloxanos são moléculas oligoméricas que derivam de moléculas parcialmente hidrolisadas de silanos (Namouniara et al., 2019).

Figura 77 - Exemplo de alquilalcoxisiloxano, em que OR' representa um grupo alcoxi.



Fonte: Maranhão (2009).

De acordo com o American Concrete Institute, siloxanos podem ser definidos como segue:

Siloxanos, assim como os silanos, são compostos orgânicos de silício. Diversas formulações de siloxanos estão disponíveis, incluindo metil siloxanos, siloxanos oligoméricos e alquilalcoxisiloxanos poliméricos. Metil siloxanos têm baixa resistência a ambientes alcalinos e não são utilizados como hidrofugantes de superfície. Siloxanos oligoméricos são moléculas condensadas ou parcialmente hidrolisadas, formadas a partir de metil silanos, que contém cadeias de grupos alquila maiores, como butil ou octil. Siloxanos oligoméricos geralmente são hidrofugantes eficazes. Alquilalcoxisiloxanos poliméricos têm grandes cadeias e grande peso molecular. Os grupos alquila com grandes cadeias em siloxanos oligoméricos e alquilalcoxisiloxanos poliméricos são demandados por sua resistência eficaz no meio alcalino do concreto.

De forma similar aos silanos, os siloxanos normalmente estão disponíveis em soluções com aguarrás mineral, solventes de hidrocarbonetos aromáticos ou água. Os siloxanos reagem com a umidade atmosférica, enquanto a alcalinidade do concreto age como um catalisador para formar a camada hidrofóbica (American Concrete Institute, 2014, p.58, tradução nossa).

Os siloxanos são líquidos transparentes, móveis e não-voláteis e uma de suas vantagens em relação aos silanos é que eles têm uma reação mais rápida para formar

a substância ativa e não apresentam perdas por evaporação. Uma vez que a evaporação é insignificante e pouco álcool é liberado, siloxanos oligoméricos podem ser utilizados de forma diluída (Mayers, 1998). Siloxanos têm entre $1,5 \times 10^{-6}$ e $7,5 \times 10^{-6}$ mm de diâmetro (Sohawon e Beushausen, 2018). Em alguns casos, hidrofugantes à base de siloxanos podem provocar um leve escurecimento da superfície, o que também pode ocorrer com o uso de hidrofugantes cremosos (Oliveira, 2013, p.33).

Em experimento realizado por Namouniara et al. (2019), os autores sugerem que a maior profundidade de penetração dos silanos deve-se - além do menor tamanho das moléculas - ao maior tempo levado para a polimerização, e que a menor profundidade de penetração dos siloxanos em relação aos silanos deva-se à mais rápida polimerização de suas moléculas.

A molécula de siloxano em si é uma molécula de silano parcialmente hidrolisada. Quando o siloxano entra em contato com a solução intersticial, uma hidrólise residual acontece rapidamente, causando a formação de polisiloxanos. Esses polímeros criam uma barreira hidrofóbica que reduz e até mesmo cancela a absorção adicional do produto, o que explica a menor profundidade de penetração [...] (Namouniara et al., 2019, tradução nossa).

Por outro lado, segundo o American Concrete Institute (2014) os siloxanos demoram mais a secar que os silanos, o que aumenta o tempo de sua aplicação. Uma das vantagens de siloxanos oligoméricos em relação aos silanos é a presença de cadeias maiores de grupos alquila, o que proporciona boa resistência ao ingresso de água, cloretos e álcalis e boa permeabilidade ao vapor de água. De acordo com Maranhão e Loh (2010), o tamanho do grupo orgânico na molécula de silano/siloxano tem influência no desempenho do hidrofugante, de modo que quanto maior o grupo, maior será a eficiência e a durabilidade do produto, sendo os grupos mais utilizados o metil (CH_3 -), o propil (C_3H_7 -) e o octil (C_8H_{17} -).

Assim, moléculas com grupos alquila maiores tendem a apresentar maior hidrofobicidade, como mostra a **Tabela 4**, em que são listados produtos da Dow Corning à base de silanos. Nota-se que os produtos com grupos orgânicos Metil são os menos hidrofóbicos, enquanto produtos com grupos orgânicos Octil são os mais hidrofóbicos. A **Figura 78** à **Figura 82** ilustram algumas dessas moléculas de silano.

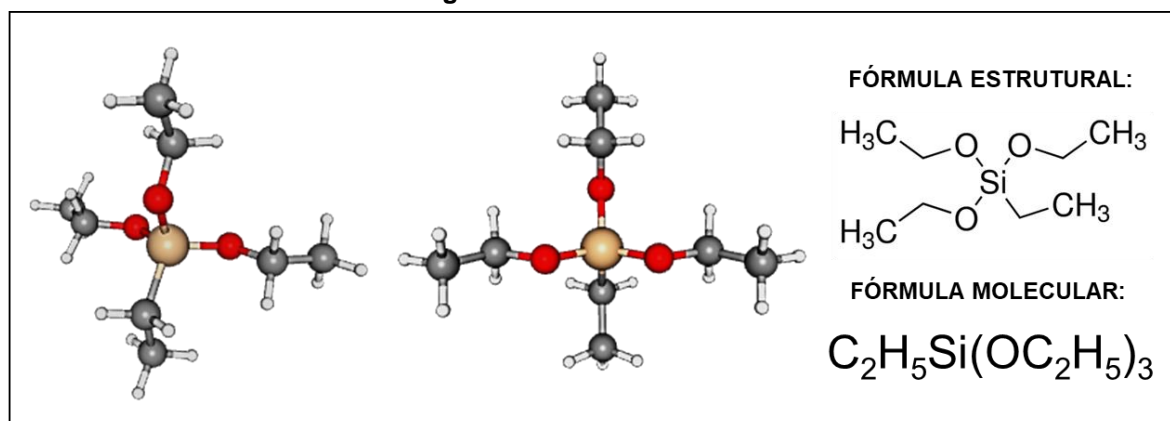
Tabela 4 - Produtos Dow Corning ordenados de acordo com sua hidrofobicidade.

Produto Dow Corning	Grupo orgânico	Grupo Alcoxi	Nome químico
Z-6697	—	Etoxi	Tetraetoxisilano
Z-6070	Metil	Metoxi	Metiltrimetoxisilano
Z-6366	Metil	Metoxi	Metiltrimetoxisilano (HP)
Z-6370	Metil	Etoxi	Metiltriethoxisilano
Z-6383	Metil	Etoxi	Metiltriethoxisilano (HP)
Z-6194	Metil	Metoxi	Dimetildimetoxisilano
Z-6265	Propil	Metoxi	Propiltrimetoxisilano
Z-6535	Propil	Etoxi	Propiltriethoxisilano
Z-2306	i-Butil	Metoxi	Isobutiltrimetoxisilano
Z-6403	i-Butil	Etoxi	Isobutiltriethoxisilano
Z-6124	Fenil	Metoxi	Feniltrimetoxisilano
Z-6341	n-Octil	Etoxi	n-Octiltriethoxisilano

Maior hidrofobicidade

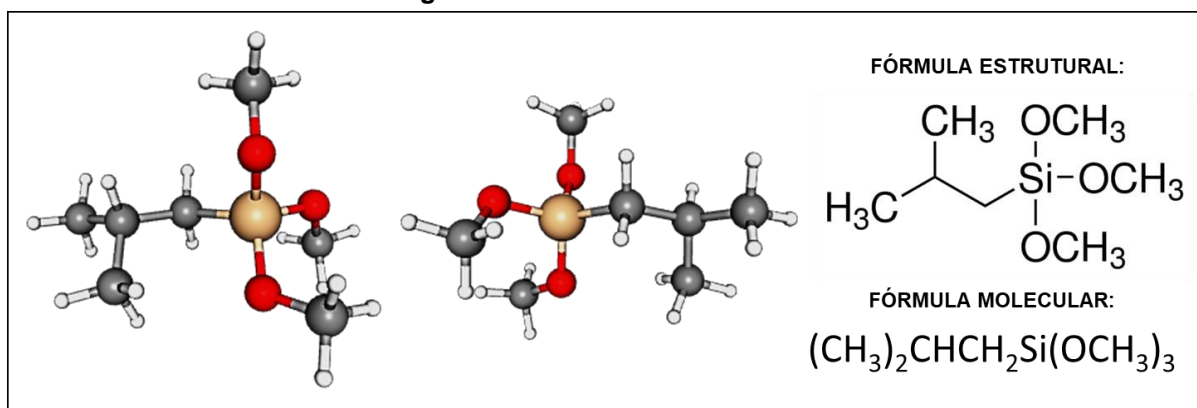
Fonte: Dow Corning (2005).

Figura 78 - Etiltriethoxisilano.



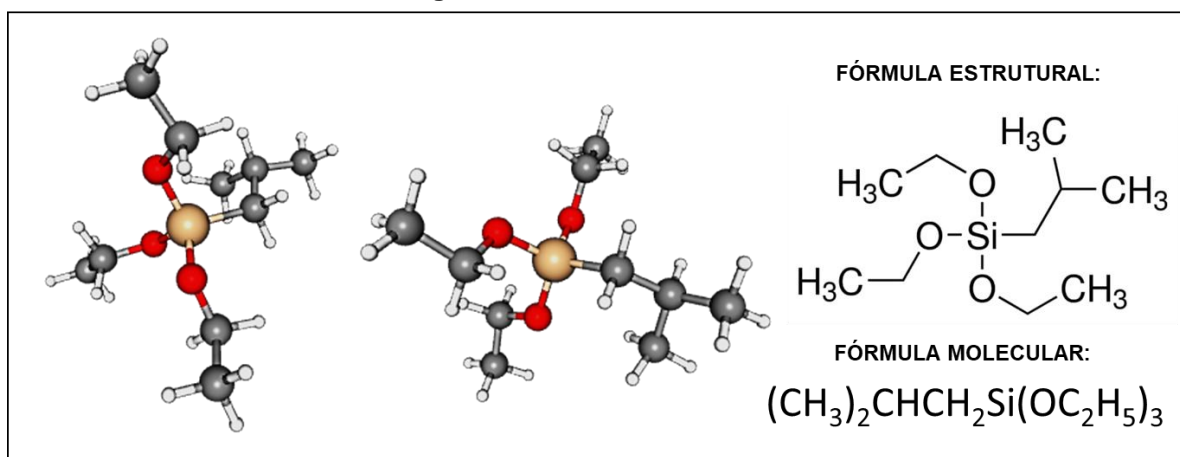
Fonte: National Center for Biotechnology Information (2023a) e Sigma-Aldrich(2023c).

Figura 79 - Isobutiltrimetoxisilano.



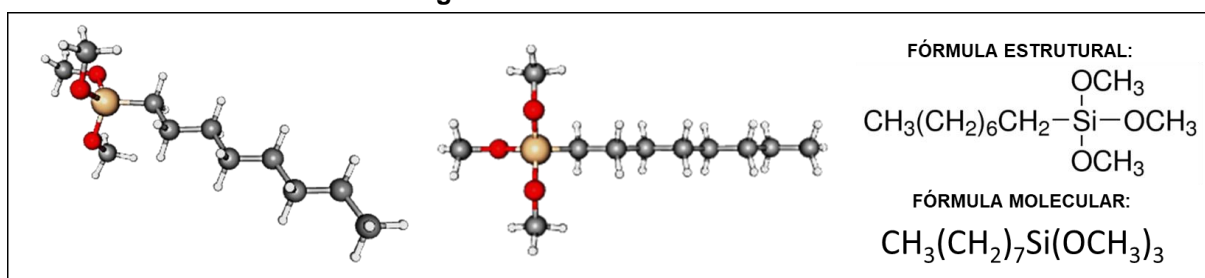
Fonte: National Center for Biotechnology Information (2023e) e Sigma-Aldrich (2023b).

Figura 80 - Isobutiltrietoxissilano.



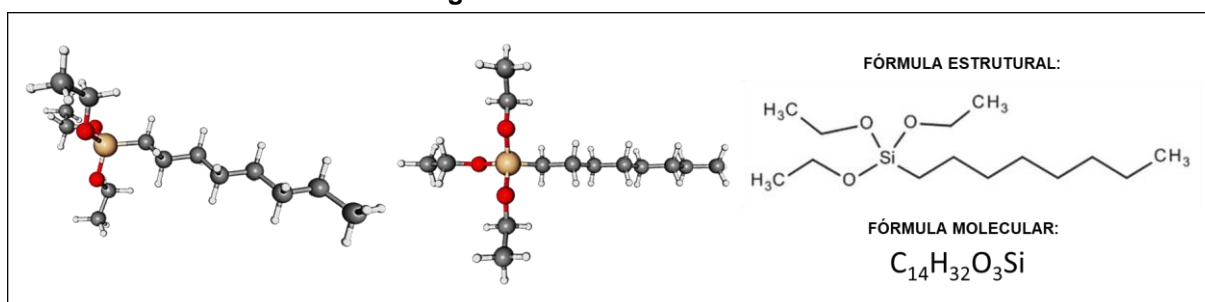
Fonte: National Center for Biotechnology Information (2023d) e Sigma-Aldrich (2023a).

Figura 81 - Trimetoxioctilsilano.



Fonte: National Center for Biotechnology Information (2023c) e Sigma-Aldrich (2023e).

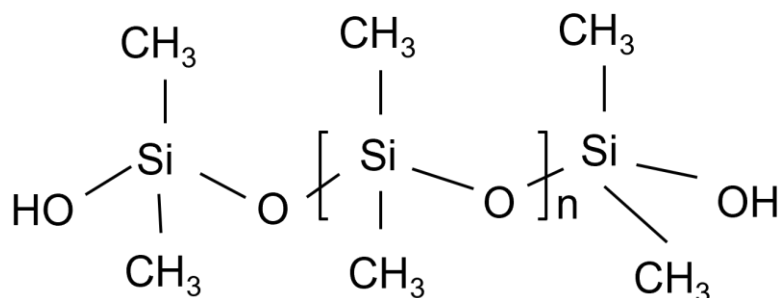
Figura 82 - Trietoxioctilsilano.



Fonte: National Center for Biotechnology Information (2023b) e Sigma-Aldrich (2023d).

Os polidimetilsiloxanos (**Figura 83**) - ou PDMS - são os siloxanos mais utilizados mundialmente, tanto em termos de volume quanto de área de aplicação. Eles estão disponíveis como fluidos de baixa ou alta viscosidade, e são reativos quando há terminações silanol (OH). A baixa tensão superficial, a boa resistência aos raios ultravioleta (no caso dos polímeros orgânicos) e a permeabilidade ao vapor são ótimas qualidades no campo do tratamento hidrofóbico (Lecomte et al., 2013).

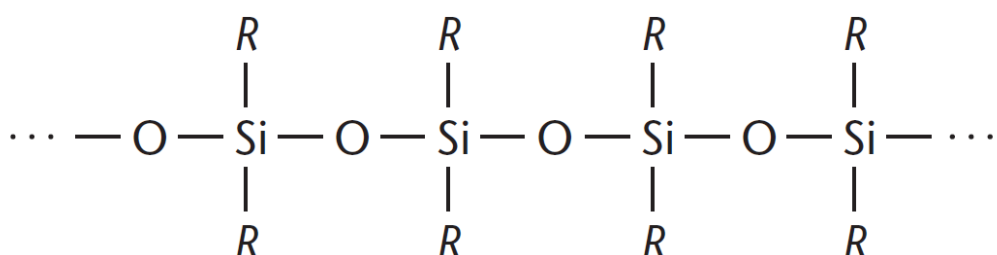
Figura 83 - Polidimetilsiloxano.



Fonte: Lecomte et al. (2013).

É comum utilizar o termo “silicones” como referência aos hidrofugantes, mas há uma diferença conceitual em relação aos silanos e siloxanos. Teoricamente, os silicones são siloxanos poliméricos ou oligoméricos lineares geralmente considerados não ramificados, cuja fórmula geral é $[-\text{OSiR}_2]_n$ (International Union of Pure and Applied Chemistry, 2014). Sua cadeia principal é constituída por átomos de silício e oxigênio alternados, e aos silícios ligam-se grupos orgânicos alquila (Feltre, 2004). Assim, “silicone” é um termo genérico que designa polímeros formados por siloxanos em sua cadeia principal (Lecomte et al., 2013). A estrutura fundamental dos silicones é representada pela **Figura 84**.

Figura 84 - Estrutura fundamental dos silicones. “R” representa um grupo alquila.



Fonte: Feltre (2004).

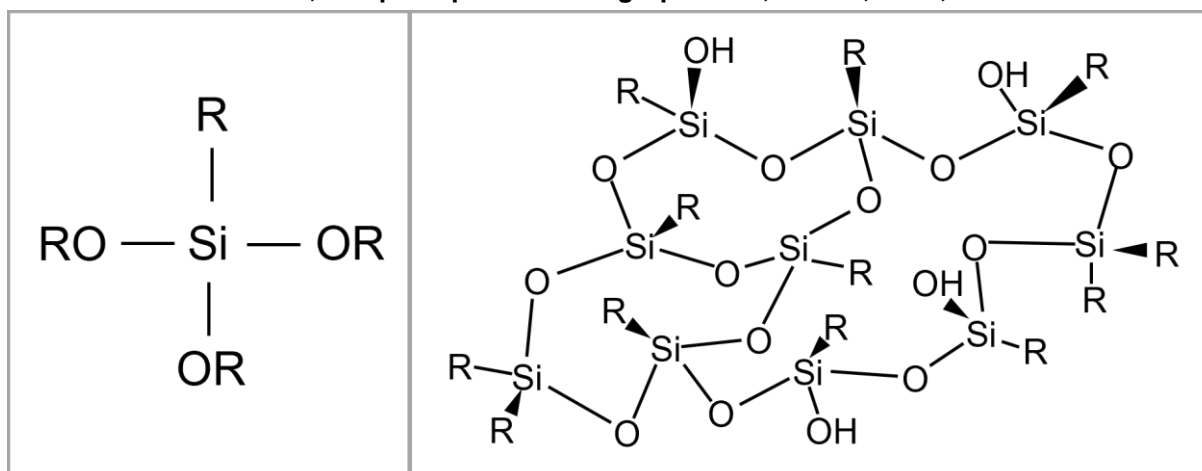
Talvez devido às reações de condensação envolvendo silanos e/ou siloxanos que resultam na formação da resina de silicone que se liga ao substrato, seja comum a utilização do termo “silicones hidrofugantes”.

Quando o agente hidrofugante é aplicado no concreto, é transportado para dentro do concreto por sucção capilar. A polimerização começa dentro do concreto. Os grupos alcoxi dos silanos reagem com o concreto e com os

outros grupos alcoxi, formando uma fina rede de siloxano polimérico ou resina de silicone nas paredes dos poros (Johansson, 2006, p.5, tradução nossa).

A **Figura 85** contém uma representação esquemática de uma resina de silicone formada a partir do alquiltrialcoxisilano.

Figura 85 - À esquerda, alquiltrialcoxisilano e à direita representação esquemática de uma resina de silicone, em que R pode ser um grupo etoxi, metoxi, metil, fenil ou octil²⁰.



Fonte: Lecomte et al. (2013).

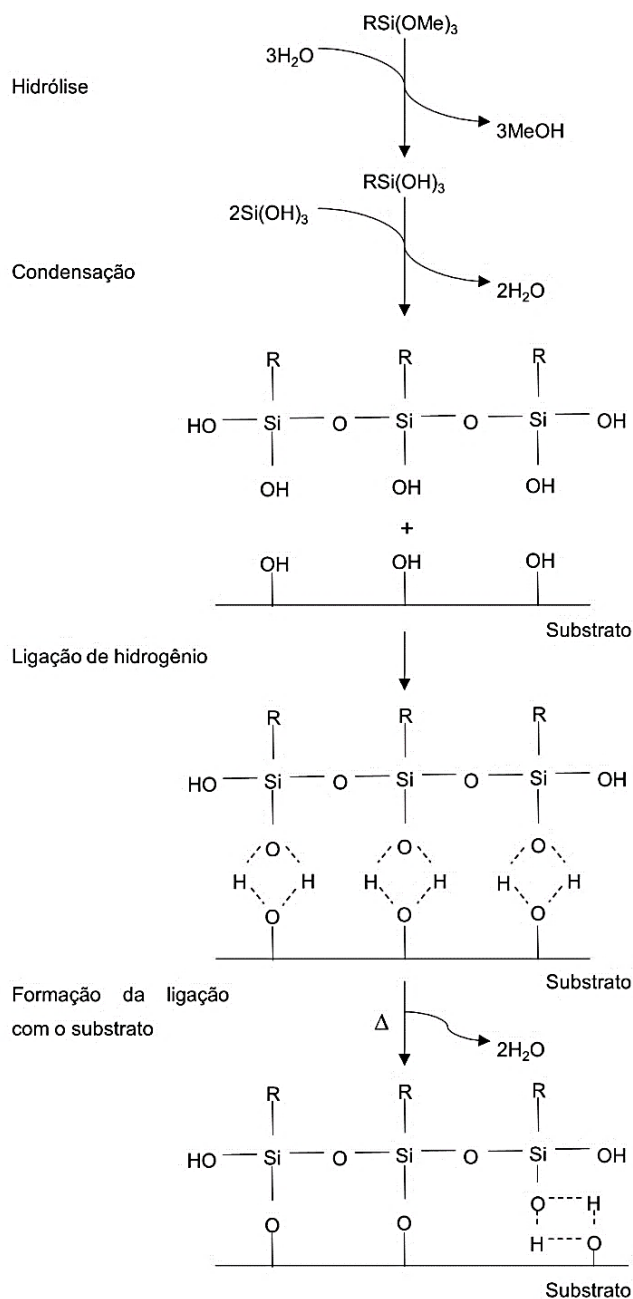
A reação química entre o silano e o substrato cimentício é ilustrada na **Figura 86**. Inicialmente, o silano reage com a água ou o vapor d'água no interior dos poros, e o grupo alcoxi passa por hidrólise, formando grupos silanol. Depois, as moléculas de silanol instáveis perdem água e condensam em uma resina de silicone, formando oligômeros. Os grupos silanol dos oligômeros então fazem ligações com os grupos OH dos silicatos do substrato. Ligações covalentes são formadas com o substrato com perda concomitante de água. Na interface, normalmente só há uma ligação covalente de cada silício do silano com o oxigênio e logo, com a superfície do substrato. Os dois grupos silanol restantes da molécula de silano estão presentes de forma condensada ou livre, enquanto os grupos "alquila" permanecem livres. A água para a hidrólise pode vir de várias fontes, pode ser adicionada, estar presente na superfície do substrato ou vir da atmosfera (Arkles, 1977). A **Figura 87** representa a substituição de uma camada de água adsorvida²¹ na superfície por uma resina de silicone. De acordo com Marani,

²⁰ Os grupos etoxi e metoxi têm, respectivamente, as fórmulas $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{O}-$ e $\text{CH}_3\text{O}-$; os grupos metil, fenil e octil têm, respectivamente, as fórmulas CH_3- , C_6H_5- , e $\text{C}_8\text{H}_{17}-$ (Feltre, 2004).

²¹ Adsorção é o aumento na concentração de uma substância dissolvida na interface de uma fase líquida e condensada devido à operação de forças superficiais. A adsorção pode inclusive ocorrer na interface de uma fase gasosa condensada (International Union of Pure and Applied Chemistry, 2014). Em geral designa a adesão de espécies químicas em alguma superfície sólida e pode ou não envolver

o tempo de cura total pode chegar a 7 dias após a aplicação, porém, a maior parte da extensão da cura ocorre nas primeiras 24 horas (informação pessoal).²²

Figura 86 - Condensação das moléculas de silano e reação com o substrato. As linhas tracejadas não são ligações, representam as reações ocorridas.

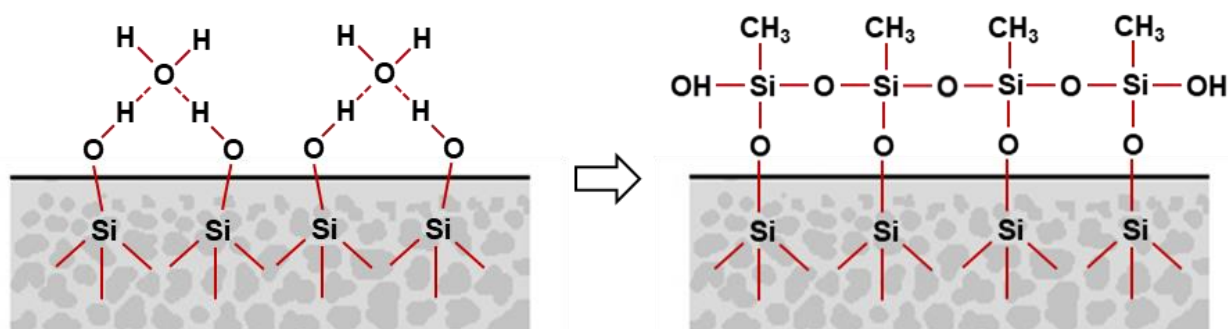


Fonte: Arkles (1977).

ligações químicas (as interações podem ocorrer por meio de ligações covalentes ou forças de Van der Waals).

²² MARANI, P. **PERGUNTAS Pesquisadora FAU USP - Hidrofugantes Wacker**. Destinatário: Vanessa de Moraes. São Paulo, 3 jan. 2023. E-mail.

Figura 87 - Representação esquemática da substituição de uma camada de água adsorvida na superfície do concreto por uma resina de silicone. As linhas tracejadas não representam ligações.



Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2017).

A mistura entre silanos e siloxanos é o produto bastante comum. Os silanos atuam bem no interior dos poros, enquanto os siloxanos atuam bem na superfície. Em materiais de construção impermeáveis como o concreto, se utiliza misturas ricas em silano, enquanto produtos ricos em siloxanos são utilizados em superfícies absorventes, como pedra natural. Geralmente as misturas são aplicadas não-diluídas ou em soluções à base de água ou solvente (Mayers, 1998).

O poder de penetração dos siloxanos é inferior ao dos silanos, devido à dimensão da estrutura molecular ser superior, sendo que os primeiros são preferencialmente utilizados em substratos porosos como as pedras, materiais cerâmicos e argamassas, enquanto os segundos são aplicados em betão denso, com poros finos (Esteves, 2014, p. 25).

Tal diferença é destacada pelo American Concrete Institute:

Por terem moléculas maiores, os siloxanos geralmente não penetram tanto no concreto quanto os silanos. Entretanto, siloxanos podem ser preferíveis em concretos muito porosos, uma vez que os silanos menos viscosos podem se difundir muito profundamente no concreto, reduzindo a capacidade hidrofóbica (American Concrete Institute, 2014, p.58, tradução nossa).

Segundo Marani, essa diferença de profundidade de penetração entre silanos e siloxanos pode influenciar o valor do ângulo de contato medido entre a água e a superfície. Isso porque enquanto os silanos penetram mais profundamente nos poros, os siloxanos permanecem na superfície do substrato, o que aumenta a repelência à água e pode resultar em ângulos de contato maiores (informação pessoal).²³

²³ MARANI, P. **PERGUNTAS Pesquisadora FAU USP - Hidrofugantes Wacker**. Destinatário: Vanessa de Moraes. São Paulo, 3 jan. 2023. E-mail.

De acordo com Selley (2014), hidrofugantes à base de silanos são uma proteção padrão contra o ataque de cloretos em concreto armado, e entre suas vantagens estão: boa profundidade de penetração, boa resistência à radiação ultravioleta, boa permeabilidade ao vapor de água, não são pegajosos e não acumulam sujeira. Já os siloxanos são mais utilizados em substratos porosos para proporcionarem o “efeito de superfície” / “efeito gota” e geralmente não são utilizados isoladamente. Entre suas vantagens estão alguma penetração, resistência à radiação ultravioleta e à oxidação e entre suas desvantagens estão possibilidade de escurecimento do substrato quando aplicado em excesso e proteção contra cloretos limitada.

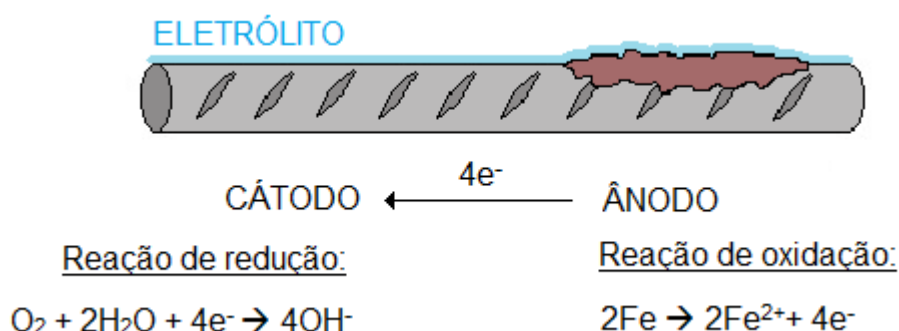
Os hidrofugantes são comumente vendidos em soluções aquosas ou em soluções de solventes orgânicos. Silanos à base de água normalmente são menos efetivos em reduzir a penetração de água no concreto (American Concrete Institute, 2014). Soluções diluídas em solventes proporcionam melhor penetração e desempenho, mas por questões ambientais fabricantes tem aumentado as soluções diluídas em água com baixo conteúdo de compostos orgânicos voláteis (VOC) (Oliveira, 2013).

4.4. Carbonatação e corrosão e relação com hidrofugantes

A atuação da água sobre estruturas de concreto armado pode gerar diversas manifestações patológicas, provocar a degradação do material e o comprometimento da estrutura. Entre as manifestações associadas à presença de água estão: degradação biológica, hidrólise dos componentes da pasta de cimento, lixiviação, surgimento de eflorescências, surgimento de manchas, danos decorrentes de reações álcali-agregado, danos decorrentes da cristalização de sais nos poros, relacionados ao processo de gelo e degelo e corrosão devido a cloretos e à carbonatação. Uma das manifestações mais comuns é a corrosão das armaduras devido à carbonatação.

A corrosão das armaduras é responsável pela diminuição de sua seção e pode gerar fissuras e deslocamentos devido às tensões internas originadas pela expansão dos óxidos e hidróxidos de ferro, além de manchas avermelhadas oriundas dos produtos da corrosão. O processo ocorre necessariamente na presença de água ou ambiente com umidade relativa elevada e oxigênio, em situações em que o revestimento da armadura é ineficaz. Não há corrosão em concretos secos, devido à ausência de eletrólitos e tampouco em concretos saturados devido à ausência de oxigênio. Como mostra a **Figura 88**, o processo envolve uma reação anódica e uma reação catódica, formando uma pilha eletroquímica: na reação anódica ocorre a oxidação do ferro e na reação catódica ocorre a redução do oxigênio em meio alcalino (Ribeiro et al., 2014).

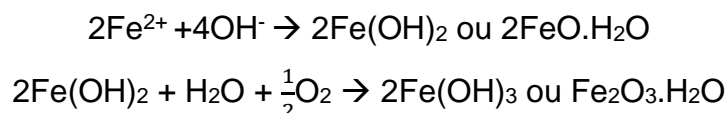
Figura 88 - Representação esquemática da corrosão da barra de aço.



Fonte: Vanessa de Moraes (2023).

O principal produto da corrosão do aço é o Fe_2O_3 hidratado – conhecido como ferrugem – que apresenta um estado de energia menor e, portanto, mais estável do

que o ferro metálico. A depender da composição e do meio corrosivo, o cátion metálico resultante do processo corrosivo pode sofrer dissolução ou então reagir com os elementos presentes no meio, como oxigênio, hidroxila, enxofre e cloretos, resultando em um filme passivo superficial. As equações abaixo representam a formação de ferrugem.



A passivação refere-se à perda de reatividade química de certos metais e ligas em determinadas circunstâncias. O filme passivo formado sobre o aço tem apenas alguns nanômetros, é compacto, aderente e inibe o processo corrosivo. Embora a ação protetora do filme passivo seja imune a danos mecânicos provocados na superfície do aço, ela pode ser destruída devido à carbonatação do concreto ou pela presença de íons cloreto, de forma que a armadura seja despассивada.

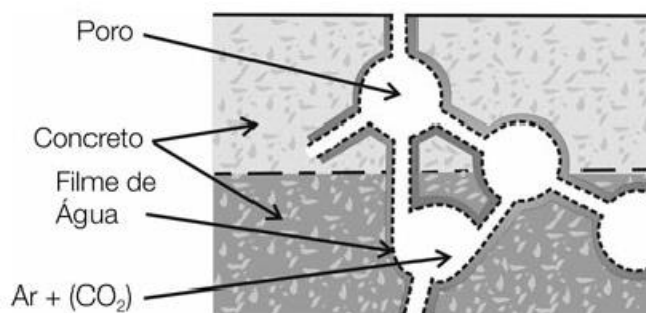
Quando a armadura está em contato com o concreto, ela geralmente está exposta a um pH em torno de 12 e nessas condições está presente em sua superfície um filme de Fe_3O_4 , um composto que atua como uma barreira entre o meio corrosivo e a superfície do aço e que protege a armadura contra a corrosão. Com a diminuição do pH para um valor em torno de 8 o filme passivo de Fe_3O_4 deixa de ocorrer e de ser estável, passando a ocorrer a corrosão e a ser formado o $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ – a ferrugem - que não é um filme protetor.

A alta alcalinidade das estruturas de concreto é devida, principalmente, aos compostos alcalinos hidratados e hidróxido de cálcio liberados a partir das reações de hidratação do cimento. A redução da alcalinidade ocorre a partir do CO_2 presente na atmosfera, do dióxido de enxofre (SO_2) e do gás sulfídrico (H_2S), que transformam os compostos do cimento em carbonatos. O CO_2 penetra nos poros do concreto, dilui-se na umidade presente na estrutura e forma o ácido carbônico (H_2CO_3). O ácido formado reage com o hidróxido de cálcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - e resulta em água e carbonato de cálcio (CaCO_3). Embora o carbonato de cálcio não deteriore o concreto, o composto consome os álcalis da pasta - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e C-S-H – e assim reduz o pH. Esse fenômeno é denominado **carbonatação**, que ocorre naturalmente nas estruturas de concreto em contato com o ar atmosférico.

Segundo Bertolini et al. (2004, p.23), em um concreto não carbonatado e livre de cloretos, a concentração dos íons hidroxila (OH^-) varia de 0,1M a 0,9M, devido à presença tanto de NaOH e KOH (sendo o último predominante, especialmente em cimentos Portland). Outros íons, como Ca^{2+} e SO_4^{2-} estão presentes somente em concentrações muito baixas.

Há a necessidade de certa quantidade de água nos poros para que as reações de carbonatação ocorram, de forma que a melhor condição para a ocorrência da carbonatação é a presença de um filme de umidade nas paredes capilares e livre acesso à entrada de CO_2 (**Figura 89**). O intervalo de umidade relativa mais crítico para a ocorrência da carbonatação encontra-se entre 60% e 70% (Bertolini et al., 2004).

Figura 89 - Carbonatação parcial do concreto em estrutura porosa não saturada.



Fonte: Ribeiro et al. (2014).

Além da umidade, também influenciam diretamente o processo de carbonatação: a temperatura, a relação água/cimento (porosidade) do concreto e o tipo de cimento utilizado na fabricação do concreto. O aumento da temperatura provoca um aumento na taxa de carbonatação, o aumento da porosidade favorece maiores profundidades de carbonatação e a capacidade do concreto em fixar o CO_2 é proporcional à alcalinidade em sua pasta de cimento.

A impregnação hidrofóbica não impede a transmissão de gases e se por um lado permite a passagem de vapor de água para fora do concreto, possibilitando sua “respiração”, também é permeável ao ingresso de CO_2 . Em geral, quando se objetiva reduzir as taxas de carbonatação, são utilizados revestimentos formadores de filme. O hidrofugante pode inclusive aumentar a taxa de carbonatação uma vez que diminui a umidade no concreto. Enquanto o concreto estiver seco, não há problema, mas se a carbonatação acelerada atingir a armadura e o concreto ficar úmido devido à perda

de hidrofobicidade ao longo do tempo, a armadura pode corroer. Assim, é importante que a estrutura seja bem mantida e que ocorram inspeções regulares, de modo que o tratamento hidrofóbico seja renovado a tempo de manter o concreto suficientemente seco (Raupach; Büttner, 2014, p. 146).

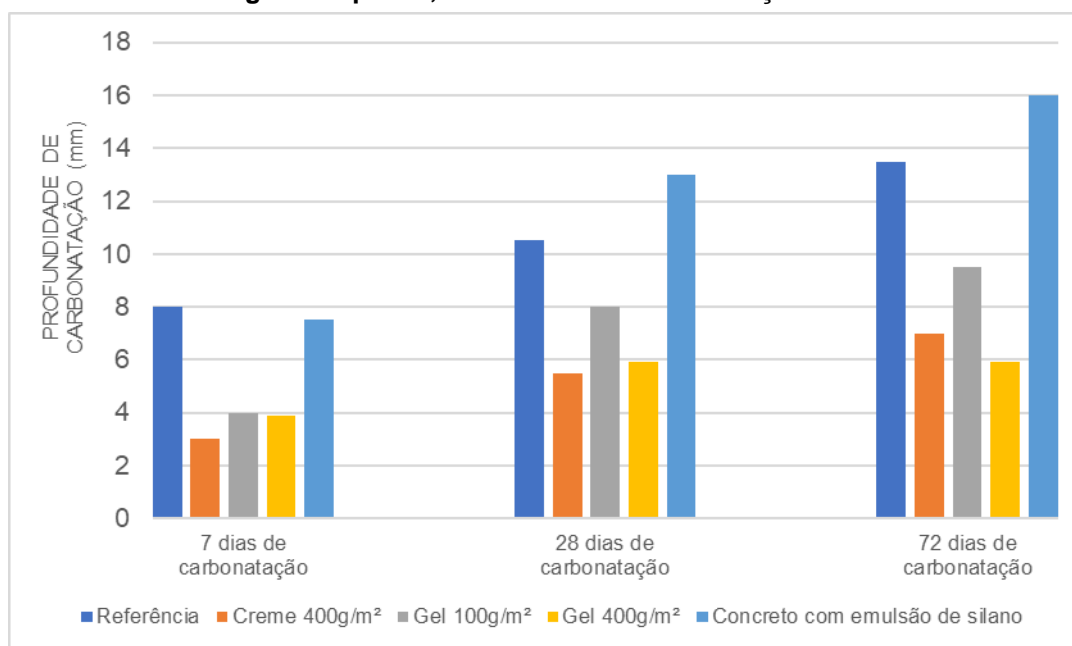
A carbonatação também pode afetar a impregnação hidrofóbica ao reduzir a taxa de polimerização para a formação da camada protetora. Segundo Johansson (2006), a composição do hidrofugante e o pH do substrato são fatores que têm influência direta nesse processo.

[...] silanos com grupos metoxi reagem significativamente mais rápido do que aqueles com grupos etoxi e um grupo alquila grande diminui a velocidade de reação. O concreto com mais idade normalmente é carbonatado na camada superficial, o que significa que o valor do pH é reduzido [...] Mesmo que haja variação entre diferentes silanos, a curva tem um formato de V parecido em uma escala logarítmica, com um valor de pH mínimo em torno de 6,7. No concreto carbonatado, com a diminuição do valor do pH de 13 para 9, isso reduziria a taxa de polimerização em um fator em torno de 50 (Johansson, 2006, p.5, tradução nossa).

Os principais métodos utilizados para o reparo de estruturas carbonatadas são baseados na realcalinização do concreto, substituição do concreto carbonatado por um novo material alcalino, limpeza e proteção das armaduras e limitação ao ingresso de umidade, fator em que a impregnação hidrofóbica tem influência.

Em experimento realizado por Zhang et al. (2017) amostras de concreto produzidas com relação água/cimento de 0,5 foram impregnadas com hidrofugante gel nas dosagens de 100g/m² e 400g/m² (trietoxisilano) e hidrofugante creme na dosagem de 400g/m² (alquilalcoxissilano) e foi produzido um corpo de prova de concreto com 2% emulsão de silano (octiltrietoxissilano) na mistura (o que se costuma denominar de “hidrofugação integral”), em relação à massa de cimento. Os corpos de prova foram submetidos à carbonatação acelerada com aproximadamente 20% de umidade relativa, umidade de 70% e temperatura de 20° a 23° aos 7, 28 e 72 dias (**Gráfico 3**). Foram realizados também ensaios de absorção capilar.

Gráfico 3 - Profundidade de carbonatação em concreto tratado e não tratado com hidrofugantes após 7, 28 e 72 dias de carbonatação acelerada.



Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2017).

Os resultados indicaram que as impregnações hidrofóbicas chegaram a reduzir a profundidade de carbonatação em relação à amostra não tratada em até 50%, e que a maior quantidade de produto aplicado (400g/m²) apresentou melhores resultados. Apenas no concreto produzido com emulsão de silano foi verificado um aumento da carbonatação e uma das razões possíveis é que a adição de silano retarda o processo de hidratação do cimento (Zhang et al., 2017). Por outro lado, neste caso também foi observada a redução da absorção capilar. Uma importante observação feita pelos autores é a de que a reação de carbonatação pode destruir o filme hidrofóbico dentro dos poros capilares e causar uma absorção levemente maior de água com a passagem do tempo, embora a absorção seja ainda bastante inferior em relação ao corpo de prova de referência.

Nesta pesquisa, a aplicação de hidrofugantes é investigada como proteção da superfície de uma estrutura de concreto aparente já carbonatado, com frente de carbonatação que atinge as armaduras da estrutura. No entanto, embora esteja fora do escopo da dissertação, as considerações feitas sobre relação entre carbonatação, corrosão do aço e hidrofugante são aplicáveis aos reparos feitos com argamassas estruturais à base de cimento.

4.5. Recomendações quanto à escolha do hidrofugante

A escolha do silano ou siloxano mais apropriado não obedece a um padrão universal, depende do tipo de concreto, umidade, pH etc., embora hoje quase todos os hidrofugantes do mercado consistam em alquiltrietoxisilanos, com três a oito átomos de carbono no grupo alquila (Johansson, 2006, p.5). O desempenho do hidrofugante variará de acordo com suas propriedades químicas, tamanho das moléculas, teor de sólidos, forma de aplicação, número de camadas de aplicação e propriedades do substrato, como a porosidade e absorção (Esteves, 2014). Custos iniciais reduzidos podem refletir-se em menor durabilidade e custos de manutenção elevados, gerando uma solução com custo global maior, se o produto não for o ideal para o material a proteger.

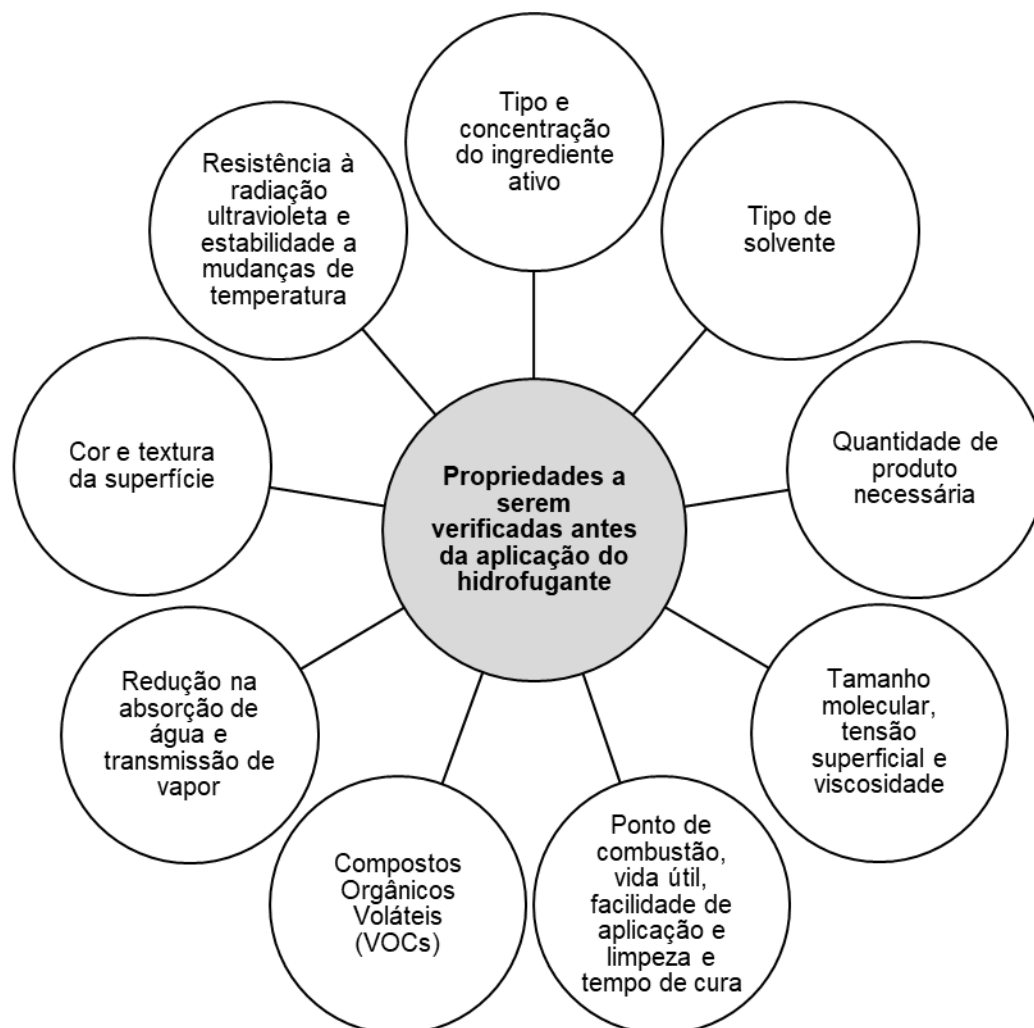
Silanos são hidrofugantes apropriados a substratos cimentícios de poros mais finos, enquanto siloxanos, por serem moléculas polimerizadas são menos apropriados para esse tipo de substrato. Outras características a serem observadas são a potencial alteração de cor da superfície pelo produto (verificado por meio de pré-testes), desempenho em serviço (o que pode ser verificado por meio de obras de referência) e impacto ambiental (Oliveira, 2013). Segundo Baltazar²⁴ (2012 apud Esteves, 2014) ao escolher um produto hidrofugante é preciso considerar:

- O tipo de substrato: a estrutura porosa e a natureza deste podem influenciar a profundidade de penetração do produto;
- O tipo de solvente: condicionado pelo local de tratamento (abertos ou fechados) e pelo grau de exposição aos agentes atmosféricos;
- Fatores econômicos: deve-se considerar o custo global do tratamento, incluindo o custo inicial, o custo de aplicação e o custo de manutenção;
- Exigências de durabilidade: deve-se considerar vida útil do produto;

De acordo com o American Concrete Institute (2014, p.57), existe uma ampla gama de produtos hidrofugantes no mercado, e não se deve especificá-los genericamente, devendo antes suas propriedades serem verificadas, como mostra a **Figura 90**.

²⁴ Baltazar, L (2012) – Proteção superficial do betão. Comportamento e durabilidade de produtos hidrófugos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Figura 90 - Propriedades a serem verificadas antes da aplicação do hidrofugante.



Fonte: Vanessa de Moraes (2023), com base em American Concrete Institute (2014, p. 57).

No Brasil, os hidrofugantes mais vendidos são aqueles à base da mistura de silano e siloxano com alta diluição. Tais produtos são recomendados para a aplicação e proteção de concreto não estrutural, argamassas e cerâmicas e muitas vezes são incorretamente utilizados para a proteção de concreto armado ou estrutural. Produtos à base de silano e misturas à base de silano e siloxano têm preços bastante similares, o que afetará o preço final é a diluição do produto. Tecnicamente, a vantagem de produtos à base de silanos é proporcionar uma maior profundidade de penetração e a dos produtos à base de mistura de silano e siloxano é o “efeito gota”, por isso estes são mais utilizados (informação pessoal).²⁵

²⁵ MARANI, P. **PERGUNTAS Pesquisadora FAU USP - Hidrofugantes Wacker**. Destinatário: Vanessa de Moraes. São Paulo, 3 jan. 2023. E-mail.

4.6. Durabilidade dos sistemas de hidrofugação

Uma vez que a durabilidade dos sistemas de hidrofugação depende essencialmente das condições ambientais às quais estão sujeitos os elementos tratados, torna-se difícil estimar sua vida útil (Esteves, 2014, p.31). Segundo McAuliffe (2019), em superfícies não trafegáveis, hidrofugantes à base de silanos e siloxanos com baixo teor de sólidos, podem durar de 10 a 15 anos e hidrofugantes altamente concentrados em silanos aplicados em duas camadas podem apresentar durabilidade de 20 a 30 anos. Em superfícies trafegáveis, como as de pontes, a durabilidade desses produtos é reduzida, uma vez que o concreto é desgastado mais rápido, o que remove a proteção. Nesses casos, estima-se uma durabilidade entre 8 e 12 anos, considerando produtos altamente concentrados em silanos.

De acordo com o American Concrete Institute (2014), tanto silanos como siloxanos devem ser reaplicados a cada 5 a 10 anos para que sejam mantidas as características do hidrofugante, embora se tenha relato de um caso na Suécia em que um hidrofugante à base de silano tenha mantido bom desempenho em uma superfície vertical após 35 anos. Christodoulou et al. (2017), ao retirar amostras de vigas de uma ponte do Reino Unido construída entre 1968 e 1970 e submetê-las a testes de absorção capilar, verificou que 20 anos após a aplicação de isobutiltrimetoxisilano o hidrofugante ainda apresentava um efeito protetor residual. Caso o desempenho do hidrofugante ainda seja parcialmente efetivo, será necessária menor quantidade de produto na reaplicação.

Não há um consenso entre os autores sobre as causas de deterioração dos hidrofugantes. Segundo Pinto²⁶ (1997 apud Esteves 2014, p.30) as variações diárias e sazonais de temperatura e umidade, a radiação solar (UV), chuva e poluição atmosférica podem ser agentes de degradação. Segundo Charola (2001), compostos à base de silício não são sensíveis à radiação UV e a perda de repelência à água dos hidrofugantes pode ser atribuída à “sujidade” da superfície tratada, através da deposição de partículas. Esta sugestão baseia-se no resultado de um teste de exposição de longo prazo, em que as amostras que receberam impacto da chuva

²⁶ Pinto, A. (1997) – Conservação de pedras granílicas. Estudo da acção de hidrófugos. ITG 22, LNEC, Lisboa, 193p.

direta mantiveram melhor repelência à água do que aquelas em posições protegidas onde o pó se acumulou.

Segundo Maranhão e Loh (2010) a hidrólise das ligações de oxigênio e silício (O-Si-O) também pode ser um fator associado à degradação de hidrofugantes, que é intensificado em ambientes com o PH elevado como os presentes nos poros de produtos cimentícios.

De acordo com o American Concrete Institute (2014), a aplicação dos hidrofugantes sem o adequado preparo prévio das superfícies, em um concreto deteriorado ou fraco, é um fator que acarreta a redução da vida útil do sistema de hidrofugação.

Para Pedro Marani, a durabilidade está diretamente relacionada à quantidade de silanos e/ou siloxanos e como estão dispostos na camada do material. Quanto maior a diluição do produto, menor a quantidade de silanos e siloxanos aplicados. Outro fator que afeta a durabilidade é a escolha correta do produto para cada tipo de substrato: como exemplo, em substratos de baixa porosidade é necessário utilizar produtos de menor tamanho de molécula (silanos) para que seja garantida uma maior profundidade de penetração. Com relação à manutenção, se a aplicação do produto for bem-feita, com escolha, diluição e quantidades adequadas do produto, não há necessidade de reaplicação (informação pessoal).²⁷

Segundo a norma europeia EN 1504, para proporcionar durabilidade aos sistemas de hidrofugação são recomendadas inspeções regulares e a realização de manutenção quando necessário (Raupach; Büttner, 2014).

Embora não haja um consenso em relação aos fatores que condicionam a durabilidade dos sistemas de hidrofugação, vários experimentos corroboram a hipótese de que é diretamente afetada pela profundidade de penetração.

²⁷ MARANI, P. **PERGUNTAS Pesquisadora FAU USP - Hidrofugantes Wacker**. Destinatário: Vanessa de Moraes. São Paulo, 3 jan. 2023. E-mail.

4.7. Profundidade de penetração dos hidrofugantes

Silanos e siloxanos não são estáveis à radiação ultravioleta (Johansson, 2006), e a camada do hidrofugante mais afetada é a superficial, uma vez que os raios não penetram no substrato. Conseqüentemente, para que se obtenha boa durabilidade do efeito de repelência de água, um certo valor mínimo de profundidade de penetração no material é necessário (De Vries e Polder, 1997).

O efeito hidrofóbico a longo prazo obtido com alquil silanos depende da extensão que os raios de luz e os raios ultravioleta são capazes de destruir as ligações Si-C. Quanto mais profundamente o silano penetrar na superfície do elemento a ser protegido, menor será a ação destrutiva dos raios de luz e dos raios ultravioleta e maior será o efeito a longo prazo do silano (Rodder, 1987, p.2, tradução nossa).

A profundidade de penetração do hidrofugante é definida como a distância da superfície à linha que divide o concreto seco e o concreto molhado após a aspersão de água na seção transversal de um corpo de prova rompido (Johansson, 2006). Quanto maior a profundidade de penetração, maior é a resistência da superfície tratada à abrasão e à escamação e maior é a durabilidade do tratamento. O efeito de proteção diminui rapidamente ao longo do tempo quando não há profundidade de penetração suficiente. Essa propriedade é particularmente importante na proteção contra os efeitos de gelo e degelo, pois impede o ingresso da água em maiores profundidades, situação em que ocorre a fissura superficial do concreto (Basheer e Cleland, 2011).

A eficiência dos hidrofugantes na redução da absorção capilar também depende da profundidade de penetração atingida, uma vez que, devido à existência de imperfeições no substrato, um tratamento apenas superficial dificilmente é eficaz, além de estar sujeito ao desgaste e a fatores de degradação que causarão problemas dentro de um curto prazo (Namoulniara et al., 2019). Assim, a profundidade de penetração é importante não só para prolongar a durabilidade do sistema de hidrofugação, mas também para maximizar a repelência à água (Oliveira, 2013, p.24).

Alguns fatores são importantes para que o hidrofugante possa alcançar uma profundidade de penetração eficiente: porosidade e teor de umidade do substrato, tempo de contato com a superfície e velocidade de reação, e características do produto como o tamanho, o tipo de molécula e viscosidade (Pan et al, 2017). Alta

porosidade, baixo teor de umidade e um longo tempo de contato proporcionam maior profundidade de penetração.

Para Wittmann, Zhang e Akira (2010), a profundidade de penetração depende principalmente de quatro fatores: o tipo de agente hidrofóbico aplicado, a relação água/cimento do concreto (que condiciona a porosidade), o teor de umidade e o preparo da superfície. Segundo Johansson et al. (2006), os três fatores que mais afetam a profundidade de penetração são o tempo de contato entre o hidrofugante e o substrato, a porosidade e a saturação do concreto, embora outros fatores como a composição do hidrofugante, tamanho das moléculas e limpeza da superfície também interfiram nessa propriedade.

As moléculas de siloxano são maiores que as de silano, e por isso é mais difícil de obter uma profundidade de penetração com elas. Assim, siloxanos não deveriam ser utilizados em concretos densos. Para que se obtenha um bom resultado de impregnação é importante que a superfície esteja limpa antes do tratamento. O hidrofugante pode ser aplicado como um fluido ou como uma espécie de emulsão. A profundidade de penetração aumenta com o tempo de sucção capilar, baixa umidade e alta porosidade (Johansson, 2006, p.6, tradução nossa).

Sobre a influência do tamanho das moléculas na profundidade de penetração, o autor afirma:

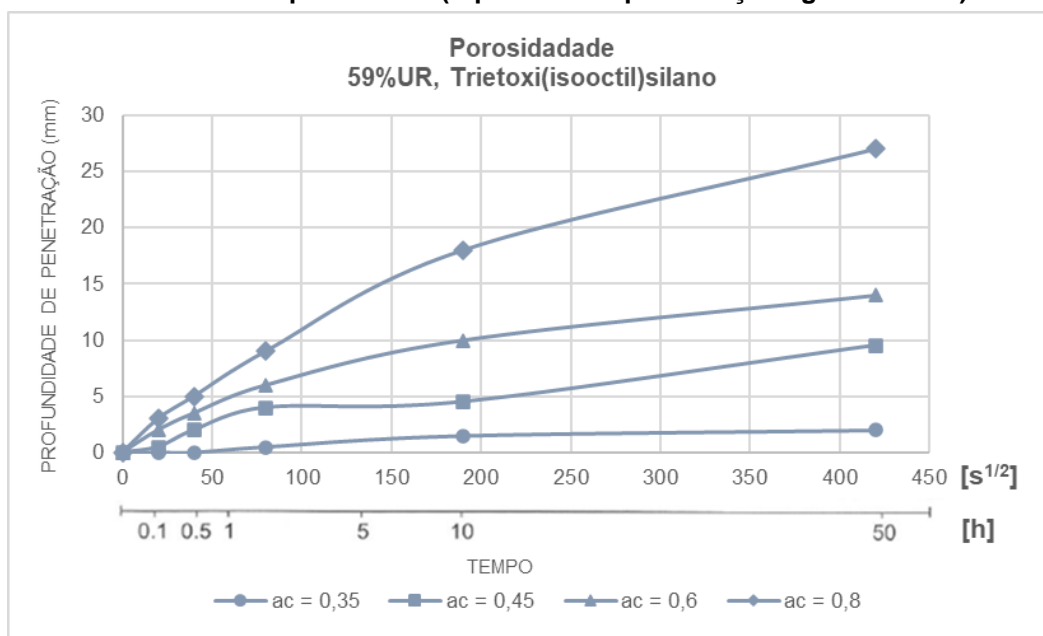
A reatividade química e o tamanho da molécula do hidrofugante afetam a profundidade de penetração efetiva. Um silano pequeno adentra o concreto mais rápido do que um silano grande, o que resulta assim em uma profundidade de penetração efetiva maior. Uma reatividade química alta do silano tem o efeito oposto. Quando a polimerização se inicia, o tamanho da molécula aumenta e a penetração diminui (Johansson, 2006, p.32, tradução nossa).

Além dos fatores mencionados, Namouniara et al. (2019) apontam como condicionante da profundidade de penetração propriedades do concreto como tipo de cimento, a natureza dos agregados e o pH, a temperatura do substrato e a forma de aplicação, a quantidade e a qualidade do hidrofugante.

O **Gráfico 4** relaciona profundidade de penetração e porosidade, o **Gráfico 5** relaciona profundidade de penetração e umidade relativa, O **Gráfico 6** relaciona a profundidade de penetração com o tamanho da molécula, a **Figura 91** apresenta diferentes profundidades de penetração para diferentes dosagens, a **Figura 92** apresenta diferentes profundidades de penetração para diferentes teores de umidade

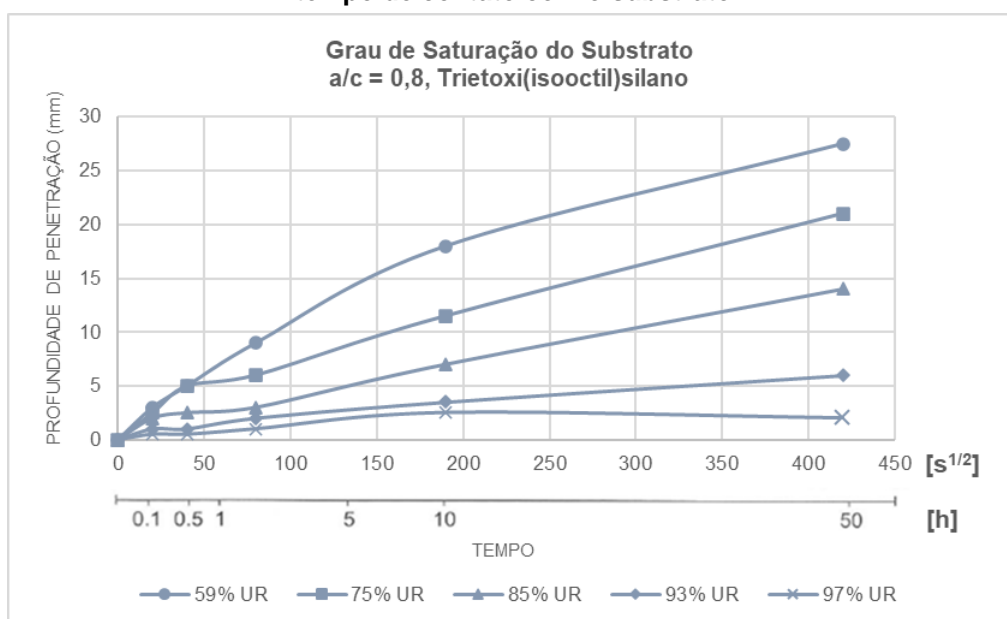
e a **Tabela 5** associa profundidade de penetração e redução na absorção de água com a dosagem e a porosidade. Nota-se que a profundidade de penetração aumenta com a quantidade de produto aplicada, com a porosidade e diminui com o aumento da umidade relativa.

Gráfico 4 - Profundidade de penetração do hidrofugante em função do tempo de contato com o substrato e da porosidade (representada pela relação água-cimento).



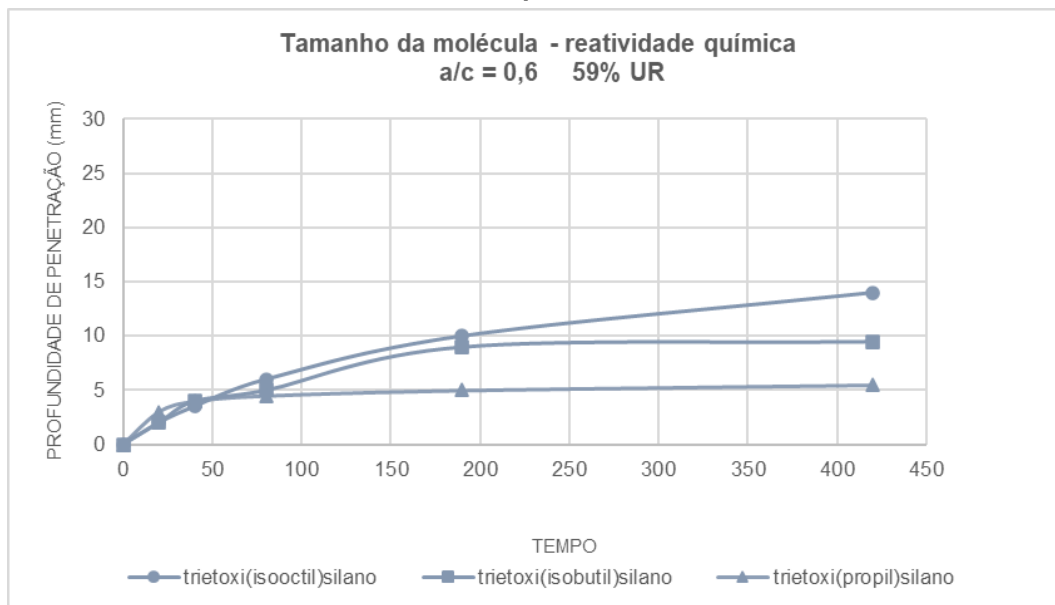
Fonte: Adaptado de Johansson et al. (2006).

Gráfico 5 - Profundidade de penetração do hidrofugante em função da umidade relativa e do tempo de contato com o substrato.



Fonte: Adaptado de Johansson et al. (2006).

Gráfico 6 - Perfis de penetração de três hidrofugantes diferentes. O tempo no eixo x é a duração do contato no tratamento. A profundidade de penetração foi medida quatro meses depois.



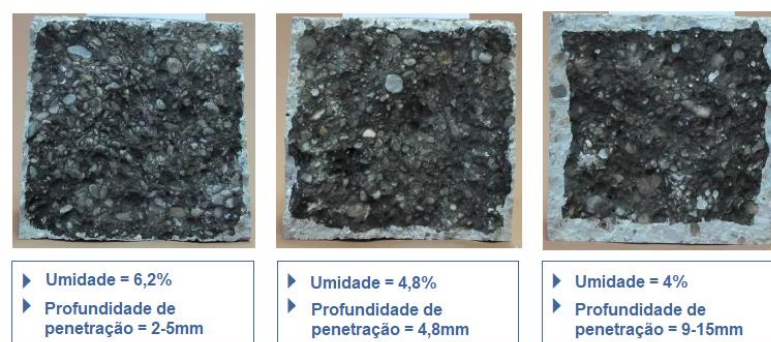
Fonte: Adaptado de Johansson (2006).

Figura 91 - Diferentes profundidades de penetração para diferentes dosagens de creme hidrofugante com 80% de teor de sólidos.



Fonte: Wacker ([20--d?]).

Figura 92 - Diferentes profundidades de penetração para diferentes teores de umidade.



Fonte: Wacker([20--d?]).

Tabela 5 - Profundidade de penetração e redução da absorção de água em função da dosagem e da porosidade do concreto.

Creme hidrofugante à base de silano (80%)	Dosagem (g/m ²)	C 25/30 (a/c=0,7)	C 40/50 (a/c=0,45)
Profundidade de penetração (mm)	200	7 a 9	5 a 7
Redução na absorção de água (%)		94	91
Profundidade de penetração (mm)	400	11 a 13	6 a 11
Redução na absorção de água (%)		91	93

Fonte: Adaptado de Wacker ([20--d?]).

A influência da quantidade de produto aplicada, porosidade do concreto e umidade do substrato na profundidade de penetração é também mencionada pelo American Concrete Institute (2014): quanto maior a quantidade de produto aplicada, maior a porosidade e menor o teor de umidade no substrato, maior será a profundidade de penetração.

Produtos hidrofugantes com maior viscosidade (em gel ou creme) têm mais tempo de contato com a superfície que tratamentos líquidos (que evaporam ou escorrem mais rápido), por isso tendem a ter maior profundidade de penetração (Malaga, 2015). Assim, como os hidrofugantes à base de creme têm um tempo de secagem maior que os hidrofugantes líquidos, isso resulta em uma profundidade de penetração e um potencial de proteção maior (Sohawon e Beushausen, 2018). Os cremes foram desenvolvidos para obter boa profundidade de penetração em concretos com baixa porosidade, uma vez que o maior tempo de contato entre o hidrofugante em forma de creme e a superfície resulta em maior absorção capilar (Charola, 2001).

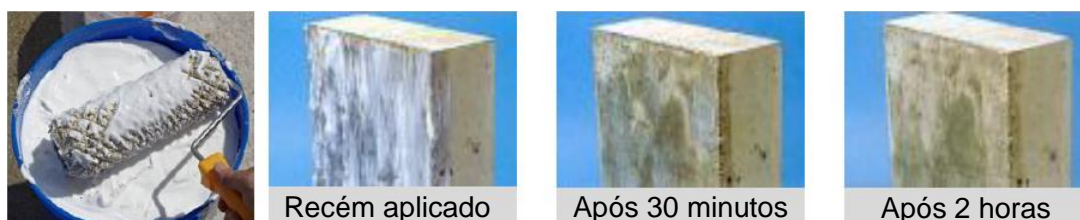
Esses produtos caracterizam-se por serem tixotrópicos²⁸ e apresentam a vantagem de proporcionarem maior controle quando da aplicação pois formam uma camada cremosa que depois de algum tempo desaparece (**Figura 93**). A perda de material também é controlada, uma vez que gotejamentos e escoamentos são evitados.

A maior vantagem do creme hidrofugante comparativamente às impregnações convencionais de baixa viscosidade é que até mesmo

²⁸ A tixotropia pode ser simplificada como a propriedade que certos géis têm de se tornarem fluidos quando agitados e de voltarem a ser géis quando deixados em repouso (THIXOTROPY, 2023) ou fenômeno que faz diminuir a viscosidade de certos líquidos ao serem agitados (TIXOTROPIA, 2023).

superfícies verticais e tetos podem ser tratados sem que o material goteje ou pingue de forma descontrolada. Isso garante que toda a superfície seja uniformemente impregnada e protegida (Hager, 1998, p. 211, tradução nossa).

Figura 93 – Creme hidrofugante logo após a aplicação, depois de 30 minutos e depois de 2 horas.



Fonte: Wacker ([20--d?]).

Segundo Hager (1998), as principais características dos cremes hidrofugantes são:

- Boa penetração no substrato;²⁹
- Alto conteúdo de ingredientes ativos;
- Resistência a álcalis;
- Redução drástica na absorção capilar;
- Pouca influência na permeabilidade ao vapor de água;
- Proteção contra sais de degelo;
- Adesão de revestimento;
- São livres de solventes (compatíveis com o meio ambiente);
- Têm baixa volatilidade;
- São tixotrópicos, logo podem ser aplicados sem perdas;
- Podem ser facilmente aplicados por spray, pincel ou rolo;
- Economizam tempo, pois a aplicação se dá de uma só vez.

Uma das vantagens dos cremes hidrofugantes é o controle da aplicação que proporcionam, uma vez que o produto fica visível na superfície muito mais tempo que os hidrofugantes líquidos. A maioria dos hidrofugantes líquidos são absorvidos dentro de 15 a 20 minutos, enquanto os cremes podem ficar visíveis nas superfícies por

horas. Isso ajuda quem o aplicador a identificar as áreas da superfície já tratadas (McAuliffe, 2019).

Segundo Marani, o controle da quantidade de produto aplicada é realizado por meio da média da quantidade de produto utilizado e da área total e esse valor é um valor médio e não homogêneo. A principal vantagem dos produtos em creme é o maior controle e maior homogeneidade da quantidade aplicada por conta de sua tixotropia (informação pessoal).³⁰

Segundo Wacker ([20--b?]), os hidrofugantes líquidos geralmente devem ser aplicados em várias camadas para que seja alcançada a profundidade de penetração desejada em superfícies verticais. Como o material pode escorrer antes de penetrar no concreto, são recomendados produtos com maior viscosidade como o creme para que seja garantido o tempo de contato adequado e menos perdas.

Em experimentos de Wittmann, Zhang e Akira (2010) foram realizadas comparações entre os desempenhos de silano líquido, creme a base de silano, gel à base de silano, mistura de silano e siloxano líquida, silicato de sódio e silicato de sódio acrílico relativamente a: profundidade de penetração, absorção de água, resistência à penetração de cloretos e redução na corrosão das áreas das armaduras. O gel e o creme apresentaram os melhores desempenhos em praticamente todos os ensaios. Com relação à profundidade de penetração os maiores valores foram obtidos na ordem decrescente: gel à base de silano, creme à base de silano e silano líquido. Esses resultados foram influenciados pelas concentrações e consistências dos produtos.

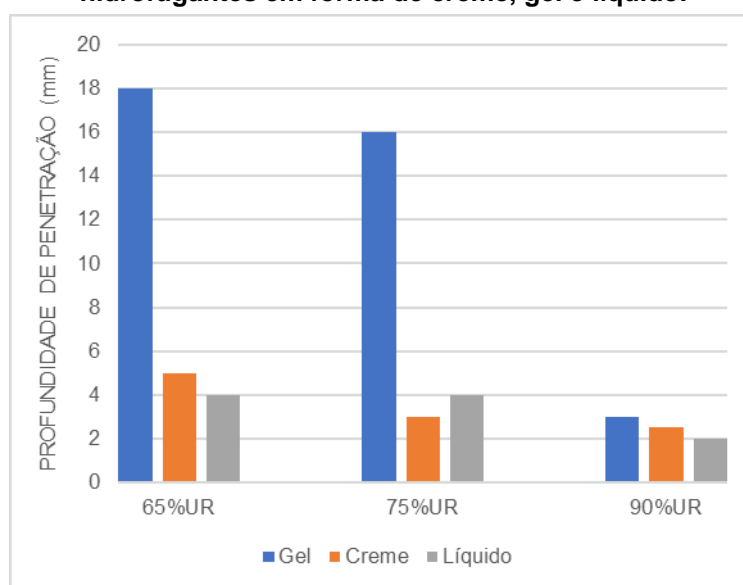
Penetrações mais profundas puderam ser atingidas com o gel e o creme a base de silano, porque ambos têm mais conteúdo ativo de silano do que o silano líquido. Adicionalmente, eles podem permanecer na superfície após a aplicação, havendo aumento da penetração ao longo do tempo até a absorção total. Nesse sentido, a evaporação - que é um problema em silanos de baixa viscosidade durante a aplicação - pode ser minimizada. (Whittman; Zhang; e Akira, 2010, p.104, tradução nossa).

O **Gráfico 7** ilustra a relação entre a profundidade de penetração e diferentes tipos de hidrofugantes (em forma de gel, creme ou líquido) com a umidade relativa para um determinado tipo de concreto. Nota-se que o aumento da umidade relativa

³⁰ MARANI, P. **PERGUNTAS Pesquisadora FAU USP - Hidrofugantes Wacker**. Destinatário: Vanessa de Moraes. São Paulo, 3 jan. 2023. E-mail.

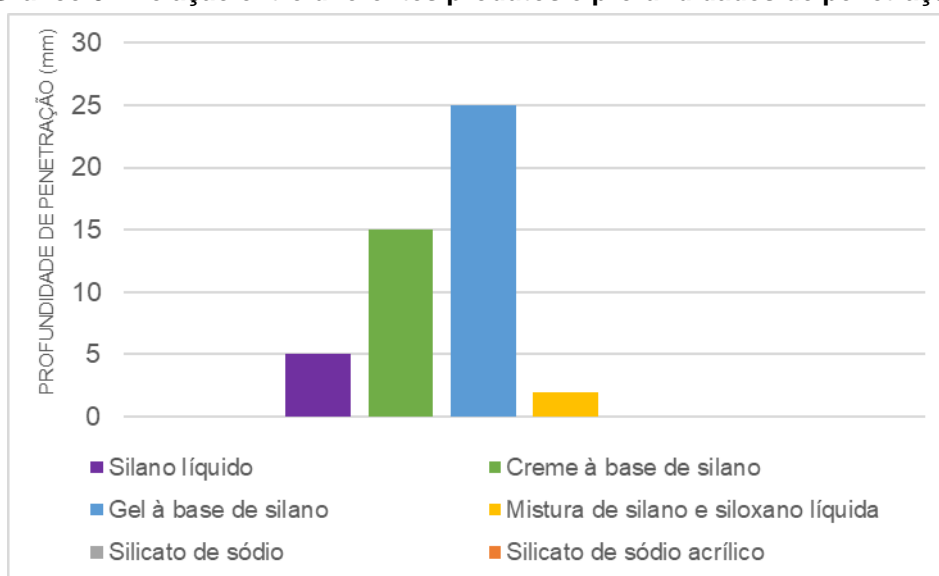
provoca a diminuição da profundidade de penetração e que produtos com consistência de gel atingem maiores profundidades. O **Gráfico 8** apresenta os resultados de Wittmann, Zhang e Akira (2010) em que há diferentes profundidades de penetração para hidrofugantes com diferentes consistências e composições. O creme e o gel hidrofugante à base de silanos apresentaram as maiores profundidades de penetração.

Gráfico 7 - Profundidade de penetração em função de diferentes umidades relativas para hidrofugantes em forma de creme, gel e líquido.



Fonte: Adaptado de Bofeldt e Nyman (2001).

Gráfico 8 - Relação entre diferentes produtos e profundidades de penetração.

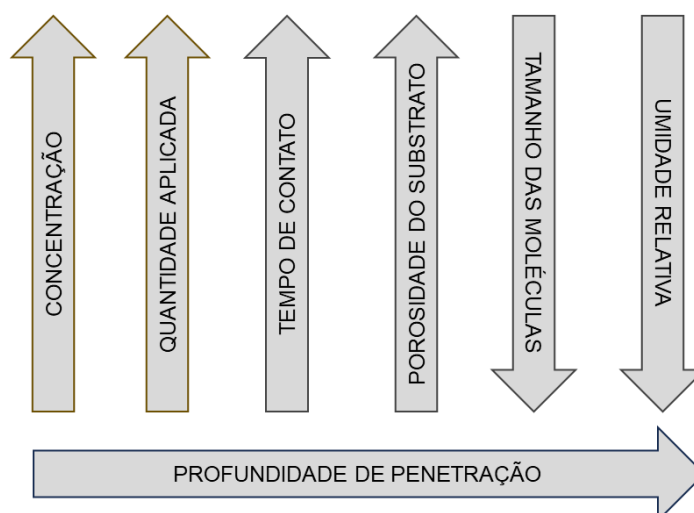


Fonte: Wittmann, Zhang e Akira (2010).

De acordo com Di Mundo et al. (2020), um gel é feito por meio da adição de um espessante mineral ao ingrediente ativo, que após a aplicação pode ser lavado ou escovado e o creme é a mistura do silano com a água na presença de emulsificantes e em ambos os casos a pasta obtida pode ser aplicada com *spray airless* na superfície do concreto. Segundo Marani, gel e creme costumam designar os mesmos produtos com nomes diferentes (informação pessoal).³¹

A **Figura 94** resumidamente ilustra as variáveis que têm influência na profundidade de penetração, segundo a bibliografia consultada. A profundidade de penetração aumenta com a concentração do hidrofugante, a quantidade aplicada, o tempo de contato e a porosidade do substrato e reduz com o tamanho das moléculas e a umidade relativa.

Figura 94 - Variáveis que têm influência na profundidade de penetração.



Fonte: Vanessa de Moraes (2023).

Ressalta-se que, observando os resultados apresentados no **Gráfico 6** obtidos por Johansson (2006), as maiores profundidades de penetração identificadas após 4 meses foram do trietoxi(isooctil)silano, trietoxi(isobutil)silano e trietoxi(propil)silano, nessa ordem. Embora neste caso as moléculas de silano com os maiores radicais alquila tenham apresentado maior profundidade de penetração, a **Figura 94** refere-se ao tamanho das moléculas de silano comparativamente às moléculas de siloxano, de acordo com a literatura consultada.

³¹ MARANI, P. **PERGUNTAS Pesquisadora FAU USP - Hidrofugantes Wacker**. Destinatário: Vanessa de Moraes. São Paulo, 3 jan. 2023. E-mail.

4.8. Concentração do hidrofugante

As concentrações de sólidos - ou espécies ativas - dos produtos comerciais no Brasil são, comumente, inferiores a 20% em massa. Para essas concentrações a profundidade de penetração do produto é limitada a um milímetro ou menos, sendo o nível de proteção e a durabilidade da hidrofugação potencialmente reduzidos, como indicam os resultados da pesquisa de De Vries e Polder (1997). Os autores verificaram que produtos à base de silanos, sem diluição e com elevada concentração de espécies ativas, acima de 99% ou 100% em massa, propiciaram as maiores profundidades de penetração. Segundo De Witte et al.³²(1993, p.173-181 apud CHAROLA, 1995, p.13), o aumento da concentração do hidrofugante tem uma relação direta com a sua durabilidade, de modo que a efetividade a longo prazo do produto aumenta com a concentração do teor de ativos.

Investigações de Basheer e Cleland (2011) também corroboram o padrão verificado por outros autores, ou seja, as profundidades de penetração são maiores em composições com teores superiores a 40% de silano, em contraposição à penetração propiciada pela combinação de silano-siloxano. Segundo De Witte et al.³³(1993, p.173-181 apud Charola 1995, p.13) devido à alta volatilidade dos silanos, a concentração do produto comercial deve ser maior do que 40%, enquanto para siloxanos oligoméricos deve ser acima de 5%.

Segundo Pinto³⁴ (1997 apud Esteves, 2014, p.24) para assegurar, após a polimerização, uma quantidade final suficiente de silanos dentro do suporte deve-se utilizar soluções concentradas em torno de 40%. Segundo Vries e Polder³⁵(1997 apud Esteves, 2014, p.25), o risco de volatilidade da matéria ativa para siloxanos é inferior ao registrado nos silanos, sendo utilizadas soluções concentradas de apenas 10 a 20% de matéria ativa. Em todas as situações, é importante que se considere que as concentrações dos produtos estejam alinhadas com as características e demandas de cada tipo de substrato.

³² De Witte, et. al. 1993 Surface Protectants for Stone Materials. The Current Situation in Northern Europe in Science and Technology for Cultural Heritage (2): 173-181.

³³ De Witte, E., et al. 1993. Surface Protectants for Stone Materials. The Current Situation in Northern Europe in Science and Technology for Cultural Heritage (2): 173-181.

³⁴ Pinto, A. (1997) – Conservação de pedras graníticas. Estudo da acção de hidrófugos. ITG 22, LNEC, Lisboa, 193p.

³⁵ Vries, J.; Polder, R. (1997) – Hydrophobic treatment of concrete, Construction and Building Materials, Vol. 11, nº4, pp; 259-265.

4.9. Recomendações quanto ao desempenho dos hidrofugantes

De Vries e Polder (1997) elencaram os seguintes requisitos de desempenho a serem cumpridos por sistemas de hidrofugação:

- Minimização da absorção de água;
- Durabilidade;
- Permeabilidade ao vapor;
- Resistência à alcalinidade do concreto.

Para os autores, em relação ao concreto de referência (sem proteção), os principais critérios devem ser:

- A absorção de água deve ser de menos de 20% da absorção do concreto de referência;
- Profundidade de penetração no substrato de, pelo menos, 2mm;
- Transmissão de vapor do concreto tratado de, pelo menos, 60% da transmissão de vapor do concreto de referência (sem tratamento).

Oliveira (2013) elenca como principais requisitos:

- Redução da absorção de água acima de 75%;
- Redução da permeabilidade ao vapor de água abaixo de 10%;
- Profundidade de penetração entre 1 e 5mm;
- Não alteração da cor do suporte;
- Resistência à radiação ultravioleta;
- Estabilidade a agentes físico-químicos;
- Durabilidade da hidrofugação de pelo menos 10 anos;
- Se necessário, possibilidade de reaplicação;
- Compatibilidade com outras soluções de conservação;
- Proteção contra a degradação biológica;
- Proteção contra sujidades e poluentes atmosféricos;
- Facilidade de aplicação;
- Adequação do produto ao substrato;

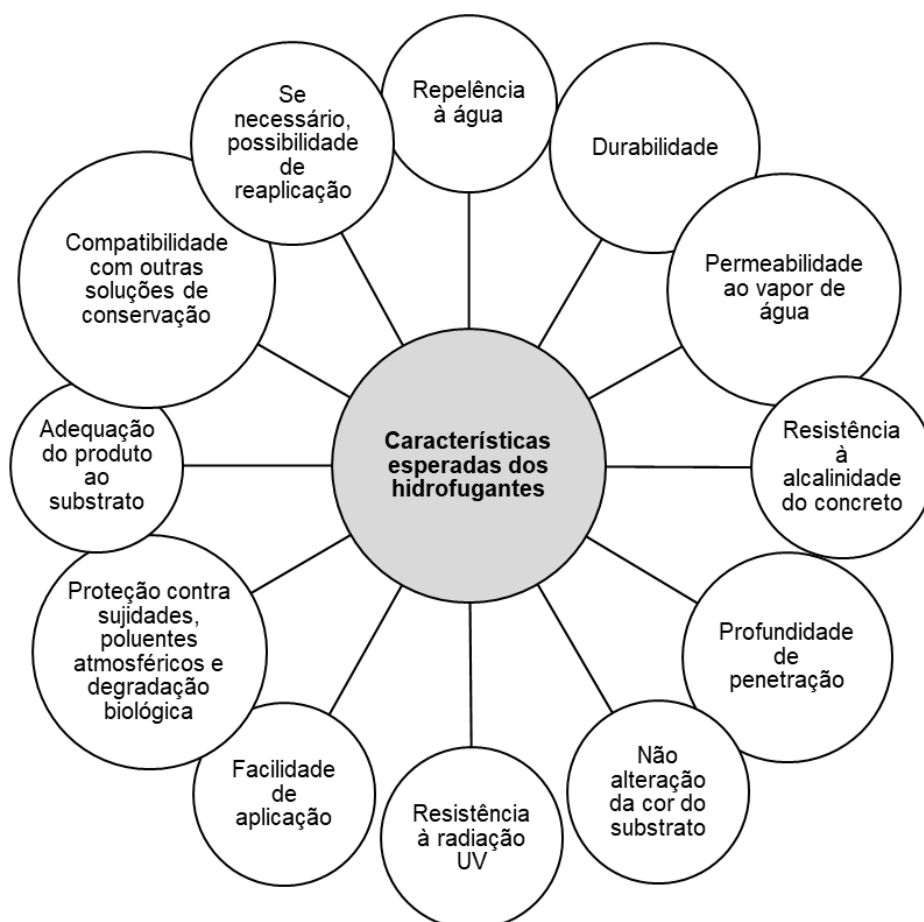
Segundo Raupach e Büttner (2014) profundidades de penetração em torno de **5mm** são requeridas para que se alcance uma proteção de longa durabilidade. De acordo com Medeiros (2008), no Reino Unido, a profundidade de penetração recomendada é de entre **2** e **4** mm. Para Wittmann, Zhang e Akira (2010),

profundidades de penetração de **5mm** são suficientes para barrar a entrada de cloretos.

Uma alta repelência à água é um requisito desejável para um sistema de tratamento superficial. Segundo Basheer et al. (1997) o documento *NHRP Report 244 do National Cooperative Highway Research Program*, dos Estados Unidos recomenda a aceitação de sistemas de proteção superficial que reduzam a absorção de água em 75% se comparado com o concreto sem a aplicação da proteção. Segundo os mesmos autores, o *German Committee for Reinforced Concrete* especifica que a redução na absorção seja de 50%.

As divergências na literatura quanto aos requisitos de desempenho se devem ao fato de que cada substrato tem características próprias e está sujeito a diferentes condições de exposição. Essas variáveis devem ser consideradas quando da escolha das propriedades dos sistemas de hidrofugação. A **Figura 95** apresenta algumas das principais características esperadas dos hidrofugantes.

Figura 95 - Características esperadas dos hidrofugantes.



Fonte: Vanessa de Moraes (2023).

A norma NP EN 1504-2 (Comité Europeu de Normalização, 2008) estabelece características e requisitos de desempenho para produtos e sistemas de proteção superficial de acordo com os princípios e métodos de projeto, estando entre estes métodos os hidrofugantes. A **Tabela 6** apresenta as características obrigatórias e as características requeridas apenas para certas utilizações dos sistemas de hidrofugação, de acordo com o princípio de projeto. A **Tabela 7** apresenta os requisitos de desempenho para impregnações hidrofóbicas.

Entre as *características de desempenho obrigatórias* para os hidrofugantes segundo a norma estão a profundidade de penetração, redução na absorção de água, resistência aos álcalis e a velocidade relativa de secagem. Entre as características de desempenho demandadas apenas em certas situações estão a redução na difusão de íons cloreto e a resistência ao gelo-degelo.

Quanto aos requisitos, a profundidade de penetração divide-se em duas classes de produtos: produtos com profundidades de penetração menores que 1cm (classe I) e produtos com profundidades de penetração maiores que 1cm (classe II). A velocidade relativa de secagem é dividida entre produtos com velocidade relativa de secagem maior que 30% (classe I) e produtos com velocidade relativa de secagem maior que 10% (classe II). A norma recomenda ainda que a absorção do corpo de prova impregnado seja menor que 7,5% do corpo de prova não impregnado.

Tabela 6 - Características de desempenho para hidrofugantes segundo os princípios definidos na norma NP EN 1504-9.

Métodos de ensaio definido na norma	Características de desempenho	Princípios segundo a norma EM 1504-9		
		Proteção contra o ingresso	Controle da humidade	Aumento da resistividade
EN 13581	Resistência ao gelo-degelo do concreto com impregnação hidrofóbica (determinação da perda de massa)	□	□	□
Ver tabela de requisitos de desempenho para impregnação hidrofóbica	Profundidade de penetração	■	■	■
EN 13580	Absorção de água e resistência aos álcalis para a impregnação hidrofóbica	■	■	■
EN 13579	Velocidade relativa de secagem para a impregnação hidrofóbica	■	■	■
Sujeito às normas e regulamentos nacionais*	Difusão dos íons cloreto	□		

■ Características obrigatórias

□ Características para certas utilizações

*Nota Nacional (informativa): ver Especificação LNEC E 468 - Revestimentos por pintura para proteção do betão armado contra a penetração de cloretos.
Método de ensaio e requisitos

Fonte: Adaptado de Comité Europeu de Normalização (2008).

Tabela 7 - Requisitos de desempenho para a impregnação hidrofóbica segundo a norma NP EN 1504-2.

Características de desempenho	Métodos de ensaio	Requisitos
Perda de massa após ciclos de gelo-degelo com sais descongelantes. Este ensaio só é necessário se as estruturas puderem estar em contato com estes sais.	EN 13581	A perda de massa da superfície de um corpo de prova impregnado deve ocorrer pelo menos 20 ciclos mais tarde do que num provete não impregnado.
Profundidade de penetração medida em cubos de concreto de 100mm C(0,70) segundo a EN 1766 (não C(0,45) como está na EN 13579). Após 28 d de cura segundo a EN 1766, as amostras devem ser armazenadas segundo o processo de secagem da EN 1766. O tratamento com o agente hidrofóbico deve seguir a EN 13579.	A profundidade de penetração é medida com a exatidão de 0,5mm partindo o corpo de prova tratado e aspergindo a superfície de ruptura com água (usando o método da fenolftaleína, mas substituindo esta por água), segundo a EN 14630. A profundidade da zona seca é considerada a profundidade efetiva de impregnação hidrofóbica.	Classe I: <10mm Classe II: ≥10mm
Absorção de água e resistência aos álcalis	EN 13580	Taxa de absorção: <7,5% comparado com o corpo de prova não tratado <10%(após imersão em uma solução alcalina)
Velocidade relativa de secagem	EN 13579	Classe I: >30% Classe II: >10%
Difusão de íons cloreto ^a	De acordo com as normas e a regulamentação nacionais*	

^aquando a absorção capilar da água é menor que $0,01\text{kg/m}^2\cdot\text{h}^{0,5}$, não é esperada a difusão de íons cloreto

*Nota Nacional (informativa): ver Especificação LNEC E 468 - Revestimentos por pintura para a proteção do betão armado contra a penetração de cloretos. Método de ensaio e requisitos.

Fonte: Adaptado de Comité Europeu de Normalização (2008).

4.10. Recomendações quanto ao preparo do substrato

A idade do concreto quando da aplicação da proteção superficial é um fator importante. Uma idade mínima de 28 dias ou até mesmo 3 meses ou mais é requerida para a aplicação do produto. Com menor idade, os poros do concreto estão quase cheios de água, de modo que o hidrofugante não consegue penetrá-los e a reação de hidratação ainda está ocorrendo. Se o tratamento é aplicado muito cedo, os produtos de hidratação formados posteriormente podem cobrir o hidrofugante, o que pode ocasionar a perda do efeito hidrofóbico (Meier; Wittmann, 2001).

Em alguns projetos em que ocorre a cura rápida do concreto, o hidrofugante pode ser aplicado em um tempo tão reduzido quanto 7 dias (McAuliffe, 2019). Entretanto, experimentos realizados por Christodoulou et al. (2017) indicaram que a aplicação de impregnações hidrofóbicas de silano após 28 dias resulta em maior redução da absorção de água do que em 7 dias. Os hidrofugantes requerem uma quantidade mínima de umidade para reagir e podem ser aplicados sobre a superfície úmida, uma vez que permitem a “respiração” do substrato, no entanto, não se deve aplicar o produto em um concreto saturado (American Concrete Institute, 2014).

Segundo a norma europeia EN 1504, quando necessário, a impregnação hidrofóbica deve ser utilizada em combinação com métodos complementares de restauração de superfícies de concreto, como: o preenchimento de fissuras; aplicação de reparos manuais (*patch repairs*); reconcretagem em trechos maiores ou aplicação de concreto ou argamassa projetada. Deve-se atentar para que haja compatibilidade entre a superfície original e a superfície dos reparos e para a transmissão de forças entre os reparos e o concreto original (Raupach; Büttner, 2014).

É recomendável que todas as fissuras com espessura com mais de 0,1 mm sejam tratadas e que falhas de concretagem e vazios sejam tratados com material de reparo com os métodos mencionados. Se forem esperados movimentos de fissura em uma faixa maior que 0,1 a 0,2mm, pode não ser possível prevenir o ingresso de água com hidrofugante nesses casos, quando possível, é preferível que seja utilizado algum revestimento (Raupach; Büttner, 2014, p.145).

Para aumentar a penetração em áreas de fissuras, é recomendado que seja aplicada uma camada adicional nessas áreas antes da aplicação do produto em toda a superfície a ser tratada. A aplicação de maior quantidade de produto em uma região

proporciona o aumento da profundidade de penetração (American Concrete Institute, 2014).

As recomendações de diferentes fabricantes quanto ao tratamento do substrato apresentam várias semelhanças, entre algumas diretrizes comuns estão:

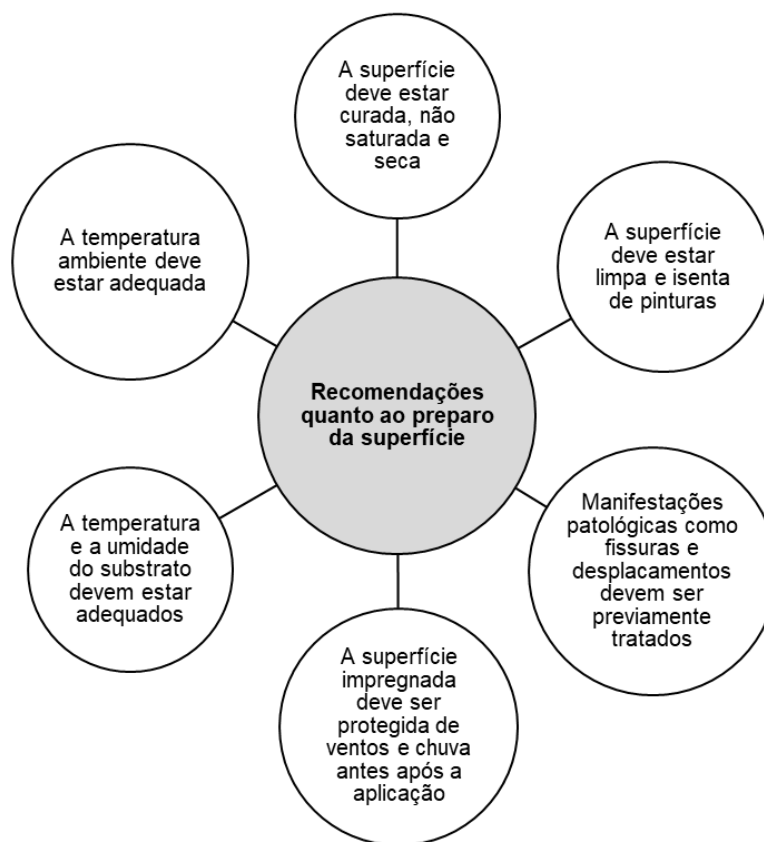
- Aplicar o hidrofugante em concreto com no mínimo 28 dias;
- A superfície deve estar compacta, seca, isenta de pinturas;
- A superfície deve estar limpa;
- Fissuras, deslocamentos e demais manifestações patológicas devem ser previamente tratadas;

Segundo Wacker ([20--d?]) também é necessário considerar características do substrato como a umidade e a temperatura da superfície e a temperatura ambiente, sendo algumas das diretrizes:

- A umidade do concreto deve ser de no máximo 4%, pois com umidades superiores a penetração do hidrofugante é dificultada;
- A temperatura da superfície deve ser de 3°C acima do ponto de orvalho;
- A temperatura da superfície deve estar entre 8°C e 30°C;
- A temperatura do ar deve estar entre 5°C e 35°C;

A temperatura do substrato pode exercer influência no desempenho do tratamento hidrofugante, uma vez que altas temperaturas favorecem a ocorrência de reações químicas mais rápidas e baixas temperaturas podem fazer com que as reações ocorram mais devagar que a taxa de evaporação do produto, o que faz com que não se forme uma superfície hidrofugante eficaz. Em geral os fabricantes também recomendam a proteção da superfície impregnada de chuvas, pois a água pode lavar o produto (Oliveira, 2013). Segundo Wacker ([20--d?]) as superfícies impregnadas devem ser protegidas em pelo menos 24h após a aplicação. Caso a aplicação esteja sujeita a altas temperaturas ou ventos, deve ser realizada sob abrigo (McAuliffe, 2019). A **Figura 96** representa resumidamente algumas recomendações quanto ao preparo da superfície antes, durante e após a aplicação do hidrofugante.

Figura 96 - Recomendações quanto ao preparo da superfície antes, durante e após a aplicação do hidrofugante.



Fonte: Vanessa de Moraes (2023).

4.11. Formas de aplicação do hidrofugante

A forma de aplicação do hidrofugante deve seguir a recomendação dos fabricantes e é condicionada por diversos fatores, como características e dimensão da superfície a ser protegida. Entre as ferramentas comumente utilizadas estão:

- Pincel;
- Trincha (**Figura 97**);
- Rolo de lã de pelo curto (**Figura 98**);
- Spray *airless* (**Figura 99 e Figura 100**);
- Pulverizador costal de baixa pressão (**Figura 101**).

Figura 97 - Trincha para a aplicação do hidrofugante.



Fonte: Leroy Merlin (2023b).

Figura 98 - Rolo para a aplicação do hidrofugante.



Fonte: Leroy Merlin (2023a).

Figura 99 - Aplicação do hidrofugante com *spray airless*.



Fonte: Sikagard®... (2017).

Figura 100 - Aplicação de hidrofugante com *spray airless*.



Fonte: Wacker ([20--b?]).

Figura 101 - Aplicação de hidrofugante com pulverizador de baixa pressão.



Fonte: A-Tech... (2009).

Pincéis, trinchas e rolos são ferramentas mais recomendadas para áreas menores, enquanto o spray *airless* é recomendado para áreas maiores. Quando a aplicação é feita com mais de uma demão, o tempo de espera entre demãos varia de acordo com o fabricante e deve ocorrer no sistema úmido sobre úmido (a aplicação da segunda demão deve ocorrer com a primeira aplicação ainda úmida), caso contrário a primeira camada repelirá a segunda.

A repelência entre sucessivas camadas de hidrofugante é um efeito destacado por vários autores, recorrente no emprego de emulsões aquosas com baixo teor de espécies ativas ou quando há aplicação indevida, sem que seja seguida a orientação do fabricante. A aplicação do produto deve ser realizada no sistema úmido sobre úmido quando a aplicação for feita em mais de uma camada. A maior velocidade de reação desses produtos resulta na formação da camada hidrorrepelente no interior dos poros antes da aplicação da camada seguinte, reduzindo o potencial de hidrofugação. Evidências desse efeito foram observadas na campanha de intervenção no edifício Vilanova Artigas realizada entre 2012 e 2015.

A escolha da ferramenta de aplicação pode ter influência na penetração do produto no substrato. É muito difícil obter uma penetração homogênea quando a

aplicação é realizada com um rolo ou pincel de pintura e nesses casos há a necessidade de aplicar maior quantidade de produto; a técnica de pulverização apresenta melhores resultados e maior eficácia, principalmente quando o substrato contém fissuras ou superfícies pronunciadas (Oliveira, 2013, p.25).

Para produtos à base de silano com baixa viscosidade, recomenda-se a utilização de pulverizador de baixa pressão para reduzir perdas e a aplicação de um fluxo contínuo de modo a deixar a superfície úmida por alguns minutos (McAuliffe, 2019).

4.12. Controle da qualidade da aplicação segundo a norma europeia EN 1504

Com o objetivo de garantir o controle da qualidade da aplicação dos tratamentos hidrofóbicos, a norma europeia EN 1504 recomenda procedimentos a serem realizados antes, durante e após a aplicação dos produtos. Além da verificação da largura e movimentação de fissuras, por exemplo, sugere-se verificar a aparência do tratamento regularmente para que eventuais irregularidades sejam identificadas, bem como o consumo. Em caso de superfícies cuja aparência deva ser preservada por razões estéticas e arquitetônicas, é recomendável que sejam preparadas áreas de testes para avaliar a influência do tratamento hidrofóbico na aparência da superfície. Em caso de géis e pastas, deve ser verificado se e quando eles desaparecerão após a aplicação (Raupach; Büttner, 2014). A **Tabela 8**, **Tabela 9** e **Tabela 10** indicam os testes a serem realizados antes, durante e após a aplicação para que seja garantida a qualidade do tratamento hidrofóbico.

Desplacamentos, a limpeza e a temperatura são propriedades superficiais que devem ser verificados em qualquer aplicação. As condições do entorno que sempre devem ser verificadas são a *temperatura ambiente*, a *umidade relativa*, *velocidade dos ventos* e a *previsão ou ocorrência de chuva*. Por fim, os tratamentos hidrofóbicos devem ser necessariamente verificados quanto à *absorção de água por capilaridade*, e a norma sugere para essa verificação o uso dos tubos de Karsten.

Tabela 8 - Propriedades da superfície a serem verificadas antes e durante a aplicação para que seja assegurada a qualidade da impregnação hidrofóbica segundo a norma europeia EN 1504.

Propriedade	Método de teste	Norma europeia	Necessidade
Deslocamento da superfície	Sondagem com martelo	—	■
Limpeza	Inspeção visual, remoção de sujeira	—	■
Resistência superficial	Determinação da resistência superficial	EN 1542	◆
Teor de umidade da superfície	Método de secagem/determinação da resistividade elétrica	—	◆
Temperatura da superfície	Termômetro	—	■
Profundidade de penetração	Teste da fenolftaleína*	EN 14630	◆
Teor de cloretos	Extração de amostras do concreto	EN 14629	◆

■ O teste deve ser realizado para todos os usos pretendidos

◆ O teste deve ser realizado caso seja especificado

□ O teste deve ser realizado para usos especiais

*O ensaio tem o teste da fenolftaleína apenas como referência de método, uma vez que consiste no rompimento da superfície do corpo de prova e posterior aspersão com **água** (e não fenolftaleína) para verificação da profundidade de penetração do hidrofugante.

Fonte: Adaptado de Raupach e Büttner (2014).

Tabela 9 - Condições do entorno a serem verificadas antes e durante a aplicação para que seja assegurada a qualidade da impregnação hidrofóbica segundo a norma europeia EN 1504.

Propriedade	Método de teste	Norma europeia	Necessidade
Temperatura	Termômetro	—	■
Umidade relativa	Higrômetro	—	■
Chuva	Inspeção visual	—	■
Velocidade de vento	Anemômetro	—	■
Temperatura de orvalho	Termômetro/higrômetro	—	◆

■ O teste deve ser realizado para todos os usos pretendidos

◆ O teste deve ser realizado caso seja especificado

□ O teste deve ser realizado para usos especiais

Fonte: Adaptado de Raupach e Büttner (2014).

Tabela 10 - Propriedades do tratamento hidrofóbico a serem verificadas após a aplicação para que seja assegurada a qualidade da impregnação hidrofóbica segundo a norma europeia EN 1504.

Propriedade	Método de teste	Norma europeia	Necessidade
Profundidade de ingresso do agente hidrofugante	Extração de testemunhos do concreto/Quantidade total consumida	EN 12504-1, EN ISO 2808	◆
Absorção de água por capilaridade	Tubo de Karsten/Absorção capilar	EN 12390-1, ISO 7031	■

■ O teste deve ser realizado para todos os usos pretendidos
 ◆ O teste deve ser realizado caso seja especificado
 □ O teste deve ser realizado para usos especiais

Fonte: Adaptado de Raupach e Büttner (2014).

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental consistiu na realização de ensaios com a finalidade de avaliar o comportamento de hidrofugantes com diferentes composições e consistências. Foram realizados ensaios em um pilar de referência (ensaios *in situ*) e ensaios em corpos de prova de concreto.

5.1. Materiais utilizados

Os materiais utilizados foram 4 tipos de hidrofugante e corpos de prova de concreto. Os hidrofugantes - denominados A, B, C e D - têm as seguintes características:

- **A:** Composição de silano e siloxano com baixo teor de sólidos de ~2 ou 2,5% disperso em solvente orgânico (aguarrás), teor de ingrediente ativo não informado pelo fabricante, densidade relativa entre 0,77g/cm³ a 0,83g/cm³ e aplicação recomendada de 0,3 a 0,7 l/m² em 2 demãos;
- **B:** Emulsão branca de silano e siloxano dispersa em água com teores de sólidos e de ingrediente ativo não informados pelo fabricante, densidade aproximada de 1kg/l e recomendação de aplicação de 150 a 250 ml/m²/demão, em 1 a 2 demãos. Caso a aplicação ocorra em 1 demão, a recomendação é que se aplique até que a superfície esteja saturada. Para a aplicação em duas demãos, a segunda demão deve ser aplicada no sistema úmido sobre úmido;
- **C:** Emulsão monocomponente à base de silano com 99% de ingrediente ativo disperso em água, densidade de 0,9 kg/l e viscosidade de 9mm/s, com consumo recomendado de 150 g/m² a depender da absorção do substrato e da profundidade de penetração necessária, em 2 a 3 demãos aplicadas na condição úmida sobre úmida;
- **D:** Creme hidrofugante à base de silano com 80% de ingrediente ativo disperso em água, com densidade aproximada de 0,9 g/cm³ e aplicação recomendada de até 400g/m², a depender da porosidade do substrato.

Há uma diferença entre teor de sólidos e teor de ativos. Enquanto teor de sólidos está relacionado à quantidade de material não volátil, geralmente excluindo solventes e outros diluentes, o teor de ativos é a quantidade de material que efetivamente é ligado ao substrato. Tal diferença se deve ao fato de que parte dos

silanos e siloxanos é constituída por grupos reativos que são perdidos quando se ligam ao substrato. Como exemplo, há produtos à base de silanos que têm mais de 98% do teor de sólidos e entre 70% e 80% de teor de ativos (informação pessoal).³⁶ Nem todos os fabricantes disponibilizam a informação do teor de sólidos e teor de ativos. Os hidrofugantes A, B e C são líquidos (**Figura 102**, **Figura 103** e **Figura 104**) e o hidrofugante D tem consistência de creme (**Figura 105**).

Figura 102 - Hidrofugante A, líquido transparente.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 103 - Hidrofugante B, líquido branco.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

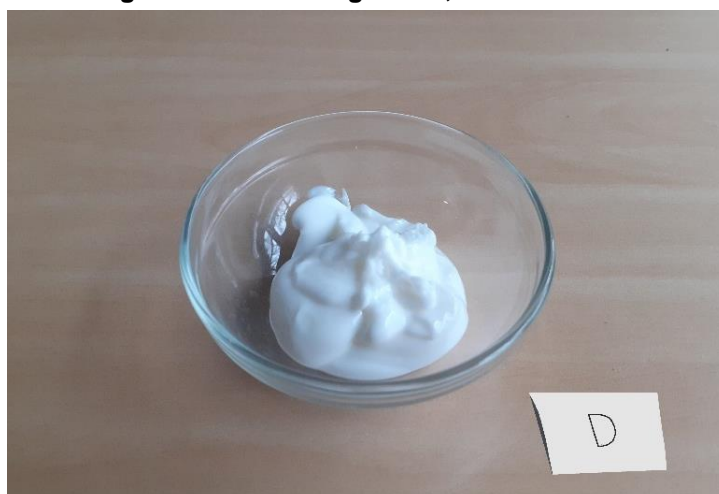
³⁶ MARANI, P. **PERGUNTAS Pesquisadora FAU USP - Hidrofugantes Wacker**. Destinatário: Vanessa de Moraes. São Paulo, 3 jan. 2023. E-mail.

Figura 104 - Hidrofugante C, líquido incolor.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 105 - Hidrofugante D, creme branco.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

O traço (1 : 1,5 : 2,5 : 0,53 – cimento : areia : agregado graúdo : água - em massa) foi o mesmo adotado em um conjunto de estudos de pesquisadores da FAUUSP, voltados às futuras intervenções no edifício³⁷. As características dos materiais usados constam na **Tabela 11**. Não foi usado aditivo plastificante para evitar interferências nas análises realizadas.

³⁷ Programa experimental da tese de doutorado de Tatiana Regina da Silva Simão, no qual foi realizado o estudo de dosagem do concreto usado para diversos estudos. A dosagem foi realizada a partir da reconstituição do traço do concreto das empenas do edifício Vilanova Artigas, 1:4 (cimento:agregados) com relação água/cimento 0,5 e consumo de cimento de, aproximadamente, 400kg/m², como descrito em Oliveira et al (2017, p.264).

Tabela 11 - Características dos materiais usados na moldagem dos corpos de prova.

CIMENTO CP II - E 32 ³⁸	
Massa específica (g/cm ³)	3,05
Agregado miúdo, areia quartzosa	
Massa específica (g/cm ³)	2,63
Módulo de finura (Mf)	2,2
Agregado graúdo, pedra granítica	
Dimensão máxima (Dmáx)	12,5

Fonte: Vanessa de Moraes (2023)

Os hidrofugantes foram aplicados nos corpos de prova para a realização dos ensaios. Para cada hidrofugante, foram utilizados:

- 1 corpo de prova de dimensões 10x10x5cm para ensaios de absorção com tubos de Karsten;
- 1 corpo de prova de dimensões 10x10x5cm para ensaio com o goniômetro;
- 3 corpos de prova cilíndricos de 10x20cm para verificação da profundidade de penetração do hidrofugante;
- 3 corpos de prova para a realização do ensaio de absorção por capilaridade segundo a norma da ABNT NBR 9779 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012).

A **Figura 106** e a **Figura 107** ilustram os corpos de prova produzidos para os ensaios. Os corpos de prova foram curados em câmara úmida por 28 dias e depois foram mantidos em ambiente de laboratório até a data de aplicação dos produtos e posterior realização dos ensaios. Devido a restrições de acesso relativas ao período compreendido pela pandemia de COVID-19 e dificuldades relacionadas à aquisição dos hidrofugantes com fornecedores, a aplicação dos produtos só foi possível após um período de em torno de 17 meses, o que certamente afetou os resultados, uma vez que os corpos de prova entraram em equilíbrio com o ambiente.

³⁸ A caracterização do cimento (Tupi CP II E-32), adquirido em loja de varejo em março de 2021 não foi realizada em laboratório em razão das restrições da pandemia de COVID-19. A consulta feita aos registros do Programa Setorial da Qualidade do Cimento Portland indica que o cimento Tupi CP II-31 está classificado na Lista de Cimentos Conformes-rev1 (outubro/20 a março/21). Portanto, essa classificação sugere que o cimento utilizado na moldagem dos corpos de prova atende, estatisticamente, às normas técnicas de especificação da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

Figura 106 - Corpos de prova produzidos para os ensaios.



Fonte: Vanessa de Moraes (2021).

Figura 107 - Corpos de prova utilizados nos ensaios.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

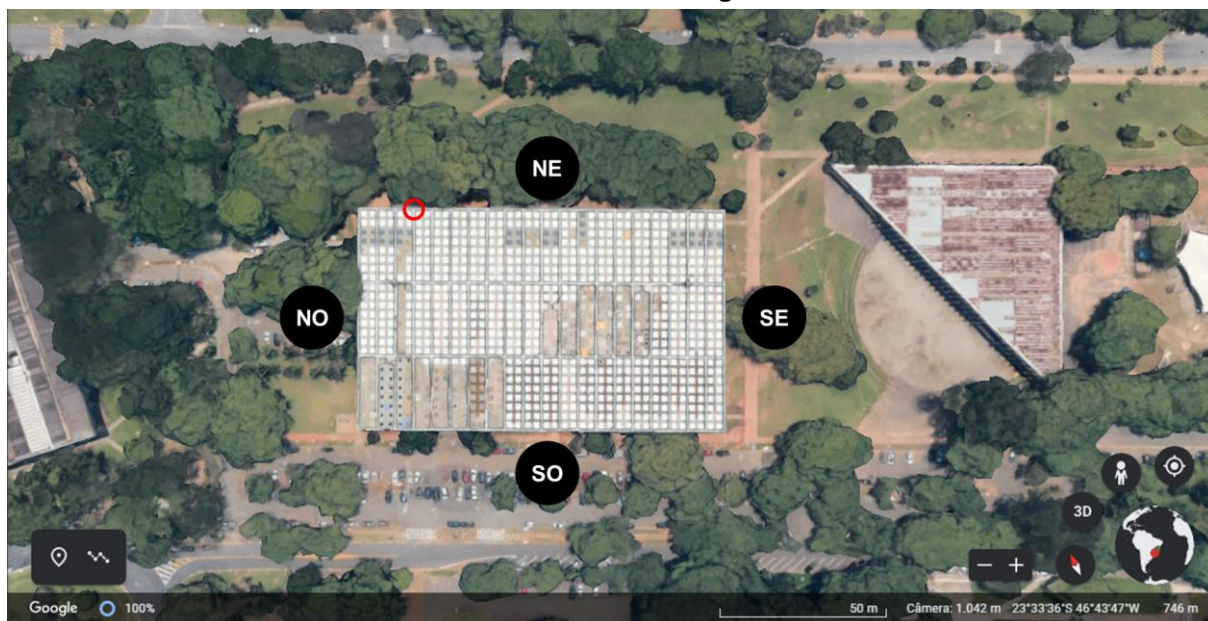
5.2. Ensaio

Os ensaios foram realizados em duas etapas: inicialmente em um pilar externo do edifício Vilanova Artigas e posteriormente nos corpos de prova.

5.2.1. Ensaio realizado *in situ*

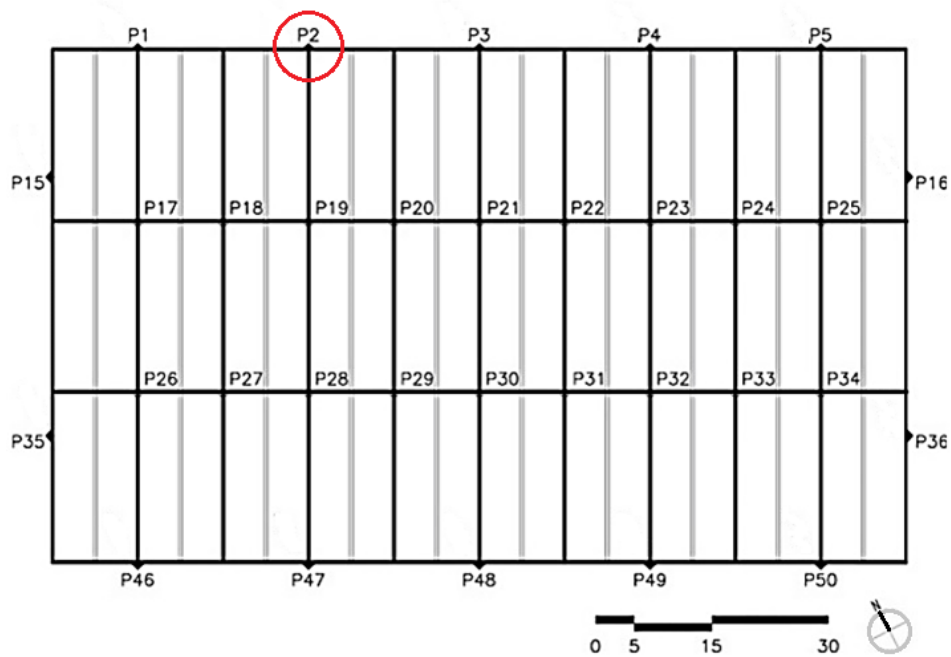
Para os ensaios realizados *in situ* foi selecionado um pilar localizado na face nordeste do edifício Vilanova Artigas (**Figura 108 a Figura 110**). O pilar foi escolhido por ser um elemento acessível da edificação, mas não representa toda a superfície das empenas, que é heterogênea, composta por trechos que variam bastante entre si.

Figura 108 - Indicação do pilar 2 em vermelho e da orientação das empenas na implantação do edifício Vilanova Artigas.



Fonte: Google Earth (jan. 2023).

Figura 109 - Indicação do pilar 2 em vermelho em planta de vigas e pilares do edifício Vilanova Artigas.



Fonte: Adaptado de Barossi et al. (2017).

Figura 110 - Pilar em que foram realizados os ensaios ao centro da imagem.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

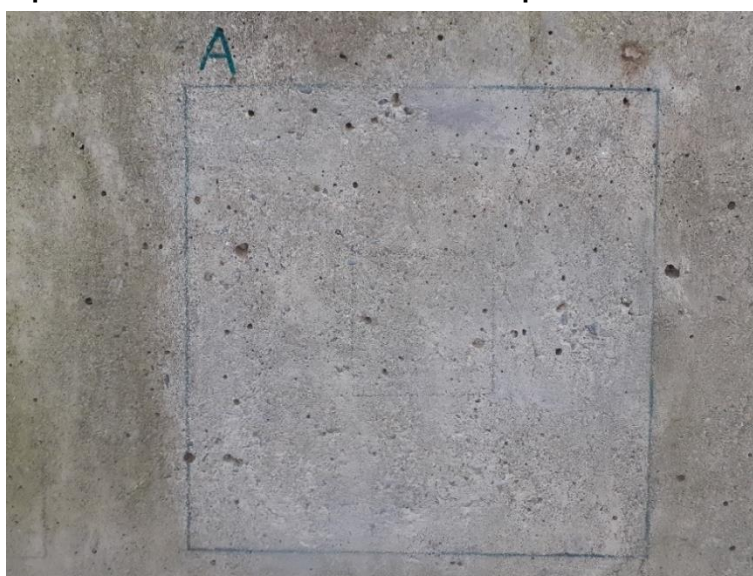
Foram realizados os seguintes ensaios:

- Medição de atributos colorimétricos com o equipamento colorímetro tristímulo (comparação entre a aparência de cor da superfície antes e após a aplicação dos hidrofugantes), segundo o mesmo procedimento utilizado por Castro (2018);
- Avaliação da absorção por capilaridade com tubos de Karsten segundo a norma europeia EN 16302 (European Committee for Standardization, 2013), antes e após a aplicação dos hidrofugantes.

5.2.1.1. Limpeza do pilar

A limpeza da área de ensaios no pilar representou um desafio pois a superfície mostrou-se bastante heterogênea, com poros e orifícios, muitos preenchidos com insetos, teias de aranha e sujeira (**Figura 111**, **Figura 112**, **Figura 113** e **Figura 114**), além de apresentar amplas áreas com manchas e biofilme, principalmente nas proximidades da vegetação e folhagem das árvores (**Figura 115** e **Figura 116**).

Figura 111 - Detalhe da superfície de uma área do pilar em uma área de 25x25cm, em que é possível observar e ter a dimensão de poros e orifícios.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 112 - Imagem ilustrando orifícios de até 1cm.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 113 - Resto de inseto retirado de orifício na superfície do pilar.



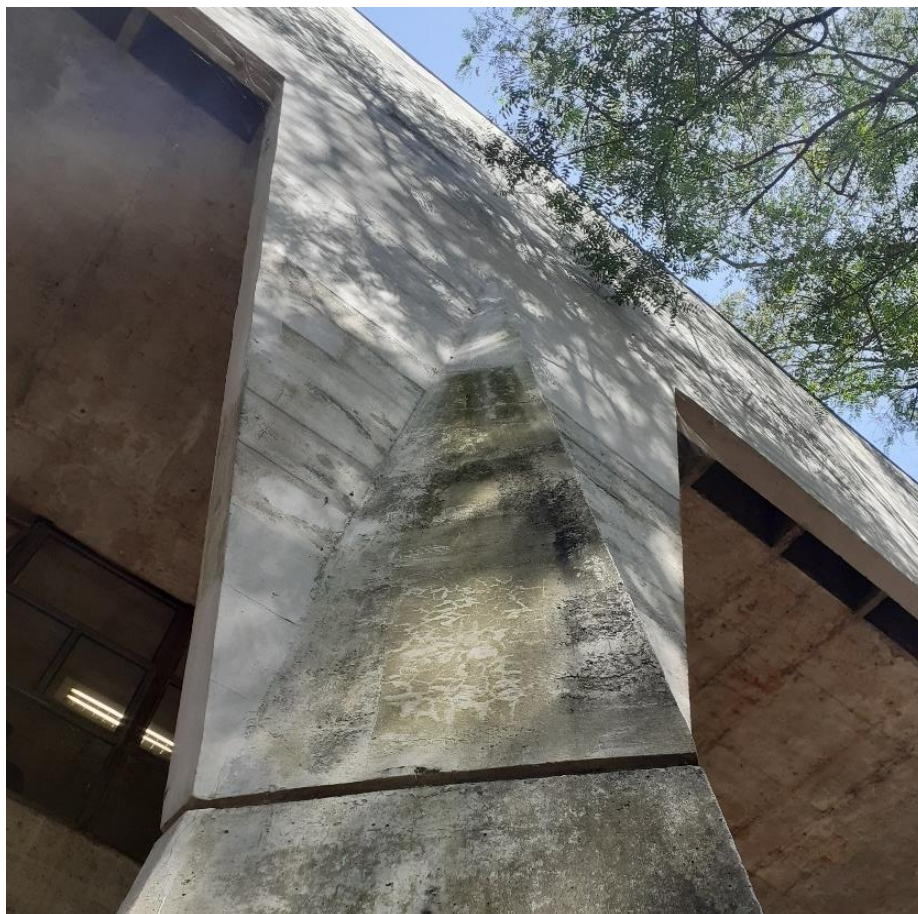
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 114 - Teia de aranha retirada de orifício na superfície do concreto.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 115 - Superfície do pilar próxima a vegetação com biofilme e sujeira.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 116 - Biofilme e sujeira na base do pilar.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

A limpeza das áreas de ensaio do pilar ocorreu visando a retirada de biofilme e sujeira da superfície e dos poros e orifícios. Como a área é de pequena dimensão, foi utilizado vaporizador para roupas, borrifador de água e escova de aço (**Figura 117**). Não foram utilizados detergentes. Para a limpeza em áreas mais amplas seria mais apropriado utilizar jato de água.

Figura 117 - Instrumentos utilizados para a limpeza da área de ensaio do pilar: vaporizador, borrifador de água e escova de aço.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

A **Figura 118** ilustra a área selecionada para os ensaios após a limpeza. Observa-se que o pilar não havia recebido nenhum tratamento de superfície prévio.

Figura 118 – Faixa da face leste do pilar após a limpeza.

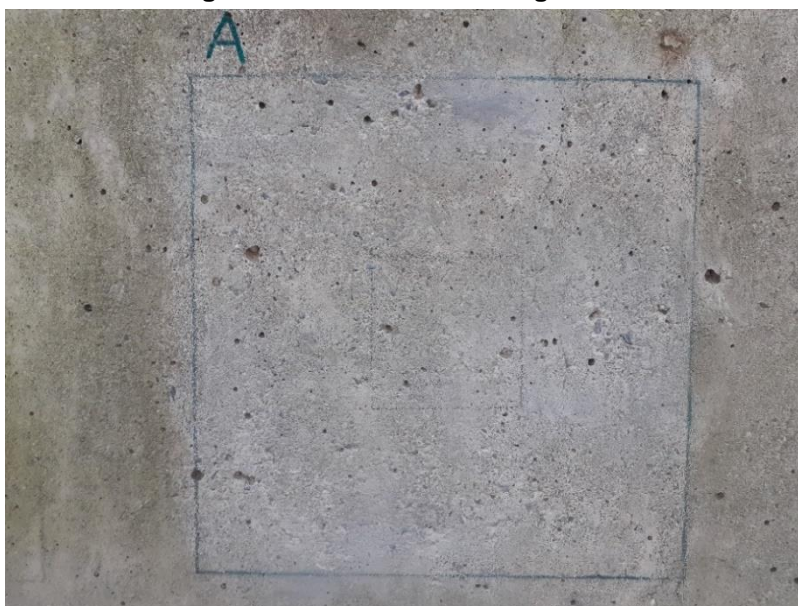


Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

5.2.1.2. Seleção das áreas de aplicação dos hidrofugantes

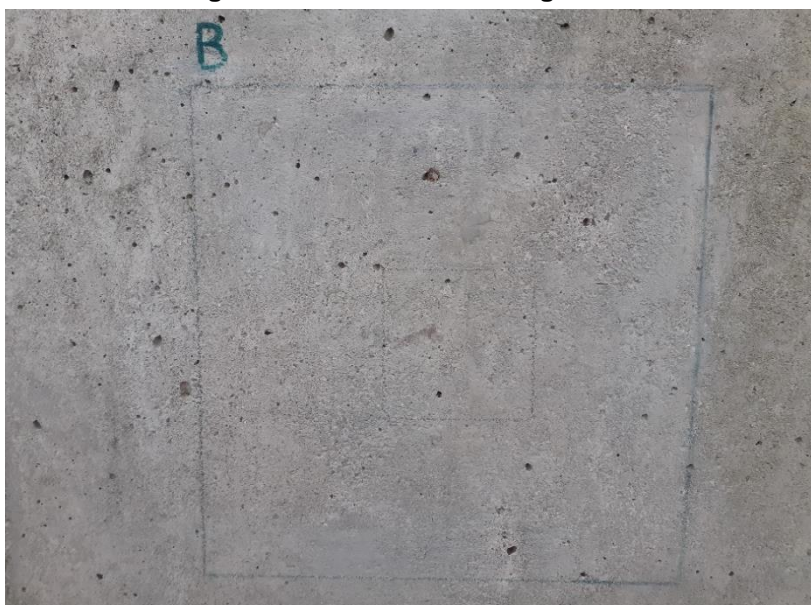
Após a limpeza, foram demarcadas áreas destinadas aos ensaios com dimensões aproximadas de 25x25cm, uma para cada um dos 4 produtos testados (**Figura 119** a **Figura 122**). Procurou-se escolher áreas em que as superfícies fossem mais representativas da superfície do pilar como um todo, e a realização dos ensaios ocorreu em pontos sem manifestações patológicas como orifícios e fissuras.

Figura 119 - Área do hidrofugante A.



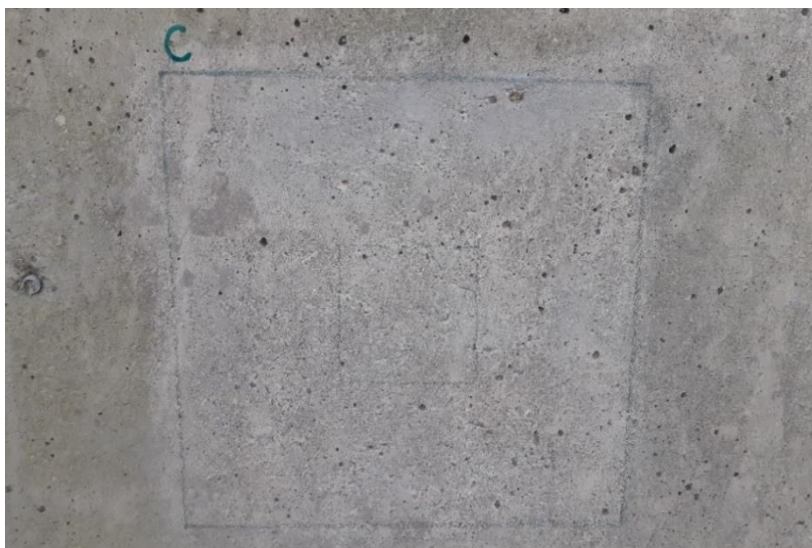
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 120 - Área do hidrofugante B.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 121 - Área do hidrofugante C.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 122 - Área do hidrofugante D.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

5.2.1.3. Aplicação dos hidrofugantes

Com as superfícies limpas e secas, os produtos foram aplicados em quantidades de acordo com o consumo indicado nas fichas técnicas e no sistema úmido sobre úmido. O controle da quantidade de produto aplicado foi feito pela medição do volume aplicado e pela pesagem (no caso do creme hidrofugante). Para os produtos líquidos foi aplicada uma quantidade entre 500 e 700ml/m² e para o creme foi feita a aplicação de entre 200 e 400g/m², em uma demão, o que foi recomendado em conversa com o fabricante (informação verbal).³⁹ Em uma área adicional de teste, procurou-se aplicar uma segunda demão do creme após alguns minutos, mas a segunda camada foi repelida pela primeira, devido à rápida secagem desta, o que foi percebido quando, ao deslizar o pincel sobre a superfície, formaram-se massas que rolavam sobre a mesma. Esse fator fez com que a amostra fosse perdida e foi necessário aguardar nova amostra do fornecedor, o que contribuiu para o atraso dos ensaios.

Após a aplicação foi verificado que as quantidades utilizadas e indicadas nas fichas técnicas eram superiores à capacidade de absorção tanto na superfície do pilar como nos corpos de prova, pois todos os produtos escorreram em geral logo a partir da segunda demão - os hidrofugantes líquidos mais que o creme -, o que indica que houve perdas. Ficou evidenciada a dificuldade de controle da aplicação, em parte relacionada à ausência de orientações mais aprofundadas nas fichas dos produtos.

Para a aplicação dos hidrofugantes líquidos foi utilizado um spray manual (**Figura 123**), pois considerou-se que um pincel ou rolo não preencheriam os poros do concreto. O mais indicado pelos fabricantes para áreas pequenas, no entanto, é o uso de pincel, trincha ou rolo. Para o produto em creme (D) foi utilizado um pincel (**Figura 124**).

³⁹ Informação obtida com Pedro Marani, representante da Wacker.

Figura 123 - Spray manual utilizado para a aplicação dos produtos líquidos.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 124 - Pincel utilizado para a aplicação do creme hidrofugante. Ao centro da imagem, o orifício da superfície foi preenchido com o produto.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Imediatamente após a aplicação de todos os produtos houve o escurecimento da superfície devido à molhagem do substrato, efeito que desapareceu após a secagem. Assim, não houve alteração aparente na cor e aspecto das superfícies. A **Figura 125** e **Figura 126** ilustram as áreas de ensaio do creme após alguns minutos e após algumas horas, respectivamente. Após alguns dias não foi mais perceptível o esse escurecimento em nenhuma das áreas em relação às superfícies adjacentes; no entanto, visualmente notou-se um leve escurecimento na área do hidrofugante B, como será descrito adiante.

Figura 125 - Área do creme hidrofugante escurecida, minutos após a aplicação e início da secagem. Nota-se ao centro um ponto branco, um orifício que foi preenchido com o creme. Também é perceptível na parte inferior da imagem que o creme chegou a escorrer pois o substrato não absorveu toda a quantidade aplicada.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 126 - Área do creme hidrofugante horas após a aplicação.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Os mesmos procedimentos foram utilizados para a aplicação dos hidrofugantes nos corpos de prova (**Figura 127, Figura 128 e Figura 129**).

Figura 127 - Corpos de prova e spray utilizado para aplicação dos hidrofugantes líquidos.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 128 - Aplicação do creme hidrofugante em corpo de prova.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 129 - Aplicação do creme hidrofugante.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

5.2.1.4. Avaliação de alteração de cor com colorímetro tristímulo

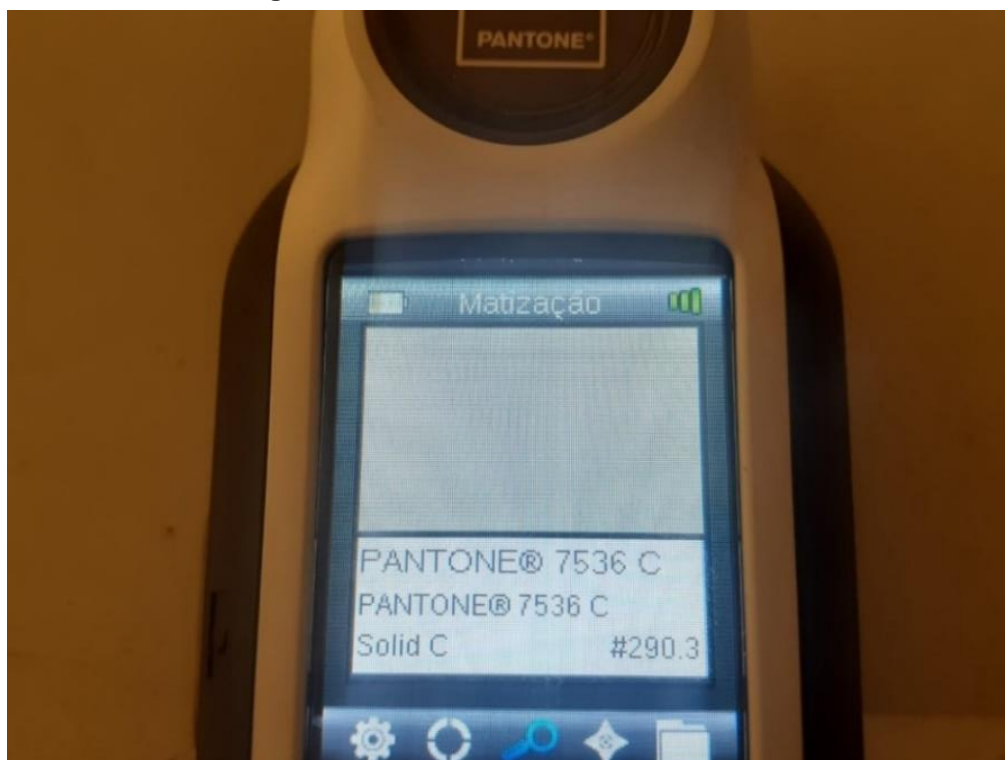
O efeito dos diferentes produtos hidrofugantes na alteração da cor e aspecto superficial das amostras foi analisado por meio da comparação de superfícies sem e com a aplicação dos produtos. Para isso, foi utilizado o equipamento colorímetro tristímulo RM200 Capsure da X-Rite (**Figura 130**).

Figura 130 - Colorímetro tristímulo.

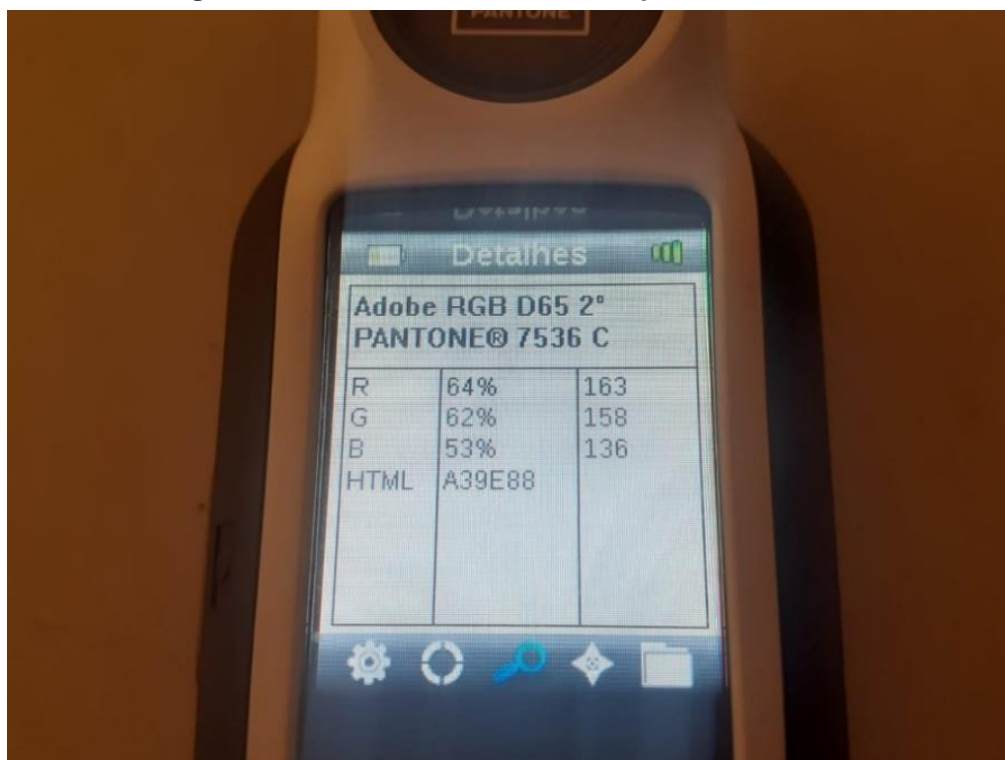


Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

As medições com o colorímetro tristímulo foram realizadas considerando o mesmo método e parâmetros utilizados por Castro (2018): iluminante D65, luz do dia, observador 10° e uso de diâmetro de abertura do leitor do equipamento no tamanho grande, 8mm. O equipamento identifica as cores segundo a escala Pantone, retorna valores de Red (R), Green (G) e Blue (B), e valores do espaço de cor CIELAB – L*, a* e b* - que são parâmetros de identificação das cores (**Figura 131**, **Figura 132**, **Figura 133**).

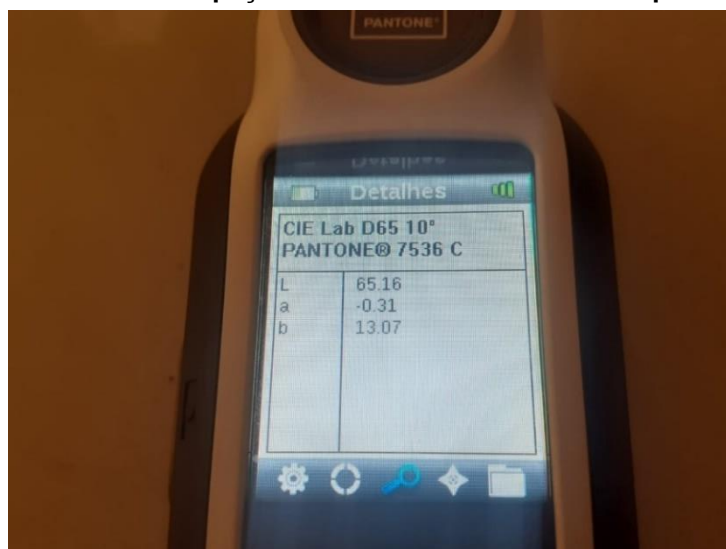
Figura 131 - Leitura de cor do colorímetro.

Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 132 - Valores RGB retornados pelo colorímetro.

Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

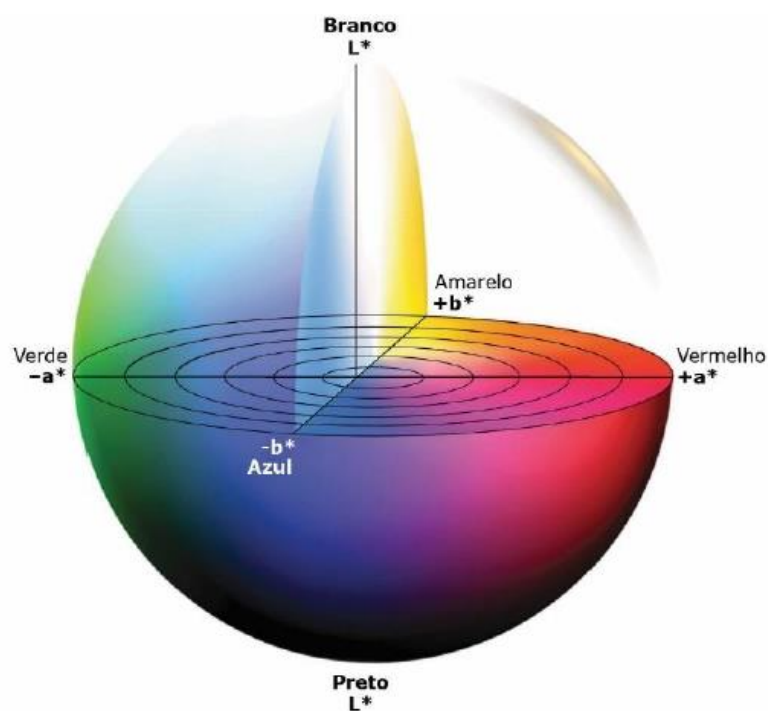
Figura 133 – Valores do espaço de cores CIELAB retornados pelo colorímetro.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

No espaço de cor CIELAB, as cores são distribuídas espacialmente em uma esfera, em que o valor de L^* representa a luminosidade da cor em uma escala de 0 (branca) a 100 (preta), a^* representa a quantidade de verde e vermelho, variando de -60 a 60 e b^* representa a quantidade de azul e amarelo, também variando de -60 a 60 (Figura 134).

Figura 134 - Espaço de cor CIELAB



Fonte: X-RITE Pantone (2015) apud Castro (2018), p. 72.

A partir dos valores de L^* , a^* e b^* obtidos é possível fazer a comparação entre as cores das superfícies antes e após a aplicação dos hidrofugantes, por meio de um cálculo de diferença de cor. Foi utilizado o mesmo método adotado por Castro (2018) e recomendado pela CIE (*Comission Internationale de L'Eclairage*), uma comissão independente sem fins lucrativos dedicada à cooperação internacional para a troca de informações e questões relacionadas à ciência e arte da luz e iluminação, cor e visão, fotobiologia e tecnologia da imagem (CASTRO, 2018). Trata-se de um cálculo euclidiano de 1976 em que a fórmula de diferença de cor considera que a diferença entre duas cores é a raiz quadrada da soma dos quadrados das diferenças entre luminosidade, L^* , das diferenças entre os valores de a^* e entre os valores de b^* .

A diferença total de cor é calculada pela seguinte equação:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$$

Em que:

ΔL^* = diferença de luminosidade, (+) mais claro, (-) mais escuro

Δa^* = diferença em vermelho (+) e verde (-)

Δb^* = diferença em amarelo (+) e azul (-)

Para realizar a medição, o aparelho é encostado na superfície (**Figura 135** e **Figura 136**) e retorna os valores necessários para a identificação das cores a cada medição por meio de uma lente. Em cada uma das quatro regiões dos hidrofugantes foram feitas 23 medições (cores) em uma área de 8x8cm (**Figura 136**) delimitada por um papel escuro.

Figura 135 - Lado do colorímetro que encosta na superfície.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 136 - Delimitação da área para medições com colorímetro.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Segundo Castro (2018) o número mínimo de medições necessárias para caracterizar a superfície é 13. Para a área de ensaio de cada hidrofugante, dentre as 23 medições, foi identificada a cor mais frequente – a moda. A moda é o valor que ocorre com maior frequência em um conjunto de dados, sendo uma das medidas de tendência central de uma distribuição.

A moda é aplicável a diferentes escalas, sendo apropriada ao tratamento de dados da escala nominal (Hoffman, 2016, p.219), como os resultados obtidos por meio das medidas feitas com o colorímetro tristímulo utilizados nesta pesquisa. Os parâmetros do espaço de cor (espaço de cor CIE L*a*b*) são correspondentes ao da cor da cartela padrão – Pantone e Munsell – identificada como a mais próxima à cor captada em cada medição (Castro, 2018, p.116).

A cor obtida a partir da moda foi aquela cujos valores de L* a* e b* foram utilizados no cálculo de diferença de cor para a comparação entre a superfície sem hidrofugante e com hidrofugante. A classificação das diferenças de cor adotou os mesmos níveis de tolerância utilizados por Castro (2018) e Zhang (2005), que foram propostos por Waelbers e Rohde (1994)⁴⁰, ilustrados **Tabela 12**.

Tabela 12 - Relação entre avaliação visual e ΔE no concreto.

ΔE^*_{ab}	AVALIAÇÃO VISUAL DA DIFERENÇA DE COR
ATÉ 0,2	NÃO VISÍVEL
DE 0,2- 0,5	MUITO LEVE
DE 0,5- 1,5	LEVE
DE 1,5-3,0	ÓBVIA
DE 3,0-6,0	MUITO ÓBVIA
DE 6,0 – 12,0	GRANDE

Fonte: Waelbers e Rohde (1994) apud Zhang (2005).

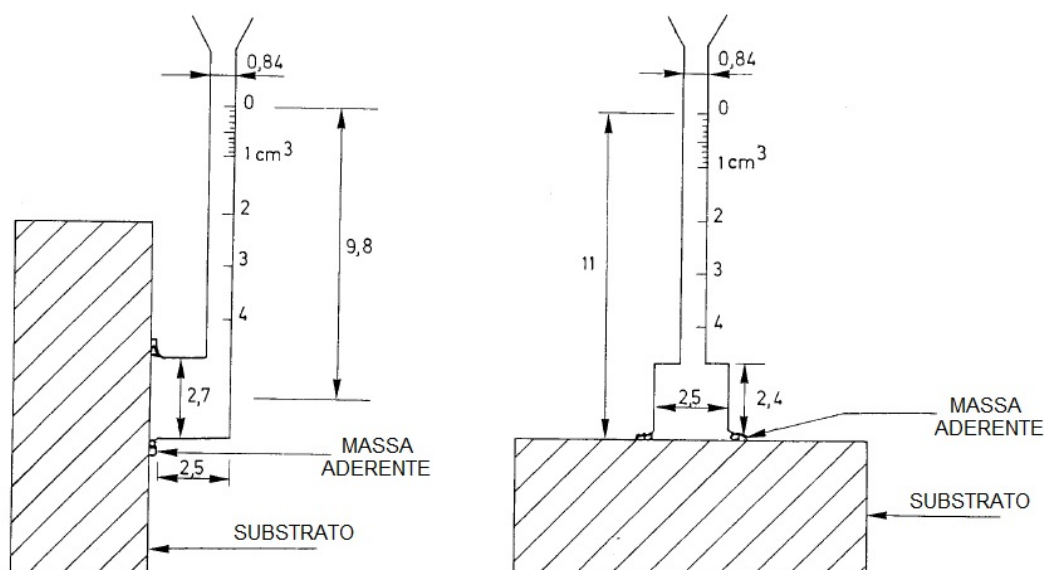
⁴⁰ WAELBERS, K; ROHDE, A. W. An aesthetic repair system for concrete. Concrete meets the challenge. Concrete Society of Southern Africa Silver Jubilee commemoration national convention. Sun City, p.18-21, Sep. 1994.

5.2.1.5. Avaliação da absorção por capilaridade no pilar utilizando tubos de Karsten

O ensaio com tubos de Karsten é uma técnica de avaliação *in situ* utilizada para verificar o desempenho de superfícies e revestimentos de paredes no geral quanto à absorção de água, explicitando suas funções e exigências funcionais, sua classificação funcional, características de desempenho e comportamento físico em serviço (Apps, 2011). O ensaio foi descrito primeiramente por RILEM (1980), e neste trabalho teve como referência a norma europeia EN 16302 (European Committee for Standardization, 2013).

O ensaio de absorção com tubos de Karsten pode ser realizado em superfícies verticais ou horizontais, e para cada tipo é utilizado um tubo diferente (**Figura 137**). O instrumento consiste em um tubo graduado conectado a um cilindro em sua parte inferior, sendo aderido à superfície a ser avaliada com uma massa. A área de contato com a superfície é de $5,7 \text{ cm}^2$ e o tubo vertical é graduado de 0 a 4 cm^3 , com precisão de $0,1 \text{ cm}^3$. A altura total da água entre a metade da seção de aderência e a graduação superior é de $9,8 \text{ cm}$. Atualmente também são produzidos tubos de Karsten com a unidade de medida indicada em velocidade de chuva dirigida, como mostra o **APENDICE A**.

Figura 137 – Modelo de tubo de Karsten para utilização em superfície vertical (esquerda) e para utilização em superfície horizontal (direita) segundo a recomendação técnica do comitê RILEM de 1980.



Fonte: Adaptado de RILEM (1980).

Em geral, a absorção é medida aos 5, 10, 15, 30 minutos e 1 hora, mas os tempos de medição dependem da porosidade do substrato (RILEM, 1980). (RILEM, 1980). Os tubos produzidos segundo o relatório dos anos 1980 eram mais curtos, medindo 9,8 cm do centro da área do cilindro da base até a marca zero no topo dos tubos, enquanto os tubos produzidos atualmente medem 12 cm e são graduados até 5 ml (Saldanha e Eichburg, 2013).

A absorção de água do substrato está relacionada com sua durabilidade, de modo que os resultados das medições com tubos de Karsten podem ser utilizados para prever a vulnerabilidade de superfícies de materiais não tratados e não desgastados expostas à deterioração da água. Também é possível avaliar o grau de deterioração por meio da comparação entre superfícies deterioradas e não deterioradas e o desempenho de tratamentos de superfície (Gale, 2020).

Segundo RILEM (1980), o ensaio utilizando tubos de Karsten visa medir a absorção de água sob baixa pressão e pode ser efetuado tanto em laboratório como em campo (daí vem sua praticidade), e entre seus campos de aplicação estão:

- Caracterização do substrato e avaliação do impacto de alterações superficiais na absorção de água;
- Analisar o impacto do intemperismo na superfície (formação de pátina, entupimento dos poros etc.);
- Avaliar o impacto do intemperismo (de forma natural ou artificial) em um tratamento hidrofóbico ou impermeável;
- Determinar a profundidade de penetração de um tratamento em função da abrasão.

A medida da absorção de água por meio de tubos de Karsten é tradicionalmente realizada em substratos de pedra natural e alvenaria de tijolos (Oliveira, 2013). Utilizar esse método para avaliação de desempenho pode orientar práticas de manutenção corretiva e preventiva. Segundo Flores-Colen ⁴¹(2009 apud Apps, 2011, p. 33), a técnica com tubos de Karsten é frequentemente utilizada em revestimentos de paredes com os seguintes objetivos:

⁴¹ Flores-Colen, I. (2009) - "Metodologia de avaliação do desempenho em serviço de fachadas rebocadas na óptica da manutenção predictiva." Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Junho, 537p.

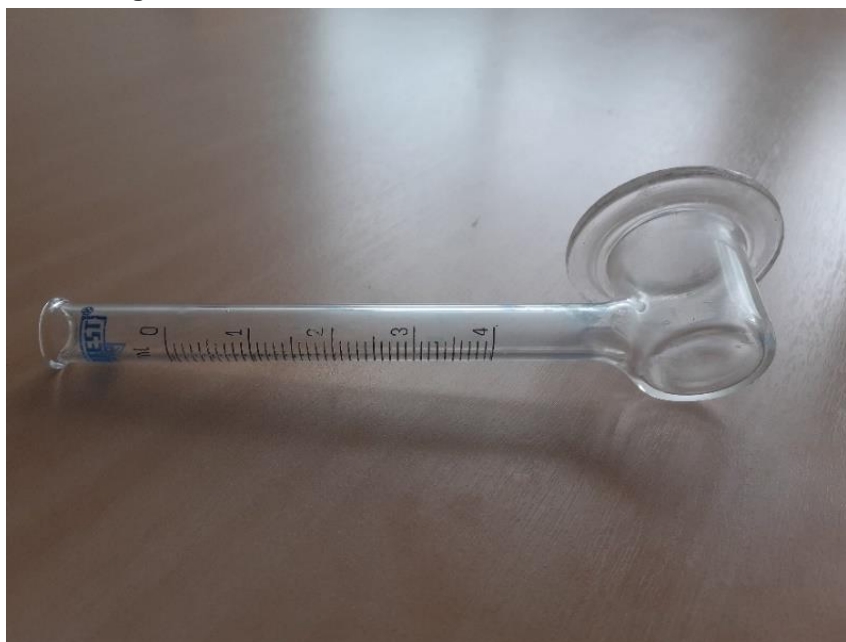
- Determinar a absorção de água por revestimentos tradicionais ou não tradicionais com base em ligantes minerais ou mistos;
- Avaliar a capacidade de absorção de água dos revestimentos de paredes;
- Estimar o grau de degradação dos revestimentos e prever a vulnerabilidade da superfície à ação da água;
- Comparar resultados obtidos sobre diferentes tipos de superfícies de revestimentos e avaliar a influência do acabamento;
- Determinar o grau de proteção fornecido por um tratamento de superfície hidrofugante e a sua eficácia em um determinado período (durabilidade do tratamento).

O método do tubo de Karsten é o método não destrutivo mais indicado para a avaliação da qualidade do tratamento hidrofóbico e é indicado inclusive em superfícies pouco porosas como as de concretos densos, com a diferença de que nesses casos a absorção verificada será menor (informação pessoal)⁴². Como foi visto, alguns autores defendem que uma de suas vantagens é a possibilidade de correlacionar a altura da coluna d'água dentro do tubo com a pressão da água da chuva a uma determinada velocidade de vento, considerando que esse é um fator que exerce grande influência na absorção da superfície das estruturas em condições climáticas naturais (Pavlov; Prostiakova, 2010), embora haja controvérsias.

Foram realizados ensaios de absorção por capilaridade utilizando tubos de Karsten graduados com capacidade de 4ml e subdivisões de 0,1ml (**Figura 138**), nas quatro áreas onde foram aplicados os hidrofugantes, antes e após a aplicação dos produtos.

⁴² MARANI, P. **PERGUNTAS Pesquisadora FAU USP - Hidrofugantes Wacker**. Destinatário: Vanessa de Moraes. São Paulo, 3 jan. 2023. E-mail.

Figura 138 - Tubo de Karsten utilizado nos ensaios.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

O procedimento consistiu em aderir os tubos nas superfícies com um material de fixação e preenchê-los com água até o nível zero. Com os tubos preenchidos, fez-se a checagem do nível d'água de 5 em 5 minutos, até que os valores se estabilizassem, dentro do valor limite de 1 hora, anotando a cada checagem o volume total de água absorvido.

Com uma superfície limpa e seca, deve-se fazer a fixação dos tubos, essa etapa é essencial para que os ensaios sejam bem-sucedidos. Oliveira (2013) ressalta que as superfícies de fixação dos tubos devem ser livres de fissuras, irregularidades e cavidades visíveis. É importante que antes da definição do material de fixação para os ensaios sejam realizados testes prévios na superfície a ser avaliada pois cada material e cada superfície tem características próprias. Se não houver uma boa aderência, vazamentos podem ocorrer e inutilizar os ensaios e nesse caso é necessário reiniciá-los. Para este trabalho, foram testados três materiais: plastilina, silicone e massa de calafetar.

É comum a recomendação da plastilina para a realização de ensaios com tubos de Karsten. Ao ser testada na superfície de concreto, no entanto, apresentou má aderência e os tubos com frequência apresentaram vazamentos (**Figura 139**) ou se desprenderam ao longo do ensaio, mesmo com a utilização de muito material para fixação – que inclusive causou alteração na área de absorção (**Figura 140**).

Figura 139 - Fixação do tubo de Karsten com plastilina, com má aderência e vazamento.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 140 - Aplicação da plastilina em excesso para a fixação do tubo alterou a área de absorção.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Saldanha e Eichburg (2013) ressaltam que a alteração na área de absorção provoca alteração nos resultados, com absorção menor em áreas menores. Como forma de controle da área de absorção em situações em que for viável, sugerem a utilização de tinta de carimbo na massa aderente.

O silicone (**Figura 141**) apresentou dois principais problemas: o tempo de secagem, de modo que o tubo tivesse que ser segurado até que o silicone estivesse seco para que fosse possível iniciar os ensaios, e a dificuldade de remoção do material, tanto da superfície de concreto quanto dos tubos. Esses fatores tornaram seu uso pouco prático e inadequado para a aplicação em questão.

Figura 141 - Aplicação de silicone acético no tubo de Karsten.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

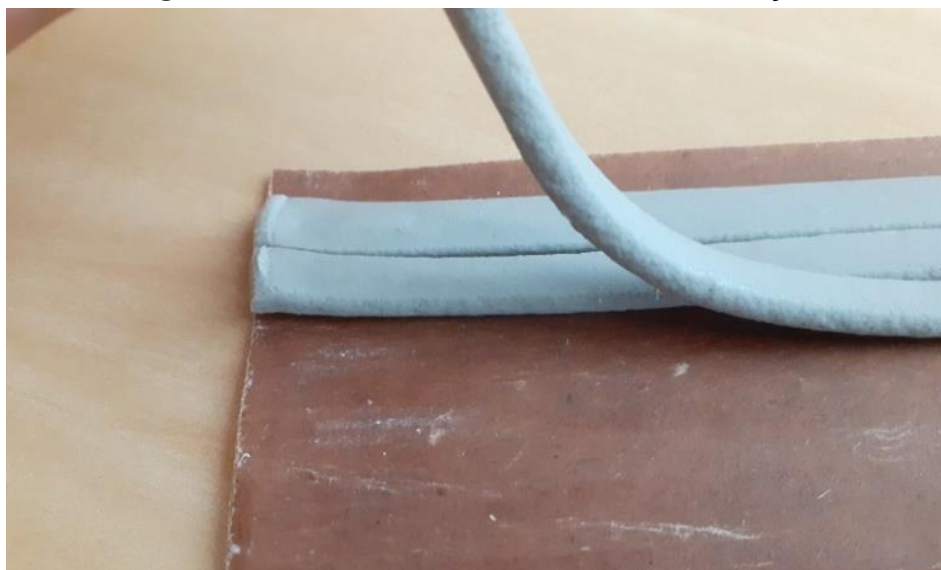
A massa de calafetar foi o material que melhor funcionou, pois além de ser de uso imediato, cessaram os vazamentos visíveis e quedas. Além disso esse material normalmente é vendido em tiras da largura das bordas dos tubos, o que facilitou a aplicação (**Figura 142**). Mesmo entre as massas de calafetar disponíveis no mercado há diferenças, embora apresentem boa aderência em geral. Algumas têm aderência muito melhor que outras, e ao mesmo tempo são mais pegajosas de difícil remoção (**Figura 143** e **Figura 144**). Para os ensaios realizados neste trabalho optou-se por um material com boa aderência, mas que fosse de fácil remoção.

Figura 142 - A massa de calafetar normalmente é vendida em tiras da largura da borda do tubo de Karsten.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 143 - Massa de calafetar de mais fácil remoção.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 144 - Massa de calafetar mais aderente, de difícil remoção.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

A mesma conclusão sobre as diferenças entre materiais de fixação foi tida por Apps (2011):

[...] no que diz respeito aos materiais de fixação, a silicone transparente apresenta melhores características de material vedante mas maior tempo de realização de ensaio devido à necessidade de aguardar a secagem do material; a massa antivibratória é pior vedante do que a silicone mas melhor do que a plasticina; tanto a massa antivibratória como a plasticina permitem reduzir o tempo de ensaio, podendo iniciar-se logo após a fixação dos tubos, e provocam maior redução da área de absorção do que a silicone transparente; pelo exposto, recomenda-se a utilização da silicone transparente quando se pretendem resultados mais rigorosos e a utilização da massa antivibratória quando se pretende reduzir o tempo dispendido com o ensaio. No caso da plasticina, não se recomenda futuramente a sua utilização, pois não possui vantagens relativamente à massa antivibratória e apresenta maiores dificuldades de fixação bem como piores características, como resistência a elevadas temperaturas e elasticidade (Apps, 2011, p.98).

A massa foi aplicada nas bordas dos tubos de forma igualmente distribuída e em quantidade suficiente para fixá-los, de modo a não afetar a área interna de absorção do ensaio (**Figura 145**). Após a aplicação do material, os tubos foram pressionados contra a superfície até ser garantida boa aderência e fixação e sem que houvesse espaços por onde pudessem ocorrer vazamentos, mantendo-os sempre na vertical e havendo o cuidado para não os quebrar (**Figura 146**). Apps (2011, p. 52) recomenda que além da massa aplicada na borda do tubo seja ainda aplicada massa em torno do tubo para que seja garantida a estanqueidade (**Figura 147**); neste trabalho a massa foi aplicada apenas na borda do tubo.

Figura 145 - Distribuição da massa de calafetar na borda do tubo de Karsten.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 146 - Tubo de Karsten pressionado sobre a superfície para a fixação, mantendo-se o cuidado para não o quebrar.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 147 - Aplicação da massa de fixação no entorno do tubo de Karsten.



Fonte: Sobrinho (2008).

Após a fixação dos tubos, estes foram preenchidos com água até a marca de 0ml. Neste trabalho, foi utilizada uma seringa (**Figura 148**), mas é comumente recomendado o uso de uma pisseta ou pipeta (**Figura 149**). Pode haver dificuldade no preenchimento até a marca exata de 0 ml; neste caso pode ser utilizado um conta-gotas e caso a marca seja ultrapassada pode-se introduzir um pedaço de papel absorvente para corrigir o nível de água, imediatamente após o preenchimento do tubo.

Figura 148 - Utilização de seringa para preenchimento dos tubos de Karsten.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 149 - Preenchimento do tubo de Karsten com pisseta.



Fonte: Hendrickx (2019).

É importante que se impeça a formação de bolhas (**Figura 150**), pois podem alterar a área de absorção e adulterar os resultados, caso o ar seja despreendido ao longo do ensaio, diminuindo o nível nos tubos e causando a impressão de que houve absorção. Saldanha e Eichburg (2013) sugerem que uma forma de prevenir a formação de bolhas é a utilização de um recipiente de plástico semelhante a uma pisseta em contato com a parede de trás do tubo.

Figura 150 - Formação de bolha dentro de tubo de Karsten.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Após o preenchimento dos tubos até o nível 0, a absorção foi medida a cada 5 minutos ao longo de 1h por meio de um cronômetro. A cada checagem foi registrado o volume acumulado absorvido. Para a área de cada hidrofugante foram tomadas três medidas e foram feitas leituras antes e após a aplicação dos produtos (**Figura 151**), sempre nos mesmos pontos da superfície, e essas leituras foram posteriormente comparadas.

Figura 151 – Medição da absorção com tubos de Karsten em uma das áreas de ensaio.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

O ensaio antes e após a aplicação do produto de proteção superficial deve ser realizado pela mesma pessoa, da mesma forma e no mesmo local para evitar leituras e resultados equivocados (Saldanha; Eichburg, 2013). É importante observar - principalmente quando da realização do ensaio em edifícios históricos - se o material de fixação deixa marcas ou restos na superfície. Neste ensaio a massa de calafetar deixou restos e marcas circulares que com o tempo ficaram esbranquiçadas, mas que são facilmente removíveis (**Figura 152 à Figura 156**).

Figura 152 - Marcas deixadas pela massa de calafetar logo após o ensaio com tubos de Karsten.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 153 - Marca e restos deixados pela massa de calafetar logo após o ensaio com tubos de Karsten.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 154 - Marcas da massa de calafetar esbranquiçadas, dias após o ensaio com tubos de Karsten.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 155 - Marca da massa de calafetar esbranquiçada, dias após ensaio com tubo de Karsten.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 156 - Marca da massa de calafetar dias após o ensaio com tubo de Karsten, imagem ilustra a facilidade de remoção.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Além dos materiais de fixação, Apps (2011) aponta alguns fatores que podem alterar os resultados dos ensaios com tubos de Karsten, como: as características das superfícies; presença de biofilme/microfissuras; tipo de tubo de Karsten (tubos mais longos levam a maiores absorções) e condições climáticas. Em dias de sol, a superfície tende a absorver mais que em dias chuvosos, pois neste último caso a absorção tende a ser menor devido à saturação dos poros. Recomenda que sejam feitas medições da umidade da superfície, da umidade e temperatura do ar no momento dos ensaios para fins comparativos. Segundo o autor, deve-se realizar um número mínimo de 10 ensaios para uma área de referência máxima de 10m² para obter uma avaliação fidedigna da absorção de água líquida.

5.2.2. Ensaio em corpos de prova

Os ensaios realizados em corpos de prova foram:

- Resistência à compressão axial aos 28 dias de idade para a caracterização do concreto segundo a norma ABNT NBR 5739 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018);
- Absorção utilizando tubos de Karsten segundo a norma europeia EN 16302 (European Committee for Standardization, 2013);
- Absorção por capilaridade segundo a norma ABNT NBR 9779 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012);
- Verificação da profundidade de penetração do hidrofugante segundo a norma europeia EN 14630 (European Committee for Standardization, 2006);
- Medição do ângulo de contato da água com as superfícies dos corpos de prova, com e sem aplicação de hidrofugantes segundo a norma estadunidense ASTM D7334 (American Society for Testing and Materials, 2013).

5.2.2.1. Resistência à compressão axial

Foram realizadas as medições de resistência em 6 corpos de prova aos 28 dias de idade e a resistência final foi calculada a partir da média entre os valores medidos (Figura 157)

Figura 157 - Ensaio de resistência à compressão axial.



Fonte: Renan Andrade (2021).

5.2.2.2. Medição da absorção de água utilizando tubos de Karsten

Foi realizado o mesmo procedimento que o utilizado na superfície do pilar. Em cada corpo de prova de 10x10x5cm foram feitas três medições de absorção, nos mesmos pontos, antes e após a aplicação dos hidrofugantes (**Figura 158**) e depois foi feita a comparação entre os valores registrados.

Figura 158 - Medições das absorções nos corpos de prova com os hidrofugantes A e B.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

5.2.2.3. Ensaio de absorção por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado tendo como referência a norma ABNT NBR 9779 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012). Foi utilizado um corpo de prova cilíndrico de 10x20cm para cada hidrofugante e um corpo de prova de referência, sem proteção superficial. Em cada corpo de prova foi feita uma marca a 5mm a partir da superfície de absorção (**Figura 159**), posteriormente essa superfície foi apoiada em dois bastões de silicone dentro de um recipiente (**Figura 160**) para que ficasse livre para a absorção e foi depositada água até a marca (**Figura 161**). Mantendo a água nesse nível com reposições a cada medição, os corpos de prova foram retirados da água e enxugados com um pano úmido e a absorção foi medida com uma balança 3h, 6h, 24h, 48h e 72h após a primeira inserção dos cilindros na água. Foi utilizada uma balança digital com capacidade de pelo menos 5kg e precisão de 1g (**Figura 162**) com uma base estável.

Figura 159 - Marca a 5mm da superfície de absorção do corpo de prova.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 160 - Recipiente com bastões de silicone para apoiar a superfície de absorção dos corpos de prova.



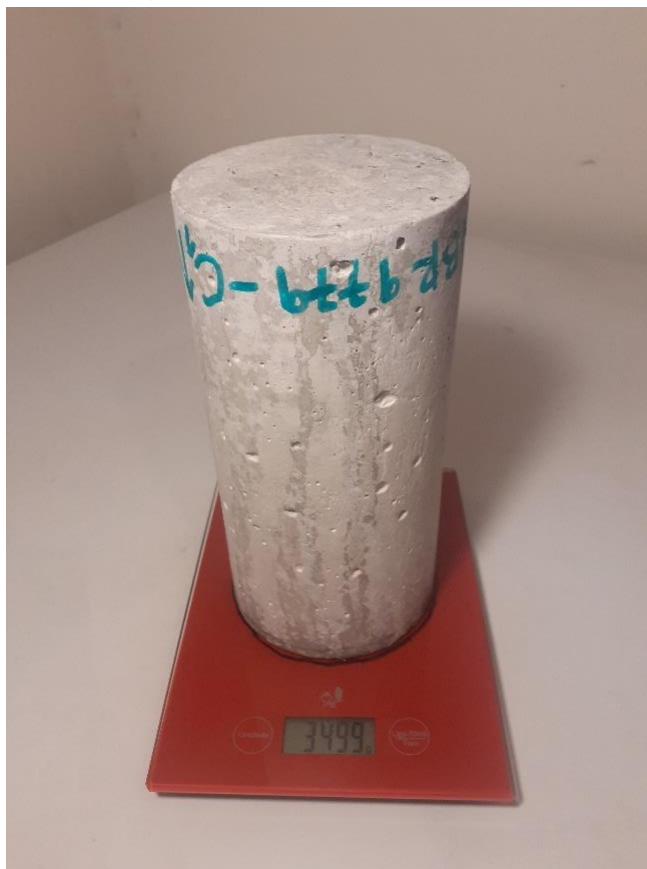
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 161 - Corpos de prova em recipientes preenchidos com água até a marca de 5mm.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 162 - Balança utilizada para pesagem dos corpos de prova



. Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

5.2.2.4. Penetração do hidrofugante no substrato

Os hidrofugantes foram aplicados nos corpos de prova cilíndricos de 10x20cm, que após a secagem foram rompidos por compressão diametral (**Figura 163**) de modo que sua seção longitudinal ficasse exposta. Posteriormente, a seção foi molhada para facilitar a visualização da profundidade de penetração do hidrofugante. A área que absorveu água fica mais escura e a área que não absorveu fica mais clara (**Figura 164**). O procedimento segue o mesmo da norma europeia EN 14630 (European Committee for Standardization, 2006) – e recomendado na norma NP EN 1504-2 (Comité Europeu de Normalização, 2008) - mas substituindo fenolftaleína por água.

Figura 163 - Rompimento por compressão diametral do corpo de prova.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 164 - Seção do corpo de prova após ser molhada com água. A área escura representa a que absorveu água e área mais clara (nas bordas) representa a penetração do hidrofugante, onde não houve absorção.

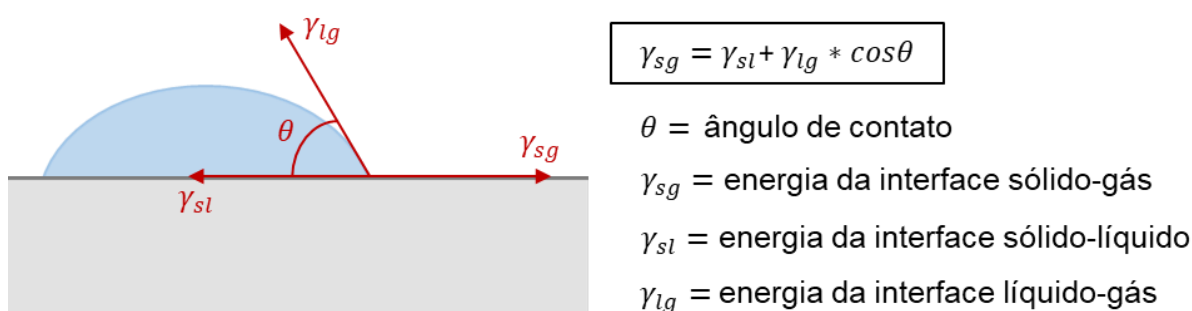


Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

5.2.2.5. Medição do ângulo de contato

O método da gota séssil é utilizado para medir a molhabilidade de uma superfície (Petri, 2021). Considerando uma gota de um líquido depositada em uma superfície horizontal e lisa, o ângulo formado pela intersecção entre a interface líquido-gás e a interface líquido-sólido é denominado ângulo de contato (Hebbar; Isloor; Ismail, 2017, p.221). É possível correlacionar o ângulo de contato com a energia da interface sólido-gás, da interface líquido-gás e da interface sólido-líquido por meio da equação de Young, considerando uma superfície ideal: rígida, plana, não-reativa, inerte, homogênea, insolúvel, lisa e não porosa (**Figura 165**).

Figura 165 - Ângulo de contato e equação de Young.



Fonte: Vanessa de Moraes (2023).

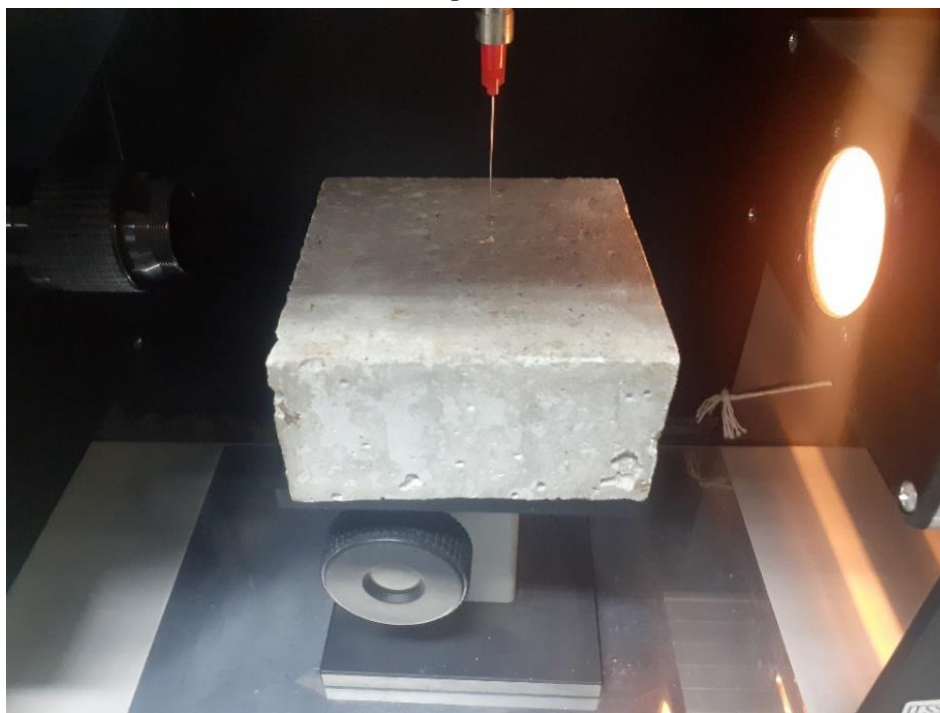
A medição do ângulo de contato foi realizada com um goniômetro (**Figura 166**), segundo as orientações da norma estadunidense ASTM D7334 (American Society for Testing and Materials, 2013). O teste consiste na deposição de uma gota de água não maior que 20 µL na superfície de uma amostra posicionada no equipamento por meio de uma seringa (**Figura 167**). O ângulo de contato entre a gota e o substrato (**Figura 168**) pode ser medido diretamente por meio de um microscópio equipado com uma escala de goniômetro acoplado ao equipamento ou por meio da captura de uma imagem e utilização de um transferidor em um software apropriado (**Figura 169** e **Figura 170**). Neste trabalho foi utilizado um software que fornece diretamente o ângulo de contato.

Figura 166 -Goniômetro contendo o corpo de prova onde é depositada a gota de água a partir da qual é feita a medição do ângulo de contato.



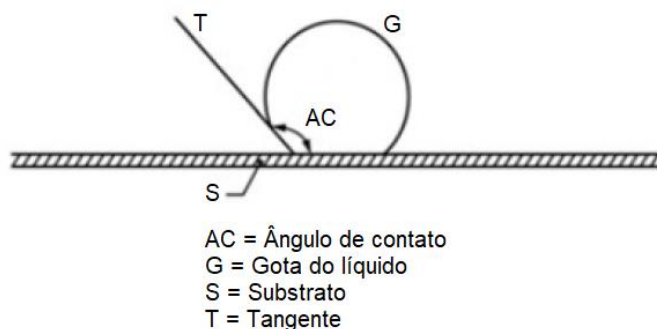
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 167 - Deposição de gota de água no corpo de prova por meio de uma agulha. Ao lado esquerdo a câmera que capta a imagem utilizada no software e ao lado direito a iluminação da gota.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 168 - Ângulo de contato entre a gota de água e o substrato.



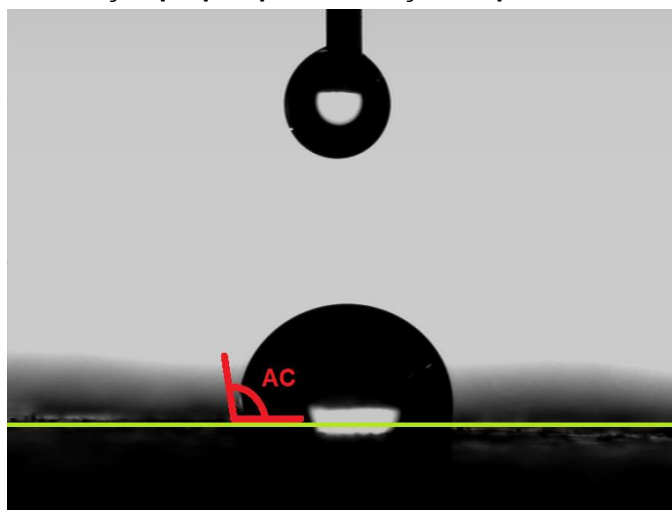
Fonte: Adaptado de American Society for Testing and Materials (2013).

Figura 169 - Imagem enviada ao software de medição do ângulo de contato.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 170 - Imagem enviada ao software de medição do ângulo de contato. No software, a linha horizontal (verde) deve ser posicionada no limite da superfície de apoio da gota, representada dentro da área preta e é a base do ângulo medido. Neste caso, como a superfície é irregular, há uma área sombreada acima da linha. As linhas verde e vermelha são de elaboração própria para ilustração do procedimento.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Sobre a medição com o goniômetro, Hebbar, Isloor e Ismail (2017) afirmam:

Sugere-se que o telescópio seja levemente inclinado para baixo (1-2 graus) da linha do horizonte de modo que a borda mais próxima da superfície de apoio (fora de foco) esteja fora da linha de visão e uma porção do perfil refletida pela superfície do substrato seja focalizada, o que previne a formação de uma linha de contato entre o líquido e o substrato difusa no perfil. Uma iluminação de fundo sempre é utilizada para auxiliar na observação, enquanto uma fonte de luz específica é selecionada para evitar aquecimento indesejado do líquido ou do substrato. Para estabelecer um ângulo de contato de avanço, é melhor aumentar lentamente a gota séssil para um diâmetro de aproximadamente 5mm por meio de uma seringa de micrômetro com uma agulha de aço inoxidável ou teflon com uma ponta estreita. A agulha deve permanecer na gota durante a medição para que seja evitada vibração indesejada. O diâmetro da agulha deve ser tão pequeno quanto possível para que não distorça o perfil da gota. Como a gota pode ser assimétrica, é aconselhável que sejam medidos os ângulos de contato dos dois lados do perfil da gota e que seja utilizada a média dos ângulos. Para um substrato relativamente grande, ângulos de contato devem ser medidos em vários pontos para que se tenha um valor médio que seja representativo de toda a superfície (Hebbar; Isloor; Ismail, 2017, p.226).

Segundo a norma, a água pode ser utilizada como líquido de teste para estabelecer se uma superfície é hidrofílica, hidrofóbica, ou se apresenta comportamento intermediário, como mostra a **Tabela 13**. Para a medição dos ângulos de contato, foram utilizados cinco corpos de prova de concreto de 10x10x5cm: em quatro desses foram aplicados os hidrofugantes e o outro corpo de prova foi utilizado como referência (sem hidrofugante); o concreto foi o material escolhido com o objetivo de aproximar as características da superfície de ensaio com o material da empena do edifício Vilanova Artigas.

Tabela 13 - Relação entre ângulo de contato e a hidrofobicidade do substrato segundo a norma estadunidense ASTM D7334-08.

Ângulo de contato	Hidrofobicidade da superfície
$AC < 45^\circ$	Hidrofílica
$45^\circ < AC < 90^\circ$	Comportamento intermediário
$90^\circ > AC$	Hidrofóbica

Fonte: Adaptado de American Society for Testing and Materials (2013).

De acordo com Hebbar, Isloor e Ismail (2017), superfícies com ângulo de contato menor que 90° são consideradas hidrofílicas, maior que 90° são consideradas hidrofóbicas - quando as gotas de água tendem a formatos esféricos devido à ausência de atração com as moléculas de água – e ângulo de contato maior que 140°

são consideradas super-hidrofóbicas. A norma ASTM D7334-08 (American Society for Testing and Materials, 2013) elenca fatores que podem influenciar os resultados do ensaio:

- Sujeira ou impressões digitais na superfície de teste;
- Uma superfície de teste áspera ou porosa, de modo que a gota afunde rapidamente;
- Uma superfície de teste curva que dificulte a medição dos ângulos;
- Baixa umidade ($UR < 50\%$) quando a água é o líquido de teste, de modo que o ângulo de contato mude rapidamente.

Segundo Hebbbar, Isloor e Ismail (2017), medições precisas e a reprodutibilidade dos valores do ângulo de contato com as superfícies podem ser influenciadas por diversos parâmetros, como heterogeneidade, rugosidade superficial, forma e tamanho das partículas que compõem a superfície.

O ângulo de contato da água com a superfície avaliada deve ser a média dos ângulos de contato medidos naquela superfície, e a medição deve ser realizada rapidamente dentro dos primeiros 30 segundos de deposição da gota para que sejam evitadas mudanças no ângulo à medida que a água evapora (American Society for Testing and Materials, 2013).

6. RESULTADOS

Este capítulo contém os resultados dos ensaios realizados *in situ* e com os corpos de prova.

6.1. Resultado dos ensaios *in situ*

Os tópicos a seguir apresentam os resultados dos ensaios realizados no pilar: avaliação de cor com colorímetro tristímulo, absorção por capilaridade utilizando tubos de Karsten e inclui um tópico sobre o “efeito de superfície”, ou comumente chamado “efeito gota”.

6.1.1. Efeito de superfície

A expressão “efeito de superfície” (eventualmente referido como “efeito gota” ou “*beading effect*”, na literatura estrangeira) denomina a formação de gotículas em vez do molhamento (**Figura 171**) da superfície e está relacionado com a medição do ângulo de contato. O efeito revela a característica hidrofóbica do substrato impregnado com hidrofugante e é explicado pelo produto aplicado que permanece na face dos materiais. Este efeito tende a desaparecer algumas semanas após o tratamento sem que o desempenho do produto que penetrou os poros seja afetado (Oliveira, 2013).

Figura 171 - Efeito de superfície/efeito pérola/ “*beading effect*” observado no pilar após a aplicação do hidrofugante B. A água se deposita na superfície na forma de gotículas tendentes ao formato esférico.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

O principal aspecto notado após a aplicação dos hidrofugantes foi a diferença de molhamento entre áreas protegidas e não protegidas. Nota-se que para os produtos A, B e C, a área hidrofugada foi visivelmente menos molhada. Na área dos hidrofugantes A e B (ambos compostos por silanos e siloxanos) foi notável a formação de gotículas superficiais em vez de molhamento da superfície, efeito que ocorreu pouco ou não ocorreu nos casos dos hidrofugantes C e D, concentrados em silano.

Assim, à primeira vista esse efeito trouxe a impressão de que os hidrofugantes A e B foram mais eficientes com relação à redução da absorção de água. Também foi perceptível que nas áreas onde há biofilme e sujeira – mais próximas à base do pilar e escuras – houve mais molhamento e retenção de umidade. A **Figura 172** a **Figura 179** ilustram esses resultados.

Figura 172 - Área do hidrofugante A: molhamento e escurecimento do entorno.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 173 - Área do hidrofugante B: molhamento e escurecimento abaixo.



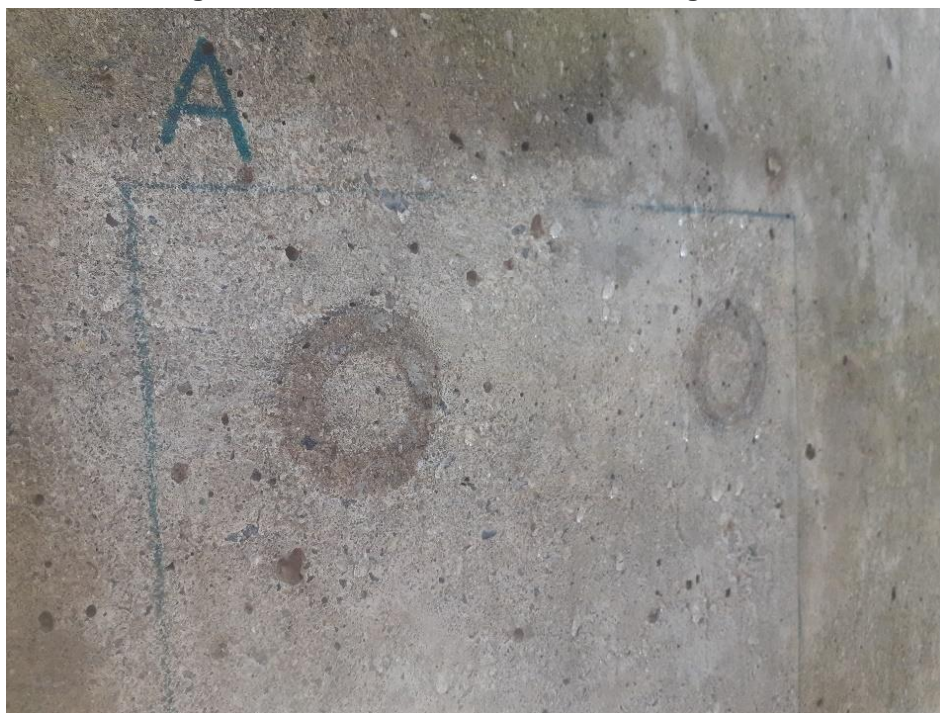
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 174 - Área do hidrofugante C: molhamento e escurecimento abaixo.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 175 - Gotículas na área do hidrofugante A.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 176 - Gotículas na área do hidrofugante B.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 177 - Gotículas superficiais na área do hidrofugante B e logo abaixo molhamento da superfície.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 178 - Na área do hidrofugante C embora houvesse pouco molhamento, foi pouco perceptível a formação de gotículas superficiais, como nos hidrofugantes A e B.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 179 - Na área do hidrofugante D não houve formação de gotículas superficiais e não há diferença na aparência do molhamento da superfície hidrofugada e não hidrofugada.



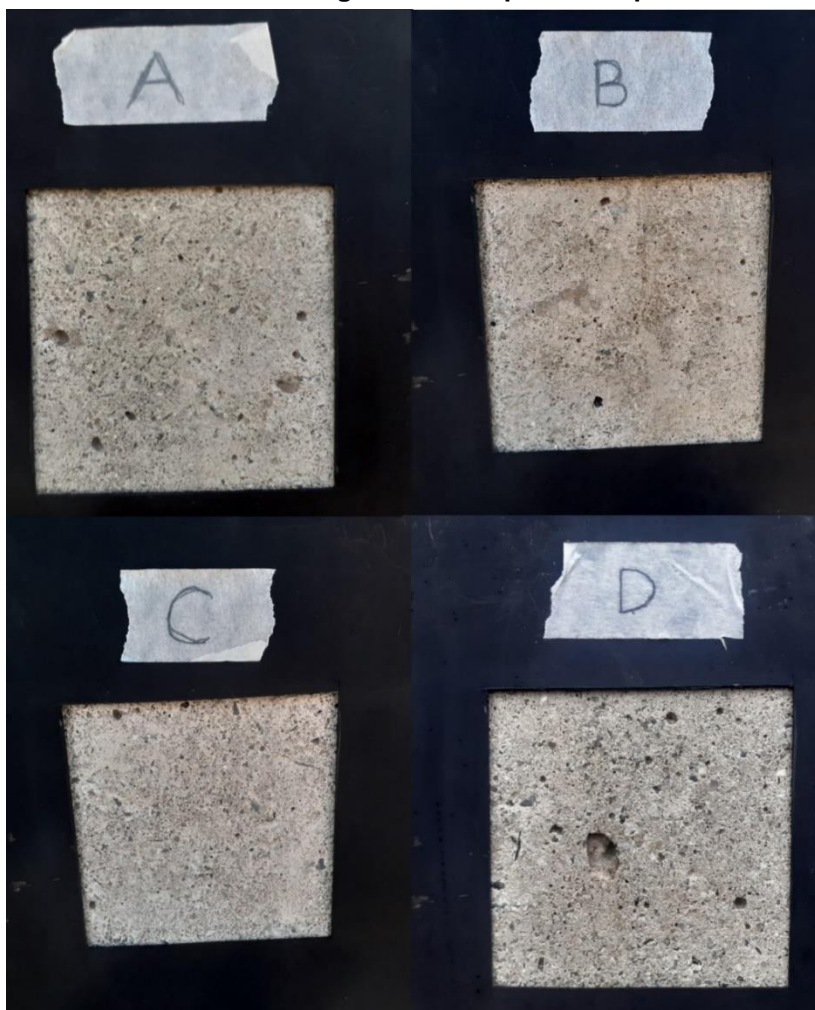
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Esses resultados estão de acordo com os comentários de Pedro Marani sobre a não observação do “efeito gota” em superfícies hidrofugadas com produtos com elevada concentração de silanos, sugerindo que produtos que penetram mais no concreto – seja pelo maior tempo de reação ou pelo tamanho da molécula - não necessariamente apresentam os maiores ângulos de contato.

6.1.2. Resultados das medições com colorímetro tristímulo

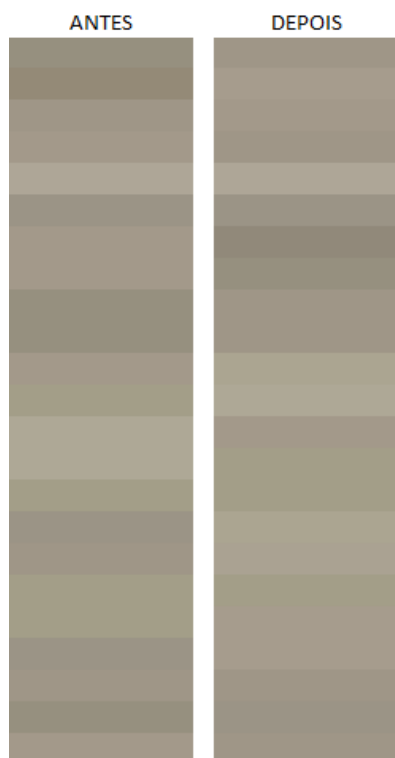
O principal aspecto observado nas superfícies dos ensaios é que não são homogêneas, não há uma única cor que represente sua totalidade. Assim, nas áreas de 64 cm² em que foram realizadas as medições com o colorímetro foram identificadas várias cores, dentre as 23 tomadas. Isso pode ser visualizado na **Figura 180**.

Figura 180 - Superfícies de ensaio dos hidrofugantes A, B, C e D, em que foram tomadas as medidas com o colorímetro. A imagem mostra que são superfícies heterogêneas.

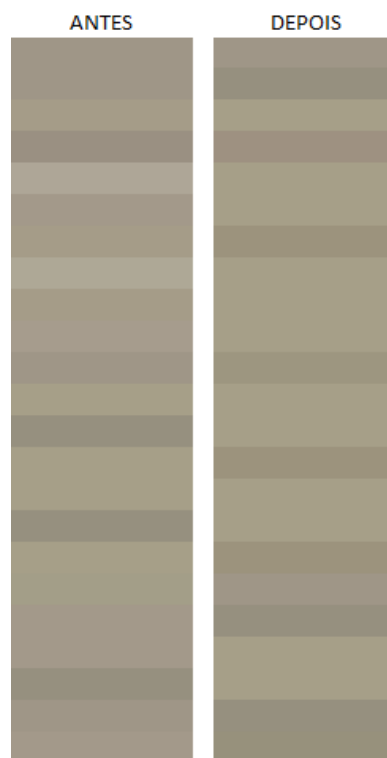


Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

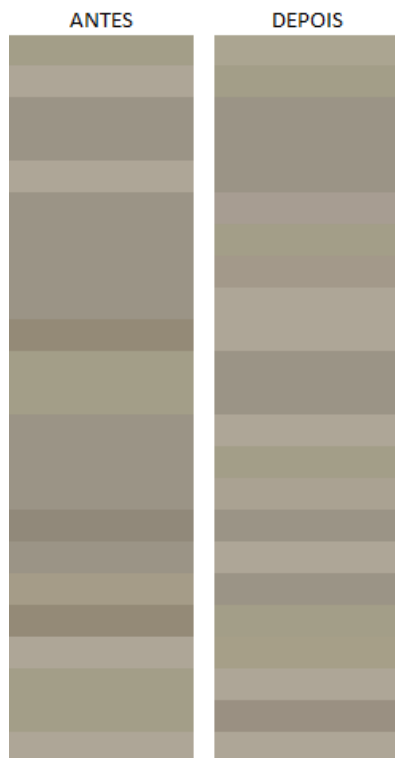
Com as medidas tomadas com o colorímetro foi possível obter os valores RGB dos 23 pontos medidos, antes e após a aplicação dos hidrofugantes, como mostram a **Figura 181** à **Figura 184**. As posições das 23 medidas nas imagens são aleatórias, dão um aspecto geral da aparência de cor das superfícies e confirmam sua heterogeneidade.

Figura 181 - Área do hidrofugante A.

Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 183 - Área do hidrofugante B.

Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 182 - Área do hidrofugante C.

Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

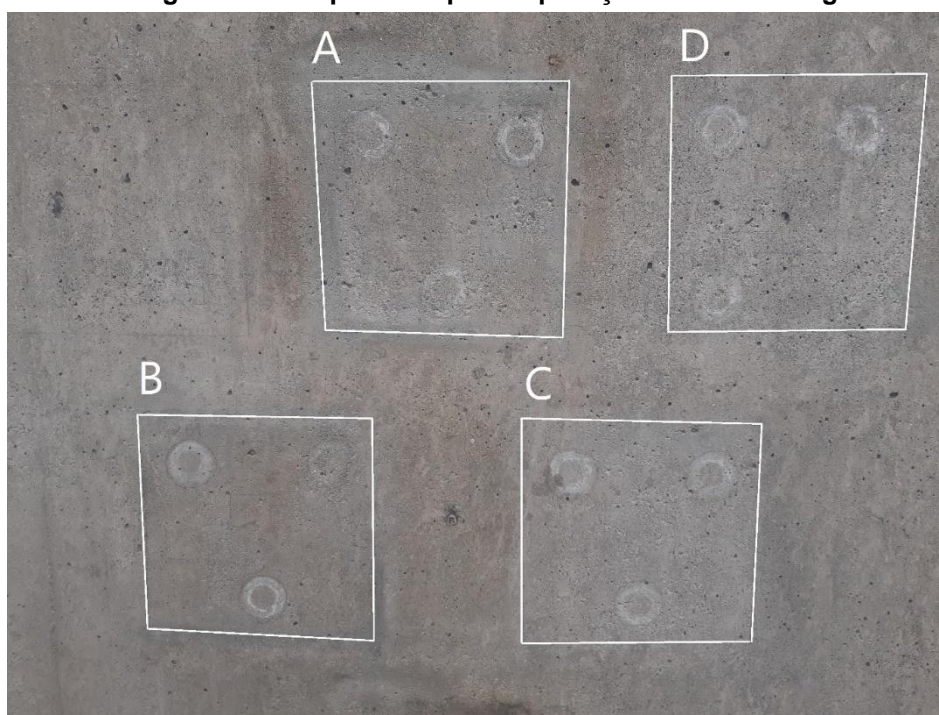
Figura 184 - Área do hidrofugante D.

Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

A partir das 23 medidas tomadas em cada área foram encontradas as modas - as cores mais frequentes - e com os valores de L^* , a^* e b^* dessas cores foram realizados os cálculos de diferença de cor. As modas, com seus respectivos códigos e nomes na tabela Pantone, seus valores L^* , a^* e b^* , os valores de ΔL^* , Δa^* e Δb^* , os valores de ΔE^* e sua classificação (*Just Noticeable Difference*) constam na **Tabela 14**. As tabelas com todas as medições realizadas com o colorímetro constam no APÊNDICE B.

Os resultados dos cálculos de diferença de cor antes e após a aplicação dos hidrofugantes indicam que em todas as áreas foram encontradas diferenças de cor classificadas como “leve” e “não visível”. Na área relativa ao hidrofugante B, no levantamento antes da aplicação do produto houve empate entre três modas, sendo que duas dessas três cores (*Crockery* e *Tuffet*) apresentaram diferença de cor classificada como “muito óbvia” com a moda levantada após a aplicação do produto (*Plastic Std*), enquanto a outra moda (*Plastic Std*), que é a mesma cor do levantamento original) apresentou diferença de cor como “não visível”, já que se trata da mesma cor. A **Figura 185** é uma fotografia das áreas dos 4 hidrofugantes após a aplicação dos produtos, com estes já secos. Há a impressão de um leve escurecimento na área do hidrofugante B, mas o aspecto geral é de que não há alteração visível na aparência da superfície.

Figura 185 - Superfície após a aplicação dos 4 hidrofugantes.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Tabela 14 - Modas antes e após a aplicação dos hidrofugantes e cálculo do ΔE .

Hidrofugante	Moda antes da aplicação do hidrofugante					Moda após a aplicação do hidrofugante					ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	JND
	Nome Pantone	CÓDIGO	L*	a*	b*	Nome Pantone	Código	L*	a*	b*					
A	Tuffet	16-1106 TPG	64,37	1,97	10,6	Crockery	16-1104 TCX	63,05	1,94	10,32	-1,32	-0,03	-0,23	1,34	Leve
B	Crockery	16-1104 TCX	63,05	1,94	10,3	Plastic Std	PQ-7536C	65,69	0,21	13,10	2,64	-1,73	2,78	4,21	Muito óbvia
	Plastic Std	PQ-7536C	65,69	0,21	13,10						0	0	0	0,00	Não visível
	Tuffet	16-1106 TPG	64,37	1,97	10,6						1,32	-1,76	2,55	3,37	Muito óbvia
C	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	0	0	0	0,00	Não visível
D	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	0	0	0	0,00	Não visível

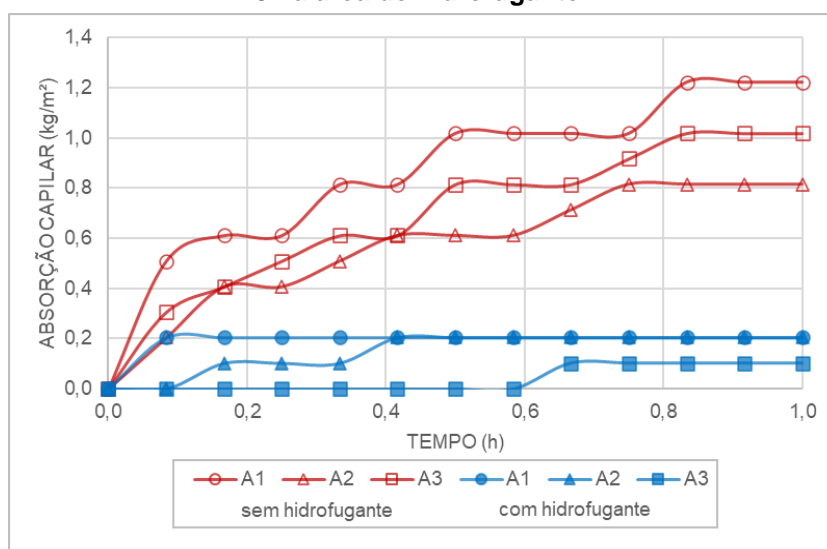
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).
 Legenda: JND - *Just Noticeable Difference*.

O método de cálculo de diferença de cor pode não ser o mais adequado para a comparação entre as cores da superfície do concreto antes e após a aplicação dos hidrofugantes, considerando a heterogeneidade do material. Se realizado o cálculo de diferença de cor entre as diferentes cores que compõem a superfície, encontra-se diferenças classificadas como “grande” e “muito óbvia”. Assim, é possível que em uma medição se tenha a sorte de levantar mais uma ou outra cor como moda, alterando totalmente os resultados. É possível observar isso na área do hidrofugante B, em que duas das modas apresentaram diferença de cor “muito óbvia” e a outra moda apresentou diferença de cor “não visível” em relação à cor medida após a aplicação do produto.

6.1.3. Resultados dos ensaios com tubos de Karsten no pilar

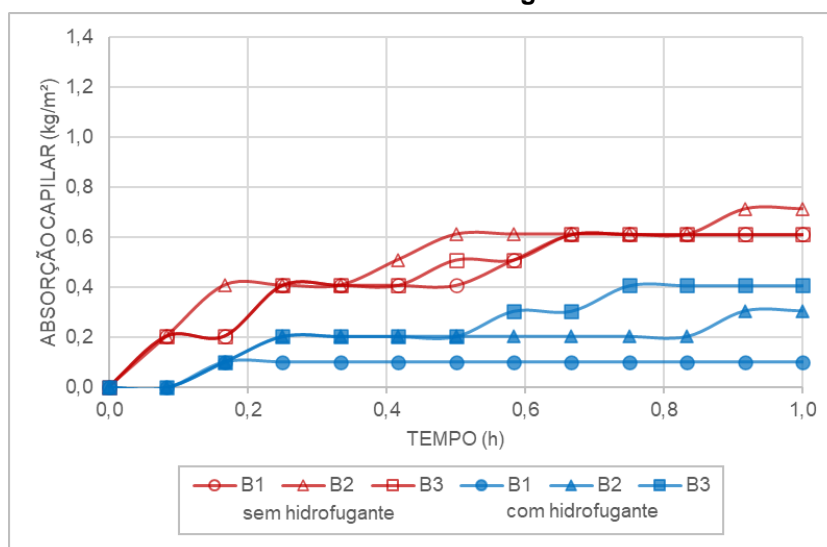
O **Gráfico 9** ao **Gráfico 12** apresentam a absorção do concreto em kg/m^2 em função do tempo em horas e ilustram os resultados de três medições realizadas na área de cada hidrofugante aplicado na superfície do pilar. Os resultados indicaram redução da absorção após a aplicação de todos os 4 hidrofugantes, mas não foi identificado um padrão de absorção inicial e de redução da absorção de água ao longo do tempo.

Gráfico 9 – Absorção em função do tempo para as três medições com tubo de Karsten A1, A2 e A3 na área do hidrofugante A.



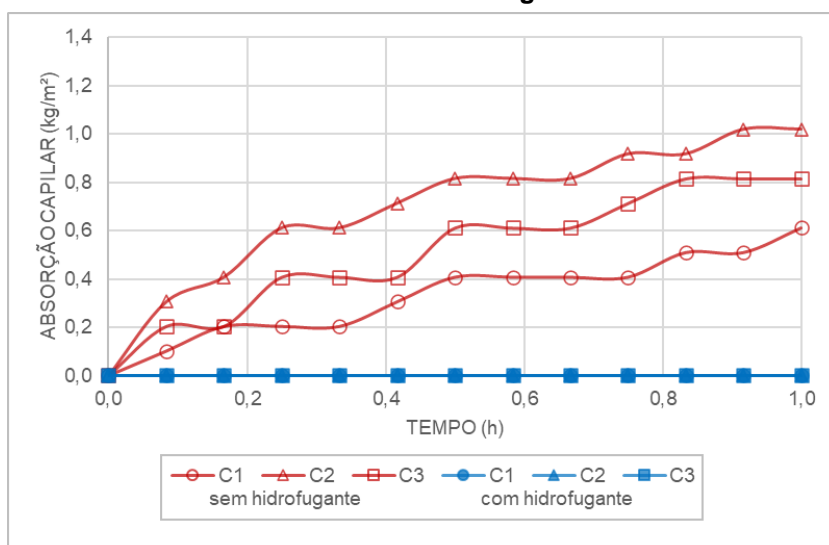
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Gráfico 10 - Absorção em função do tempo para as três medições com tubo de Karsten B1, B2 e B3 na área do hidrofugante B.



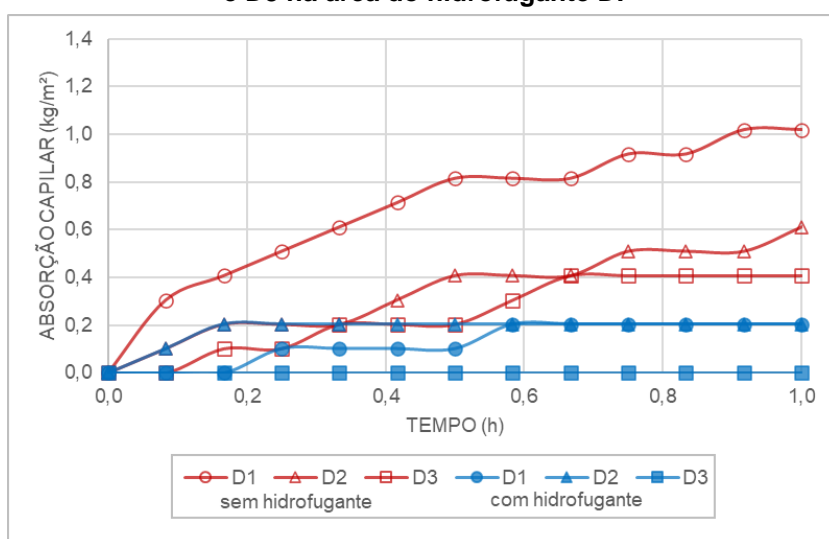
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Gráfico 11 - Absorção em função do tempo para as três medições com tubo de Karsten C1, C2 e C3 na área do hidrofugante C.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Gráfico 12 - Absorção em função do tempo para as três medições com tubo de Karsten D1, D2 e D3 na área do hidrofugante D.

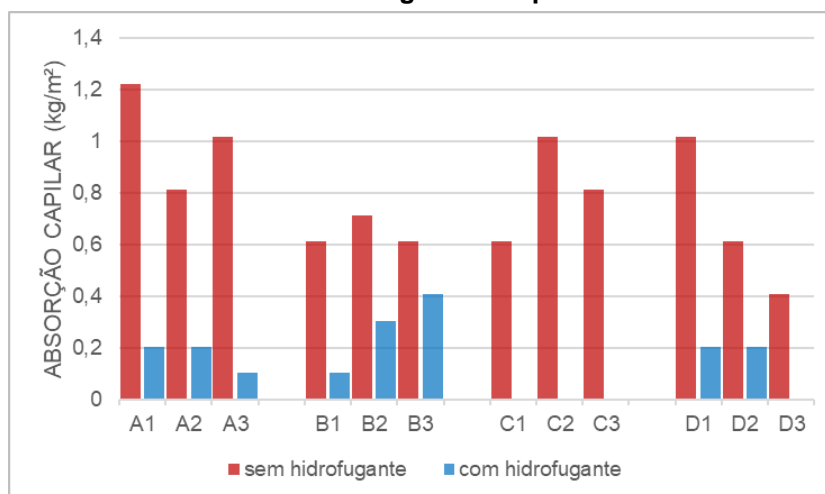


Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Acredita-se que a variabilidade da absorção de água pelo concreto sem tratamento seja devida às características das superfícies avaliadas (fissuras, cavidades, irregularidades). A região onde foi aplicado o hidrofugante B parece menos heterogênea do que as demais regiões. Outros fatores que influenciam a variabilidade dos resultados são diferenças na fixação dos tubos, possíveis vazamentos imperceptíveis, absorção de água pela massa de calafetar e até mesmo a presença de bolhas de ar dentro dos tubos. É notável a ação do hidrofugante C, cujos resultados foram de absorção nula, não mensurável por meio do método do tubo de Karsten.

O **Gráfico 13** representa a absorção total ao final do ensaio para as 12 medidas, antes e após a aplicação dos hidrofugantes. As tabelas com os levantamentos detalhados das medições com tubos de Karsten encontram-se no **APÊNDICE C**.

Gráfico 13 – Absorção total ao final do ensaio com tubo de Karsten, antes e após a aplicação dos hidrofugantes no pilar.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Os gráficos mostram que as maiores reduções de absorção foram verificadas nos ensaios realizados com os hidrofugantes A e C (caso em que após a aplicação do produto não foi medida absorção de água pela superfície). As reduções máximas foram de: 1,02 kg/m² para o hidrofugante A, 0,51 kg/m² para o hidrofugante B, 1,02 kg/m² para o hidrofugante C e 0,81 kg/m² para o hidrofugante D.

A partir desses resultados, não é possível fazer uma análise comparativa e inferir que um hidrofugante foi mais eficiente que o outro, uma vez que é necessário considerar as variações entre as características das superfícies em que foram realizadas as medições e problemas de precisão durante a realização dos ensaios, como possíveis vazamentos imperceptíveis, absorções sob a massa de calafetar e bolhas dentro dos tubos. Entretanto, nota-se a eficiência do hidrofugante C, uma vez que não houve absorção após a aplicação do produto. É possível fazer uma comparação entre as absorções medidas antes e após a aplicação dos produtos, que demonstra que todos os hidrofugantes reduzem a absorção capilar. Possivelmente, esse ensaio apresentaria reduções mais evidentes em substratos mais porosos como os cerâmicos.

6.2. Resultados dos ensaios com corpos de prova

Os ensaios com corpos de prova consistiram na verificação da resistência por meio do rompimento por compressão axial, na verificação da absorção por capilaridade com tubos de Karsten, na verificação da profundidade de penetração dos hidrofugantes por meio do rompimento por compressão diametral e na medição do ângulo de contato da água com as superfícies impregnadas.

6.2.1. Ensaio de resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial nos corpos de prova indicou um valor médio de 30,93 Mpa, os valores utilizados no cálculo constam no **APÊNDICE D**. Segundo Oliveira et al. (2017, p.211), a resistência característica do concreto especificado em documentos históricos do edifício Vilanova Artigas pode ser considerada, aproximadamente, 32 MPa. Assim, o resultado dos ensaios indica uma correspondência de classe de resistência, sugerindo que, observadas as diferenças entre materiais, idades e entre as superfícies, o efeito relativo do hidrofugante nos corpos de prova pode ser correlacionado ao efeito no concreto do edifício em análise comparativa.

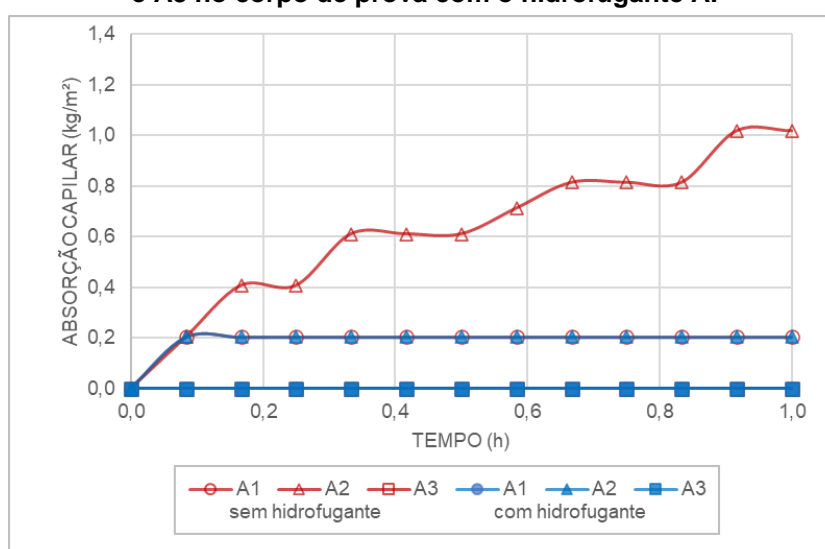
Convém ressaltar que em ensaios de resistência à compressão utilizando testemunhos das empenas noroeste, nordeste e de uma viga de cobertura, foram medidos valores médios de respectivamente 38,2MPa, 38MPa e 49,3MPa. É possível que a resistência do concreto tenha aumentado com o tempo, mas os resultados sugerem que não foi utilizada uma formulação de concreto baseada em uma única resistência característica (Oliveira et al., 2017, p.262).

6.2.2. Resultado da medição de absorção de água utilizando tubos de Karsten

A absorção dos ensaios com tubos de Karsten nos corpos de prova resultou muito menor do que a absorção observada nos ensaios realizados no pilar, de modo que em cada corpo de prova foram tomadas três medidas, e em muitas das medidas mesmo antes da aplicação dos hidrofugantes a absorção não foi mensurável. Não foi identificado um padrão de absorção entre os diferentes pontos medidos e entre antes e após a aplicação dos produtos e não foi possível fazer uma associação direta entre os resultados da absorção dos corpos de prova e do pilar, apenas a de que a redução da absorção dos corpos de prova foi menor do que a verificada no pilar. Entre as hipóteses para esses resultados estão o uso de fôrma metálica na moldagem - deixando a superfície mais lisa, regular e menos porosa - e até eventuais resíduos de desmoldante. Nos resultados em que foi possível comparar a absorção antes e após a aplicação dos produtos, como esperado, houve diminuição da absorção.

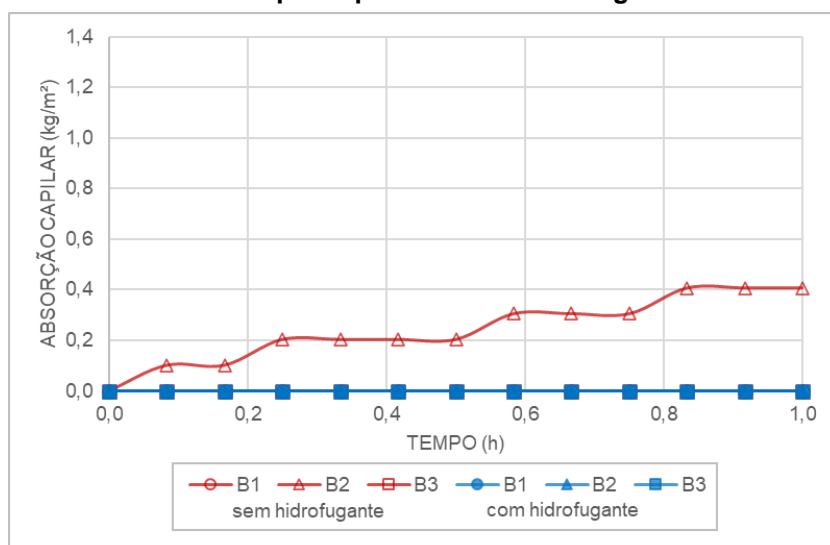
O **Gráfico 14** ao **Gráfico 17** apresentam a absorção do concreto em kg/m² em função do tempo em horas e ilustram os resultados de três medições realizadas na área de cada hidrofugante. O **Gráfico 18** apresenta as absorções totais nas 12 medidas antes e após a aplicação dos produtos. As tabelas com os levantamentos detalhados das medições com tubos de Karsten encontram-se no **APÊNDICE E**.

Gráfico 14 - Absorção em função do tempo para as três medições com tubo de Karsten A1, A2 e A3 no corpo de prova com o hidrofugante A.



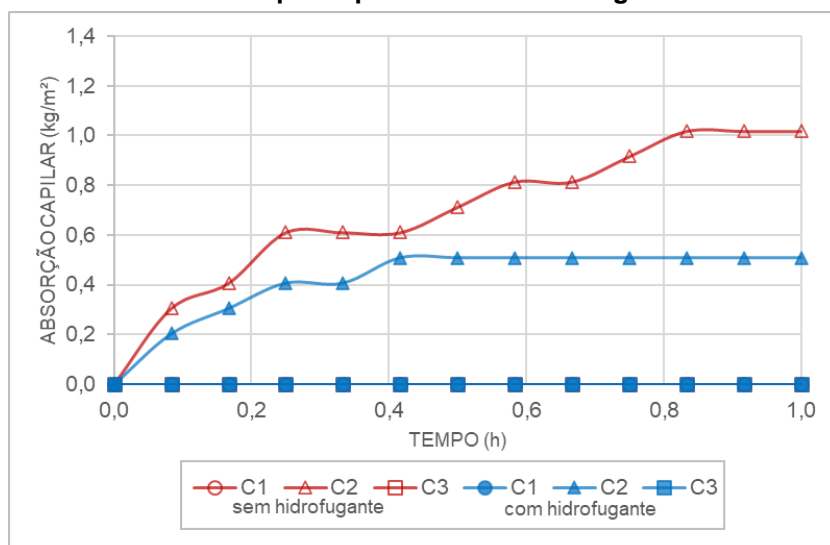
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Gráfico 15 - Absorção em função do tempo para as três medições com tubo de Karsten B1, B2 e B3 no corpo de prova com o hidrofugante B.



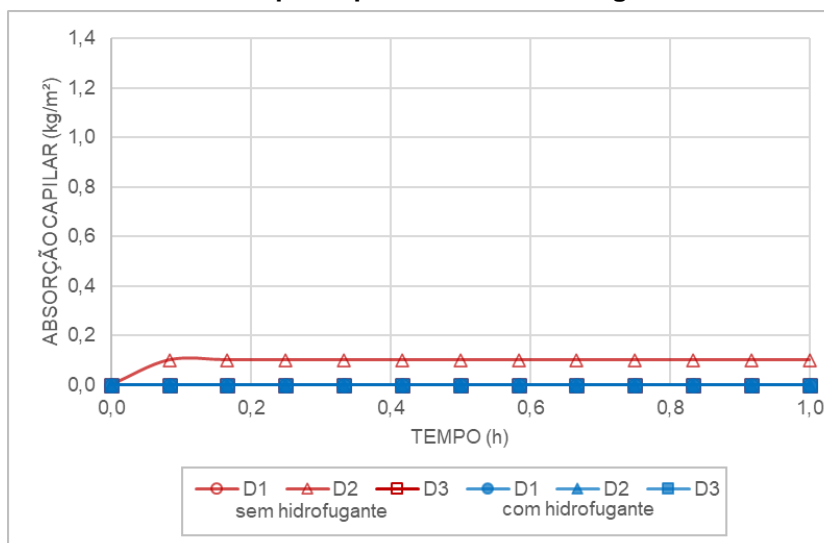
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Gráfico 16 - Absorção em função do tempo para as três medições com tubo de Karsten C1, C2 e C3 no corpo de prova com o hidrofugante C.



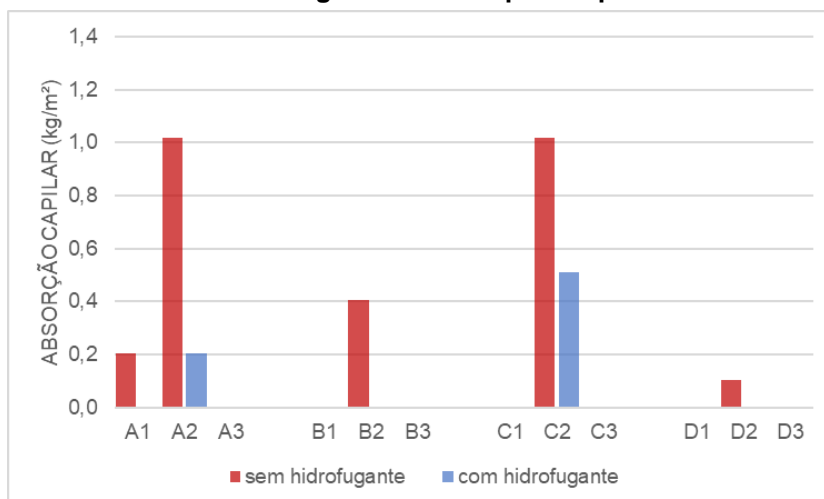
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Gráfico 17 - Absorção em função do tempo para as três medições com tubo de Karsten D1, D2 e D3 no corpo de prova com o hidrofugante D.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022)

Gráfico 18 - Absorção total ao final do ensaio com tubo de Karsten antes e após a aplicação dos hidrofugantes nos corpos de prova.



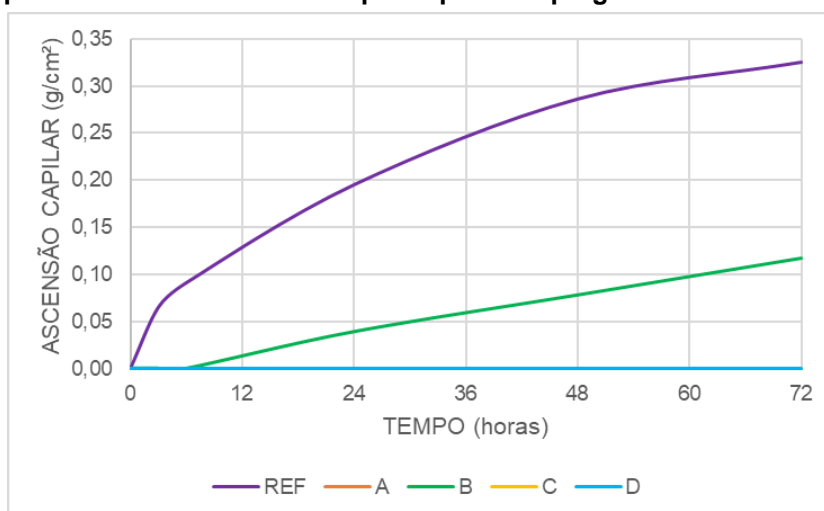
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Os resultados indicam que, nos ensaios em que foi identificada diferença de absorção antes e após a aplicação dos produtos, houve redução na absorção. As mesmas observações feitas para os ensaios com tubos de Karsten no pilar relativas à variabilidade dos resultados valem para os ensaios realizados nos corpos de prova. Segundo Bertolini et al. (2004), os valores obtidos em ensaios de absorção utilizando corpos de prova dependem de vários fatores, sendo o principal deles o grau de secagem ao qual as amostras foram previamente submetidas. Embora as condições de ensaio entre as amostras fossem as mesmas, a não-realização de secagem prévia em forno pode ter influenciado os resultados obtidos.

6.2.3. Resultado do ensaio de absorção por capilaridade segundo a norma ABNT NBR 9779:2012

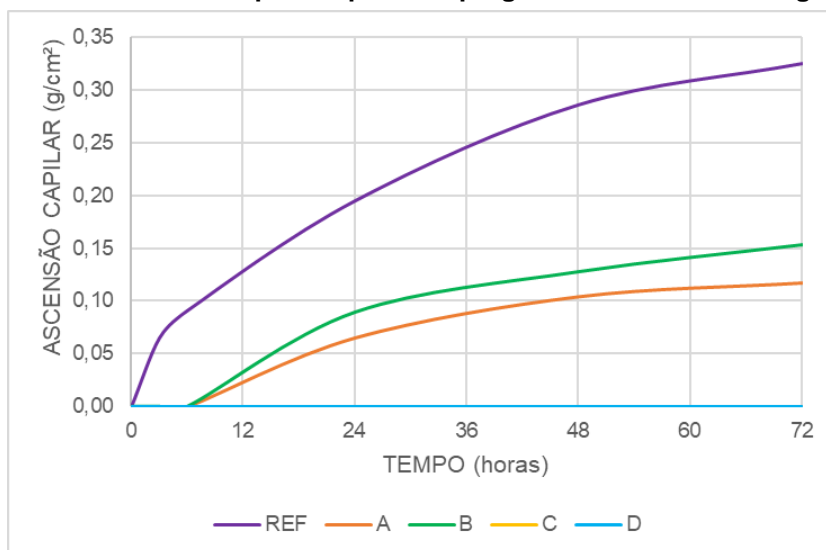
O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado três vezes utilizando corpos de prova impregnados com os hidrofugantes A, B, C e D e um corpo de prova de referência, sem hidrofugante. Em nenhum dos resultados houve absorção de água nos corpos de prova impregnados com os hidrofugantes C e D, em um dos resultados não houve absorção no corpo de prova impregnado com o hidrofugante A e houve menor absorção do hidrofugante B em relação ao corpo de prova de referência e em dois dos resultados houve absorção nos corpos de prova impregnados com os hidrofugantes A e B, também menor que a identificada no corpo de prova de referência. Esses resultados indicam a melhor capacidade de barrar a água dos hidrofugantes com alta concentração em silanos (C e D) em relação àqueles com menor teor de sólidos compostos por silanos e siloxanos (A e B). Os resultados estão ilustrados no **Gráfico 19** ao **Gráfico 22** e os levantamentos detalhados encontram-se no **APÊNDICE F**.

Gráfico 19 - Ensaio 1, ascensão de água por capilaridade. Absorção observada apenas no corpo de prova de referência e no corpo de prova impregnado com o hidrofugante B.



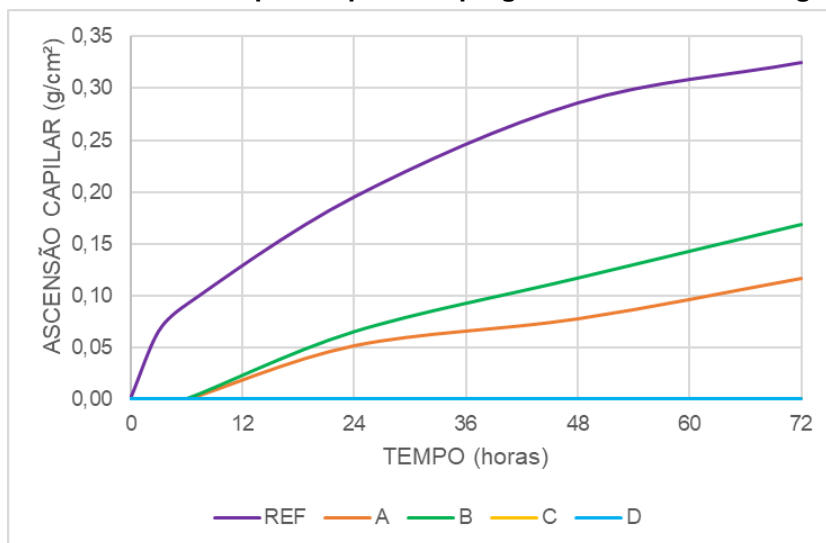
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Gráfico 20 - Ensaio 2, ascensão de água por capilaridade. Absorção observada no corpo de prova de referência e nos corpos de prova impregnados com os hidrofugantes A e B.



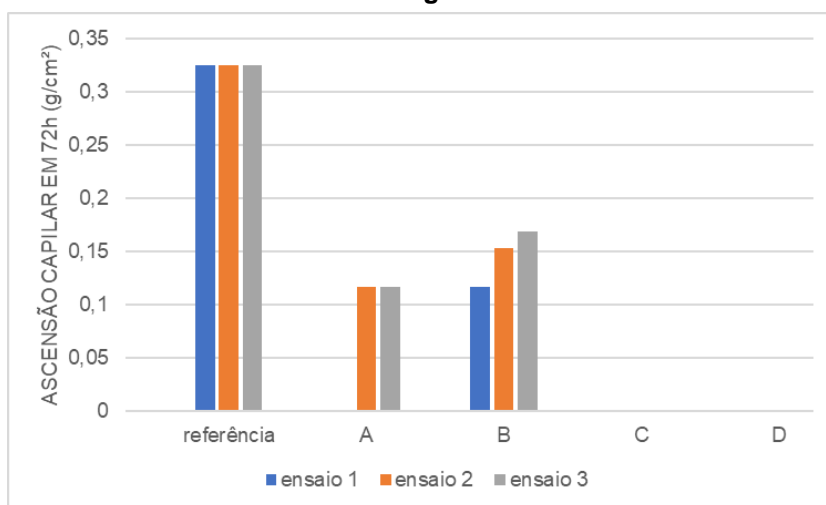
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Gráfico 21 - Ensaio 3, ascensão de água por capilaridade. Absorção observada no corpo de prova de referência e nos corpos de prova impregnados com os hidrofugantes A e B.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Gráfico 22 - Absorção capilar total na superfície de referência e nas superfícies com hidrofugantes.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

6.2.4. Resultado dos ensaios de penetração do hidrofugante no substrato

A avaliação da profundidade de penetração dos hidrofugantes no substrato foi realizada a partir da impregnação de três corpos de prova para cada produto e posterior rompimento por compressão diametral. Os resultados indicaram que praticamente não houve penetração visível nos corpos de prova impregnados com os hidrofugantes A e B (compostos por silanos e siloxanos), enquanto nos corpos de prova impregnados com os hidrofugantes C e D (com alta concentração de silanos) a penetração foi notável. No hidrofugante C, a máxima penetração observada foi de 6mm, e no hidrofugante D (creme) foi de 12mm.

Nota-se que nos corpos de prova em que a penetração foi perceptível (C e D), esta não apresenta um valor constante, variando ao longo das superfícies, de 0 até 6 ou 12 mm, e a presença de agregados parece ter uma influência direta nessa variação e na profundidade de penetração, uma vez que quando estão mais rentes à superfície a penetração do hidrofugante é menor – ou é “barrada”. Esse fator também pode estar associado às propriedades do que Kreijger (1984) denomina como “pele do concreto”, que é a sua camada mais externa. Para o autor, as propriedades e características físicas do concreto variam em camadas de acordo com a distância da superfície externa do material, e essa pele tem um papel determinante em sua durabilidade.

[...] a durabilidade não é como a força, uma propriedade do material, mas (com algumas exceções), em primeiro lugar, uma propriedade de superfície, determinada pela composição e pelas propriedades das camadas superficiais, indicadas pela palavra “pele”. O concreto de fato tem três peles, a pele de pasta de cimento (cerca de 0,1mm de espessura), a pele de argamassa (cerca de 5mm) e a pele de concreto (cerca de 30mm). Elas são resultantes do efeito de parede⁴³, da sedimentação e segregação como um resultado da gravidade, dos métodos de compactação como vibração e da permeabilidade e evaporação da água dentro e fora do concreto. A “pele” leva a variações nas relações cimento/agregado e quantidade de água e na porosidade nas camadas superficiais e então afeta a durabilidade [...] (Kreijger, 1984, p. 275, tradução nossa).

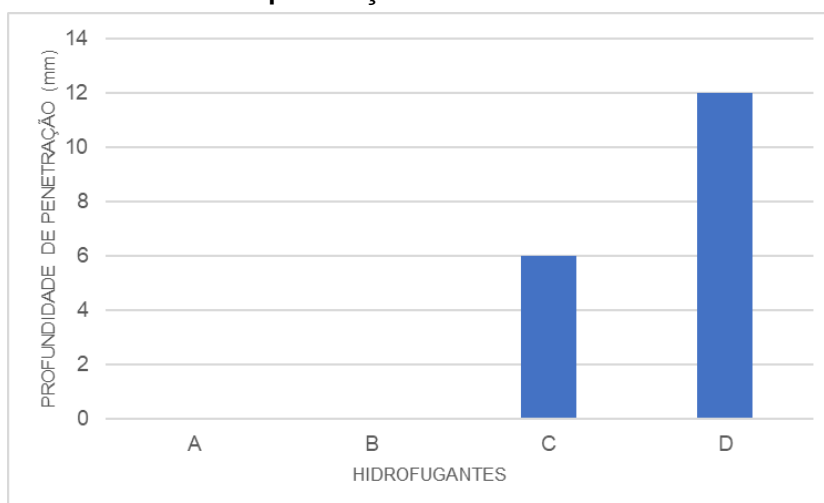
Assim, além de haver variação em propriedades como módulo de elasticidade, tensões de compressão e flexão, deformação, fluência e coeficiente de expansão térmica de acordo com a distância da camada avaliada à superfície, também variam

⁴³ O “efeito de parede” acontece quando o tamanho do agregado é grande em relação à forma e a compactação do concreto e a uniformidade da distribuição dos agregados são afetados pela parede da forma.

o tipo e tamanho de agregado, a relação agregado/cimento e a porosidade. Nas camadas mais superficiais, os agregados são menores, a relação agregado/cimento é menor, a porosidade e a quantidade de cimento são maiores, o que facilita a absorção do hidrofugante.

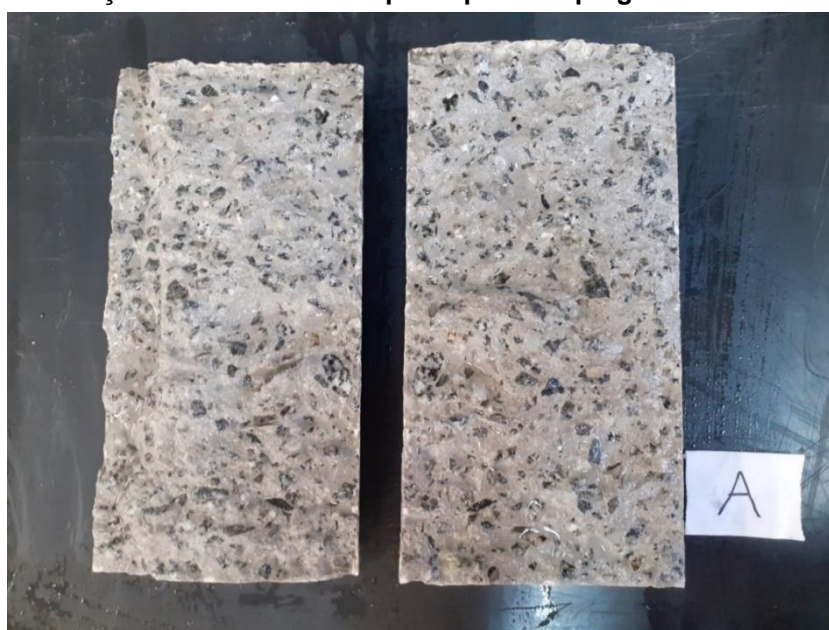
O **Gráfico 23** ilustra a profundidade de penetração máxima alcançada por cada hidrofugante. A **Figura 186** à **Figura 202** mostram imagens das seções transversais dos corpos de prova após o rompimento representativas de cada hidrofugante, em que é possível observar a penetração ou não do produto.

Gráfico 23 - Profundidade de penetração máxima observada em cada hidrofugante.



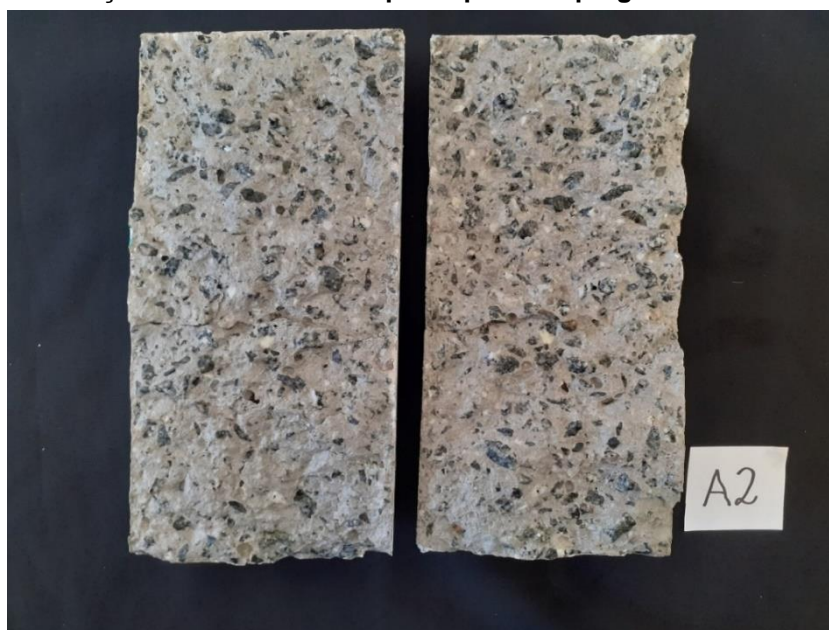
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 186 - 1ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante A.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 187 - 2ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante A.



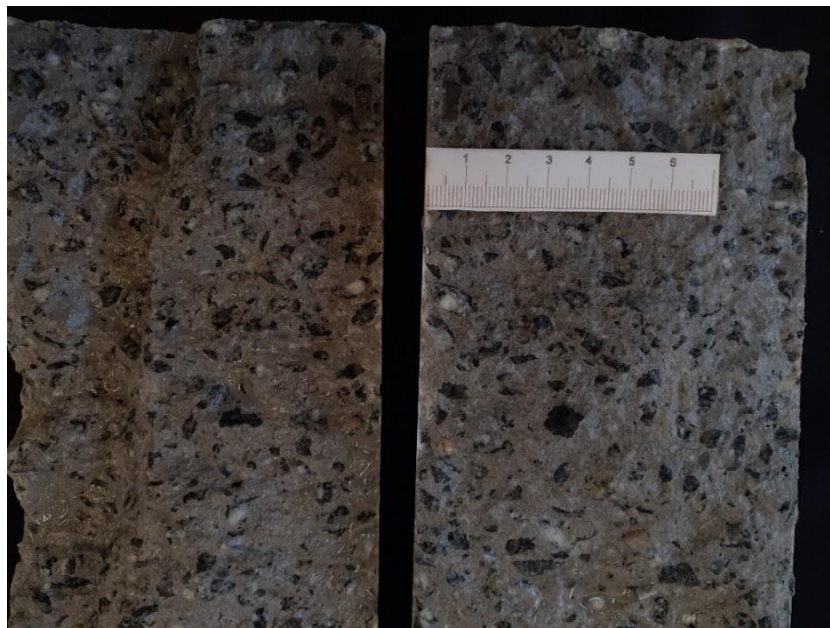
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 188 - 3ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante A.



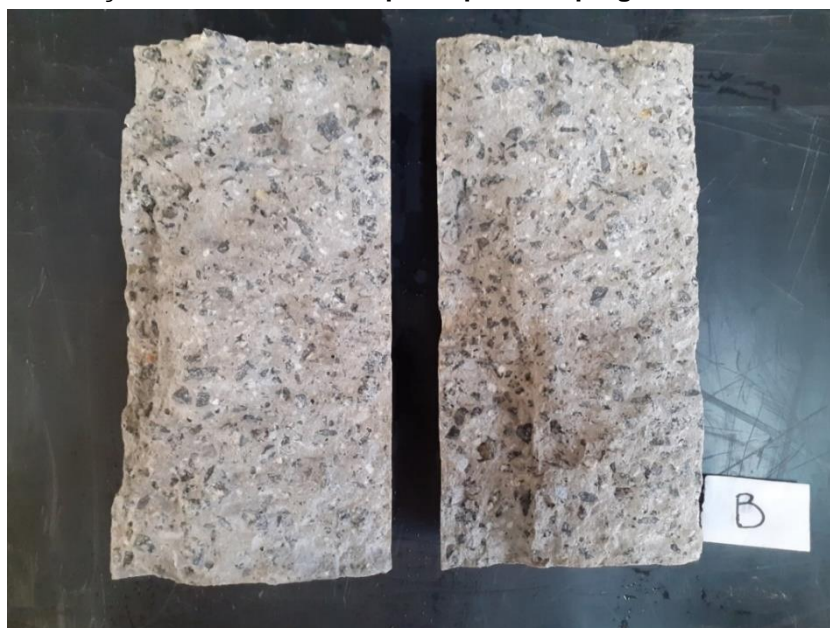
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 189 - Detalhe da borda do corpo de prova impregnado com hidrofugante A. Praticamente não houve penetração visível e em alguns trechos aparentemente de apenas um milímetro.



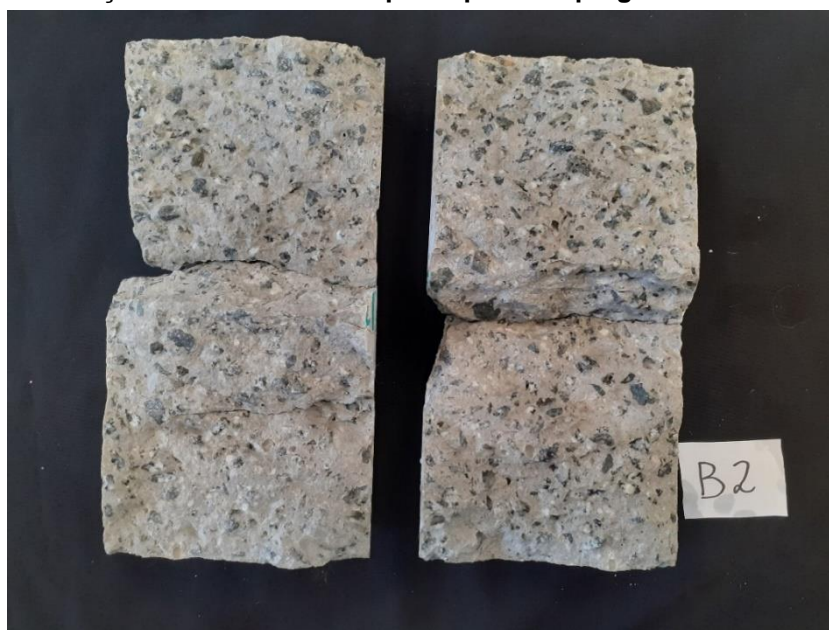
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 190 - 1ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante B.



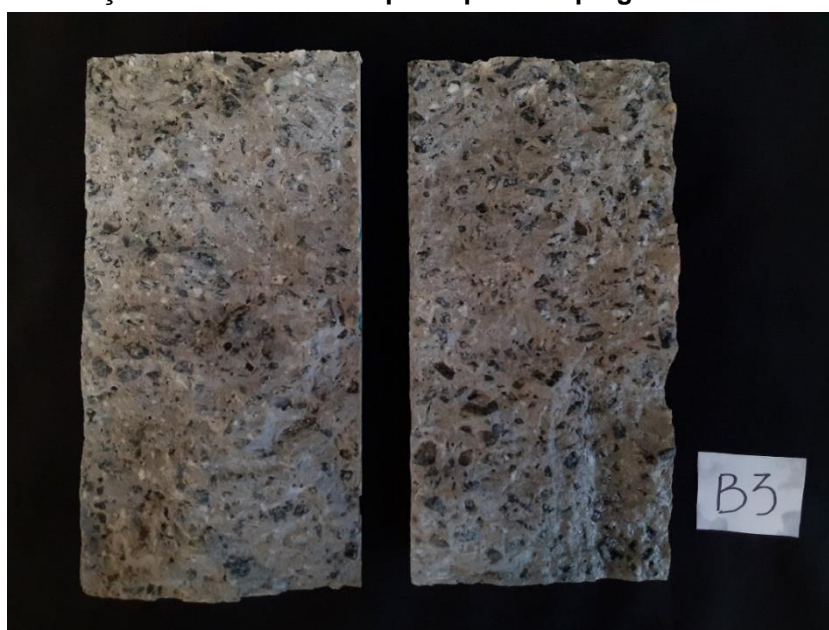
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 191 - 2ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante B.



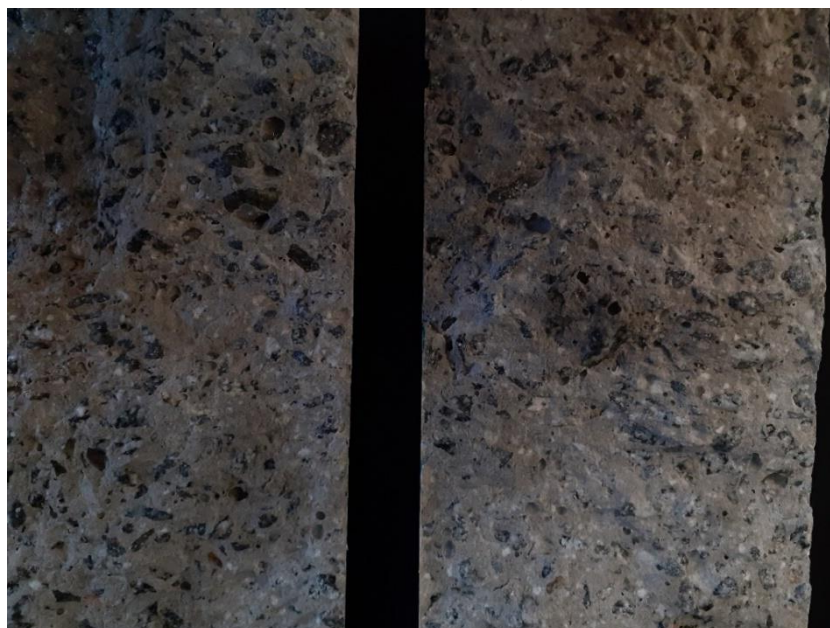
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 192 - 3ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante B.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 193 - Detalhe da borda do corpo de prova impregnado com hidrofugante B. Não foi observada penetração.



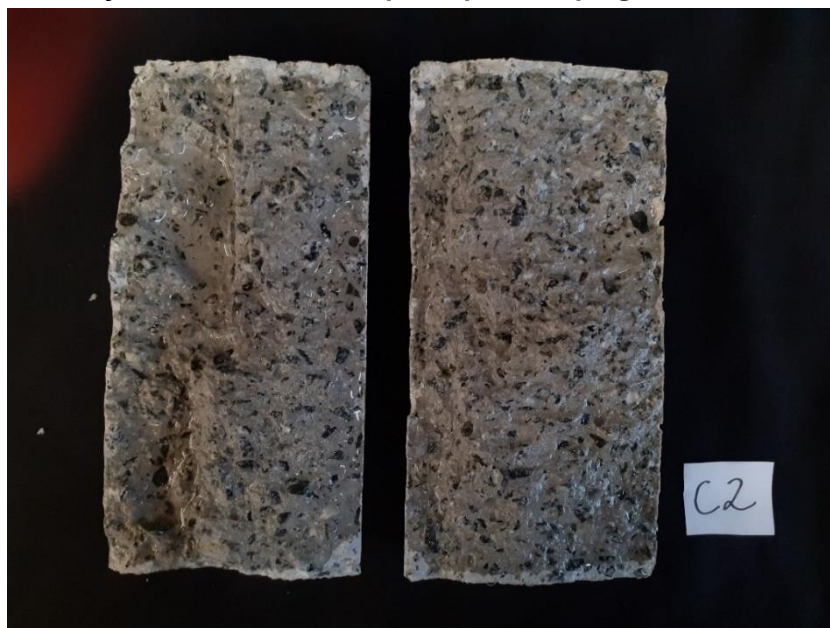
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 194 - 1ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante C.



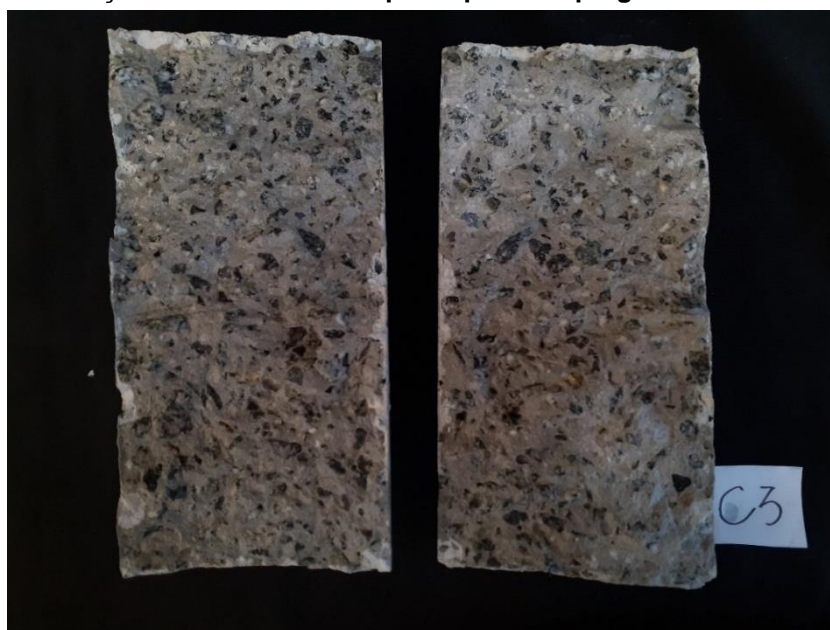
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 195 - 2ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante C.



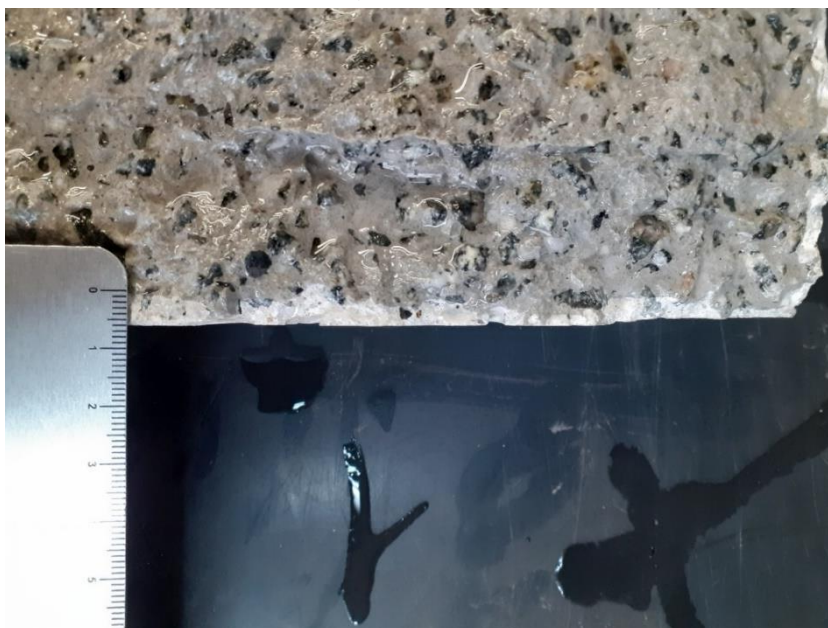
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 196 - 3ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante C.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 197 - Detalhe da borda do corpo de prova impregnado com hidrofugante C. A profundidade de penetração máxima observada foi de 6mm.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 198 - 1ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante D.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 199 - 2ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante D.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 200 - 3ª seção transversal de corpo de prova impregnado com hidrofugante D.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 201 - Detalhe da borda do corpo de prova impregnado com hidrofugante D. A profundidade de penetração máxima observada foi de 12mm.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 202 - Detalhe da borda do corpo de prova impregnado com hidrofugante D. A profundidade de penetração máxima observada foi de 12mm.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Os resultados estão de acordo com o que foi visto na bibliografia, uma vez que os produtos com maior concentração à base de silanos têm maiores profundidades de penetração devido a fatores como tamanho das moléculas e concentração dos produtos. O creme hidrofugante apresentou o maior valor. As profundidades de penetração identificada encontram-se acima dos valores recomendados na bibliografia consultada (em torno de 5mm).

6.2.5. Resultados das medições de ângulo de contato

Os resultados das medições dos ângulos de contato mostram que os maiores valores são referentes aos hidrofugantes A e B, compostos por silanos e siloxanos e ambos possivelmente com baixo teor de sólidos, e os ângulos medidos no corpo de prova de referência – sem hidrofugante – foram os menores observados, conforme mostra a **Tabela 15**. De acordo com a norma da ASTM D7334-08 (American Society for Testing and Materials, 2013), as superfícies dos hidrofugantes A e B podem ser consideradas hidrofóbicas ($\text{ângulo} > 90^\circ$) e as superfícies dos hidrofugantes C e D e a superfície de referência apresentam comportamento intermediário ($45^\circ < \text{ângulo} < 90^\circ$). Esse resultado parece refletir os resultados do tópico “efeito de superfície”, que apontou o menor molhamento e a formação de gotículas mais definidas nas superfícies impregnadas com os hidrofugantes A e B.

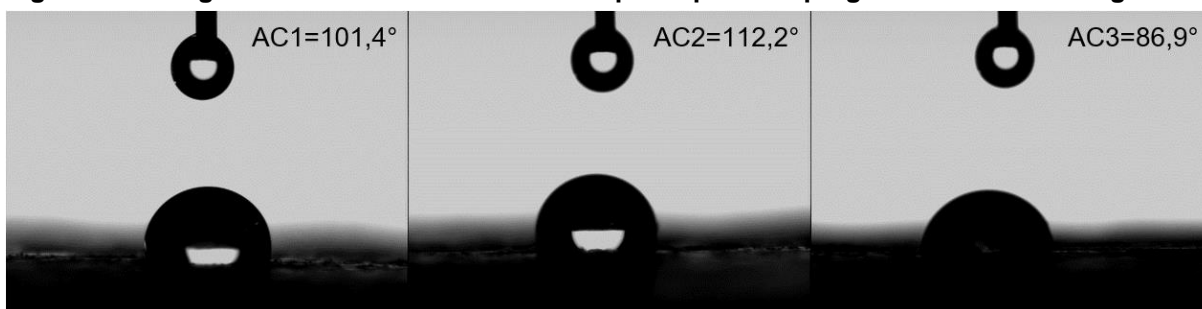
Tabela 15 - Ângulos medidos com o goniômetro.

Corpo de prova	AC1 (°)	AC2 (°)	AC3 (°)	Média (°)
A	101,4	112,2	86,9	100,17
B	108,6	114,1	104,1	108,93
C	79	78,9	65,4	74,43
D	64,7	82,8	85,6	77,70
Referência	67,1	50,5	62	59,87

Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

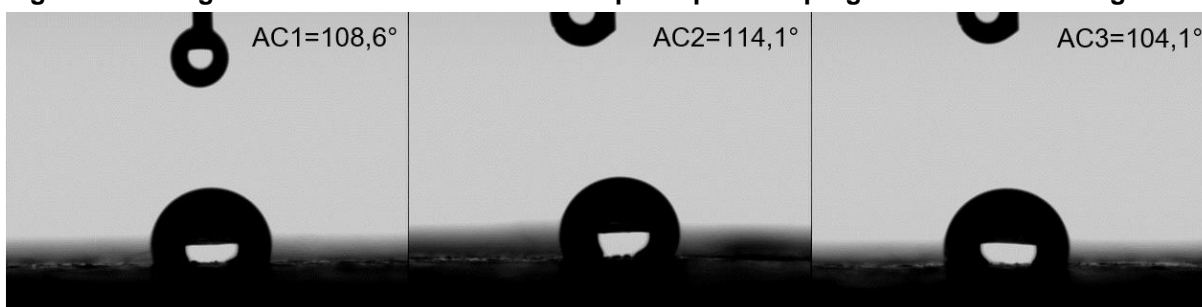
É possível que as diferenças observadas entre os resultados se devam às diferentes composições e concentrações dos hidrofugantes, sendo os hidrofugantes A e B compostos por silanos e siloxanos muito diluídos e os hidrofugantes C e D concentrados em silanos. Também há a possibilidade de que a superfície irregular dos corpos de prova tenha tido influência nas diferenças entre os resultados. Aspectos próprios do ensaio como o tempo levado para medir o ângulo de contato também podem ter interferido. Embora a deposição da gota seja automatizada, os ajustes de foco e da linha de base são feitos manualmente e isso toma alguns segundos antes da realização da medida do ângulo propriamente dita. É aconselhável que o tempo seja o mais próximo o possível entre todas as medições, que devem ser efetuadas rapidamente dentro do intervalo de 30 segundos recomendado na norma. A **Figura 203** à **Figura 207** ilustram as medições realizadas com o goniômetro.

Figura 203 - Ângulos de contato medidos no corpo de prova impregnado com o hidrofugante A.



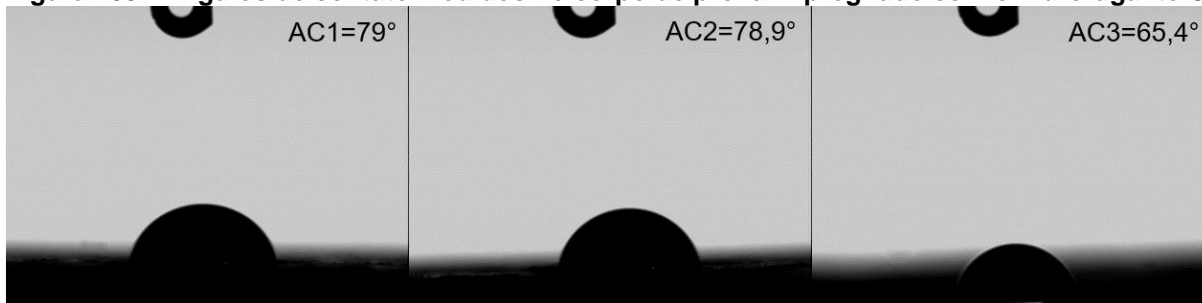
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 204 - Ângulos de contato medidos no corpo de prova impregnado com o hidrofugante B.



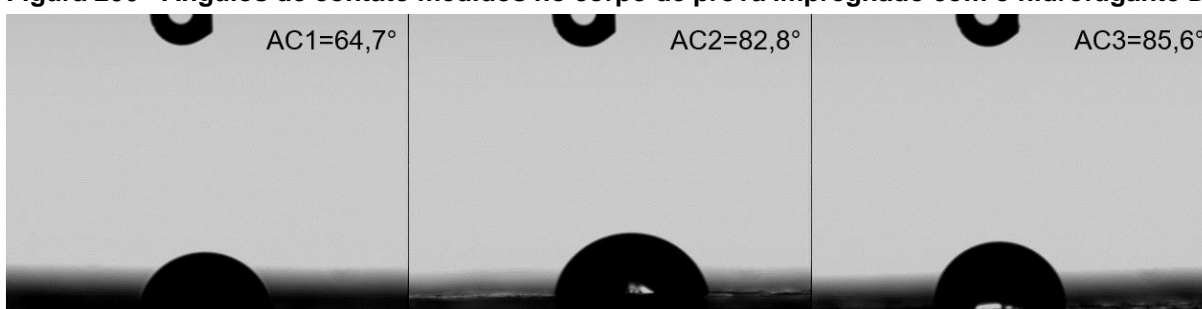
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 205 - Ângulos de contato medidos no corpo de prova impregnado com o hidrofugante C.



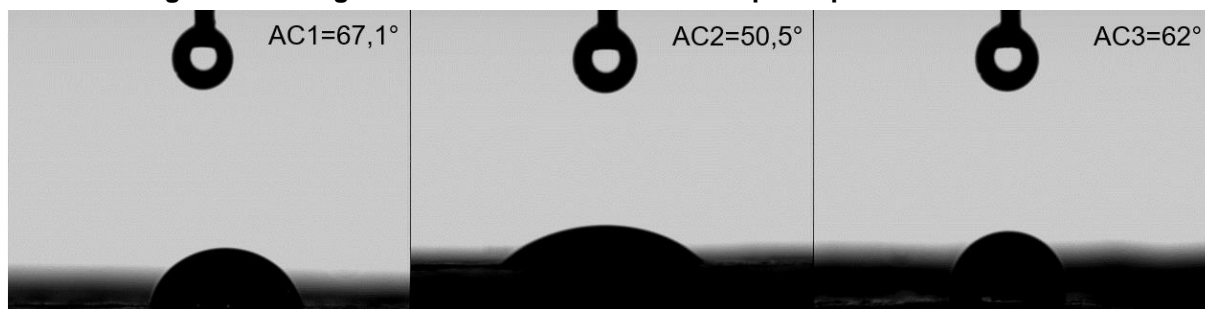
Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 206 - Ângulos de contato medidos no corpo de prova impregnado com o hidrofugante D.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Figura 207 - Ângulos de contato medidos no corpo de prova de referência.



Fonte: Vanessa de Moraes (2022).

Assim, os hidrofugantes com maior absorção de água e menores profundidades de penetração (praticamente nulas) apresentaram maior ângulo de contato, indicando novamente que não necessariamente altos valores de ângulo de contato indicam menores absorções, o que está alinhado com os resultados apresentados por Pavlov e Prostiakova (2010).

7. CONCLUSÕES

A preservação das empenas do edifício Vilanova Artigas é desafiadora devido não só às manifestações patológicas existentes, como fissuras, deslocamentos e corrosão das armaduras, mas também a características da superfície como biofilme e sujeira impregnada, à carbonatação do concreto e à heterogeneidade do material, que inclui as áreas com argamassa de reparo. A utilização de hidrofugantes foi identificada na literatura especializada como uma das práticas menos invasivas e mais efetivas para a proteção do patrimônio de concreto aparente, desde que produtos e técnicas de aplicação sejam corretamente especificados. Adicionalmente, como forma de prolongar a vida útil da edificação e reduzir custos de manutenção e reparos, o uso desses produtos é de grande relevância em um edifício público.

A pesquisa bibliográfica e o estudo de edifícios históricos produzidos em concreto armado aparente demonstraram que a forma de produção da edificação condiciona a sua durabilidade, bem como pode potencializar as manifestações patológicas às quais estará sujeita, o que pode ser observado na pouca espessura de cobertura das armaduras. Em se tratando de edifícios de concreto armado aparente construídos até meados do século XX, era comum o desconhecimento do comportamento do edifício a longo prazo. Por outro lado, nem sempre houve (e ainda não há) um consenso sobre a melhor forma de intervenção de recuperação desses edifícios.

Para que as intervenções não ocorram de forma subjetiva e discricionária, é importante que existam diretrizes claras quanto às práticas de recuperação. Nesse sentido, o tombamento é importante por preservar os valores estéticos, históricos, artísticos e a *história da técnica* da edificação. Entretanto, ao tombamento deve estar associado um plano de conservação definindo o que pode e o que não pode ser alterado, e de que forma essa alteração deve ocorrer, determinando assim o *limite tolerado* para a mudança. As últimas intervenções em edifícios em concreto armado aparente da arquitetura moderna têm demonstrado uma inclinação pela preservação das intenções originais dos projetistas. Assim, a falta de estudo e clareza quanto aos materiais e métodos empregados na recuperação dessas edificações pode levar a resultados insatisfatórios.

É importante que tanto os proprietários das edificações como as empresas de engenharia registrem detalhadamente em forma de texto e fotografias as intervenções

ocorridas, os métodos e produtos utilizados e suas características. Por meio do estudo da literatura estrangeira e da observação de estudos de caso, incluindo o deste trabalho, observou-se que a ausência ou insuficiência de informações sobre intervenções realizadas ao longo da história das edificações dificulta a tomada de decisões adequadas para sua manutenção e recuperação. Além disso, as pesquisas e estudos sobre o comportamento a longo prazo dos materiais empregados ainda são incipientes. O ideal seria que edificações em geral – e em especial as tombadas - tivessem não somente registros com os históricos das intervenções como também um manual de recomendações quanto à sua manutenção e conservação.

Como mostrado neste trabalho, há diferentes métodos e materiais utilizados para a proteção da superfície do concreto. No campo da conservação há consenso sobre a necessidade de minimizar o impacto visual dos tratamentos aplicados, no entanto, durante a pesquisa, notou-se a carência de estudos e registros que qualifiquem o resultado de tratamentos feitos no patrimônio de concreto aparente. Além disso, os registros fotográficos de parte significativa da arquitetura brutalista brasileira são escassos.

A utilização dos tubos de Karsten para a avaliação do desempenho dos hidrofugantes quanto à absorção capilar no pilar revelou diminuição da absorção de água nas superfícies impregnadas com os quatro produtos estudados. No entanto, ressalva-se que, embora consista em um método não-destrutivo, o ensaio é pouco preciso pois, apesar de ter sido executado sob condições de repetitividade, os resultados foram influenciados pela heterogeneidade da superfície do concreto e pelas diferenças físicas entre as áreas de medição, como maior ou menor porosidade, rugosidade superficial, peculiaridades do concreto etc. Outras características do ensaio que requerem habilidade, como a fixação do tubo e o preenchimento com água, podem acentuar a dispersão dos resultados. Ainda assim, o ensaio mostrou-se pertinente para uma avaliação comparativa antes e após a aplicação dos produtos.

Por meio da avaliação colorimétrica foi verificado que os hidrofugantes mantiveram inalterada a cor da superfície. Em uma avaliação visual, no entanto, há a percepção de um leve escurecimento da área em que foi aplicado o hidrofugante B, composto pela mistura de silanos e siloxanos. Uma possibilidade é que a presença de siloxanos seja a causa. O ensaio com colorímetro é influenciado pela heterogeneidade cromática da superfície do concreto, de modo que em um levantamento em uma

mesma superfície foram identificadas em mesma quantidade tonalidades bastante diferentes. Essa característica pode levar a equívocos na análise comparativa de resultados antes e após a aplicação dos produtos.

Os ensaios com tubo de Karsten nos corpos de prova resultaram em pouca ou nenhuma absorção, mostrando o concreto feito em laboratório absorve menos água se comparado ao concreto do pilar, já submetido ao desgaste por mais de 50 anos. O acabamento liso da fôrma metálica, a falta de secagem prévia dos corpos de prova ou mesmo a presença de resquícios de desmoldante após a limpeza também podem ter influenciado os resultados. No entanto, nos corpos de prova em que foi possível identificar alteração, houve redução da absorção após a aplicação do tratamento superficial.

Nos ensaios de absorção por capilaridade segundo a norma ABNT NBR 9779 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012), os hidrofugantes C e D, líquido e creme com alta concentração em silanos, respectivamente, tiveram melhor desempenho, de modo que em nenhum dos ensaios os corpos de prova impregnados com esses produtos apresentaram absorção. O hidrofugante B, composto pela mistura de silano e siloxano à base de água, apresentou absorção em todos os ensaios e o hidrofugante A composto por silano e siloxano em base solvente apresentou absorção em dois dos ensaios. As absorções observadas nos corpos de prova impregnados com os hidrofugantes A e B foram sempre menores que a observada no corpo de prova de referência.

As maiores profundidades de penetração nos corpos de prova foram observadas nos hidrofugantes à base de silano concentrados, C e D, de respectivamente 6mm e 12mm, embora os valores fossem variáveis ao longo das seções. Nos corpos de prova A e B não foi observada penetração mensurável dos produtos. A maior penetração do hidrofugante D, (creme) em relação ao hidrofugante C (líquido) pode estar associada ao fato de que o produto não escorre nas superfícies verticais, o que proporciona maior tempo de contato, menos perdas e maior absorção. Com uma aplicação em quantidade menor do que do hidrofugante C, o hidrofugante D -em creme - parece ter maior rendimento.

Na verificação dos ângulos de contato, os hidrofugantes A e B apresentaram os maiores valores, o que está de acordo com o que foi visto nas áreas desses hidrofugantes no pilar, que apresentaram o “efeito de superfície” / “efeito gota” /

“*beading effect*”. O hidrofugante B apresentou o maior valor médio de ângulo de contato. As superfícies com os hidrofugantes C e D, embora apresentassem valor médio de ângulo de contato maior que o verificado no corpo de prova de referência (sem hidrofugante), apresentaram ângulos de contato abaixo de 90°, e por esse critério e segundo a norma ASTM D7339-08 (American Society for Testing and Materials, 2013) não seriam consideradas hidrofóbicas.

Esse resultado entra em contradição com o fato de que as superfícies C e D não apresentaram absorção de água por capilaridade (além de terem os maiores valores de profundidade de penetração). Assim, não necessariamente maiores ângulos de contato ou a presença do “efeito gota” indicam o produto que oferece melhor proteção contra o ingresso de água. O ângulo de contato pode ser influenciado por fatores como tipo de molécula (silano ou siloxano), tamanho das moléculas, disposição das moléculas no substrato (mais próximas ou mais distantes da superfície), diluição do hidrofugante e características da superfície.

Diante dos resultados observados, os hidrofugantes concentrados em silano apresentaram melhor desempenho para o estudo de caso deste trabalho, uma vez que não alteram a cor da superfície, limitam a absorção de água e têm boa profundidade de penetração, que proporciona maior durabilidade, menores frequência e custo de manutenção. O creme hidrofugante aparentemente apresentou maior rendimento, maior possibilidade de controle da aplicação e menos perdas. Um aspecto importante a ser ressaltado é que o creme é a base de água, o que demonstra que é possível utilizar um produto que não libere Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs), não nocivo ao meio ambiente, e com alta eficiência.

Os resultados mostram que misturas muito diluídas de silano e siloxano - de uso muito comum no Brasil - apresentam menor proteção contra a absorção de água, se comparados a outros produtos à base de silanos e com maior concentração de ingrediente ativo. Além disso, por terem menor profundidade de penetração, os hidrofugantes à base da mistura de silanos e siloxanos - mesmo que tenham em um primeiro momento custos menores - apresentam menor durabilidade, o que pode resultar em maior frequência e custo de manutenção. Embora fatores ambientais também tenham influência na durabilidade dos sistemas de hidrofugação, a escolha correta do produto, considerando as características do substrato e a agressividade do meio, será determinante para o seu desempenho.

Quanto à escolha da composição dos produtos, entre silanos, siloxanos, ou misturas de ambos, não se pode dizer que um produto (tipo de molécula) é melhor que o outro, pois cada produto apresenta características específicas e adequadas para cada tipo de substrato e situação. Um produto pode ter bom desempenho em um tipo de substrato e ambiente segundo requisitos e critérios pré-definidos e a demanda do consumidor, mas pode ter características insatisfatórias em outras circunstâncias. Para algumas utilizações, o “efeito de superfície” / “efeito gota” verificado após a aplicação do produto não é suficiente para garantir sua eficiência. Neste estudo foi verificado que para atender a critérios de desempenho e durabilidade em estruturas de concreto armado aparente - típicas da arquitetura moderna - são mais adequados os produtos com alta concentração de silanos.

O contato dos consumidores com os fabricantes é fundamental para a correta aplicação dos hidrofugantes, pois nem sempre informações relativas aos produtos, quantidade adequada a ser aplicada ou forma de aplicação estão disponíveis ou claras nas fichas técnicas. Não há normatização brasileira padronizando as fichas técnicas, os procedimentos, as formas e quantificação da aplicação, considerando os diferentes tipos de produtos e substratos.

Assim, é possível encontrar fichas técnicas com muitas informações, como densidade, formas de aplicação, consumo, número de demãos, substância ativa, teor de sólidos, classes (profundidade de penetração e velocidade de secagem), e outras fichas técnicas sem o teor de sólidos e de substância ativa, apenas com algumas informações como densidade, número de demãos e recomendações genéricas sobre os tipos de substratos. Isso dificulta não só a avaliação, a escolha do hidrofugante e a comparação entre diferentes produtos, mas também sua correta aplicação.

A disponibilização de dados como teor de ativos, teor de sólidos, tipo de solvente, número de demãos de acordo com o substrato, forma de controle in loco da qualidade da aplicação e a necessidade ou não de reaplicação é importante tanto para consumidores (para que seja feita a correta escolha e aplicação dos produtos) quanto para pesquisadores, uma vez que a aproximação e as trocas entre empresas e a universidade pode ser um fator propulsor da criação e divulgação do conhecimento. A utilização de espaços, equipamentos e laboratórios disponíveis na universidade aliada à colaboração de empresas fabricantes de produtos hidrofugantes foi imprescindível para a realização deste trabalho.

7.1. Sugestões para a continuidade da pesquisa

Por fim, ao longo deste trabalho despontaram alguns temas que demandam maiores estudos e aprofundamentos, seja por sua complexidade, seja pela ausência de dados e pesquisas a eles relacionados. O estudo desses temas pode colaborar com o avanço do conhecimento relacionado à proteção superficial do concreto e aos sistemas de hidrofugação. Relaciona-se a seguir sugestões de temas para a continuidade desta pesquisa:

- Quando da pesquisa bibliográfica, foi perceptível a ausência de registros gráficos e fotográficos acerca do patrimônio da arquitetura brutalista paulista e brasileira, abrangendo não só informações históricas (documentação, registros das intervenções etc.) como dados sobre seu estado de conservação, de modo que esta é uma sugestão de pesquisa;
- Ainda é escassa a literatura nacional sobre os sistemas de proteção da superfície do concreto aparente, principalmente sobre produtos impregnantes que não formam película, a forma de controle da aplicação dos produtos e seu mecanismo de ação nas estruturas em serviço. É notável, por exemplo, a ausência de estudos sobre produtos bloqueadores de poros;
- Sugere-se a realização de estudos de absorção por capilaridade com tubo de Karsten que considerem a medição da umidade do substrato, de modo a verificar a influência dessa variável nos resultados;
- São necessários mais estudos sobre a relação entre o “efeito de superfície” ou “efeito gota” e a absorção de água e a limpeza da superfície;
- Com relação à durabilidade dos sistemas de hidrofugação, destaca-se a necessidade de estudos acerca do tema, pois foram poucas as referências encontradas na literatura quanto à durabilidade, manutenção e desempenho. É importante a realização de ensaios tanto de envelhecimento acelerado como de longa duração para subsidiar essas referências;
- Recomenda-se a realização de estudos sobre os mecanismos de atuação e impactos do vento e da chuva dirigida combinados em superfícies verticais de materiais porosos e sua relação com a absorção por capilaridade, com a avaliação de fatores como pressão e velocidade do vento, sendo recomendada inclusive a elaboração de uma norma sobre o tema. O desenvolvimento de

mecanismos avançados e práticos de medição da chuva dirigida em superfícies de edificações é uma possibilidade de pesquisa;

- É notável a indisponibilidade de tubos de Karsten graduados em velocidade de vento e a pouca variabilidade de modelos à venda. São necessários mais estudos sobre a correlação da coluna de água nos tubos com a chuva dirigida. Também se recomenda a elaboração de uma norma brasileira sobre a metodologia de medição com tubos de Karsten.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A-TECH masonry and brick sealer-water-based silane/siloxane water repellent, 21 out 2009. 1 vídeo (2min1s). Publicado pelo canal Applied Technologies LLC. Disponível em: <https://youtu.be/yurZZQzySIE>. Acesso em: 28 jan. 2023.
- AFLALO/GASPERINI ARQUITETOS. Tribunal de Contas do Município de São Paulo. [20--?]. 1 fotografia. Disponível em: <https://aflalogasperini.com.br/project/tribunal-de-contas-do-municipio-de-sao-paulo/>. Acesso em: 28 jan. 2023.
- ALVES, R. **A Alegria de ensinar**. 3ª edição. São Paulo: ARS Poética editora Ltda, 1994. Disponível em: http://www.virtual.ufc.br/CursoUCA/modulo_3/6994779-Rubem-Alves-A-Alegria-de-Ensinar.pdf. Acesso em 1 jan. 2024.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 546.3R-14**: Guide to materials selection for concrete repair. Farmington Hills, MI, USA: ACI, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1585-20**: Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes. West Conshohocken, PA, USA: ASTM:2020
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7334-08**: Standard practice for surface wettability of coatings, substrates, and pigments by advancing contact angle measurement. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6489-99**: Standard test method for determining the water absorption of hardened concrete treated with a water repellent coating. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2020b.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **ASCE 7-02**: Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. Reston, Virginia: ASCE, 2003. Disponível em: <https://www.asce.org/publications-and-news/asce-7>. Acesso em: 4 fev. 2023.
- APPS, C. A. C. P. **Avaliação da variabilidade da técnica de ensaio do tubo de Karsten na medição da permeabilidade à água líquida em revestimentos de ladrilhos cerâmicos e argamassas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/cursos/mec/dissertacao/2353642368244>. Acesso em: 26 jan. 2023.
- ARKLES, B. Tailoring surfaces with silanes. **CHEMTECH**, Washington, D. C., USA, v. 7(12), p. 766-778, dez. 1977. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/276848189_Tailoring_Surfaces_with_Silanes. Acesso em: 26 jan. 2023.

- ARKLES, B. Silanes: silicon hydrides. In: OTHMER, K. **Encyclopedia of Chemical Technology**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 1997. v. 22, p. 38-69. ISBN 0-471-52691-6. Disponível em: https://www.gelest.com/wp-content/uploads/Silicon_Hydrides.pdf. Acesso em: 26 jan. 2023.
- ARKLES, B. Hydrophobicity, hydrophilicity, and silanes. **Paint and Coatings Industry**, Troy, MI, USA, out. 2006, v. 22 (10), p.114-135. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/272494216_Hydrophobicity_Hydrophilicity_and_Silanes. Acesso em: 26 jan. 2023.
- ARKLES, B.; PAN, Y.; KIM, Y.M. The Role of Polarity in the Structure of Silanes Employed in Surface Modification. In: MITTAL, K. L. (ed) **Silanes and Other Coupling Agents**. 1. Ed. London: CRC Press, 2009, v. 5; p. 51–65. DOI: <https://doi.org/10.1201/b12244>. Disponível em: https://www.gelest.com/wp-content/uploads/technical_library/Roleofpolarity.pdf. Acesso em: 14 mai. 2023.
- ARRUDA, F. Igreja da Pampulha. 23 jul. 2009. 1 fotografia. Disponível em: <https://flic.kr/p/87pXkP>. Acesso em: 28 jan. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NB1**: Cálculo e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro: ABNT, 1960. Disponível em: https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2018/04/ABNTNB1_1960.pdf. Acesso em: 5 ago. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto – ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- BAROGHEL-BOUNY, Véronique. Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials. Part II|: Essential tool for assessment of transport properties and for durability prediction. **Cement and Concrete Research**, v.37, 2007, p;438-454.
- BASHEER, L.; CLELAND, D. J. Durability and water absorption properties of surface treated concretes. **Materials and Structures**, [S. l.], v.44 (5), p.957-967, jun. 2011. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-010-9679-4>. Acesso em: 26 jan. 2023.

- BASHEER, P. A. M.; BASHEER, L.; CLELAND, D. J.; LONG, A. E. Surface treatments for concrete: assessment methods and reported performance. **Construction and Building Materials**, Great Britain, v. 11, p. 413-429, 1997. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061897000196>. Acesso em: 26 jan. 2023.
- BAROSSO, A. C.; OLIVEIRA, C. T. de A.; VERGILI, R.; PALMEIRA, E. The roof: constructive systems and their conservation. In: PINHEIRO, M. L. B. (Org.). **Subsidies for a Conservation Management Plan Vilanova Artigas Building (School of Architecture and Urbanism of the University of São Paulo – FAUUSP) - Final Report, Keeping it Modern Program**. Los Angeles: The Getty Foundation, 2017. p. 123 - 200. Disponível em: https://www.getty.edu/foundation/initiatives/current/keeping_it_modern/report_library/vilanova_artigas.html?q=. Acesso em: 23 jan. 2023.
- BARDINI, J. T. A simple gesture. 3 mai. 2016. 1 fotografia. Disponível em: <https://flic.kr/p/Se4htk>. Acesso em: 31 jan. 2023.
- BERTOLINI, L.; ELSENER, B.; PEDEFERRI, P.; POLDER, R. **Corrosion of steel in concrete**: prevention, diagnosis, repair. Weinheim: Wiley-VCH, 2004. 392 p. ISBN 3-527-30800-8.
- BLOCKEN, B.; ABUKU, M.; ROELS, S.; CARMELIET, J. Wind-driven rain on building facades: some perspectives. In: EACWE 5. European African Conference on Wind Engineering, 5., 2009, Florence, Italy. **Proceedings [...]**. Florence, Italy: International Association for Wind Engineering (IAWE), 2009. Disponível em: <http://iawe.org/Proceedings/5EACWE/028.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2023.
- BOFELDT, M.; NYMAN, B. Penetration depth of hydrophobic impregnating agents for concrete. In: HYDROPHOBE III - 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON SURFACE TECHNOLOGY WITH WATER REPELLENT AGENTS, 3., 2001, Universität Hannover, Germany. **Proceedings [...]**. Freiburg: Aedificatio Publishers, 2001. p. 133-142. Disponível em: http://www.hydrophobe.org/pdf/hannover/III_10.pdf. Acesso em: 26 jan. 2023.
- BUCHNER, L. N.; PEPI, R. M. Restoration of the cast-in-place concrete at the New York Hall of Science. **APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology**, Toronto, ON, Canada, v. 46, n. 2/3, p. 54-63, 2015. Association for Preservation Technology International (APT). Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/43556453>. Acesso em: 26 jan. 2023.
- BUILDINGSCIENCE. Capillary rise in pores. 2021. 1 fotografia. Disponível em: <https://buildingscience.com/documents/building-science-insights-newsletters/bsi-123-capillarity-sucks>. Acesso em: 1 fev. 2023.
- CAI, W. Durability enhancement for cementitious materials through waterproofing by organosilicon chemistry. **ZKG Cement Lime Gypsum**, Gütersloh, Germany, n.9, 2020. Disponível em: <https://www.wacker.com/h/medias/7865-EN.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2023.

- CASTRO, C. S. S. M. **Para além das aparências: contribuição ao estudo da conservação de superfícies arquitetônicas de concreto aparente**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-19102018-164326/pt-br.php>. Acesso em: 26 jan. 2023.
- CASTRO, C. S. S. M.; GONÇALVES, A. P. A.; CAMPIOTTO, R. C.; VERGILLI, R. A. C.; OLIVEIRA, C. T. A.; PINHEIRO, M. L. B. Edifício Vilanova Artigas: obra de intervenção em patrimônio moderno. *In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO: PATRIMÔNIO, SUAS MATÉRIAS E IMATÉRIAS*, 2 e 3 nov. 2016, Lisboa. **Atas** [...]. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2016, p. 1-20. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/310803229_Edificio_Vilanova_Artigas_obra_de_intervencao_em_patrimonio_moderno_Edificio_Vilanova_Artigas_intervention_in_the_modern_heritage. Acesso em: 26 jan. 2023.
- CASTRO, C. S. S. M.; OLIVEIRA, C. T. A. Avaliação colorimétrica e perceptual na conservação de superfícies de concreto aparente histórico. *In: ARQUIMEMÓRIA: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO EDIFICADO*, 5., 2017, Salvador, Bahia. **Anais** [...]. Salvador: IAB – BA, 2017. v. 1. p. 1-21. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/342162854_AVALIACAO_COLORIMETRICA_E_PERCEPTUAL_NA_CONSERVACAO_DE_SUPERFICIES_DE_CONCRETO_APARENTE_HISTORICO_EVALUACION_COLORIMETRICA_Y_PERCEPTUAL_EN_LA_CONSERVACION_DE_SUPERFICIES_DE_CONCRETO_APARENTE_HISTORICO. Acesso em: 26 jan. 2023.
- CECCO JR, A. Vestiários do São Paulo Futebol Clube. [20--?]. 1 fotografia. Disponível em: <http://www.arquiteturabrutalista.com.br/fichas-tecnicas/DW%201961-55/1961-55-fichatecnica.htm>. Acesso em: 28 jan. 2023.
- CÉSAR, E. Palácio do Itamaraty. [2017?]. Disponível em: <https://casavogue.globo.com/Arquitetura/Edificios/noticia/2017/01/um-tour-arquitetonico-pelo-palacio-do-itamaraty.html>. Acesso em: 28 jan. 2023.
- CHAROLA, E. Water-repellent treatments for building stones: a practical overview. **APT Bulletin: The Journal of Preservation of Technology**, Toronto, ON, Canada, v. 26, n. 2/3, p. 10-17, 1995. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1504480?origin=crossref>. Acesso em 26 já. 2023.
- CHAROLA, A. E. Water repellents and other protective treatments: A critical review. *In: HYDROPHOBE III - 3d INTERNATIONAL CONFERENCE ON SURFACE TECHNOLOGY WITH WATER REPELLENT AGENTS*, 3., 25 e 26 set. 2001, Universität Hannover, Germany. **Proceedings** [...]. Freiburg: Aedificatio Publishers, 2001, p. 3-20. Disponível em: http://hydrophobe.org/pdf/hannover/III_01.pdf. Acesso em: 26 jan. 2023.
- CHAVES, M. J. R. **Procedimentos de produção, proteção e manutenção de estruturas de concreto aparente**. 2016. Dissertação (Mestrado em

Habitação: Planejamento e Tecnologia) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), São Paulo, 2016. Disponível em: <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2017/08/DISSERTACA%CC%83O-DE-MESTRADO-MILTON.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2023.

CHRISTODOULOU, C.; GOODIER, C. I.; AUSTIN, S. A.; WEBB, J. R.; GLASS, G. K. Long-term performance of silanes applied on reinforced concrete bridges. *In: HYDROPHOBE VIII - 8th INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER REPELLENT TREATMENT AND PROTECTIVE SURFACE TECHNOLOGY FOR BUILDING MATERIALS*, 8., 2017, Hong Kong, China. **Proceedings** [...]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2017. Disponível em: <http://www.hydrophobe.org/pdf/hongkong/A-1-5.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2023.

CLAISSE, P. A. **Transport properties of concrete: measurement and applications**. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: number 53. Cambridge: Woodhead Publishing [Imprint of Elsevier]. 286 p. 2014.

CONSERVING concrete, virtual roundtable. Participantes: Barnabas Calder, Claudia Devaux, Paul Gaudette, Rosa Lowinger, Susan MacDonald e Ana Paula Arato Gonçalves. Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2 dez. 2020. 1 vídeo (1h:28min:42s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=pAltU49c708>. Acesso em: 26 jan. 2023.

COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **NP EN 1504-2**: Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão. Definição, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade - Parte 2: Sistemas de proteção superficial do betão. Portugal: Instituto Português de Qualidade (IPQ), 2008.

CONTIER, F. A. O edifício da FAU-USP e os materiais do brutalismo. *In: X SEMINÁRIO DO COMOMO BRASIL – ARQUITETURA MODERNA E INTERNACIONAL: CONEXÕES BRUTALISTAS 1955-75*, 10., 2013. **Anais** [...]. Curitiba: PUC-PR, 2013. Disponível em: https://docomomobrasil.com/wp-content/uploads/2016/08/OBR_37.pdf. Acesso em: 26 jan. 2023.

CONSERVA FAU. [Sem Título]. 2017. 1 fotografia. Disponível em: <https://www.facebook.com/conservafau/photos/a.1692330870811684/2013152395396195/>. Acesso em: 28 jan. 2023.

DE PAULA, E. “Cristo Redentor, braços abertos sobre a Guanabara”, eternizou mestre Tom Jobim. 1 fotografia. Disponível em: <https://prefeitura.rio/cidade/fotogaleria-a-maravilha-do-cristo-redentor-sob-angulos-diferentes/>. [2021?]. Acesso em: 29 jan. 2023.

DE VRIES, I. J.; POLDER, D. R. B. Hydrophobic treatment of concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v.11, n.4, p.259-265, jun. 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00046-9](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00046-9). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061897000469>. Acesso em: 27 jan. 2023.

- DI MUNDO, R.; LABIANCA, C.; CARBONE, G.; NOTARNICOLA, M. Recent advances in hydrophobic and icephobic surface treatments of concrete. **Coatings**, [S. l.], v. 10, ed. 5, p. 449, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings10050449>. Acesso em: 26 jan. 2023.
- DOUGLAS-JONES, R.; HUGHES, J.; JONES, S.; YARROW, T. 2016. Science, value, and material decay in the conservation of historic environments. **Journal of Cultural Heritage**, [S. l.], v. 21, p. 823-833, 2016 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.03.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207416300346?via%3Dihub>. Acesso em: 26 jan. 2023.
- DOW CORNING. **A guide to silane solutions**. [S. l.: s. n.], 2005. Disponível em: https://www.academia.edu/4856411/Combining_Guide_to_Silane_Solutions_3_Dow_Corning_The_Silane_Technology_Pioneer_The_Concept_of_Coupling_with_Organofunctional_Silanes?source=swp_share. Acesso em: 16 jan. 2023.
- DRANSFIELD, J. Admixtures for concrete, mortar and grout. In: NEWMAN, J.; CHOO, B. S (ed.). **Advanced concrete technology: constituent materials**. Reino Unido: Butterworth-Heinemman, 2003, p. 4/3-4/36. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/Advanced_Concrete_Technology_Set/CL4G4fPDHGkC?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=Capillary+Absorption+Pore+diameter+concrete&pg=SA4-PA25&printsec=frontcover. Acesso em: 1 fev. 2023.
- DRANSFIELD, J. Admixtures for concrete, mortar and grout. In: NEWMAN, J.; CHOO, B. S (ed.). **Advanced concrete technology: constituent materials**. Reino Unido: Butterworth-Heinemman, 2003, p. 4/3-4/36. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/Advanced_Concrete_Technology_Set/CL4G4fPDHGkC?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=Capillary+Absorption+Pore+diameter+concrete&pg=SA4-PA25&printsec=frontcover. Acesso em: 1 fev. 2023.
- EDWARDHBLAKE. Sydney Opera House. 4 out. 2022. 1 fotografia. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/eblake/52405918936/>. Acesso em: 22 nov. 2023.
- ENSIKAT, H. J.; DITSCHKE-KURU, P.; NEINHUIS, C.; BARTHLOTT, W. Superhydrophobicity in perfection: the outstanding properties of the lotus leaf. **Beilstein Journal of Nanotechnology**, Germany, v. 2, p.152-161, 2011. DOI: <http://doi.org/10.3762/bjnano.2.19>. Disponível em: <https://www.beilstein-journals.org/bjnano/articles/2/19>. Acesso em: 26 jan. 2023.
- ESCALA DE BEAUFORT. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2020. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Escala_de_Beaufort&oldid=59323492. Acesso em: 11 set. 2023.
- ESTEVEES, C. D. C. **O Comportamento de hidrófugos de superfície em revestimentos exteriores**. 2014. 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2014. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/cursos/mec/dissertacao/283828618788886>. Acesso em: 26 jan. 2023.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14630**: Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method. Brussels: CEN, 2006.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 16309**: Conservation of cultural heritage – test methods- measurement of water absorption by pipe method. Brussels: CEN, 2013.

FLASSIG, R. Stockhammer. 1 jul. 2007. 1 fotografia. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stockhammer.JPG>. Acesso em: 28 jan. 2023.

FELTRE, R. **Química**. 6. ed. São Paulo: Moderna, 2004. (Química orgânica, v.3).

GALE, F. **Tech note 103: Measurement of water absorption under low pressure, Rilem Test Method - Test no. 11.4**. Lawrence, USA: Prosoco, 2020. Disponível em: <https://prosoco.com/app/uploads/2021/06/Tech-Note-103-Measurement-of-Water-Absorption-Under-Low-Pressure.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2023.

GAUDETTE, P. E.; HUNDERMAN, H. J. Repair of Mies Van Der Rohe's Promontory: a multiphased approach to facade restoration. **APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology**, Toronto, ON, Canada, v. 28, ed. 4, p. 45-50, 1997. DOI: <https://doi.org/10.2307/1504593>. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1504593?origin=crossref> . Acesso em: 26 jan. 2023.

GENNES, P. G.; BROCHARD-WYART, F.; QUÉRÉ, D. **Capillary and wetting phenomena**: drops, bubbles, pearls, waves. New York: Springer, 2004. VI, 292 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21656-0>. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-21656-0>. Acesso em: 31 jan. 2023.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Inauguração da Estação Oscar Freire. 4 abr. 2018. 1 fotografia. Disponível em: <https://flic.kr/p/24K3V5S>. Acesso em: 28 jan. 2023.

GROSSI, D.; LAMA, E. A. D. Avaliação da eficácia de hidrofugantes e antigraffiti no Arenito Itararé. **Revista do Instituto de Geociências - USP**, São Paulo, v.18, n. 4, p. 43-55, dez. 2018. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-144298>. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/guspssc/article/view/144298/148992>. Acesso em: 26 jan. 2023.

- GROSSI, D., LAMA, E. A. D. Inhibition of swelling clays and consolidation of Itararé Sandstone using diaminoalkanes (DAA) and ethyl silicate (TEOS). **Brazilian Journal of Geology**, São Paulo, v. 52, n.3. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-4889202220210061>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjgeo/a/nx5GwLz3QskDLrXfJMy4jWR/?lang=en>. Acesso em: 26 jan. 2023.
- HAGER, R. The revolution in concrete protection impregnation with cream. *In: HYDROPHOBE II - 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER REPELLENT TREATMENT OF BUILDING MATERIALS*, 2., 1998, Zurich, Switzerland. **Proceedings** [...]. Zurich: Aedificatio Publishers, 1998. p. 205-216. Disponível em: http://hydrophobe.org/pdf/zurich/II_19.PDF. Acesso em: 26 jan. 2023.
- HANKWANG. Capillary flow brick. 23 jan. 2011. 1 fotografia. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Capillary_flow_brick.jpg. Acesso em: 31 jan. 2023.
- HEBBAR, R.S.; ISLOOR, A.M.; ISMAIL, A.F. **Contact angle measurement**. *In: ISMAIL, A.F.; MATSUURA, T.; OATLEY-RADCLIFFE, D (ed.). Membrane Characterization*. 1. ed. Amsterdam, Holland: Elsevier, 2017. cap. 12, p. 219-255. ISBN 9780444637765. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63776-5.00012-7>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444637765000127#section-cited-by>. Acesso em: 26 jan. 2023.
- HENDRICKX, R. Using the Karsten tube to estimate water transport parameters of porous building materials: The possibilities of analytical and numerical solutions. *Materials and Structures*, [S. l.], v.46, p.1309-1320, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9975-2>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-012-9975-2>. Acesso em: 5 fev. 2013.
- HOFFMANN, R. **Análise de regressão: uma introdução à econometria**. 5a. ed. Piracicaba: Edição do Autor, 2016. 393 p. DOI: <https://doi.org/10.11606/9788592105709>. Disponível em: <https://www.livrosabertos.sibi.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/73>. Acesso em: 27 jan. 2026.
- HOW to calculate wind load**. wikiHow, 25 mai. 2020. Disponível em: <https://www.wikihow.com/Calculate-Wind-Load>. Acesso em: 4 fev. 2023.
- INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY. **Compendium of chemical terminology**: Gold Book. Versão 2.3.3, [S. l.], 24 fev. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1351/goldbook>. Disponível em: <https://goldbook.iupac.org/>. Acesso em: 27 jan. 2026.
- JOHANSSON, A. **Impregnation of concrete structures: Transportation and fixation of moisture in water repellent treated concrete**. 2006. 68 p. Licentiate Thesis - Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI) and

School of Architecture and the Build Environment, Division of Structural Design and Bridges, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, 2006. Disponível em: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:10982/FULLTEXT01>. Acesso em: 27 jan. 2023.

JOHANSSON, A.; JANZ, M.; SILFWERBRAND, J.; TRÄGÄRDH, J. Penetration depth for water repellent agents in concrete as a function of humidity, porosity, and time. **Restoration of Buildings and Monuments**, [S. l.], vol. 13, n. 1, p.3-16, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1515/rbm-2007-6102>. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/rbm-2007-6102/html>. Acesso em: 27 jan. 2023.

JUNIOR, C. M. M. Influência da chuva dirigida e dos detalhes arquitetônicos na durabilidade de revestimentos de fachada. 2010. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/1356>. Acesso em: 20 fev. 2023.

KARAPANAGIOTIS, I.; CHATZIGRIGORIOU, A.; MANOUDIS, P. N. Chapter 10 - Waterborne superhydrophobic coatings for the conservation of the cultural heritage: a case study for the protection of mortar, ceramic and wood. *In*: ZARRAS, P.; SOUCEK, M. D.; TIWARI, A. (ed.). **Handbook of Waterborne Coatings**. [S. l.]: Elsevier, 2020. p. 229-247. ISBN 9780128142011. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814201-1.00010-X>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012814201100010X?via%3Dihub>. Acesso em: 17 jan. 2023.

KAZMIERCZAK, C. S. Proteções superficiais de estruturas de concreto. *In*: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. Ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 2, cap. 34, p.1211-1231. ISBN 978-85-98576-20-6.

KOK, P. MASP, São Paulo, SP. 21 nov. 2008. 1 fotografia. Disponível em: <https://flic.kr/p/5DrJGq>. Acesso em: 28 jan. 2023.

KOK, P. SESC Pompéia, São Paulo. 15 mar. 2009. 1 fotografia. Disponível em: <https://flic.kr/p/4UgMAS>. Acesso em: 28 jan. 2023.

KON, N. Casa no Butantã/ Paulo Mendes da Rocha e João Genaro. 2014. 1 fotografia. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/01-181073/classicos-da-arquitetura-casa-no-butanta-slash-paulo-mendes-da-rocha-e-joao-de-gennaro>. Acesso em: 28 jan. 2023.

KON, N. Vista da fachada principal do edifício Vilanova Artigas. 2010. 1 fotografia. Disponível em: <https://conservafau.wordpress.com/page/4/>. Acesso em: 28 jan. 2023.

KREIJGER, P. C. The skin of concrete: composition and properties. **Matériaux et Construction**, [S. l.], v. 17, p. 275–283, 1984. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02479083>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02479083>. Acesso em: 27 jan. 2023.

- KLEIS, C. Fuerstenlandbruecke St. Gallen 01 09.jpg. 15 ago. 2009. 1 fotografia. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fuerstenlandbruecke_St._Gallen_01_09.jpg. Acesso em: 27 jan. 2023.
- KÜHL, B. M.; OKSMAN, S.; CAMPIOTTO, R.; NADALUTTI, L. About the project “subsidies for a conservation management plan – Vilanova Artigas building”. In: PINHEIRO, M. L. B. (Org.). **Subsidies for a Conservation Management Plan Vilanova Artigas Building (School of Architecture and Urbanism of the University of São Paulo – FAUUSP) - Final Report, Keeping it Modern Program**. Los Angeles: The Getty Foundation, 2017. p. 123 - 200. Disponível em: https://www.getty.edu/foundation/initiatives/current/keeping_it_modern/report_library/vilanova_artigas.html?q=. Acesso em: 22 jan. 2023.
- KUS, H. **Long-term performance of water repellants on rendered autoclaved aerated concrete**. 2002. 46 p. Teshis (Doctorate) – Centre for Build Environment, University of Gävle, Gävle, Sweeden, 2002. Disponível em: <http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A9203&dswid=-5783>. Acesso em: 27 jan. 2023.
- LEROY MERLIN. Rolo de lâ roma 15cm anti-respingo 822-15. 2023a. 1 fotografia. Disponível em: https://www.leroymerlin.com.br/rolo-de-la-roma-15cm-anti-respingo-822-15_1567218053. Acesso em: 28 jan. 2023.
- LEROY MERLIN. Trincha pincel castor cerda preta 619 - 2”. 2023b. 1 fotografia. Disponível em: https://www.leroymerlin.com.br/trincha-para-pintura-2-cerdas-pretas-serie-619-castor_1566931746. Acesso em: 28 jan. 2023.
- LECOMTE, J. P.; LLADÓ, D.; SALVATI, S.; RODRIGUES, G.; RIBEIRO, M. Mortar protection: new silicone resin-based hydrophobic powder for the dry mix market. **European Coatings Journal**, [S. l.], v. 12, p. 88-91, 2013. Disponível em: <https://www.dow.com/content/dam/dcc/documents/en-us/tech-art/62/62-17/62-1778-01-hydrophobic-powder-for-the-dry-mix-market.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2022.
- LEUNG, K. P. Tsing Ma Bridge at day. 6 jun. 2011. 1 fotografia. Disponível em: <https://flic.kr/p/aNHjpX>. Acesso em: 29 jan. 2023.
- LITTLE, J.; FERRARO, C.; ARREGI, B. Assessing risks in insulation retrofits using hygrothermal software tools. Affiliation: historic environment Scotland, Scotland, report number: technical paper 15 affiliation: Historic Environment Scotland, Scotland, 2015. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2493.3844>. Disponível em: <https://arrow.tudublin.ie/bescharcrep/4/>, <https://www.historicenvironment.scot/archives-and-research/publications/publication/?publicationId=8a2a7b9d-e3b2-4c7d-8c17-a59400a8387b>. Acesso em: 18 fev. 2023.

- LUBELLI, B.; VAN HEES, R. P. J.; BOLHUIS, J. Effectiveness of methods against rising damp in buildings: results from the EMERISDA project. **Journal of Cultural Heritage**, [S. l.], 31S, S15-S22, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.025>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207418301122>. Acesso em: 4 fev. 2023.
- MACDONALD, S. 20th century heritage: recognition, protection and practical challenges. In: **ICOMOS WORLD REPORT 2002-2003 ON MONUMENTS AND SITES IN DANGER**, 2003, Paris. Thematic Reports: 20th Century Heritage. Paris: ICOMOS, 2003. p. 1-14 Disponível em: <https://journals.ub.uni-heidelberg.de/index.php/heritage/article/download/21220/14989>. Acesso em: 27 jan. 2023.
- MACDONALD, S.; GONÇALVES, A. P. A. **Conservation principles for concrete of cultural significance**. Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2020. ISBN 978-1-937433-80-2. Disponível em: http://hdl.handle.net/10020/gci_pubs/conservation_principles_concrete. Acesso em: 28 jan. 2023.
- MALAGA, O. **Performance of impregnation of concrete structures: results from a 5-year field study at TV-40 Boras**. 2015. Thesis (Master of Science: Design and Construction project Management) – Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2015. Disponível em: <https://odr.chalmers.se/bitstream/20.500.12380/232499/1/232499.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2023.
- MARANHÃO, F. L. **Método para a redução de manchas nas vedações externas de edifícios**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-12082010-170254/pt-br.php>. Acesso em: 27 jan. 2023.
- MARANHÃO, F.L.; LOH, K. O uso de hidrofugantes em materiais de construção porosos. **Téchne**. São Paulo, v. 155, p. 4-7, fev. 2010. Disponível em: <https://revistatechne.com.br/uso-de-hidrofugantes-em-materiaisde-construcao-porosos/>. Acesso em: 27 jan. 2023.
- MAYERS, H. The chemistry and properties of silicone resins: network formers (in paints and renders). **Pigment & Resin Technology**, [S. l.] v.27, n.6, p. 364–373, 1 dez. 1998.
- MCAULIFFE, Tony. **Concrete protection with silanes**. [S. l.]: Dow Corning, 2019. Disponível em: <https://www.dow.com/content/dam/dcc/documents/en-us/tech-art/62/62-15/62-1567-01-concrete-protection-with-silanes.pdf?iframe=true>. Acesso em: 4 jan. 2023.
- MEDEIROS, M. H. F.; GOMES, T. S.; HELENE, P. Hidrofugantes de superfície: estudo da capacidade de barrar o ingresso de água no concreto. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, São Paulo, n. 8, p.21-28, abr. 2006. Disponível em:

http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/06/Art3_N82.pdf. Acesso em: 30 jan. 2020.

MEDEIROS, M. H. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons lloreto**. Orientador: Prof. Dr. Paulo Helene. 2008. 218 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MEDEIROS, M. H. F.; CASTRO-BORGES, P.; ALEIXO, D. M.; QUARCIONI, V. A.; MARCONDES, C. G. N.; HELENE, P. Reducing water and chloride penetration through silicate treatments for concrete as a mean to control corrosion kinetics. **International Journal of Electrochemical Science**, [S. l.], v. 7, ed. 10, p. 9682-9696, 2012. Disponível em: <http://www.electrochemsci.org/papers/vol7/71009682.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2023.

MEIER, S. J.; WITTMANN, F. H. Influence of concrete quality, its age and moisture content, on penetration depth of water repellent agents. *In*: HYDROPHOBE III - 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON SURFACE TECHNOLOGY WITH WATER REPELLENT AGENTS, 2001, Universität Hannover, Germany. **Proceedings** [...]. Freiburg: Aedificatio Publishers, 2001. p. 123-132. Disponível em: http://www.hydrophobe.org/pdf/hannover/III_09.pdf. Acesso em: 27 jan. 2023.

MEYER, O. **Preserving a heritage**. München, Germany: Wacker-Chemie, 1997.

MOHAMMOD, A. S. Understanding chemical attack and permeation properties of concrete. Structures in the Arabian Peninsula. *In*: BADR, A.; FENTIMAN, C.; GRANTHAM, M.; MANGABHAI, R. (ed.). **Concrete for modern age: developments in materials and processes**. United Kingdom: Whittles, 2 mai. 2018. 1 ed, p. 979-495. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/Concrete_for_the_Modern_Age_Developments/chzLDwAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=Capillary+Absorption+Pore+diameter+concrete&pg=PA486&printsec=frontcover. Acesso em: 1 fev. 2023.

NAMOULNIARA, K.; MAHIEUX, P-Y; LUX, J.; AÏT-MOKHTAR, A.; TURCRY, P. Efficiency of water repellent surface treatment: experiments on low performance concrete and numerical investigation with pore network model. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 227, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.019>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819320483>. Acesso em: 5 ago. 2023.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION. PubChem Compound Summary for CID 6515, Ethyltriethoxysilane. 2023a. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Ethyltriethoxysilane>. Acesso em: 29 jan. 2023.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION. PubChem Compound Summary for CID 76262, Triethoxyoctylsilane. 2023b. Disponível em:

<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Triethoxyoctylsilane>. Acesso em: 30 jan. 2023.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION. PubChem Compound Summary for CID 76485, Trimethoxyoctylsilane. 2023c. Disponível em:

<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Trimethoxyoctylsilane>. Acesso em: 30 jan. 2023.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION. PubChem Compound Summary for CID 87391, Triethoxy(2-methylpropyl)silane. 2023d. Disponível em:

https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Triethoxy_2-methylpropyl_silane. Acesso em 30: jan. 2023.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION. PubChem Compound Summary for CID 87622, Isobutyltrimethoxysilane. 2023e. Disponível em:

<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Isobutyltrimethoxysilane>. Acesso em: 30 jan. 2023.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). Commerce Department. 31 dez. 1958. Wind pressures in various areas of the United States. Disponível em: <https://www.govinfo.gov/app/details/GOVPUB-C13-96985edc22caa9ba7e9d0b744379bd9c> e

<https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-C13-96985edc22caa9ba7e9d0b744379bd9c/pdf/GOVPUB-C13-96985edc22caa9ba7e9d0b744379bd9c.pdf>. Acesso em: 4 fev. 2023.

NISHIURA, T.; MURAKAMI, Y.; FUKUDA, M. Impregnation treatment with hydrophobic silane to an important stone building suffering from freezing damage in cold and heavy snowfall district. *In: HYDROPHOBE VIII - 8th INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER REPELLENT TREATMENT AND PROTECTIVE SURFACE TECHNOLOGY FOR BUILDING MATERIALS*, 8., 2017, Hong Kong, China. **Proceedings** [...]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2017. Disponível em:

<http://www.hydrophobe.org/pdf/hongkong/C-1-4.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2023.

OGATA, E. Entrega da fachada do Theatro Municipal. 10 abr. 2017. 1 fotografia. Disponível em: <https://www.capital.sp.gov.br/noticia/prefeitura-entrega-recuperacao-da-fachada-do-theatro-municipal>. Acesso em: 29 jan. 2023.

OLIVEIRA, J. M. P. **Estudo da durabilidade e eficácia da ação de repelentes de água em fachadas de edifícios recentes**. Orientador: Professora Doutora Maria Helena Póvoas Corvacho. 2013. 174 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013. Disponível em:

<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/68862/2/26902.pdf>.
Acesso em: 21 fev. 2023.

OLIVEIRA, C. de A.; GALLO JUNIOR, F.; GONÇALVES, A. P. A.; CHAVES, L. A. Task 3: Characteristics and conservation of the exposed reinforced concrete of the Vilanova Artigas Building (FAUUSP). In: PINHEIRO, M. L. B.; KÜHL, B. M.; OLIVEIRA, C. T. A. (Org.). **Subsidies for a Conservation Management Plan Vilanova Artigas Building (School of Architecture and Urbanism of the University of São Paulo – FAUUSP) - Final Report. Keeping it Modern Program**. Los Angeles: The Getty Foundation, 2017. p. 203 - 345. Disponível em:

https://www.getty.edu/foundation/initiatives/current/keeping_it_modern/report_library/vilanova_artigas.html?q=. Acesso em: 27 jan. 2023.

OLIVEIRA, C. A.; SIMÃO, T. R. S.; ARAUJO, A.; FILHO, C. V. M. Conservação das estruturas de concreto aparente do patrimônio da arquitetura moderna brasileira: desafios e oportunidades. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, [S. l.], v. 13, n. 3, p. 63-72, jul. 2020. Disponível em: http://rpee.Inec.pt/Ficheiros/rpee_seriiIII_n13/rpee_sIII_n13_pg63_72.pdf. Acesso em: 27 jan. 2023.

PAN, X.; SHI, Z.; LING, T.; LI, N., A review on surface treatment for concrete – part 2: Performance. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 133, p. 81-90, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.128>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816318979?via%3Dihub>. Acesso em: 27 jan. 2023.

PANG, A. S. Views of the Salk Institute. 7 nov. 2003. Disponível em: <https://flic.kr/p/Q31UR>. Acesso em: 28 jan. 2023.

PAVLOV, V.I.; PROSTIAKOVA, A.I. Beading effect as a method of assessment of the water repellent property of the construction material surface. **Concrete Technologies**, Rússia, n. 9-10, p. 88-89, 2010. Disponível em: https://www.sazi-group.ru/pdf/rosa_effect.pdf, http://www.sazisealants.com/beading_effect/. Acesso em: 27 jan. 2023.

PETRI, D. F. S. Aula sobre molhabilidade e capilaridade - Parte 1. 9 out. 2021. Disponível em: <https://eaulas.usp.br/portal/video?idItem=30707>. 1 vídeo (1h23min18s). Acesso em: 01 fev. 2023.

PETRUCCI, H. C. P. Alteração da aparência das fachadas dos edifícios: interação entre as condições ambientais e a forma construída. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/1555>. Acesso em: 3 fev. 2023.

PINHEIRO, M. L. B. (Org.). Subsidies for a Conservation Management Plan Vilanova Artigas Building (School of Architecture and Urbanism of the University of São Paulo – FAUUSP) - Final Report. São Paulo: Keeping It Modern Program. Los Angeles: The Getty Foundation. 2017. 390 p. Disponível em:

https://www.getty.edu/foundation/initiatives/current/keeping_it_modern/report_library/vilanova_artigas.html?q=. Acesso em: 7 fev. 2023.

POLDER, R. B.; BORSJE, H.; DE VRIES, H. Prevention of reinforcement corrosion by hydrophobic treatment of concrete. **Heron**, Netherlands, v. 46, ed. 4, p. 227-238, 2001. Disponível em: <https://heronjournal.nl/46-4/1.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2023.

POLICRETO ENGENHARIA. Tratamento de Concreto Aparente no Metrô Chácara Klabin. [20--]. 1 fotografia. Disponível em: <https://tratamentodeconcreto.com.br/tratamento-de-concreto-aparente-metro-chacara-klabin.php>. Acesso em: 29 jan. 2023.

PROSOCO. Prosoco, (c) 2023. Specialty construction chemicals manufacturer. Disponível em: <https://prosoco.com/>. Acesso em: 3 fev. 2023.

PRUDENCE, P. Habitat 67 - Moshe Safdie. 1 jun. 2014. 1 fotografia. Disponível em: <https://flic.kr/p/nWdyW7>. Acesso em: 28 jan. 2023.

RANGEL, T. C. **Modificação superficial do cobre e alumínio metálicos para superrepelência a líquidos**. Orientador: Prof. Dr. Daniel Eduardo Weibel. 2014. 63 p. Dissertação (Mestrado em Química) - Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/129736/000976788.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 27 jan. 2023.

RAUPACH, M.; BÜTTNER, T. **Concrete repair to EN 1504: diagnosis, design, principles and practice**. 1 ed. London: CRC Press, 2014. 292 p.

RICHARDSON, A. National Theatre. 23 out. 2009. 1 fotografia. Disponível em: <https://flic.kr/p/7aLFMN>. Acesso em: 28 jan. 2023.

RILEM Comission 25-PEM. Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. **Materials and Structures**, v. 13, n.75, 1980, p. 175-254.

RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUZA, C. A. C.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P.T.; LOURENÇO, M. Z.; HELENE, P. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 272 p. ISBN 978-85-352-7547-6.

RODDER, K. **Impregnation of concrete in depth**. Titular: Huels AG, Dynamit Nobel AG. US n. 4716051A. Depósito: 26 nov. 1985. Concessão: 29 dez. 1987. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US4716051/en_2, <https://patentimages.storage.googleapis.com/19/9d/4d/1ee9f8eb82a5e8/US4716051.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2023.

RUDOLPH, P. Exterior of the Endo Pharmaceuticals Building Endo Laboratories, Garden City, New York, with vegetation. New York Garden City, 1967. 1

fotografia. Disponível em: <https://www.loc.gov/item/2019647123/>. Acesso em: 28 jan. 2023.

SAIN-BAIRD, J. How the Obelisk Made Its Home in Central Park. Central Park Conservancy, 1 fev. 2018. Disponível em: <https://www.centralparknyc.org/articles/obelisk>. Acesso em: 29 jan. 2023.

SALDANHA, A. G.; EICHBURG, D. E. Testing the test: water absorption with RILEM tubes. The Construction Specifier, New York, 9 ago. 2013. Disponível em: <https://www.constructionspecifier.com/testing-the-test-water-absorption-with-rilem-tubes/>. Acesso em: 02 fev. 2023.

SANVITTO, M.L.A. Brutalismo paulista: uma estética justificada por uma ética? In: X SEMINÁRIO DOCOMOMO BRASIL – ARQUITETURA MODERNA E INTERNACIONAL: CONEXÕES BRUTALISTAS 1955-75, 10., 2013. **Anais [...]**. Curitiba: PUC-PR, 2013. Disponível em: https://docmomobrasil.com/wp-content/uploads/2016/08/CON_03.pdf. Acesso em: 27 jan. 2023.

SATO, N. M. N. UEMOTO, K. L. SHIRAKAWA, M. A. SAHADE, R. F. Condensação de vapor de água e desenvolvimento de microrganismos em fachadas de edifícios: estudo de caso. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2002. **ENTAC - 1993 a 2002 Primeira Coletânea de Anais dos Encontros Nacionais de Tecnologia do Ambiente Construído**. Foz do Iguaçu, Paraná: ANTAC, 2002. p. 1191-1198. Disponível em: <https://docplayer.com.br/69390684-Condensacao-de-vapor-de-agua-e-desenvolvimento-de-microrganismos-em-fachada-de-edificios-estudo-de-caso.html>. Acesso em: 22 jan. 2023.

SCARABELLO. Residência Dr. Celso Silveira Mello; Cidade Jardim, Piracicaba, São Paulo. [196-?]. 1 fotografia. São Paulo: Revista Acrópole, n.343, ano 29, p. 19, set. 1967. Disponível em: <http://www.acropole.fau.usp.br/edicao/343>. Acesso em: 28 jan. 2023.

SELLEY, D. **Silane and siloxane: organosilicon treatments for reinforced concrete**. [S. l.]: Dow Corning Corporation, 28 out. 2014. Disponível em: <https://pdfslide.net/documents/silanes-selley-american-concrete-institute-silane-and-siloxane-organosilicon.html?page=1>. Acesso em: 17 jan. 2023.

SFORZA, A. N. **Bertrand Goldberg: preserving a vision of concrete**. Master (Science in Historic Preservation) - Graduate School of Architecture, Planning & Preservation, Columbia University, New York, 2017. DOI: <https://doi.org/10.7916/D85M6HZT>. Disponível em: <https://academiccommons.columbia.edu/doi/10.7916/D85M6HZT>. Acesso em: 27 jan. 2023.

SIDDERS, S. Cleopatra's Needle (The Obelisk) in Central Park. 6 jan. 2023a. 1 fotografia. Disponível em: <https://flic.kr/p/2obcRxX>. Acesso em: 29 jan. 2023.

SIDDERS, S. Cleopatra's Needle (The Obelisk) in Central Park. 6 jan. 2023b. 1 fotografia. Disponível em: <https://flic.kr/p/2obe912>. Acesso em: 29 jan. 2023.

- SIGMA-ALDRICH. Isobutyltriethoxysilane. 2023a. Disponível em:
<https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/product/aldrich/699713>. Acesso em: 30 jan. 2023.
- SIGMA-ALDRICH. Isobutyl(trimethoxy)silane. 2023b. Disponível em:
<https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/substance/isobutyltrimethoxysilane1783018395307>. Acesso em: 30 jan. 2023.
- SIGMA-ALDRICH. Triethoxy(ethyl)silane. 2023c. Disponível em:
<https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/product/aldrich/440574>. Acesso em: 30 jan. 2023.
- SIGMA-ALDRICH. Triethoxy(octyl)silane. 2023d. Disponível em:
<https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/substance/triethoxyoctylsilane276492943751>. Acesso em: 30 jan. 2023.
- SIGMA-ALDRICH. Trimethoxy(octyl)silane. 2023e. Disponível em:
<https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/product/aldrich/376221>. Acesso em: 30 jan. 2023.
- SIKAGARD® – Concrete protect plus: hydrophobic impregnation – silane/siloxane based. [S. l.: s. n.], 6 jul. 2017. 1 vídeo (0min58s). Publicado pelo canal Sika. Disponível em: https://youtu.be/S_QG7hZEypQ. Acesso em: 27 jan. 2023.
- SIERRA-FERNANDEZ, A.; GOMEZ-VILLALBA, L. S.; RABANAL, M. E.; FORT, R. New nanomaterials for applications in conservation and restoration of stony materials: a review. **Materiales de Construcción**, Spain, v. 67, n. 325, e107, jan. - mar. 2017. ISSN-L: 0465-2746 DOI:
<http://dx.doi.org/10.3989/mc.2017.07616>. Disponível em:
<https://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/2161>. Acesso em: 28 jan. 2023.
- SOBRINHO, M. **Estudo da ocorrência de fungos e da permeabilidade em revestimentos de argamassa em habitações de interesse social – estudo de caso na cidade de Pitangueiras/SP**. 2008. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008. Disponível em:
<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4633>. Acesso em: 27 jan. 2023.
- SOHAWON, H. BEUSHAWSEN, H. (2018). The effect of hydrophobic (silane) treatment on concrete durability characteristics. *In* INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE REPAIR, REHABILITATION AND RETROFITTING (ICRRR), 19-21 nov. 2018, Cape Town, South Africa. Proceedings [...]. Cape Town, South Africa: MATEC Web of Conferences, 31 out. 2018. v. 199. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819907015>. Disponível em:
https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/58/mateconf_iccrrr2018_07015/mateconf_iccrrr2018_07015.html. Acesso em: 27 jan. 2023.

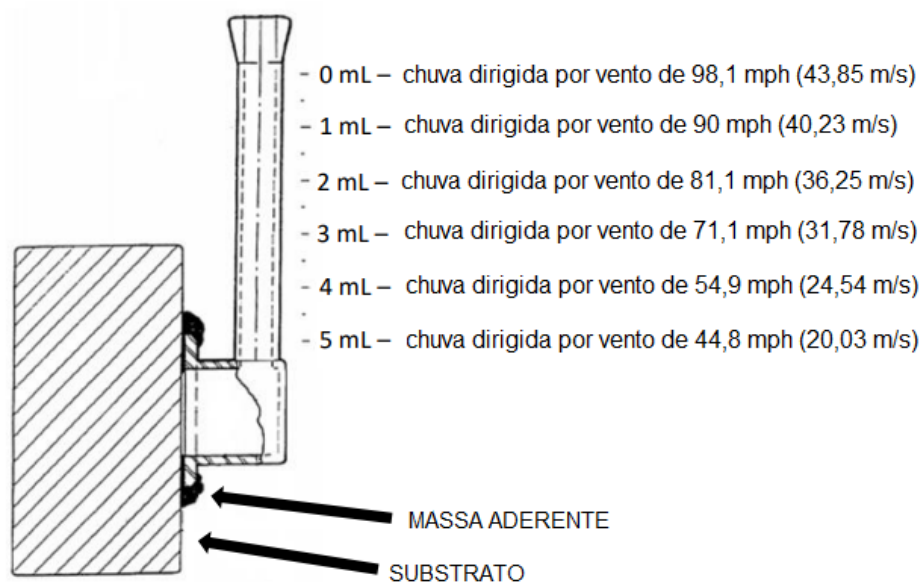
- SPRAGG, B. The Sydney Opera House. 28 ago. 2015. 1 fotografia. Disponível em: <https://flic.kr/p/FA8cfN>. Acesso em: 29 jan. 2023.
- STANKUNS, F. *fau usp*. 19 ago. 2010. 1 fotografia. Disponível em: <https://flic.kr/p/8wEn1B>. Acesso em: 28 jan. 2023.
- SUPERHYDROPHOBIC surfaces/lotus effect by W.Th, 7 fev. 2017. 1 vídeo (0min34s). Publicado pelo canal William Thielicke. Disponível em: <https://youtu.be/HF4blivJQ6o>, <http://william.thielicke.org/LotusEffekt/>. Acesso em: 27 jan. 2023.
- TEEMU008. Promontory Apartments. 26 nov. 2010. 1 fotografia. Disponível em: <https://flic.kr/p/ceHbGq>. Acesso em: 28 jan. 2023.
- THIXOTROPY. *In: Oxford English Dictionary*. Disponível em: <https://www.oed.com/search/dictionary/?scope=Entries&q=Thixotropy>. Acesso em: 6 ago. 2023.
- TIXOTROPIA. *In: Michaelis, Dicionário Brasileiro de Língua Portuguesa*. Disponível em: <https://michaelis.uol.com.br/busca?r=0&f=0&t=0&palavra=Tixotropia>. Acesso em: 6 ago. 2023.
- TROTTMANN, M. Lotus Leaf. 5 mai. 2019. 1 fotografia. Disponível em: <https://flic.kr/p/2gkJhL5>. Acesso em: 5 mar. 2023.
- VALENTE, J. B. Sede Anhembi Tennis Clube. [20--?]. 1 fotografia. Disponível em: <http://www.arquiteturabrutalista.com.br/fichas-tecnicas/DW%201961-54/1961-54-fichatecnica.htm>. Acesso em: 28 jan. 2023.
- VARGAFTIK, N. B.; VOLKOV, B. N.; VOLJAK, L. D. International Tables of the Surface Tension of Water. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, v. 12, n. 3, p. 817-820, 1 jul. 1983. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.555688>. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/jpr/article/12/3/817/241268/International-Tables-of-the-Surface-Tension-of>. Acesso em: 14 mai. 2023.
- WACKER. **SILRES Portfolio, Product Overview**: Architectural Coatings and Construction Materials. Munich, Germany: Wacker Chemie AG, [20--a?]. Disponível em: <https://www.wacker.com/h/medias/7813-EN.pdf>. Acesso em: 22 out. 2022.
- WACKER. **Concrete protection for concrete advantages**. Munich, Germany: Wacker Chemie AG, [20--b?]. Disponível em: <https://www.wacker.com/h/medias/6527-E-final-0117.pdf>. Acesso em: 22 out. 2022.
- WACKER. **Concrete protection: reference projects – hydrophobic impregnation**. Munich, Germany: Wacker Chemie AG, [20--c?].

- WACKER. **Protect your concrete with hydrophobic surface treatment**. Munich, Germany: Wacker Chemie AG, [20--d?].
- WANG, Y.; LI, L.; AN, M.; SUN, Y.; YU, Z.; HUANG.; H. Factors Influencing the capillary water absorption characteristics of concrete and their relationship to pore structure. **Applied Sciences**, [S. l.], v. 12, n. 4: 2211, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12042211>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/4/2211/htm>. Acesso em: 1 fev. 2023.
- WIND pressure exerted on vertical wall**. Engineersedge, 2023. Disponível em: https://www.engineersedge.com/civil_engineering/wind_pressure_exerted_on_vertical_wall_14014.htm. Acesso em: 4 jan. 2023.
- WITTMANN, F. H.; ZHANG, P.; AKIRA, Y. Water repellent surface impregnation for extension of service life of reinforced concrete structures in marine environments: the role of cracks. **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 32, ed. 2, p. 101-109, fev. 2010. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.11.001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946509001656?via%3Dihub>. Acesso em: 28 jan. 2023.
- ZANONI, V. A. G.; SANCHEZ, J. M. M.; BAUER, E. Método para a quantificação de chuva dirigida incidente nas fachadas das edificações. **PARC - Pesquisa em Arquitetura e Construção**, [S. l.], v. 9 n. 2, p.122-132, 2018. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v9i2.8650260>. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8650260>. Acesso em: 5 fev. 2023.
- ZEIN, R. V. **A arquitetura da escola brutalista – 1953 – 1973**. 2005. 358p. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/5452>. Acesso em: 28 jan. 2023.
- ZHANG, Y. **Methodology for aesthetic repair and rehabilitation for architectural concrete**. 2005. 181 p. Thesis (Master in Philosophy) -. Faculty of Engineering & The Built Environment, University of Johannesburg, Johannesburg, South Africa, 2005. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10210/472>. Acesso em: 30 jan. 2023.
- ZHANG, P.; LI, P.; FAN, H.; SHANG, H.; GUO, S.; ZHAO, T. Carbonation of water repellent-treated concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, [S. l.], 17 dez. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/1343947>. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2017/1343947/>. Acesso em: 28 jan. 2023.
- 圍棋一級. Kap Shui Mun Bridge from Sham Tseng. 3 jun. 2011. 1 fotografia. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kap_Shui_Mun_Bridge_from_Sham_Tseng.JPG#/media/File:Kap_Shui_Mun_Bridge_from_Sham_Tseng.JPG. Acesso em: 29 jan. 2023.

APÊNDICE A – RELAÇÃO ENTRE A COLUNA DE ÁGUA NO TUBO DE KARSTEN E VELOCIDADE DE VENTO

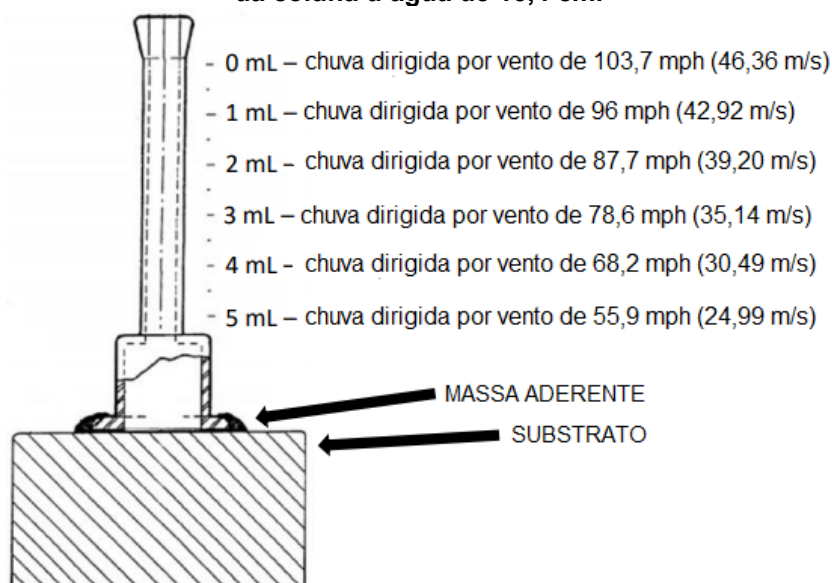
Alguns tubos de Karsten são produzidos com a correlação entre a altura da coluna de água no tubo e a velocidade de vento, como mostram as **figuras A.1 e A.2**.

Figura A.1 – Tubo de Karsten para superfície vertical com área de contato de 4,9cm² e altura da coluna d'água até o centro da área de medição de 12cm



Fonte: Adaptado de Gale (2020).

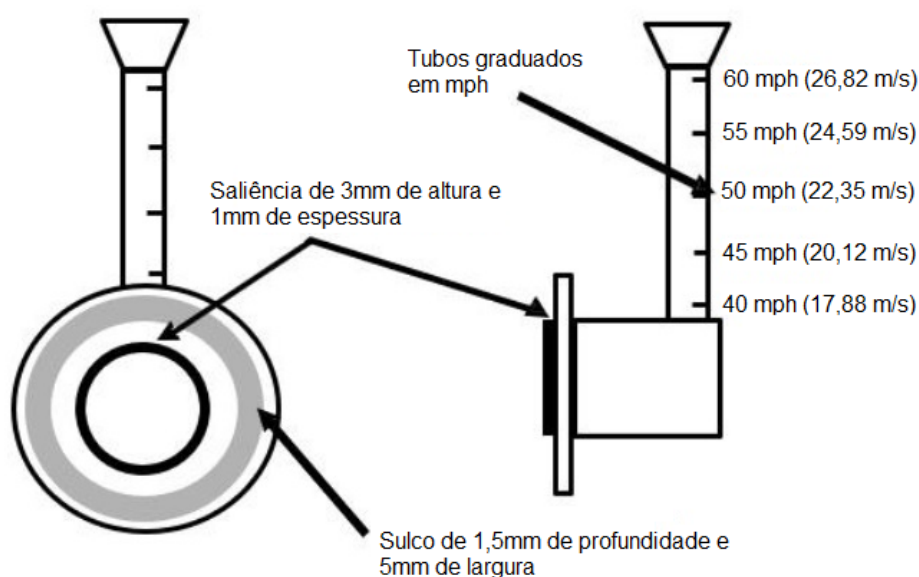
Figura A.2 – Tubo de Karsten para superfície horizontal com área de contato de 4,9 cm² e altura da coluna d'água de 13,4 cm.



Fonte: Adaptado de Gale (2020).

Após testes de laboratório, a empresa estadunidense Prosoco propôs um modelo de tubo com o objetivo de minimizar a influência do operador nos ensaios e tornar os resultados menos imprecisos. Esses tubos têm uma base mais larga para melhorar a aderência com a massa de fixação; a base tem um sulco guia para auxiliar na colocação da massa; há uma saliência na parte inferior para evitar que a massa invada a área de absorção; a graduação se dá em velocidade de vento com o objetivo de refletir as condições climáticas mais comuns (**Figura A.3**).


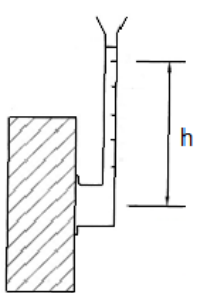
Figura A.3 – Tubo de Karsten modificado proposto pela empresa Prosoco.



Fonte: Adaptado de Gale.

Nas equações que correlacionam a pressão da coluna d'água nos tubos de Karsten e a velocidade dos ventos, a pressão é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade e é afetada por uma constante que está relacionada à densidade do ar, como mostra a **Figura A.4**.

Figura A.4 – Equações para relação entre pressão e velocidade do vento em unidades do Sistema Internacional e do Sistema Imperial.

$q = \frac{\gamma V^2}{2g}$	<p>q = pressão do vento em lb/ft² ou N/m² (pascal) γ = peso específico do ar em lb/ft³ ou kg/m³ g = força da gravidade em ft/s² ou m/s² V = velocidade média do vento em ft/s ou m/s</p>				
$q = \frac{\rho V^2}{2}$	<p>q = pressão do vento em lb/ft² ou N/m² (pascal) ρ = densidade média do ar V = velocidade média do vento em ft/s ou m/s</p>				
$q = \frac{1}{2} * 0,00238 * \left(\frac{5280}{3600}\right)^2 * V^2$	<p>q = pressão do vento em lb/ft² 5280 = conversor de pés em milhas 3600 = conversor de segundos em horas $0,00238 \frac{lb * s^2}{ft^4}$ = densidade do ar em condições normais ao nível do mar V = velocidade média do vento em ft/s</p>				
					
$q = 0,00256 * V^2$	<p>q = pressão do vento em psf V = velocidade média do vento em mph</p>				
$q = 0,00061334 * V^2 [S.I.]$	<p>q = pressão do vento em kN/m² (kPa) V = velocidade média do vento em m/s</p>				
	<table border="0"> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 150px;"> $p_h = \frac{d * g * h}{1000 * 100}$ </td> <td style="padding-left: 10px;"> <p>p_h = pressão hidrostática em kN/m² d = densidade da água = 1000kg/m³ g = aceleração da gravidade ≅ 9,81 m/s h = altura da coluna d'água em cm</p> </td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 150px;"> $0,0981 * h = 0,00061334 * V^2$ </td> <td style="padding-left: 10px;"> <p>h = altura da coluna d'água em cm V = velocidade média do vento em m/s</p> </td> </tr> </table>	$p_h = \frac{d * g * h}{1000 * 100}$	<p>p_h = pressão hidrostática em kN/m² d = densidade da água = 1000kg/m³ g = aceleração da gravidade ≅ 9,81 m/s h = altura da coluna d'água em cm</p>	$0,0981 * h = 0,00061334 * V^2$	<p>h = altura da coluna d'água em cm V = velocidade média do vento em m/s</p>
$p_h = \frac{d * g * h}{1000 * 100}$	<p>p_h = pressão hidrostática em kN/m² d = densidade da água = 1000kg/m³ g = aceleração da gravidade ≅ 9,81 m/s h = altura da coluna d'água em cm</p>				
$0,0981 * h = 0,00061334 * V^2$	<p>h = altura da coluna d'água em cm V = velocidade média do vento em m/s</p>				

Fonte: Vanessa de Moraes (2023). Com base em National Institute of Standards and Technology (1958), Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988), American Society of Civil Engineers (2003), How... (2020) e Wind... (2023).

A norma ANBT NBR 6123 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988) apresenta essa equação para definir o conceito de pressão dinâmica (q), que é a pressão que o vento exerce sobre uma estrutura em condições normais de pressão (1atm = 1013,2 mbar = 101320 Pa) e temperatura de 15°C (**Figura A.5**). A velocidade básica do vento (V₀) é definida como “a velocidade de uma rajada de 3s excedida na

média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano” e pode ser encontrada no diagrama de isopletas disponível na norma.

Figura A.5 – Velocidade característica e pressão dinâmica do vento nas estruturas de acordo com a norma ABNT NBR 6123.

$V_k = V_0 * S_1 * S_2 * S_3$	V_k = velocidade característica do vento em m/s V_0 = velocidade básica do vento em m/s S_1 = fator topográfico S_2 = fator de rugosidade, dimensões da edificação ou parte e altura sobre o terreno S_3 = fator baseado em conceitos probabilísticos
$q = 0,613 * V_k^2$	q = N/m ² (Pa) V_k = velocidade característica do vento em m/s

Fonte: Vanessa de Moraes, 2023. Com base em Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988).

Segundo Hendrickx (2013), embora seja comum a correlação entre a altura de água dentro do tubo e velocidades da chuva dirigida por vento na superfície, as velocidades indicadas nos tubos disponíveis são exageradamente altas: para as alturas de 0,5cm-10cm as velocidades equivalentes são de 9m/s-40m/s. Na Escala de Beaufort (Escala...,2020) esses ventos são classificados como *brisa forte* e *furacão*, respectivamente. Por outro lado, as pressões dentro do tubo são muito baixas em comparação à sucção capilar dos poros do substrato:

Se a sucção capilar de um poro cilíndrico de acordo com a lei de Young e Laplace é dada por $P_c = -2 * \gamma_{lg} \div r$, sendo P_c a pressão capilar e γ_{lg} a tensão superficial da água, os poros maiores em um tijolo ($r = 10\mu\text{m}$) exercem mais de 10^4Pa , enquanto muitos dos poros menores exercem pressões de até 10^6 ou 10^7 Pa. A conclusão é que somente para materiais com poros muito grandes a altura da coluna de água terá um efeito significativo. Na prática, as pressões criadas pela chuva dirigida por vento são particularmente importantes para a absorção de água em fissuras (reforçada por pressões negativas no substrato) e não para o transporte capilar (Hendrickx, 2013, p. 1310, tradução nossa).

Ainda assim, o fator velocidade de vento (que está associado à sua pressão exercida em uma superfície) é utilizado em métodos padronizados para calcular a intensidade da chuva dirigida, ou seja, a quantidade de água que incide em uma área, como apontado por Zanoni, Sánchez e Bauer (2018). Esse é um dado que certamente tem influência na absorção capilar pelo material.

APÊNDICE B – MEDIÇÕES REALIZADAS COM O COLORÍMETRO TRISTÍMULO

Tabela B.1 – Medições com colorímetro tristímulo antes da aplicação do hidrofugante A.

LEITURA	DATA	HORA	NOME/PANTONE	CÓDIGO	APARELHO			CORES R/G/B			REPRESENTAÇÃO RGB
					L*	a*	b*	R	G	B	
1	18/04/2022	15:52:19	Seneca Rock	17-1107 TCX	60,32	0,86	10,37	150	144	127	
2	18/04/2022	15:52:27	Satin Slipper	20-0020	57,97	1,69	11,71	148	138	119	
3	18/04/2022	15:52:32	Crockery	16-1104 TCX	63,05	1,94	10,32	159	150	135	
4	18/04/2022	15:52:38	Tuffet	16-1106 TPG	64,37	1,97	10,55	163	153	138	
5	18/04/2022	15:52:44	Plaza Taupe	16-1105 TPG	68,96	1,83	9,65	174	166	151	
6	18/04/2022	15:52:50	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
7	18/04/2022	15:52:55	Tuffet	16-1106 TPG	64,37	1,97	10,55	163	153	138	
8	18/04/2022	15:53:00	Tuffet	16-1106 TPG	64,37	1,97	10,55	163	153	138	
9	18/04/2022	15:53:06	Seneca Rock	17-1107 TCX	60,32	0,86	10,37	150	144	127	
10	18/04/2022	15:53:11	Seneca Rock	17-1107 TCX	60,32	0,86	10,37	150	144	127	
11	18/04/2022	15:53:16	Tuffet	16-1106 TPG	64,37	1,97	10,55	163	153	138	
12	18/04/2022	15:53:21	Solid C	7536 C	65,16	-0,31	13,07	163	158	136	
13	18/04/2022	15:53:27	Spray Green	15-0309 TPG	69,43	0,37	10,89	174	168	150	
14	18/04/2022	15:53:32	Spray Green	15-0309 TPG	69,43	0,37	10,89	174	168	150	
15	18/04/2022	15:53:36	Solid C	7536 C	65,16	-0,31	13,07	163	158	136	
16	18/04/2022	15:53:40	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
17	18/04/2022	15:53:46	Crockery	16-1104 TCX	63,05	1,94	10,32	159	150	135	
18	18/04/2022	15:53:51	Solid C	7536 C	65,16	-0,31	13,07	163	158	136	
19	18/04/2022	15:54:01	Solid C	7536 C	65,16	-0,31	13,07	163	158	136	
20	18/04/2022	15:54:06	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
21	18/04/2022	15:54:16	Crockery	16-1104 TCX	63,05	1,94	10,32	159	150	135	
22	18/04/2022	15:54:24	Seneca Rock	17-1107 TCX	60,32	0,86	10,37	150	144	127	
23	18/04/2022	15:54:31	Tuffet	16-1106 TPG	64,37	1,97	10,55	163	153	138	
MODA			Tuffet	16-1106 TPG	64,37	1,97	10,55	163	153	138	

Tabela B.2 - Medições com colorímetro tristímulo depois da aplicação do hidrofugante A.

LEITURA	DATA	HORA	NOME/PANTONE	CÓDIGO	CIE Lab D65 10°			Adobe RGB D65 2°			REPRESENTAÇÃO RGB
					L*	a*	b*	R	G	B	
1	19/07/2022	08:33:27	Crockery	16-1104 TCX	63,05	1,94	10,32	159	150	135	
2	19/07/2022	08:33:33	Crockery	16-1104 TPG	65,36	2,13	10,34	166	156	141	
3	19/07/2022	08:33:38	Tuffet	16-1106 TPG	64,37	1,97	10,55	163	153	138	
4	19/07/2022	08:33:43	Crockery	16-1104 TCX	63,05	1,94	10,32	159	150	135	
5	19/07/2022	08:33:48	Plaza Taupe	16-1105 TPG	68,96	1,83	9,65	174	166	151	
6	19/07/2022	08:33:54	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
7	19/07/2022	08:33:59	Winter Twig	17-1108 TCX	57,83	1,59	9,80	145	137	122	
8	19/07/2022	08:34:24	Seneca Rock	17-1107 TCX	60,32	0,86	10,37	150	144	127	
9	19/07/2022	08:34:29	Crockery	16-1104 TCX	63,05	1,94	10,32	159	150	135	
10	19/07/2022	08:34:34	Crockery	16-1104 TCX	63,05	1,94	10,32	159	150	135	
11	19/07/2022	08:34:40	Spray Green	15-0309 TCX	68,05	0,47	11,29	171	165	145	
12	19/07/2022	08:34:48	Spray Green	15-0309 TPG	69,43	0,37	10,89	174	168	150	
13	19/07/2022	08:34:52	Tuffet	16-1106 TPG	64,37	1,97	10,55	163	153	138	
14	19/07/2022	08:34:57	Solid C	7536 C	65,16	-0,31	13,07	163	158	136	
15	19/07/2022	08:35:03	Solid C	7536 C	65,16	-0,31	13,07	163	158	136	
16	19/07/2022	08:35:08	Spray Green	15-0309 TCX	68,05	0,47	11,29	171	165	145	
17	19/07/2022	08:35:14	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	
18	19/07/2022	08:35:20	Solid C	7536 C	65,16	-0,31	13,07	163	158	136	
19	19/07/2022	08:35:25	Crockery	16-1104 TPG	65,36	2,13	10,34	166	156	141	
20	19/07/2022	08:35:31	Crockery	16-1104 TPG	65,36	2,13	10,34	166	156	141	
21	19/07/2022	08:35:37	Crockery	16-1104 TCX	63,05	1,94	10,32	159	150	135	
22	19/07/2022	08:35:42	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
23	19/07/2022	08:35:48	Crockery	16-1104 TCX	63,05	1,94	10,32	159	150	135	
MODA			Crockery	16-1104 TCX	63,05	1,94	10,32	159	150	135	

Tabela B.3 - Medição com colorímetro tristímulo antes da aplicação do hidrofugante B.

LEITURA	DATA	HORA	NOME/PANTONE	CÓDIGO	APARELHO			CORES R/G/B			REPRESENTAÇÃO RGB
					L*	a*	b*	R	G	B	
1	18/04/2022	16:00:18	Crockery	16-1104 TCX	63,05	1,94	10,32	159	150	135	
2	18/04/2022	16:00:23	Crockery	16-1104 TCX	63,05	1,94	10,32	159	150	135	
3	18/04/2022	16:00:28	Trench Coat	16-1101 TCX	64,92	2,52	11,90	165	156	136	
4	18/04/2022	16:00:32	Weathered Teak	17-1112 TPG	60,97	1,88	9,96	154	144	130	
5	18/04/2022	16:00:36	Plaza Taupe	16-1105 TPG	68,96	1,83	9,65	174	166	151	
6	18/04/2022	16:00:41	Tuffet	16-1106 TPG	64,37	1,97	10,55	163	153	138	
7	18/04/2022	16:00:46	Trench Coat	16-1101 TCX	64,92	2,52	11,90	165	156	136	
8	18/04/2022	16:00:50	Spray Green	15-0309 TPG	69,43	0,37	10,89	174	168	150	
9	18/04/2022	16:00:55	Trench Coat	16-1101 TCX	64,92	2,52	11,90	165	156	136	
10	18/04/2022	16:01:00	Crockery	16-1104 TPG	65,36	2,13	10,34	166	156	141	
11	18/04/2022	16:01:06	Crockery	16-1104 TCX	63,05	1,94	10,32	159	150	135	
12	18/04/2022	16:01:10	Plastic Std	PQ-7536C	65,69	0,21	13,10	166	159	136	
13	18/04/2022	16:01:15	Seneca Rock	17-1107 TCX	60,32	0,86	10,37	150	144	127	
14	18/04/2022	16:01:20	Plastic Std	PQ-7536C	65,69	0,21	13,10	166	159	136	
15	18/04/2022	16:01:24	Plastic Std	PQ-7536C	65,69	0,21	13,10	166	159	136	
16	18/04/2022	16:01:28	Seneca Rock	17-1107 TCX	60,32	0,86	10,37	150	144	127	
17	18/04/2022	16:01:34	Plastic Std	PQ-7536C	65,69	0,21	13,10	166	159	136	
18	18/04/2022	16:02:03	Solid C	7536 C	65,16	-0,31	13,07	163	158	136	
19	18/04/2022	16:02:09	Tuffet	16-1106 TPG	64,37	1,97	10,55	163	153	138	
20	18/04/2022	16:02:15	Tuffet	16-1106 TPG	64,37	1,97	10,55	163	153	138	
21	18/04/2022	16:02:23	Seneca Rock	17-1107 TCX	60,32	0,86	10,37	150	144	127	
22	18/04/2022	16:02:29	Crockery	16-1104 TCX	63,05	1,94	10,32	159	150	135	
23	18/04/2022	16:02:33	Tuffet	16-1106 TPG	64,37	1,97	10,55	163	153	138	
MODA			Crockery	16-1104 TCX	63,05	1,94	10,32	159	150	136	
			Plastic Std	PQ-7536C	65,69	0,21	13,10	166	159	136	
			Tuffet	16-1106 TPG	64,37	1,97	10,55	163	153	138	

Tabela B.4 - Medição com colorímetro tristímulo depois da aplicação do hidrofugante B.

LEITURA	DATA	HORA	NOME/PANTONE	CÓDIGO	APARELHO			Adobe RGB D65 2°			REPRESENTAÇÃO RGB
					L*	a*	b*	R	G	B	
1	19/07/2022	08:37:33	Crockery	16-1104 TCX	63,05	1,94	10,32	159	150	135	
2	19/07/2022	08:37:38	Seneca Rock	17-1107 TCX	60,32	0,86	10,37	150	144	127	
3	19/07/2022	08:37:44	Pastic Std	PQ-7536 C	65,69	0,21	13,10	166	159	136	
4	19/07/2022	08:37:49	Silver Mink	17-1312 TPG	61,48	4,26	11,18	158	145	129	
5	19/07/2022	08:37:53	Plastic Std	PQ-7536 C	65,69	0,21	13,10	166	159	136	
6	19/07/2022	08:37:58	Plastic Std	PQ-7536 C	65,69	0,21	13,10	166	159	136	
7	19/07/2022	08:38:03	Lemon Pepper	16-1119 TCX	61,53	1,25	13,81	156	147	125	
8	19/07/2022	08:38:09	Plastic Std	PQ-7536 C	65,69	0,21	13,10	166	159	136	
9	19/07/2022	08:38:14	Plastic Std	PQ-7536 C	65,69	0,21	13,10	166	159	136	
10	19/07/2022	08:38:19	Plastic Std	PQ-7536 C	65,69	0,21	13,10	166	159	136	
11	19/07/2022	08:38:24	Lemon Pepper	16-1119 TPG	62,50	0,83	13,30	167	150	128	
12	19/07/2022	08:38:28	Plastic Std	PQ-7536 C	65,69	0,21	13,10	166	159	136	
13	19/07/2022	08:38:33	Plastic Std	PQ-7536 C	65,69	0,21	13,10	166	159	136	
14	19/07/2022	08:38:37	Lemon Pepper	16-1119 TCX	61,53	1,25	13,81	156	147	125	
15	19/07/2022	08:38:42	Plastic Std	PQ-7536 C	65,69	0,21	13,10	166	159	136	
16	19/07/2022	08:38:48	Plastic Std	PQ-7536 C	65,69	0,21	13,10	166	159	136	
17	19/07/2022	08:38:52	Lemon Pepper	16-1119 TCX	61,53	1,25	13,81	156	147	125	
18	19/07/2022	08:38:57	Crockery	16-1104 TCX	63,05	1,94	10,32	159	150	135	
19	19/07/2022	08:39:03	Seneca Rock	17-1107 TCX	60,32	0,86	10,37	150	144	127	
20	19/07/2022	08:39:08	Plastic Std	PQ-7536 C	65,69	0,21	13,10	166	159	136	
21	19/07/2022	08:39:13	Plastic Std	PQ-7536 C	65,69	0,21	13,10	166	159	136	
22	19/07/2022	08:39:20	Seneca Rock	17-1107 TCX	60,32	0,86	10,37	150	144	127	
23	19/07/2022	08:39:26	Chinchilla	17-1109 TPG	60,33	1,50	12,51	151	145	124	
MODA			Plastic Std	PQ-7536 C	65,69	0,21	13,10	166	159	136	

Tabela B.5 - Medições com colorímetro tristímulo antes da aplicação do hidrofugante C.

LEITURA	DATA	HORA	NOME/PANTONE	CÓDIGO	APARELHO			CORES R/G/B			REPRESENTAÇÃO RGB
					L*	a*	b*	R	G	B	
1	18/04/2022	16:04:20	Solid C	7536 C	65,16	-0,31	13,07	163	158	136	
2	18/04/2022	16:04:25	Plaza Taupe	16-1105 TPG	68,96	1,83	9,65	174	166	151	
3	18/04/2022	16:04:30	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
4	18/04/2022	16:04:34	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
5	18/04/2022	16:04:38	Plaza Taupe	16-1105 TPG	68,96	1,83	9,65	174	166	151	
6	18/04/2022	16:04:43	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
7	18/04/2022	16:04:48	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
8	18/04/2022	16:04:52	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
9	18/04/2022	16:04:57	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
10	18/04/2022	16:05:02	Satin Slipper	20-0020	57,97	1,69	11,71	148	138	119	
11	18/04/2022	16:05:08	Solid C	7536 C	65,16	-0,31	13,07	163	158	136	
12	18/04/2022	16:05:12	Solid C	7536 C	65,16	-0,31	13,07	163	158	136	
13	18/04/2022	16:05:20	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
14	18/04/2022	16:05:26	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
15	18/04/2022	16:05:34	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
16	18/04/2022	16:05:37	Winter Twig	17-1108 TCX	57,83	1,59	9,80	145	137	122	
17	18/04/2022	16:05:41	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
18	18/04/2022	16:05:46	Trench Coat	16-1101 TCX	64,92	2,52	11,90	165	156	136	
19	18/04/2022	16:05:50	Satin Slipper	20-0020	57,97	1,69	11,71	148	138	119	
20	18/04/2022	16:05:55	Plaza Taupe	16-1105 TPG	68,96	1,83	9,65	174	166	151	
21	18/04/2022	16:05:58	Solid C	7536 C	65,16	-0,31	13,07	163	158	136	
22	18/04/2022	16:06:04	Solid C	7536 C	65,16	-0,31	13,07	163	158	136	
23	18/04/2022	16:06:11	Plaza Taupe	16-1105 TPG	68,96	1,83	9,65	174	166	151	
MODA			Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	

Tabela B.6 - Medições com colorímetro tristímulo depois da aplicação do hidrofugante C.

LEITURA	DATA	HORA	NOME/PANTONE	CÓDIGO	APARELHO			Adobe RGB D65 2°			REPRESENTAÇÃO RGB
					L*	a*	b*	R	G	B	
1	15/09/2022	15:25:55	Spray Green	15-0309 TCX	68,05	0,47	11,29	171	165	145	
2	15/09/2022	15:26:07	Solid C	7536 C	65,16	-0,31	13,07	163	158	136	
3	15/09/2022	15:26:14	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
4	15/09/2022	15:26:20	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
5	15/09/2022	15:26:26	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
6	15/09/2022	15:26:31	Cobblestone	16-1407 TPG	66,07	2,49	7,99	167	157	146	
7	15/09/2022	15:26:36	Solid C	7536 C	65,16	-0,31	13,07	163	158	136	
8	15/09/2022	15:26:42	Tuffet	16-1106 TPG	64,37	1,97	10,55	163	153	138	
9	15/09/2022	15:26:47	Plaza Taupe	16-1105 TPG	68,96	1,83	9,65	174	166	151	
10	15/09/2022	15:26:52	Plaza Taupe	16-1105 TPG	68,96	1,83	9,65	174	166	151	
11	15/09/2022	15:26:57	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
12	15/09/2022	15:27:03	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
13	15/09/2022	15:27:08	Plaza Taupe	16-1105 TPG	68,96	1,83	9,65	174	166	151	
14	15/09/2022	15:27:13	Solid C	7536 C	65,16	-0,31	13,07	163	158	136	
15	15/09/2022	15:27:20	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	
16	15/09/2022	15:27:26	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
17	15/09/2022	15:27:32	Plaza Taupe	16-1105 TPG	68,96	1,83	9,65	174	166	151	
18	15/09/2022	15:27:36	Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	
19	15/09/2022	15:27:41	Solid C	7536 C	65,16	-0,31	13,07	163	158	136	
20	15/09/2022	15:27:46	Plastic Std	PQ-7536C	65,69	0,21	13,10	166	159	136	
21	15/09/2022	15:27:50	Plaza Taupe	16-1105 TPG	68,96	1,83	9,65	174	166	151	
22	15/09/2022	15:27:55	Weathered Teak	17-1112 TPG	60,97	1,88	9,96	154	144	130	
23	15/09/2022	15:28:01	Plaza Taupe	16-1105 TPG	68,96	1,83	9,65	174	166	151	
MODA			Aluminium	16-1107 TCX	61,97	1,29	8,98	155	148	134	

Tabela B.7 - Medições com colorímetro tristímulo antes da aplicação do hidrofugante D.

LEITURA	DATA	HORA	NOME/PANTONE	CÓDIGO	APARELHO			CORES R/G/B			REPRESENTAÇÃO RGB
					L*	a*	b*	R	G	B	
1	01/08/2022	10:11:56	Solid C	7536 C	65,16	-0,31	13,07	163	158	136	
2	01/08/2022	10:12:02	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	
3	01/08/2022	10:12:08	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	
4	01/08/2022	10:12:15	Oxford Tan	15-1306 TCX	70,38	4,15	10,03	184	169	154	
5	01/08/2022	10:12:23	Crockery	16-1104 TPG	65,36	2,13	10,34	166	156	141	
6	01/08/2022	10:12:29	Cobblestone	16-1407 TPG	66,07	2,49	7,99	167	157	146	
7	01/08/2022	10:12:35	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	
8	01/08/2022	10:12:42	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	
9	01/08/2022	10:12:47	Cobblestone	16-1407 TCX	64,38	2,62	8,54	163	153	141	
10	01/08/2022	10:12:52	Crockery	16-1104 TPG	65,36	2,13	10,34	166	156	141	
11	01/08/2022	10:12:58	Cobblestone	16-1407 TPG	66,07	2,49	7,99	167	157	146	
12	01/08/2022	10:13:03	Cobblestone	16-1407 TCX	64,38	2,62	8,54	163	153	141	
13	01/08/2022	10:13:08	Plaza Taupe	16-1105 TPG	68,96	1,83	9,65	174	166	151	
14	01/08/2022	10:13:14	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	
15	01/08/2022	10:13:19	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	
16	01/08/2022	10:13:25	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	
17	01/08/2022	10:13:30	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	
18	01/08/2022	10:13:35	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	
19	01/08/2022	10:13:41	Trench Coat	16-1101 TCX	64,92	2,52	11,90	165	156	136	
20	01/08/2022	10:13:46	Cobblestone	16-1407 TCX	64,38	2,62	8,54	163	153	141	
21	01/08/2022	10:13:53	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	
22	01/08/2022	10:13:58	Plastic Std	PQ-7536C	65,69	0,21	13,10	166	159	136	
23	01/08/2022	10:14:06	Cobblestone	16-1407 TPG	66,07	2,49	7,99	167	157	146	
MODA			Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	

Tabela B.8 - Medições com colorímetro tristímulo depois da aplicação do hidrofugante D.

LEITURA	DATA	HORA	NOME/PANTONE	CÓDIGO	APARELHO			Adobe RGB D65 2°			REPRESENTAÇÃO RGB
					L*	a*	b*	R	G	B	
1	15/09/2022	15:42:40	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	
2	15/09/2022	15:42:47	Cobblestone	16-1407 TCX	64,38	2,62	8,54	163	153	141	
3	15/09/2022	15:43:11	Plaza Taupe	16-1105 TPG	68,96	1,83	9,65	174	166	151	
4	15/09/2022	15:43:17	Feather Gray	15-1305 TCX	71,05	1,37	8,92	179	172	157	
5	15/09/2022	15:43:24	Plaza Taupe	16-1105 TPG	68,96	1,83	9,65	174	166	151	
6	15/09/2022	15:43:32	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	
7	15/09/2022	15:43:38	Plaza Taupe	16-1105 TPG	68,96	1,83	9,65	174	166	151	
8	15/09/2022	15:43:43	Seneca Rock	17-1107 TCX	60,32	0,86	10,37	150	144	127	
9	15/09/2022	15:43:48	Trench Coat	16-1101 TCX	64,92	2,52	11,90	165	156	136	
10	15/09/2022	15:44:36	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	
11	15/09/2022	15:44:42	Satin Slipper	20-0020	57,97	1,69	11,71	148	138	119	
12	15/09/2022	15:44:50	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	
13	15/09/2022	15:44:55	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	
14	15/09/2022	15:45:03	Oxford Tan	15-1306 TPG	71,40	2,94	9,88	183	172	157	
15	15/09/2022	15:45:08	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	
16	15/09/2022	15:45:27	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	
17	15/09/2022	15:45:32	Oxford Tan	15-1306 TPG	71,40	2,94	9,88	183	172	157	
18	15/09/2022	15:45:37	Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	
19	15/09/2022	15:45:44	Trench Coat	16-1101 TCX	64,92	2,52	11,90	165	156	136	
20	15/09/2022	15:45:49	Cobblestone	16-1407 TPG	66,07	2,49	7,99	167	157	146	
21	15/09/2022	15:45:54	Trench Coat	16-1101 TCX	64,92	2,52	11,90	165	156	136	
22	15/09/2022	15:45:58	Winter Twig	17-1108 TPG	59,53	1,06	9,85	149	141	127	
23	15/09/2022	15:46:04	Crockery	16-1104 TPG	65,36	2,13	10,34	166	156	141	
MODA			Plaza Taupe	16-1105 TCX	67,28	1,81	9,46	170	162	146	

APÊNDICE C – MEDIÇÕES DE ABSORÇÃO COM TUBO DE KARSTEN NO PILAR

Tabela C.1 - Medições de absorção com tubo de Karsten no pilar – hidrofugante A.

Tempo(min.)	A1						A2						A3					
	Sem hidrofugante			Com hidrofugante			Sem hidrofugante			Com hidrofugante			Sem hidrofugante			Com Hidrofugante		
	ml	Kg/m ²	g/cm ²	ml	Kg/m ²	g/cm ²	ml	Kg/m ²	g/cm ²	ml	Kg/m ²	g/cm ²	ml	Kg/m ²	g/cm ²	ml	Kg/m ²	g/cm ²
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,25	0,51	0,05	0,10	0,20	0,02	0,10	0,20	0,02	0,00	0,00	0,00	0,15	0,31	0,03	0,00	0,00	0,00
10	0,30	0,61	0,06	0,10	0,20	0,02	0,20	0,41	0,04	0,05	0,10	0,01	0,20	0,41	0,04	0,00	0,00	0,00
15	0,30	0,61	0,06	0,10	0,20	0,02	0,20	0,41	0,04	0,05	0,10	0,01	0,25	0,51	0,05	0,00	0,00	0,00
20	0,40	0,81	0,08	0,10	0,20	0,02	0,25	0,51	0,05	0,05	0,10	0,01	0,30	0,61	0,06	0,00	0,00	0,00
25	0,40	0,81	0,08	0,10	0,20	0,02	0,30	0,61	0,06	0,10	0,20	0,02	0,30	0,61	0,06	0,00	0,00	0,00
30	0,50	1,02	0,10	0,10	0,20	0,02	0,30	0,61	0,06	0,10	0,20	0,02	0,40	0,81	0,08	0,00	0,00	0,00
35	0,50	1,02	0,10	0,10	0,20	0,02	0,30	0,61	0,06	0,10	0,20	0,02	0,40	0,81	0,08	0,00	0,00	0,00
40	0,50	1,02	0,10	0,10	0,20	0,02	0,35	0,71	0,07	0,10	0,20	0,02	0,40	0,81	0,08	0,05	0,10	0,01
45	0,50	1,02	0,10	0,10	0,20	0,02	0,40	0,81	0,08	0,10	0,20	0,02	0,45	0,92	0,09	0,05	0,10	0,01
50	0,60	1,22	0,12	0,10	0,20	0,02	0,40	0,81	0,08	0,10	0,20	0,02	0,50	1,02	0,10	0,05	0,10	0,01
55	0,60	1,22	0,12	0,10	0,20	0,02	0,40	0,81	0,08	0,10	0,20	0,02	0,50	1,02	0,10	0,05	0,10	0,01
60	0,60	1,22	0,12	0,10	0,20	0,02	0,40	0,81	0,08	0,10	0,20	0,02	0,50	1,02	0,10	0,05	0,10	0,01

Tabela C.2 - Medições de absorção com tubo de Karsten no pilar - hidrofugante B.

Tempo(min.)	B1						B2						B3					
	Sem hidrofugante			Com hidrofugante			Sem hidrofugante			Com hidrofugante			Sem hidrofugante			Com Hidrofugante		
	ml	Kg/m ²	g/cm ²	ml	Kg/m ²	g/cm ²	ml	Kg/m ²	g/cm ²	ml	Kg/m ²	g/cm ²	ml	Kg/m ²	g/cm ²	ml	Kg/m ²	g/cm ²
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,10	0,20	0,02	0,00	0,00	0,00	0,10	0,20	0,02	0,00	0,00	0,00	0,10	0,20	0,02	0,00	0,00	0,00
10	0,10	0,20	0,02	0,05	0,10	0,01	0,20	0,41	0,04	0,05	0,10	0,01	0,10	0,20	0,02	0,05	0,10	0,01
15	0,20	0,41	0,04	0,05	0,10	0,01	0,20	0,41	0,04	0,10	0,20	0,02	0,20	0,41	0,04	0,10	0,20	0,02
20	0,20	0,41	0,04	0,05	0,10	0,01	0,20	0,41	0,04	0,10	0,20	0,02	0,20	0,41	0,04	0,10	0,20	0,02
25	0,20	0,41	0,04	0,05	0,10	0,01	0,25	0,51	0,05	0,10	0,20	0,02	0,20	0,41	0,04	0,10	0,20	0,02
30	0,20	0,41	0,04	0,05	0,10	0,01	0,30	0,61	0,06	0,10	0,20	0,02	0,25	0,51	0,05	0,10	0,20	0,02
35	0,25	0,51	0,05	0,05	0,10	0,01	0,30	0,61	0,06	0,10	0,20	0,02	0,25	0,51	0,05	0,15	0,31	0,03
40	0,30	0,61	0,06	0,05	0,10	0,01	0,30	0,61	0,06	0,10	0,20	0,02	0,30	0,61	0,06	0,15	0,31	0,03
45	0,30	0,61	0,06	0,05	0,10	0,01	0,30	0,61	0,06	0,10	0,20	0,02	0,30	0,61	0,06	0,20	0,41	0,04
50	0,30	0,61	0,06	0,05	0,10	0,01	0,30	0,61	0,06	0,10	0,20	0,02	0,30	0,61	0,06	0,20	0,41	0,04
55	0,30	0,61	0,06	0,05	0,10	0,01	0,35	0,71	0,07	0,15	0,31	0,03	0,30	0,61	0,06	0,20	0,41	0,04
60	0,30	0,61	0,06	0,05	0,10	0,01	0,35	0,71	0,07	0,15	0,31	0,03	0,30	0,61	0,06	0,20	0,41	0,04

Tabela C.3 - Medições de absorção com tubo de Karsten no pilar - hidrofugante C.

Tempo(min.)	C1						C2						C3					
	Sem hidrofugante			Com hidrofugante			Sem hidrofugante			Com hidrofugante			Sem hidrofugante			Com Hidrofugante		
	ml	Kg/m ²	g/cm ²	ml	Kg/m ²	g/cm ²	ml	Kg/m ²	g/cm ²	ml	Kg/m ²	g/cm ²	ml	Kg/m ²	g/cm ²	ml	Kg/m ²	g/cm ²
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,05	0,10	0,01	0,00	0,00	0,00	0,15	0,31	0,03	0,00	0,00	0,00	0,10	0,20	0,02	0,00	0,00	0,00
10	0,10	0,20	0,02	0,00	0,00	0,00	0,20	0,41	0,04	0,00	0,00	0,00	0,10	0,20	0,02	0,00	0,00	0,00
15	0,10	0,20	0,02	0,00	0,00	0,00	0,30	0,61	0,06	0,00	0,00	0,00	0,20	0,41	0,04	0,00	0,00	0,00
20	0,10	0,20	0,02	0,00	0,00	0,00	0,30	0,61	0,06	0,00	0,00	0,00	0,20	0,41	0,04	0,00	0,00	0,00
25	0,15	0,31	0,03	0,00	0,00	0,00	0,35	0,71	0,07	0,00	0,00	0,00	0,20	0,41	0,04	0,00	0,00	0,00
30	0,20	0,41	0,04	0,00	0,00	0,00	0,40	0,81	0,08	0,00	0,00	0,00	0,30	0,61	0,06	0,00	0,00	0,00
35	0,20	0,41	0,04	0,00	0,00	0,00	0,40	0,81	0,08	0,00	0,00	0,00	0,30	0,61	0,06	0,00	0,00	0,00
40	0,20	0,41	0,04	0,00	0,00	0,00	0,40	0,81	0,08	0,00	0,00	0,00	0,30	0,61	0,06	0,00	0,00	0,00
45	0,20	0,41	0,04	0,00	0,00	0,00	0,45	0,92	0,09	0,00	0,00	0,00	0,35	0,71	0,07	0,00	0,00	0,00
50	0,25	0,51	0,05	0,00	0,00	0,00	0,45	0,92	0,09	0,00	0,00	0,00	0,40	0,81	0,08	0,00	0,00	0,00
55	0,25	0,51	0,05	0,00	0,00	0,00	0,50	1,02	0,10	0,00	0,00	0,00	0,40	0,81	0,08	0,00	0,00	0,00
60	0,30	0,61	0,06	0,00	0,00	0,00	0,50	1,02	0,10	0,00	0,00	0,00	0,40	0,81	0,08	0,00	0,00	0,00

Tabela C.4 - Medições de absorção com tubo de Karsten no pilar – hidrofugante D.

Tempo(min.)	D1						D2						D3					
	Sem hidrofugante			Com hidrofugante			Sem hidrofugante			Com hidrofugante			Sem hidrofugante			Com Hidrofugante		
	ml	Kg/m ²	g/cm ²	ml	Kg/m ²	g/cm ²	ml	Kg/m ²	g/cm ²	ml	Kg/m ²	g/cm ²	ml	Kg/m ²	g/cm ²	ml	Kg/m ²	g/cm ²
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,15	0,31	0,03	0,00	0,00	0,00	0,05	0,10	0,01	0,05	0,10	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,20	0,41	0,04	0,00	0,00	0,00	0,10	0,20	0,02	0,10	0,20	0,02	0,05	0,10	0,01	0,00	0,00	0,00
15	0,25	0,51	0,05	0,05	0,10	0,01	0,10	0,20	0,02	0,10	0,20	0,02	0,05	0,10	0,01	0,00	0,00	0,00
20	0,30	0,61	0,06	0,05	0,10	0,01	0,10	0,20	0,02	0,10	0,20	0,02	0,10	0,20	0,02	0,00	0,00	0,00
25	0,35	0,71	0,07	0,05	0,10	0,01	0,15	0,31	0,03	0,10	0,20	0,02	0,10	0,20	0,02	0,00	0,00	0,00
30	0,40	0,81	0,08	0,05	0,10	0,01	0,20	0,41	0,04	0,10	0,20	0,02	0,10	0,20	0,02	0,00	0,00	0,00
35	0,40	0,81	0,08	0,10	0,20	0,02	0,20	0,41	0,04	0,10	0,20	0,02	0,15	0,31	0,03	0,00	0,00	0,00
40	0,40	0,81	0,08	0,10	0,20	0,02	0,20	0,41	0,04	0,10	0,20	0,02	0,20	0,41	0,04	0,00	0,00	0,00
45	0,45	0,92	0,09	0,10	0,20	0,02	0,25	0,51	0,05	0,10	0,20	0,02	0,20	0,41	0,04	0,00	0,00	0,00
50	0,45	0,92	0,09	0,10	0,20	0,02	0,25	0,51	0,05	0,10	0,20	0,02	0,20	0,41	0,04	0,00	0,00	0,00
55	0,50	1,02	0,10	0,10	0,20	0,02	0,25	0,51	0,05	0,10	0,20	0,02	0,20	0,41	0,04	0,00	0,00	0,00
60	0,50	1,02	0,10	0,10	0,20	0,02	0,30	0,61	0,06	0,10	0,20	0,02	0,20	0,41	0,04	0,00	0,00	0,00

APÊNDICE D – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Tabela D.1 - Ensaio de resistência à compressão axial.

Corpos de prova	Diâmetro 1 (D1)	Diâmetro 2 (D2)	Média (D1/D2)	Área (mm ²)	Área (m ²)	Altura (H)	Altura (H)	Carga (N)	Carga (kN)	Tensão (kN/m ²)	MPa
1	100,59	100,8	100,70	7963,53	0,008	193,48	193,8	249820	249,82	31370,51	31,37
2	100,01	100,03	100,02	7857,12	0,0079	191,72	191,8	249752	249,75	31786,70	31,79
3	99,75	99,66	99,71	7807,79	0,0078	194,27	194,23	243535	243,54	31191,29	31,19
4	100,22	99,9	100,06	7863,41	0,0079	196,08	195,8	236363	236,36	30058,59	30,06
5	99,7	99,97	99,84	7828,08	0,0078	194,95	195	242152	242,15	30933,75	30,93
6	100,33	100,49	100,41	7918,52	0,0079	197,6	197,7	239444	239,44	30238,49	30,24
										MÉDIA=	30,93

APÊNDICE F – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE SEGUNDO A NORMA NBR 9779:2012

Tabela F.1 - Ensaio 1, ascensão de água por capilaridade.

CP	Φ (cm)	Área (cm ²)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Peso seco (g)	3h Peso (g)	6h Peso (g)	24h Peso (g)	48h Peso (g)	72h Peso (g)	Massa absorvida (g)	Capilaridade (g/cm ²)
REF	9,9	76,98	19,7	1516,44	3546	3551	3553	3561	3568	3571	25	0,32
A1	10	78,54	19,6	1539,38	3495	3495	3495	3495	3495	3495	0	0,00
B1	9,9	76,98	19,6	1508,75	3544	3544	3544	3547	3550	3553	9	0,12
C1	10	78,54	19,4	1523,67	3499	3499	3499	3499	3499	3499	0	0,00
D1	10	78,54	20	1570,80	3579	3579	3579	3579	3579	3579	0	0,00

Tabela F.2 - Ensaio 2, ascensão de água por capilaridade.

CP	Φ (cm)	Área (cm ²)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Peso seco (g)	3h Peso (g)	6h Peso (g)	24h Peso (g)	48h Peso (g)	72h Peso (g)	Massa absorvida (g)	Capilaridade (g/cm ²)
REF	9,9	76,98	19,7	1516,44	3546	3551	3553	3561	3568	3571	25	0,32
A2	9,9	76,98	19,9	1531,84	3562	3562	3562	3567	3570	3571	9	0,12
B2	10	78,54	19,4	1523,67	3417	3417	3417	3424	3427	3429	12	0,15
C2	10	78,54	19,9	1562,94	3566	3566	3566	3566	3566	3566	0	0,00
D2	9,9	76,98	20	1539,54	3569	3569	3569	3569	3569	3569	0	0,00

Tabela F.3 - Ensaio 3, ascensão de água por capilaridade.

CP	Φ (cm)	Área (cm ²)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Peso seco (g)	3h Peso (g)	6h Peso (g)	24h Peso (g)	48h Peso (g)	72h Peso (g)	Massa absorvida (g)	Capilaridade (g/cm ²)
REF	9,9	76,98	19,7	1516,44	3546	3551	3553	3561	3568	3571	25	0,32
A3	9,9	76,98	20	1539,54	3551	3551	3551	3555	3557	3560	9	0,12
B3	9,9	76,98	19,8	1524,14	3507	3507	3507	3512	3516	3520	13	0,17
C3	10	78,54	20	1570,80	3555	3555	3555	3555	3555	3555	0	0,00
D3	10	78,54	20	1570,80	3540	3540	3540	3540	3540	3540	0	0,00