

FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

TATIANA REGINA DA SILVA SIMÃO



Proteger para preservar:

**Sistemas de proteção de superfície de concreto aparente
do patrimônio da arquitetura moderna brasileira**

**SÃO PAULO
2023**

FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

TATIANA REGINA DA SILVA SIMÃO



Proteger para preservar:

**Sistemas de proteção de superfície de concreto aparente
do patrimônio da arquitetura moderna brasileira**

**SÃO PAULO
2023**

TATIANA REGINA DA SILVA SIMÃO

PROTEGER PARA PRESERVAR:

**Sistemas de proteção de superfície de concreto aparente do patrimônio
da arquitetura moderna brasileira**

Versão Corrigida

Tese apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo para obtenção de título de Doutora em Arquitetura.

Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura

Orientadora: Prof.^a Dra. Claudia Terezinha 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.

Catálogo na Publicação
Serviço Técnico de Biblioteca
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo

Simão, Tatiana Regina da Silva
PROTEGER PARA PRESERVAR: Sistemas de Proteção de Superfície do Concreto Aparente do Patrimônio da Arquitetura Moderna Brasileira / Tatiana Regina da Silva Simão; orientador Claudia T. de Andrade Oliveira. - São Paulo, 2023. 367 p.

Tese (Doutorado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura.

1. Conservação do Patrimônio. 2. Concreto Aparente. 3. Proteção de Superfície. I. Oliveira, Claudia T. de Andrade, orient. II. Título.

Nome: Tatiana Regina da Silva Simão

Título: Proteger para preservar: Sistemas de proteção de superfície de concreto aparente do patrimônio da arquitetura moderna brasileira

Tese de Doutorado 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 Doutora em Arquitetura. Área de concentração: Tecnologia da Construção.

Aprovada em:

Banca examinadora

Orientadora: Profa. Dra. Claudia Terezinha de Andrade Oliveira
Instituição: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo - FAUUSP
Julgamento: Aprovada

Prof. Dr. Claudio Vicente Mitidieri Filho
Instituição: Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo - IPT
Julgamento: Aprovada

Prof. Dr. Marcos Crivelaro
Instituição: Faculdade de Tecnologia de São Paulo - FATEC-SP
Julgamento: Aprovada

Prof(a). Dr(a). Maria Augusta Justi Pisani
Instituição: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo Mackenzie
Julgamento: Aprovada

Prof(a). Dr(a). Valdecir Angelo Quancioni
Instituição: Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo - IPT
Julgamento: Aprovada

Dedico este trabalho, com todo amor e gratidão ao meu querido esposo e eterno companheiro Sílvio, por todo seu carinho, paciência, compreensão e constante apoio em todos os momentos da minha vida.

Aos meus filhos Kauê e Kaique por serem a luz da minha vida.

As pessoas que foram referências na minha vida, meus avós Eunice e Mehrez e meu pai José Andirás (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível sem o apoio e colaboração de algumas pessoas e instituições, por isso tenho muito a agradecer e como foram muitas pessoas importantes ao longo desta jornada peço desculpas caso esqueça de citar alguém, mas sintam-se agradecidos de coração.

Primeiramente a minha família principalmente meus amados esposo e filhos por todo apoio, sacrifícios e compreensão ao longo de todo o tempo do desenvolvimento deste trabalho. A minha querida tia Arli, por sempre incentivar a conclusão do mesmo e auxiliar a desestressar com sua animada conversa, conselhos e com sua companhia em passeios deliciosos.

À minha orientadora Professora Claudia T. de Andrade Oliveira por todas as horas de orientações, conversas e apoio ao longo destes anos, com certeza a conclusão deste trabalho só foi possível graças a toda paciência e auxílio.

Aos pesquisadores do grupo Conservafau, Carmem Saraiva, Renata Campiotto, Fábio Gallo e Rodrigo Vergili, pela acolhida, apoio e por disponibilizarem informações importantíssimas das pesquisas realizadas na elaboração do Plano de Gestão da Conservação do Edifício Vilanova Artigas.

Ao Instituto Federal São Paulo - IFSP, instituição de ensino onde trabalho, pelo apoio ao desenvolvimento profissional, com sua política de capacitação e liberação do uso dos laboratórios e dos técnicos, Edson Batista Ferreira e Rogério Andrade do Departamento de Construção Civil para a realização de parte dos estudos piloto. Aos diretores do departamento e coordenadores dos cursos por toda a compreensão e apoio na finalização do trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológico de São Paulo - IPT, primeiramente pelo acordo de desenvolvimento de pesquisas, através de seus pesquisadores responsáveis, Valdecir Angelo Quarcioni e Rafael Francisco Cardoso dos Santos, programa sem o qual não seria possível o desenvolvimento do programa experimental de laboratório realizado neste trabalho. Em segundo lugar, mas de fundamental importância, por

permitir a realização dos ensaios e a utilização dos laboratórios do e toda sua qualificada equipe de técnico, em especial Adriana de Araujo, Fábio Luiz Carossi, Thales Gomes Rosa, Leandro Augusto, Edwin Miranda, Sergio Soares de Lima, João Paulo Lacerda, Lucas Clementino do Nascimento, Karoline Mariana Goncalves entre tantos outro por todo o apoio na realização dos ensaios e discussões de resultados.

Aos pesquisadores do Laboratório de Caracterização Tecnológica – LCT da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, Carina Ulsen, Liz Zanchetta, Guilherme Nery, Gaspar Darin Filho e Juliana Antoniassi pelo auxílio nas orientações e definições das metodologias na realização dos ensaios exploratórios.

As empresas Mc-Bauchemie, Cortec, Sika e Viapol com seus profissionais que apoiaram o desenvolvimento das pesquisas doando produtos para a realização dos ensaios e compartilhando conhecimento adquiridos na área de proteção de superfície do concreto aparente, em especial ao Flavio Camargo Martim, Matheus Rocha da Silva, Giovanni Rogatto, Thiago Alves, Tuane Souza e Phelipe Gonçalves.

Com muito carinho a todos os professores que me ensinaram desde o ensino fundamental até o doutorado a ler e escrever até a arte de pesquisar e buscar caminhos para encontrar resultados consistentes para soluções dos problemas quer sejam de ordem técnica ou em alguns casos repassando para o campo pessoal.

Aos meus amigos e colegas de trabalho, por diversas vezes escutarem minhas aflições e angústia nos momentos difíceis no desenvolvimento do trabalho.

“O que vale na vida não é o ponto de partida e sim a caminhada. Caminhando e semeando, no fim, terás o que colher.” (CORALINA, 2012, p. 28).

“Eu sou aquela mulher a quem o tempo muito ensinou. Ensinou a amar a vida. Não desistir da luta. Recomeçar na derrota. Renunciar a palavras e pensamentos negativos. Acreditar nos valores humanos. Ser otimista.” (CORALINA, 2012, p. 102).”

SIMÃO, T. R. S. Proteger para preservar: Sistemas de proteção de superfície de concreto aparente do patrimônio da arquitetura moderna brasileira. 2023. 367 p. Tese (Doutorado) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

RESUMO

Edifícios da Arquitetura Moderna executados com estruturas de concreto armado aparente compõem um vasto acervo do patrimônio cultural. Alguns edifícios atingiram níveis preocupantes de deterioração devido à corrosão das armaduras por carbonatação, necessitando de intervenções emergenciais que têm ensejado questionamentos sobre perdas da autenticidade material e desempenho técnico pouco satisfatório. Portanto, o objetivo foi investigar o efeito de produtos e sistemas de proteção de superfície, aplicados por meio de técnicas pouco invasivas no concreto aparente com características do patrimônio da Arquitetura Moderna, compostos por: inibidor de corrosão orgânico de migração, realcalinizante químico e hidrofugante. A pesquisa exploratória combinou abordagens qualitativas e quantitativas, ensaios em campo (superfície de concreto aparente carbonatado, com 50 anos de serviço e exposta ao intemperismo) e em laboratório (corpos de prova de concreto carbonatado e com armadura corroída), buscando aproximações ao cenário de intervenção real. Ensaios em campo apontaram variações do potencial de corrosão para medidas menos negativas, com destaque para o inibidor de corrosão 1 à base de aminoalcool e sais de amino álcool (variação $> 50\text{mV}$). Medidas feitas com colorímetro tristímulo indicaram que o concreto sem tratamento apresentou variações maiores das diferenças colorimétricas ($\Delta E > 6$ – diferença grande) do que regiões avaliadas antes e após aplicação dos tratamentos. Os resultados de absorção de água pelo método do cachimbo apresentam grande dispersão, no entanto as regiões com a aplicação de hidrofugantes à base de silano e amina (absorção nula) e a área sem tratamento com a maior absorção de água ($0,08 \text{ mL/cm}^2$) apresentaram resultados consistentes. Ensaios em laboratório apresentaram variações do potencial de corrosão, para valores menos negativos, da ordem de 360 mV para o concreto tratado com hidrofugante à base de silano e amina e de 240 mV para o concreto tratado com inibidor 1, resultando na reclassificação da probabilidade de corrosão para $< 10\%$ e incerta, respectivamente. A absorção de água medida pelo método do cachimbo em corpos de prova indicou resultados menos dispersos do que os de campo. As propriedades do concreto (resistência à compressão, características da microestrutura) não foram significativamente afetadas pelos produtos. Na observação ao microscópio eletrônico de varredura da superfície corroída da barra de aço do concreto tratado com inibidor de corrosão 1 foi identificada redução da relação atômica O/Fe, medida por Espectroscopia

de Raio X de Energia Dispersiva, o que sugere a formação de uma possível camada protetiva. Há evidências de que os inibidores de corrosão penetram no concreto em profundidades compatíveis com o cobrimento das armaduras dos edifícios da Arquitetura Moderna. A profundidade de penetração dos inibidores de corrosão foi medida por um método desenvolvido nesta tese, usando solução alcoólica de ninidrina. A pesquisa propiciou um avanço no entendimento da ação desses produtos, sugerindo a adequação das técnicas de aplicação à conservação do concreto aparente do patrimônio da Arquitetura Moderna exposto ao intemperismo.

Palavras-chave: conservação do patrimônio; concreto aparente e proteção de superfície.

ABSTRACT

Buildings of Modern Architecture executed with exposed reinforced concrete structures make up a vast collection of cultural heritage. Some buildings have reached worrying levels of deterioration due to corrosion of the reinforcements by carbonation, requiring emergency interventions that have given rise to questions about loss of material authenticity and unsatisfactory technical performance. Therefore, the objective was to investigate the effect of surface protection products and systems, applied through minimally invasive techniques on exposed concrete with characteristics of the heritage of Modern Architecture, composed of: organic migration corrosion inhibitor, chemical realkalinizer and water repellent. The exploratory research combined qualitative and quantitative approaches, tests in the field (surface of exposed carbonated concrete, with 50 years of service and exposed to weathering) and in the laboratory (test specimens of carbonated concrete and with corroded reinforcement), seeking approximations to the scenario of actual intervention. Field tests showed variations in the corrosion potential for less negative measurements, with emphasis on corrosion inhibitor 1 based on aminoalcohol and aminoalcohol salts ($> 50\text{mV}$). Measurements made with a tristimulus colorimeter indicated that the untreated concrete showed greater variations in colorimetric differences ($\Delta E > 6$ – large difference) than the regions evaluated before and after application of the treatments. The results of water absorption by the pipe method show great dispersion, however the regions with the application of hydrophobic agents based on silane and amine (zero absorption) and the untreated area with the highest water absorption (0.08 mL/ cm^2) presented consistent results. Laboratory tests showed variations in the corrosion potential, for less negative values, of the order of 360 mV for concrete treated with a silane and amine-based waterproofing agent and 240 mV for concrete treated with inhibitor 1, resulting in the reclassification of the probability of corrosion to $< 10\%$ and uncertain, respectively. The water absorption measured by the pipe method in specimens indicated less dispersed results than the field results. Concrete properties (compressive strength, microstructure characteristics) were not significantly affected by the products. In the scanning electron microscope observation of the corroded surface of the steel bar of the concrete treated with corrosion inhibitor 1, a

reduction in the O/Fe atomic ratio was identified, measured by Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, which suggests the formation of a possible protective layer. There is evidence that corrosion inhibitors penetrate the concrete at depths compatible with the covering of reinforcement in Modern Architecture buildings. The depth of penetration of corrosion inhibitors was measured by a method developed in this thesis, using alcoholic ninhydrin solution. The research provided a breakthrough in the understanding of the action of these products, suggesting the suitability of the application techniques for the conservation of apparent concrete of the heritage of Modern Architecture exposed to weathering.

Keywords: heritage conservation; exposed concrete and surface protection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Efeito visual fragmentado das empenas do edifício Vilanova Artigas após as obras de recuperação emergencial realizadas entre os anos de 2012-2015. Esquerda - Fachada Sudoeste do edifício Vilanova Artigas e a direita quina das fachadas Noroeste e Sudoeste.....	28
Figura 2: Detalhe (esquerda) e ampliação (direita) pilar da fachada Sudoeste do Edifício Vilanova Artigas com indicação de mancha marrom avermelhada de produtos de corrosão aparecendo na junção entre o concreto original e a argamassa de reparo executado na intervenção realizada entre os anos de 2012 e 2015. As manchas já eram observáveis, em exames visuais, um ano após o final da obra de recuperação do concreto. Em toda a extensão das empenas do edifício, com cerca de 3.000 m ² , foram localizadas mais de 400 manchas de produtos de corrosão, em vistorias feitas entre 2015 e 2017.	29
Figura 3: Imagens de: (a) Formas e cimbramento do pilar externo registradas em visita à obra em 1967, durante a aula de cálculo estrutural do Professor Figueiredo Ferraz e (b) perspectiva das fôrmas e cimbramento das lajes e vigas internas do edifício.....	40
Figura 4: Aspecto pixelado e fragmentado dos reparos executados na intervenção realizada no edifício Vilanova Artigas entre 2012 e 2015. Fotos à esquerda e a direita superior fachada sudoeste e foto a direita inferior quina das fachadas sudoeste e sudeste do edifício FAUUSP. ...	48
Figura 5: Macro etapas do processo de conservação.....	50
Figura 6: Residencial Habitat 67, Montreal (a) vista do complexo; (b) detalhe do reparo na fachada de uma unidade habitacional.	55
Figura 7: Edifício de circulação e serviços do Sesc Pompéia: (a) vista geral do edifício, (b) detalhe de reparos pontuais executados em diferentes intervenções executados com argamassa industrializada.	55
Figura 8: Empena SO do edifício Vilanova Artigas após intervenção executada: (a) ponto de corrosão na união da argamassa de reparo e concreto original e manchas de umidade na região ao redor da argamassa de reparo; (b) fissuras na argamassa de reparo.	63
Figura 9: MASP na década de (a) 1980 e (b) em 2018, antes e depois das intervenções executadas no concreto das vigas e pilares, realizadas em 1989.....	65
Figura 10: Edifícios em concreto aparente do Sesc Pompéia e detalhes do reservatório da caixa d'água com seu acabamento remetendo às rendas do período que Lina esteve na Bahia.....	67
Figura 11: Detalhe das formas para moldagem do concreto do reservatório d'água do Sesc Pompeia, sistema desenvolvido pela Lina Bo Bardi para homenagear o arquiteto mexicano Luís Barragán e remeter a memória das rendeiras cajazeiras.....	67
Figura 12: Edifício do Pentágono: (a) vista das paredes após a recuperação do concreto aparente e (b) aparência do concreto antes (esquerda) e depois (direita) da aplicação da camada final de silicato de potássio.	70
Figura 13: Edifício do New York Hall of Science: (a) superfície do concreto aparente após recuperação e (b) detalhe das armaduras corroídas durante os trabalhos de conservação do concreto.....	71
Figura 14: Fundación Joan Miró. À esquerda: fachada principal do edifício. À direita: detalhes da superfície do concreto das fachadas com pintura.....	72
Figura 15: Escalas dos componentes (sólidos e poros) do concreto armado.	79

Figura 16: Acima: Imagens geradas pelo escaneamento a laser das fachadas do edifício Vilanova Artigas.....	80
Figura 17: Fachada Noroeste com a identificação das áreas reparadas na intervenção de 2012-2015.	81
Figura 18: Intervalos das espessuras de cobrimento das armaduras das empenas, a partir de 393 medidas feitas com detector de metais (covermeter) nas empenas NE, SE, SO. Os resultados dos levantamentos da empena NO estavam incompletos, portanto, não foram apresentados.	83
Figura 19: Imagens de: (a) Fixação da câmara para o teste com o poroscópio. (b) Ampliação da área porosa em concreto para fixar a câmara do poroscópio. (c) Cachimbo fixado na fachada.....	84
Figura 20: Planta de cobertura do edifício Vilanova Artigas com a indicação dos locais de extração de testemunhos (a) Empena NE (b) Empena NO.	87
Figura 21: Testemunhos extraídos das empenas: (a) à esquerda empena NO; (b) à direita empena NE. A seta indica o sentido da movimentação da máquina no momento da extração do testemunho. A extremidade (A) equivale à face externa das empenas NO (T1 e T2) e NE (T3 e T4) respectivamente.....	88
Figura 22: Imagem microscópica do concreto da empena da Fachada Noroeste, com presença de núcleos anidro de clínquer e escória.....	94
Figura 23: Imagem microscópica do concreto das empenas Noroeste e Nordeste, indicando presença de pirita (FeS ₂).....	95
Figura 24: Cristais de C-S-H de amostra de concreto extraída do edifício Vilanova Artigas, edifício com estrutura de concreto com 50 anos de serviço.	95
Figura 25: Imagem de: (a) micromassa de C-S-H densa com algumas placas de portlandita (CH), etringita e aluminatos de cálcio hidratados (b) Detalhe da imagem anterior (quadrado vermelho) mostrando a portlandita (CH), amostra de concreto extraída do edifício Vilanova Artigas, edifício com estrutura em concreto com mais de 50 anos.	96
Figura 26: Visualização da seção fraturada de MEV, CP retirado da região carbonatada do testemunho extraído da empena NO.....	96
Figura 27: Visualização da seção polida na MEV. CP retirado da região carbonatada do testemunho extraído da empena NE.	97
Figura 28: Visualização da seção fraturada de MEV, CP retirado da região carbonatada do testemunho extraído da empena NE.....	98
Figura 29: Amostras de concreto, carbonatado e não carbonatado, em ensaio de porosimetria de mercúrio com volume de mercúrio introduzido acumulado em relação ao diâmetro dos poros contidos na amostra, retiradas da empena NE.	99
Figura 30: Amostras de concreto, carbonatado e não carbonatado, em ensaio de porosimetria de mercúrio com volume de mercúrio introduzido acumulado em relação ao diâmetro dos poros contidos na amostra, retiradas da empena NO.....	100
Figura 31: Representação esquemática do mecanismo de carbonatação.	103
Figura 32: Comparação entre concreto carbonatado e não carbonatado quanto a absorção por imersão e índice de vazios.	104
Figura 33: Modelo de corrosão descrito por Tuutti (1982) com modificações de Bertolini (2010). As fotos ao lado trazem evidências características das duas fases do processo corrosivo.	105

Figura 34: Aspecto visual da superfície da armadura após aspersão da solução de fenolftaleína, a esquerda o concreto apresentou-se parcialmente carbonatado a direita o concreto apresentou-se carbonatado.	107
Figura 35: Classificação dos inibidores de corrosão.	119
Figura 36: Mecanismo de migração do inibidor de corrosão orgânico (OCI) depois da difusão do líquido e do vapor mostrando a adsorção final no metal formando uma camada protetiva.	120
Figura 37: Imagens de: (a) Ilustração simplificada do inibidor à base de aminoálcool, onde R1, 2, 3 e H ou grupo alquila OH grupo final da cauda (b) inibidor de carboxilato de amina, em que R1, 2, 3 é H ou grupo alquila OH grupo final da cauda.	121
Figura 38: Medida de taxa de corrosão em barra de aço em concreto carbonatado, o inibidor migratório aplicado após o início da corrosão.	122
Figura 39: Evolução da realcalinização química ao longo do tempo.	130
Figura 40: Resultados de resistência à compressão em corpos de prova de referencia, carbonatados e realcalinizados.	131
Figura 41: Classificação dos sistemas de proteção de superfície para concreto.	134
Figura 42: Interação e ângulo de contato entre a água e a superfície do concreto (a) concreto não tratado, superfície hidrofílica ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$) (b) concreto tratado, superfície hidrofóbica ($\alpha > 90^\circ$).	135
Figura 43: Estrutura de hidrofugantes à base de silicone.	136
Figura 44: Representação esquemática de penetração de tratamentos de superfície nos poros do concreto.	136
Figura 45: Diagrama de representação da aderência química dos agentes hidrofugantes ao substrato de concreto.	138
Figura 46: Estudo piloto com aplicação de ninidrina em CP de concreto com aplicação de inibidor de corrosão a base de amina.	144
Figura 47: Aspersão da ninidrina na face interna do CP com inibidor 1 nas 3 formulações, 1º terço o comercial, 2º terço solução a água e 3º terço solução a etanol realizada em temperatura ambiente.	145
Figura 48: Aspersão da ninidrina, em duas aplicações, na face externa e interna do CP com inibidor 2 nas 3 formulações, 1º terço o comercial, 2º terço solução em água e 3º terço solução em etanol 0,08g/20 ml, com avaliação realizada após aquecimento da superfície com ar quente em velocidade média proveniente de secador de cabelo após aplicação cada aplicação do reagente.	146
Figura 49: Aspersão da ninidrina no pó de concreto com inibidor de corrosão 1 (I1) a base de amina em três profundidades, de 0-5 mm, de 5 a 10 mm e de 10 a 15 mm a) sem reagente, b) com aplicação dos reagentes apenas 1 vez, c) aplicação dos reagentes 2 vezes após secagem completa da primeira aplicação.	147
Figura 50: Sequência de limpeza do pilar 3 (a) limpeza com escova de aço a seco, b) pilar após escovação com escova de cerdas de nylon e enxague abundante com água e c) limpeza com vapor (d) pilar úmido após enxague abundante e por fim (e) pilar seco após todo o procedimento de limpeza.	150

Figura 51: Armadura exposta: (a) detalhe da armadura antes da limpeza do pilar (b) armadura após limpeza do pilar (c) e (e) detalhes da armadura exposta antes da escarificação e limpeza com a mini retífica e (d) Visão geral face Norte do Pilar 3 com identificação da área da armadura.....	150
Figura 52: Detalhe da armadura limpa e escarificada (a) com indicação de espessura da armadura 10 mm) e (b) profundidade escarificada (10,75 mm).....	151
Figura 53: Imagens de (a) Localização e marcação das armaduras (b) detector de metais D-TECT 150 da Bosch usado para localizar as armaduras e espessura de revestimento	151
Figura 54: Delimitação das áreas com giz para aplicação dos produtos em (a) face Norte; em (b) face Leste e em (c) face Oeste.....	152
Figura 55: Equipamento Positector DPM v. 3.4 da DeFelsko para medições de umidade relativa, temperatura da superfície e temperatura do ar e temperatura de ponto de orvalho.	153
Figura 56: Equipamento de medida de umidade superficial do concreto.....	154
Figura 57: Equipamento utilizado na medição de potencial de corrosão no pilar 3 e o eletrodo de cobre com solução de sulfato de cobre.....	154
Figura 58: Imagens de (a) colorímetro tristímulo Capsure RM200 da X-Rite e (b) máscara em superfície preta com abertura de 8 x 8 cm para realização das leituras na superfície.	156
Figura 59: Espaço de cor L* a*b*.....	156
Figura 60: Síntese das atividades desenvolvidas em campo no pilar 3 do edifício Vilanova Artigas.	162
Figura 61: Procedimentos de limpeza das barras de aço e moldagem e cura dos CPs de Ø 5 x 10 cm com armadura.....	166
Figura 62: Procedimento de preparação da pintura carbonatação dos CPs com aço Ø 5 x 10 cm..	167
Figura 63: Procedimento de preparação da pintura carbonatação dos CPs com aço Ø 5 x 10 cm..	167
Figura 64: Averiguação da profundidade de carbonatação do concreto em CP de sacrifício, inicialmente com o pó do concreto retirado com a furadeira e posteriormente rompendo o mesmo a tração por compressão diametral e aspergindo fenolftaleína.	168
Figura 65: Imagens de: (a) ciclo de molhagem e secagem para acelerar o processo de corrosão do aço com (b) acompanhamento da medição do potencial de corrosão; (c) CP rompido a compressão para observar barra de aço oxidada.	169
Figura 66: Fluxograma dos procedimentos de moldagem e investigação do efeito dos produtos nas armaduras com corrosão em corpos de prova com aço.	172
Figura 67: Esquema de separação de amostra em tubo contendo a fase estacionária (FE), ocorrendo a separação da amostra em cromatografia gasosa.....	174
Figura 68: Coleta de amostra no concreto (a) início da furação do CP com na profundidade de 0 -5 mm (b) furadeira de alto impacto com recipiente para coletar pó do concreto e (c) CP com as furações completas nas 3 profundidades.....	175
Figura 69: Concentração dos principais compostos do Inibidor de Corrosão 1 – I1 em 12,5 minutos de análise de cromatografia gasosa.	176
Figura 70: Concentração dos principais compostos do Inibidor de corrosão 2 – I2 em 12,5 minutos de análise de cromatografia gasosa.	177
Figura 71: Concentração dos principais compostos do Hidrofugante com amina - HA em 22,5 minutos de análise de cromatografia gasosa.	177

Figura 72: Corpos de prova com realcalinizante envolvidos em manta acrílica e filme plástico, para comparar com a técnica de aplicação por pincel, indicada pelo fabricante.	182
Figura 73: Fluxograma dos procedimentos de moldagem e investigação do efeito dos produtos e profundidade de penetração nos corpos de prova sem aço.	187
Figura 74: Imagem das áreas do Pilar 3 do edifício Vilanova Artigas onde foram realizados os ensaios de campo: (a) face Norte, (b) face Leste e (c) face Oeste.	188
Figura 75: Intervalos das espessuras de cobertura das armaduras do pilar 3 faces Norte, Leste e Oeste, do edifício Vilanova Artigas, com dados de 88 medidas feitas com detector de metais (BOSH-D-TECT150), em 2021.	191
Figura 76: Gráfico de umidade da superfície do concreto.	194
Figura 77: Curvas da distribuição da probabilidade acumulada das medidas de potencial na superfície do Pilar P3, variando com a aplicação dos produtos/sistemas nas áreas de A1 a A10.	201
Figura 78: Média das leituras de potencial de corrosão antes e depois de aplicação de produtos / sistemas no pilar 3 do edifício Vilanova Artigas.	204
Figura 79: Gráfico da absorção de total água (mL/cm ² , 1 hora de ensaio) das áreas do pilar P3 pelo método EN16203:2013, usando o método do cachimbo / tubo de Karsten.	210
Figura 80: Área A3 da leitura de absorção de água pelo método do cachimbo (tubo de karsten) em (a) região da leitura L1, (b) concreto com aspecto mais poroso.	211
Figura 81: Leitura da absorção de águas da área A3 (a) em argamassa de reparo com fissura e (b) o detalhe da área ainda com o cachimbo.	212
Figura 82: Resultados do ensaio com o cachimbo no pilar P3: A1 com inibidor 1 (I1); A2 com inibidor de corrosão 2 (I2); A3 com realcalinizante, inibidor de corrosão 1 (I1) e hidrofugante à base de amina (HA) aplicados sobre concreto e sobre reparo; A8 com hidrofugante à base de silano e siloxano; A10 concreto de referência.	213
Figura 83: Gráficos das análises paramétricas por áreas dos ensaios realizados no pilar 3 do edifício Vilanova Artigas.	214
Figura 84: Gráficos de média de potencial de corrosão dos corpos de prova sem e com a aplicação de produtos / sistemas de proteção de superfície.	220
Figura 85: Imagens de (a) corpo de prova com concreto rompido a compressão diametral para observação da barra e do concreto e (b) aspersão de solução de fenolftaleína para confirmação de áreas carbonatadas.	221
Figura 86: Inspeção visual da barra de aço dos dois lados após extração do concreto com aplicação de hidrofugante a base de silano com inibidor de corrosão (HA).	221
Figura 87: Arranjo experimental do ensaio de absorção de água pelo ensaio com o cachimbo.	223
Figura 88: Leituras individuais e média da absorção total de água pelo método do cachimbo dos corpos de prova sem e com produtos/sistemas.	224
Figura 89: Resultados do ensaio com o cachimbo em CPs tratados com inibidores de corrosão (I1 e I2) e CPs de referência de concreto carbonatado (Ref carb) e não carbonatado (Ref não carb), com indicação dos coeficientes de absorção (coeficientes angulares das retas).	225
Figura 90: Teste expedito colorimétrico com 2 soluções de ninidrina, acima solução de spray comercial, abaixo solução elaborada em laboratório com 1,2 g de ninidrina e 100 ml de etanol absoluto e ao centro pó de concreto com inibidor sem reagente e concreto referência	

carbonatado sem inibidor com reagente de ninidrina comercial. Em (a) reação colorimétrica do pó de concreto com inibidor 1 com as soluções de ninidrina e (b) Reação colorimétrica do concreto com inibidor 2 com as soluções de ninidrina.	230
Figura 91: teste expedito colorimétrico com 2 soluções de ninidrina, acima solução de spray comercial, abaixo solução elaborada em laboratório com 1,2 g de ninidrina e 100 ml de etanol absoluto e ao centro pó de concreto com inibidor sem reagente e concreto referência carbonatado sem inibidor com reagente de ninidrina comercial. Em (a) reação colorimétrica do pó de concreto com realcalinizante + inibidor 1 + hidrofugante a base de silano e amina com a solução de ninidrina e (b) reação colorimétrica do pó de concreto com realcalinizante + inibidor 2 + hidrofugante a base de silano e amina com a solução de ninidrina.....	231
Figura 92: Imagens de: (a) reação colorimétrica do inibidor 1 com amina a solução de ninidrina com a solução tampão de ácido acético na solução de pó de concreto em água destilada (b) reação colorimétrica do sistema de proteção de superfície composta por realcalinizante + inibidor 1 + hidrofugante com amina a solução de ninidrina na solução de pó de concreto em água destilada.	233
Figura 93: Imagens de: (a) reação colorimétrica do inibidor 2 com amina e a solução de ninidrina na solução de pó de concreto em água destilada (b) reação colorimétrica do sistema de proteção de superfície composta por realcalinizante + inibidor 2 + hidrofugante com amina e a solução de ninidrina na solução de pó de concreto em água destilada.	234
Figura 94: Teste colorimétrico da solução de ninidrina aspergidas sobre solução de concreto com produtos aplicado sobre papel cromatográfico. Na parte superior da figura são apresentadas as referências com as reações do concreto sem tratamento, água e dos Inibidores (I1 e I2) na parte inferiores são as soluções de concreto com inibidor 1 e inibidor 2 nas 3 profundidades de avaliação.	235
Figura 95: Teste colorimétrico da solução de ninidrina aspergidas sobre solução de concreto com sistemas aplicado sobre papel cromatográfico. Na parte superior da figura são apresentadas as referências com as reações do concreto sem tratamento, água, os Inibidores (I1 e I2), o realcalinizante (R) e o hidrofugante com amina (HÁ) na parte inferiores são: as soluções de concreto com os sistemas com R + I1 + HA a esquerda e com R + I2 + HA a direita nas 3 profundidades de avaliação.....	235
Figura 96: Aspersão dos reagentes colorimétricos (a) CPs referência não carbonatados e (b) CPs referências carbonatados. Nesses CPs não foram aplicados quaisquer produtos/sistemas estudados nesta pesquisa.	237
Figura 97: Em (a) 2 formas de aplicação, com pincel e com CP envolto em manta acrílica e filme plástico de PVC e aspersão dos reagentes de fenolftaleina e amarelo de alizarina GG em (b) manteve-se a aplicação com pincel, mas acrescentou-se o hidrofugante a base de silano e amina e os reagentes foram a fenolftaleina, amarelo de alizarina e água com corante líquido azul.	239
Figura 98: Reação colorimétrica com Inibidores de corrosão em a) inibidor 1, aplicação em pincel e em manta e b) inibidor 2, aplicação em pincel e em manta.	240
Figura 99: Reação colorimétrica com Inibidores de corrosão + hidrofugante (HA), ambos com aplicação com pincel a) inibidor 1 + hidrofugante HA, e b) inibidor 2 + hidrofugante HA.	241
Figura 100: Aspersão de água com corante nos CPs com (a) hidrofugante HA (silano e amina) e (b) hidrofugante HS (silano/siloxano), ambos com aplicação com pincel e manta.	242

Figura 101: CPs com realcalinizante, inibidor 1 e realcalinizante com inibidor 1 e hidrofugante (HA). Em (a) aspersão de fenolftaleína, amarelo de alizarina GG e ninidrina e em (b) aspersão de fenolftaleína, amarelo de alizarina GG, ninidrina e água com corante.	243
Figura 102: CPs com realcalinizante, inibidor 2 e realcalinizante com inibidor 2 e hidrofugante a base de silano e Amina (HA). Em (a) aspersão de fenolftaleína, amarelo de alizarina GG e ninidrina e em (b) aspersão de fenolftaleína, amarelo de alizarina GG, ninidrina e água com corante.....	244
Figura 103: Resistência a compressão dos corpos de prova sem e com produtos / sistemas de proteção de superfície.....	246
Figura 104: Ensaio de absorção por capilaridade segundo a NBR 9779:2012.....	248
Figura 105: Absorção de água por capilaridade dos corpos de prova sem e com produtos / sistemas de proteção de superfície.....	248
Figura 106: Representação das médias no diagrama de caixas (boxplot) das análises estatísticas dos resultados do ensaio de absorção por capilaridade, segundo a ABNT NBR 7997:2012.	250
Figura 107: Massa específica seca (ρ_s) dos corpos de prova sem e com produtos/sistemas de proteção de superfície.....	253
Figura 108: Absorção de água por imersão (%) dos corpos de prova sem e com produtos/sistemas de proteção de superfície.....	256
Figura 109: Índice de vazios (%) dos corpos de prova sem e com produtos/sistemas de proteção de superfície.	257
Figura 110: Amostras do concreto carbonatado e não carbonatado em ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio com volume de mercúrio introduzido acumulado e mercúrio introduzido em relação ao diâmetro dos poros contidos na amostra, retirado dos corpos de prova moldados em laboratório.....	258
Figura 111: Resultados de porosimetria de intrusão de mercúrio (a) volume máximo de intrusão de mercúrio e (b) porosidade ao mercúrio.	258
Figura 112: Microscopia óptica da barra de aço do CP do concreto de referência carbonatado com definição da área de análise na MEV.....	260
Figura 113: Microscopia óptica da barra de aço do corpo de prova carbonatado no qual foi aplicado o inibidor 1 com definição da área de análise na MEV.	261
Figura 114: Imagem de microscopia óptica da barra de aço extraída do concreto referência, Ref C5, que apresentou cerca de 30% de área corroída, com acúmulo moderado de produtos de corrosão. O detalhe delimita a área analisada na MEV.....	261
Figura 115: Barra de referência. Imagens da MEV com aumento de 100, 500, 1000 e 5000 vezes. Em (d), na parte superior, superfície do aço sem produtos de corrosão; na parte inferior produto típico de corrosão do aço.	262
Figura 116: Barra de referência. Análise da superfície da barra de referência em MEV e EDS.....	263
Figura 117: Barra de referência. Análise da superfície da barra de referência em MEV e EDS.....	264
Figura 118: Barra de referência. Análise da superfície da barra de referência em MEV e EDS.....	265
Figura 119: Barra inserida em concreto tratado com inibidor de corrosão 1 (I1). Imagem em microscopia óptica (a) e análise em MEV de (b) a (c) (ampliações de 1000X e 5000X). Em (d) análise de EDS.....	266

Figura 120: análise em MEV e EDS da barra com aplicação do inibidor de corrosão 1 na superfície do concreto.....	267
Figura 121: análise em MEV e EDS da barra do CP tratado com inibidor de corrosão 1.....	268
Figura 122: Gráficos de radar dos corpos de prova sem tratamentos de proteção de superfície não carbonatado e carbonatado.	272
Figura 123: Gráficos de radar dos corpos de prova com tratamentos de superfície utilizados de forma isolada.....	272
Figura 124: Gráficos de radar dos corpos de prova com aplicação de 2 produtos de proteção de superfície utilizados de forma associada.....	274
Figura 125: Gráficos de radar dos corpos de prova com aplicação de 3 produtos de proteção de superfície utilizados de forma associada.....	275

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Áreas das empenas e áreas dos reparos realizados na intervenção de 2012-2015.....	81
Tabela 2: Pontos de corrosão nas empenas levantados por observação visual (a olho nú e com o auxílio de binóculos). Condição registrada no primeiro semestre de 2016.	82
Tabela 3: Total de pontos de corrosão nos pilares externos. Condição registrada no primeiro semestre de 2016.	82
Tabela 4: Ensaios de caracterização do concreto das empenas do edifício Vilanova Artigas.	89
Tabela 5: resultados da determinação da resistência a compressão do concreto pela NBR 7680/2015.	90
Tabela 6: Valores médios em massa do traço do concreto endurecido do edifício Vilanova Artigas.	92
Tabela 7: Volume de mercúrio introduzido nas amostras das empenas do edifício Vilanova Artigas (ml/g)X 10 ⁻³	99
Tabela 8: Porosidade e diâmetro crítico das amostras retiradas das empenas e da viga de cobertura. Dados obtidos por meio do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, a partir das curvas $\Delta V/\Delta \log D$ versus diâmetro equivalente e porosidade acumulada versus diâmetro equivalente.....	101
Tabela 9: Resultados da determinação da profundidade da frente de carbonatação por empena.....	107
Tabela 10: Variação da espessura de cobrimento da armadura por empena.....	108
Tabela 11: Resultados das avaliações de taxa de corrosão e potencial de corrosão das empenas do edifício Vilanova Artigas.	109
Tabela 12: Caracterização dos materiais para execução do traço piloto em concreto.	142
Tabela 13: Resultados caracterização do concreto do edifício Vilanova Artigas e do traço piloto.	143
Tabela 14: Faixa de valores típicos de potencial de corrosão E_{corr} em campo para armadura de aço carbono para as condições do concreto do edifício Vilanova Artigas.	155
Tabela 15: Níveis de percepção das diferenças colorimétricas.	157
Tabela 16: Probabilidade de corrosão em função do potencial de corrosão.	170
Tabela 17: Demonstrativo dos quantitativos de corpos de prova moldados com aço.....	171
Tabela 18: Dados de quantidade e dimensão dos CPs por tipo de ensaio para avaliar alteração das propriedades e microestrutura do concreto.	185
Tabela 19: Dados de leituras de espessura de cobrimento da armadura pilar P3, face norte, do edifício Vilanova Artigas.	189
Tabela 20: Dados de leituras de espessura de cobrimento da armadura pilar P3, face leste, do edifício Vilanova Artigas.	189
Tabela 21: Dados de leituras de espessura de cobrimento da armadura pilar P3, face oeste, do edifício Vilanova Artigas.	190
Tabela 22: Resultados das médias de 10 leituras de umidade relativa do ar temperatura do ar, temperatura da superfície, temperatura de ponto de orvalho e a diferença entre a temperatura da superfície e do ponto de orvalho realizadas no pilar 3 do Edifício Vilanova Artigas.....	192
Tabela 23: Dados de média das leituras de umidade superficial das áreas do pilar 3, antes e depois do umedecimento, com e sem aplicação de produtos/sistemas.....	193

Tabela 24: Dados de medidas de potencial de corrosão E_{corr} (mV) nas áreas 1 (A1) e 2 (A2) do pilar P3, antes (a esquerda) e após a aplicação (a direita) dos inibidores de corrosão 1 (I1) e 2 (I2). Vista da face norte do pilar com a indicação das áreas A1 e A2.	196
Tabela 25: Dados de Medidas de potencial de corrosão E_{corr} (mV) das áreas 3 (A3) e 4 (A4) do pilar P3, antes (a esquerda) e após (a direita) a aplicação da associação do realcalinizante (R), inibidor 1 e 2 (I1 e I2) e hidrofugante à base de silano e amina (HA): R+I1+HA e R+I2+HA. Vista da face leste do pilar com a indicação das áreas A3 e A4.	197
Tabela 26: Dados de medidas de potencial de corrosão E_{corr} (mV) das áreas 5 (A5), 6 (A6) e 7 (A7) do pilar P3, antes (a esquerda) e após (a direita) a aplicação do realcalinizante (R) associado aos inibidores 1 e 2 (I1 e I2) ou isoladamente: R+I1, R+I2 e R. Vista da face leste do pilar com a indicação das áreas A5, A6 e A7.	198
Tabela 27: Dados de medidas de potencial de corrosão E_{corr} (mV) das áreas 8 (A8) e 9 (A9) do pilar P3, antes (a esquerda) e após (a direita) a aplicação do hidrofugante à base de silano/siloxano (HS) e do hidrofugante à base de silano e amina (HA). A área 10 (10) é a área do concreto de referência. Vista da face oeste do pilar com a indicação das áreas A8, A9 e A10.	199
Tabela 28: Resumo das medições feitas no pilar P3 em cada área de aplicação de produtos/sistemas: áreas (m ²), cobertura médio (barras horizontais e verticais), umidade média da superfície (%) após molhagem para realização das medidas de potencial; valores mínimos e máximos do potencial de corrosão (mV).	205
Tabela 29: Níveis de percepção das diferenças colorimétricas	206
Tabela 30: Resultados da avaliação colorimétrica da moda de 20 leituras colorimétricas das 10 áreas de estudo do pilar 3 antes da aplicação dos produtos / sistemas (algumas áreas regiões em concreto e em argamassa de reparo).	207
Tabela 31: Resultado da avaliação colorimétrica realizada com a moda de 20 leituras colorimétricas das 10 áreas estudadas do pilar 3 (sendo algumas áreas regiões em concreto e em argamassa de reparo), comparando-se as leituras colorimétricas antes e depois da aplicação dos produtos / sistemas.	209
Tabela 32: Valores médios das leituras de potencial de corrosão (E_{corr}) antes e após aplicação dos produtos/sistemas e reclassificação da probabilidade de corrosão.	220
Tabela 33: Intensidades dos compostos do I1 por profundidades de extração do concreto.	227
Tabela 34: Intensidades dos compostos do I2 por profundidades de extração do concreto.	227
Tabela 35: Intensidades dos compostos do I1 + HA por profundidades de extração do concreto.	227
Tabela 36: Intensidades dos compostos do I2 + HA por profundidades de extração do concreto.	228
Tabela 37: Leituras de profundidade de penetração de R e R+HA por técnica de aplicação (mm).	238
Tabela 38: Leituras de profundidade de penetração de I1 e I2 por técnica de aplicação (mm).	239
Tabela 39: Leituras de profundidade de penetração de I1 + HA e I2 + HA.	240
Tabela 40: Leituras de profundidade de penetração de hidrofugante a base de silano e amina (HA) e hidrofugante a base de silano e siloxano (HS).	241
Tabela 41: Leituras de profundidade de penetração de R + I1 e R + I1 + HA.	242
Tabela 42: Leituras de profundidade de penetração de R + I2 e R + I2 + HA.	243
Tabela 43: Resumo com dados de análise de variância dos CPs ensaiados à compressão com e sem aplicação de produtos/sistemas de proteção de superfície.	247

Tabela 44: Resumo com dados de análise de variância dos CPs ensaiados à compressão com e sem aplicação de produtos/sistemas de proteção de superfície.....	249
Tabela 45: Resultados do teste de Tukey para os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade, segundo ABNT NBR 7997:2012.....	250
Tabela 46: Resumo com dados de análise de variância da massa específica seca (ρ_s) (g/cm^3) dos CPs com e sem aplicação de produtos/sistemas de proteção de superfície.	251
Tabela 47: Resultados do teste de Tukey para os resultados de massa específica seca (ρ_s) (g/cm^3).	252
Tabela 48: Resumo com dados de análise de variância da absorção de água por imersão (%) dos CPs com e sem aplicação de produtos/sistemas de proteção de superfície.	254
Tabela 49: Resumo com dados de análise de variância do índice de vazios (%) dos CPs com e sem aplicação de produtos/sistemas de proteção de superfície.....	254
Tabela 50 Resultados do teste de Tukey para os resultados de absorção de água por imersão (%) dos CPs com e sem aplicação de produtos/sistemas de proteção de superfície	255
Tabela 51: Resultados do teste de Tukey para os resultados de índice de vazios (%) dos CPs com e sem aplicação de produtos/sistemas de proteção de superfície	256

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	27
1.1. JUSTIFICATIVA	30
1.2. HIPÓTESE.....	32
1.3. OBJETIVO.....	32
1.4. ABORDAGEM METODOLÓGICA.....	32
1.4.1. Pesquisa bibliográfica.....	33
1.4.2. Pesquisa documental	33
1.4.3. Consulta a arquivos pessoais.....	34
1.4.4. Programa experimental em laboratório.....	34
1.4.5. Programa experimental em campo.....	35
1.5. ESTRUTURAÇÃO DA TESE	36
2. DESAFIOS DA CONSERVAÇÃO DO CONCRETO APARENTE DO PATRIMÔNIO DA ARQUITETURA MODERNA BRASILEIRA	39
2.1. IMPORTÂNCIA E DESDOBRAMENTOS DO ATO DE TOMBAMENTO.....	41
2.1.1. Base teórico-metodológica	43
2.1.2. Abordagem projetual, escala do edifício e frequência das intervenções na conservação do concreto aparente	53
2.2. EDIFÍCIOS DA ARQUITETURA MODERNA EM CONCRETO APARENTE NO BRASIL	56
2.2.1. Edifício Vilanova Artigas	56
2.2.1.1. O material a ser preservado do Edifício Vilanova Artigas	57
2.2.1.2. Intervenções nas empenas.....	58
2.2.2. Edifício do MASP	63
2.2.3. SESC Pompéia.....	65
2.3. INICIATIVAS INTERNACIONAIS PARA CONSERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO DA ARQUITETURA EM CONCRETO APARENTE	70
2.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO	74
3. CONCRETO DO EDIFÍCIO VILANOVA ARTIGAS	76
3.1. ETAPAS DA INVESTIGAÇÃO.....	77
3.2. LEVANTAMENTOS DE ENSAIOS <i>IN LOCO</i> E AMOSTRAGEM.....	80
3.2.1. Mapeamento dos reparos.....	80
3.2.2. Levantamento de pontos de corrosão	81
3.2.3. Cobrimento das armaduras.....	83
3.2.4. Absorção de água e umedecimento das superfícies.....	84

3.2.5. Amostragem e profundidade de carbonatação	86
3.3. CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO.....	88
3.3.1. Resistência à compressão.....	90
3.3.2 Reconstituição do traço	92
3.3.3 Análise petrográfica e microscopia óptica	93
3.3.4. Microscopia Eletrônica de Varredura.....	95
3.3.5. Porosimetria de intrusão de mercúrio (PIM)	98
3.4. CONDIÇÃO DA ARMADURA.....	102
3.4.1. Determinação de profundidade de carbonatação	107
3.4.2. Ensaio eletroquímico.....	108
3.5. CONSIDERAÇÕES SOBRE A CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO DO EDIFÍCIO VILANOVA ARTIGAS.....	110
4. OS SISTEMAS DE PROTEÇÃO DE SUPERFÍCIE EM CONCRETOS PARA A CONSERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO MODERNO.....	114
4.1. INIBIDOR DE CORROSÃO	116
4.2. REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA.....	127
4.3. HIDROFUGANTE	133
5. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	141
5.1. ESTUDOS PILOTO.....	141
5.1.1. Definição do traço	142
5.1.2. Método para detecção de inibidor de corrosão no concreto	144
5.2. ENSAIOS EM CAMPO	148
5.2.1. Procedimento de limpeza do concreto do pilar	149
5.2.2. Divisão de áreas para aplicação dos produtos e localização das armaduras e espessura de cobrimento.	151
5.2.3. Leituras antes da aplicação dos produtos	153
5.2.4. Aplicação dos produtos	158
5.2.5. Leituras após aplicação dos produtos	161
5.3. ENSAIOS EM LABORATÓRIO	163
5.3.1. Planejamento dos ensaios e organização das atividades.....	164
5.3.1.1. Moldagem, preparação e condicionamento dos corpos de prova	165
5.3.2. Avaliação da ação dos produtos / sistemas	169
5.3.2.1. Avaliação dos efeitos dos produtos no processo de corrosão do aço	169
5.3.2.2. Medidas de absorção de água.....	173

5.3.3. Profundidade de penetração dos produtos / sistemas:.....	173
5.3.3.1. Técnica qualitativa para avaliar profundidade de penetração dos produtos	173
5.3.3.2. Técnicas expeditas para avaliação da profundidade de penetração dos produtos	180
5.3.4. alteração das propriedades e microestrutura do concreto	182
6. RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CAMPO	188
6.1. ESPESSURA DO COBRIMENTO	188
6.2. TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE, DO AR E DO PONTO DE ORVALHO E UMIDADE RELATIVA DO AR	192
6.3. UMIDADE SUPERFICIAL DO CONCRETO	193
6.4. POTENCIAL DE CORROSÃO	195
6.5. LEITURAS COLORIMÉTRICAS.....	206
6.6. ABSORÇÃO DE ÁGUA PELO CACHIMBO.....	210
6.7. SÍNTESE DOS ENSAIOS DE CAMPO	214
7. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO	219
7.1. AÇÃO DOS PRODUTOS/SISTEMAS.....	219
7.1.1. Potencial de Corrosão	219
7.1.2. Absorção de água pelo método do cachimbo.....	222
7.2. PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DOS PRODUTOS	226
7.2.1. Avaliação qualitativa com cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas....	226
7.2.2. Técnicas expeditas para avaliação da profundidade de penetração dos produtos	229
7.2.2.1. Teste colorimétricos com aspersão de soluções de ninidrina sobre pó extraído do concreto	229
7.2.2.2. Teste colorimétrico com solução tampão de ácido acético e solução de ninidrina.....	232
7.2.2.3. Teste colorimétrico em papel de cromatografia com solução de ninidrina.....	234
7.2.2.4. Aspersão de reagentes	236
7.3. ALTERAÇÃO DAS PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA DO CONCRETO.....	245
7.3.1. Resistência a compressão.....	245
7.3.2. Absorção de água por capilaridade	247
7.3.3. Massa específica, absorção de água e índice de vazios - MAV	251
7.3.4. Porosimetria de intrusão de mercúrio - PIM;.....	257
7.3.5. Microscopia óptica e Microscopia eletrônica de varredura	260
7.3.5.1. Microscopia óptica	260
7.3.5.2. Microscopia eletrônica de varredura - MEV.....	261
7.4. SÍNTESE DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO	270

8. CONCLUSÕES	276
8.1. CONCLUSÕES SOBRE OS ENSAIOS DE CAMPO	276
8.2. CONCLUSÕES SOBRE OS ENSAIOS DE LABORATÓRIO	278
8.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	281
8.4. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	283
9. REFERÊNCIAS	284
APÊNDICES	306
Apêndice 1 - Figura resumo dos resultados dos ensaios realizados nas empenas do edifício Vilanova Artigas.....	307
Apêndice 2 – Recomendações de recuperação das empenas com vistas na preservação do patrimônio	308
Apêndice 3 – Dados das medidas de potencial de corrosão das medidas realizadas em campo dividida por área antes e após aplicação dos produtos/sistemas.....	310
Apêndice 4 – Dados das medidas de potencial de corrosão e inspeção visual nos corpos de prova rompidos e barras corroídas.....	314
Apêndice 5 - Resultados da avaliação da resistência a compressão.....	354
ANEXOS	355
Anexo 1 – Carta Eng. José Carlos Figueiredo Ferraz	356
Anexo 2 – Testes de detecção de inibidores de corrosão no concreto	357

1. INTRODUÇÃO

Edifícios da Arquitetura Moderna do início da segunda metade do século XX, executados com estruturas de concreto armado aparente, no Brasil e no mundo, compõem um vasto acervo do patrimônio cultural. No entanto, alguns destes edifícios atingiram níveis preocupantes de deterioração devido a problemas graves de corrosão das armaduras por carbonatação.

As obras de conservação e reparo desse patrimônio arquitetônico, notadamente nas edificações protegidas por atos legais de tombamento, devem ser tratadas de acordo com princípios fundamentais do campo disciplinar do restauro.

No entanto, não são raros os exemplares que se encontram em condições precárias de conservação necessitando muitas vezes de obras de intervenção e reparo emergenciais, realizadas sem o apoio de pesquisas precedentes sobre os materiais e técnicas utilizadas na construção do edifício, agravadas pela falta de documentação que ampare as obras de intervenção.

O pequeno distanciamento temporal tem motivado reparos localizados, projetados e executados segundo a tecnologia empregada nas estruturas de concreto armado contemporâneas, sem considerar as especificidades do concreto e as características dos edifícios modernos, nem os valores culturais¹ a serem preservados.

Como resultado, intervenções de caráter emergencial e corretivo nos edifícios modernistas, com o uso de argamassas de reparo estrutural, têm ensejado questionamentos sobre as irrecuperáveis perdas da autenticidade material e a perda da unidade da obra em razão do aspecto fragmentado das grandes superfícies de concreto aparente (Figura 1) do edifício Vilanova Artigas, sede da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo - FAUUSP. Pinto e Moreira (2013) e Pinto e Moreira (2016) ressaltam que a descaracterização das superfícies arquitetônicas do patrimônio moderno leva à perda do valor histórico dessas

¹ Valores culturais, de acordo com EN 16853:2017 são entidades tangíveis e intangíveis de significado para as gerações presentes e futuras e esses valores podem ser de diferentes tipos, por exemplo: artísticos, simbólicos, históricos, sociais, econômicos, científicos, tecnológicos, etc.

edificações, consideradas testemunhas das práticas construtivas do concreto armado aparente usadas à época da sua produção.

Figura 1: Efeito visual fragmentado das empenas do edifício Vilanova Artigas após as obras de recuperação emergencial realizadas entre os anos de 2012-2015. Esquerda - Fachada Sudoeste do edifício Vilanova Artigas e a direita quina das fachadas Noroeste e Sudoeste.



Fotos: Tatiana Simão, 2016 e 2018.

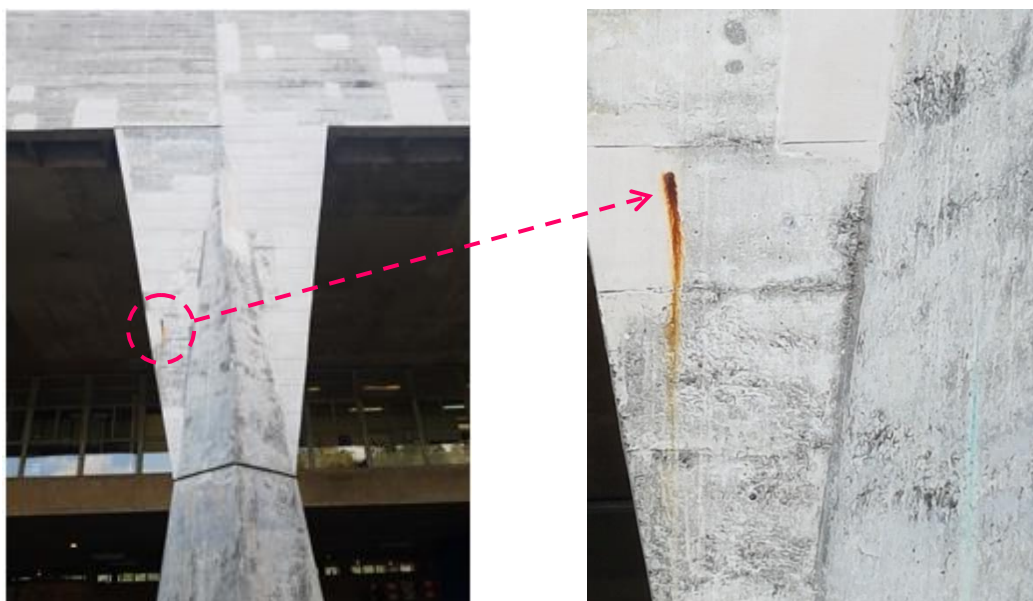
Além de descaracterizarem as superfícies arquitetônicas e comprometerem a autenticidade do material, não são raros os casos de falhas prematuras nas obras de preservação realizadas no patrimônio moderno, como destaca Heinemann (2012). Fato semelhante pode ser observado no edifício Vilanova Artigas (Figura 2) onde, após um ano do término da obra de intervenção, era possível observar inúmeros pontos marrom avermelhados, característicos de produtos de corrosão. O processo ativo de corrosão foi constatado por meio de ensaios realizados *in loco*, com resultados apresentados no relatório técnico de Araujo, Ferreira Neto e Almeida (2018), tanto no concreto original como também nas argamassas dos reparos recém-executados.

A reincidência precoce das manifestações do processo de corrosão das armaduras, suscitam questionamentos sobre a eficácia e a durabilidade dos reparos e dos sistemas de proteção que têm sido comumente aplicados a essas obras.

Além da perda de valores patrimoniais, a corrosão das armaduras pode resultar em significativa perda da seção das barras de aço, perda da aderência entre aço e concreto e perda da integridade estrutural do concreto e, por consequência, expor a edificação ao risco de falhas localizadas ou de grande extensão, levando à limitação da utilização do edifício ou mesmo à sua ruína.

Porém, o caráter reativo das intervenções corretivas, por vezes não é, sequer, suficiente para salvaguardar o patrimônio edificado. As ações tornam-se inócuas após danos irreversíveis e permanentes gerados ao patrimônio.

Figura 2: Detalhe (esquerda) e ampliação (direita) pilar da fachada Sudoeste do Edifício Vilanova Artigas com indicação de mancha marrom avermelhada de produtos de corrosão aparecendo na junção entre o concreto original e a argamassa de reparo executado na intervenção realizada entre os anos de 2012 e 2015. As manchas já eram observáveis, em exames visuais, um ano após o final da obra de recuperação do concreto. Em toda a extensão das empenas do edifício, com cerca de 3.000 m², foram localizadas mais de 400 manchas de produtos de corrosão, em vistorias feitas entre 2015 e 2017.



Fotos: Tatiana Simão, 2018.

As questões apresentadas são apontadas em depoimentos de especialistas relatados por Custance-Baker e Macdonald (2014), em reunião de 2014² que trouxe ao debate as ações e as melhores práticas para a conservação do patrimônio arquitetônico em concreto do século XX. A falta de compatibilidade estética e técnica entre concreto original e argamassas de reparo também têm estimulado debate e pesquisas focadas nas abordagens na recuperação do concreto dos edifícios da arquitetura moderna.

Os especialistas também opinaram sobre práticas de conservação preventiva como a realcalinização, uso de inibidores de corrosão de superfície e impregnação superficial por hidrofugante que, embora usadas com sucesso em algumas obras, ainda suscitam

² Reunião organizada pelo Getty Conservation Institute (GCI) da Getty Foundation, no âmbito da iniciativa voltada à conservação do patrimônio histórico e cultural do Movimento Moderno (Conserving Modern Architecture Initiative - CMAI).

divergências quanto à sua adequação ao patrimônio em concreto aparente, além de ainda não estarem suficientemente documentadas quanto à sua eficácia, durabilidade e quanto ao impacto gerado na percepção visual das superfícies arquitetônicas.

O uso isolado de hidrofugantes, comumente aplicados em estruturas de concreto no Brasil³, requer reaplicação frequente e não garante confiabilidade necessária à proteção requerida em superfícies com as características do concreto aparente do patrimônio moderno. Faz-se necessária, portanto, uma abordagem sistêmica valendo-se da associação de técnicas e produtos como meio de prevenir ou desacelerar a corrosão das armaduras por carbonatação, o mecanismo prevalente na degradação do concreto aparente da arquitetura moderna.

1.1. JUSTIFICATIVA

O edifício Vilanova Artigas, sede da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, completou 50 anos de uso no início do ano de 2019. O edifício passou por obras de recuperação estrutural das empenas externas e teve cerca de 24% da área do concreto original substituído por argamassa de reparo aplicada de forma esparsa. O resultado foi o aspecto visual fragmentado da face externa das empenas do edifício, que apresentou alteração estética na unidade do edifício tombado e seu valor histórico.

Confrontando o tempo de uso do edifício após as intervenções com as ocorrências verificadas (pontos de corrosão nas empenas, perda da capacidade de proteção do tratamento de superfície já aplicado às empenas) e à extensão que atingem essas ocorrências, podem ser enunciadas as atuais ameaças:

- perda do significado cultural do edifício com a potencial perda do material original remanescente das superfícies externas das empenas em razão do estado ativo de corrosão das armaduras;

³ Produtos comerciais à base de silano e siloxano com baixo teor de componentes ativos.

- risco à integridade física e à segurança dos usuários do edifício em razão do desprendimento do concreto, considerando que em alguns casos o processo de corrosão já atingiu grande extensão das empenas;
- ocorrência de falhas estruturais localizadas nas empenas caso o processo de corrosão não seja controlado;

Um aspecto importante de se salientar vincula-se às limitações enfrentadas pelos gestores de edifícios tombados, especialmente no setor público, quanto à insuficiência de recursos (financeiros e humanos) e às dificuldades impostas pelos processos licitatórios para contratação de serviços de manutenção preventiva.

Diante desse cenário, a presente pesquisa justifica-se pela busca de ações preventivas para a conservação das superfícies externas de concreto aparente, por meio de técnicas de aplicação de baixo impacto ao patrimônio e maior durabilidade. As técnicas, que se apresentam como possibilidades viáveis na atualidade, devem ser baseadas em produtos que estejam disponíveis no mercado brasileiro e atendam requisitos de desempenho técnico, bem como estético para a proteção desse patrimônio.

A combinação de produtos que leva a soluções redundantes se deve ao fato de propor uma ação conjunta de proteção da estrutura que apresenta problemas como a porosidade e descontinuidades superficiais, a carbonatação e a corrosão da armadura. Desta forma o inibidor de corrosão busca desacelerar o processo de corrosão, o realcalinizante recompor as condições de passivação do aço alteradas pela carbonatação e o hidrofugante limitar a absorção da água por capilaridade que é fator de desencadeamento do processo de corrosão.

No entanto algumas questões sobre o uso destes produtos/sistemas ainda necessitam de aprofundamento bibliográfico, ensaios e análises mais detalhadas, como: a interação entre os produtos, a reação destes com o concreto carbonatado, a profundidade de penetração no concreto, a efetividade da proteção com a aplicação conjunta destes produtos, e os métodos de aplicação.

É importante explicitar que a norma EN 1504-1 (2005) define **produto** como o conjunto de constituintes formulados para a reparação e proteção de estruturas de concreto e **sistema** como sendo dois ou mais produtos que são aplicados conjunta ou consecutivamente para reparar ou proteger estruturas de concreto.

1.2. HIPÓTESE

Há práticas aderentes aos princípios teóricos do restauro, configuradas por meio de produtos e sistemas aplicáveis às superfícies do concreto aparente do patrimônio arquitetônico, capazes de oferecer proteção contra o processo de degradação prevalente da corrosão da armadura por carbonatação.

1.3. OBJETIVO

Investigar o efeito de produtos e sistemas de “proteção de superfície”⁴, aplicados por meio de técnicas pouco invasivas⁵ no concreto aparente com características típicas do patrimônio da arquitetura moderna, compostos por inibidor de corrosão orgânico de migração, realcalinizante químico e hidrofugante.

1.4. ABORDAGEM METODOLÓGICA

Esta pesquisa é de natureza aplicada, focada na busca de procedimentos para a conservação preventiva, com validade e viabilidade técnica e estética, voltados ao potencial controle de fatores que interferem na corrosão por carbonatação ou na desaceleração do processo corrosivo, com vistas a prolongar a vida útil das estruturas de concreto aparente.

Trata-se de um estudo exploratório que combina abordagens qualitativas e quantitativas, ensaios em laboratório e em campo, buscando sucessivas aproximações ao cenário de intervenção real, ou seja, proteção de superfícies expostas ao

⁴ O termo “proteção de superfície” foi utilizado nesta tese para designar que o esperado efeito protetivo dos produtos/sistemas é obtido a partir da impregnação da superfície do concreto que caracteriza aplicação pouco invasiva, em consonância com os princípios da conservação do patrimônio.

⁵Na presente tese, o termo “técnicas pouco invasivas” no concreto aparente, foi utilizado para caracterizar técnicas que apresentaram pequenas alterações na cor e textura do tecido original do edifício a ser conservado.

intemperismo de estruturas de concreto armado aparente de exemplar do patrimônio da arquitetura moderna brasileira.

A seguir são apresentados os procedimentos adotados para a pesquisa bibliográfica e documental, consulta a arquivos pessoais, experimentação em laboratório e em campo, identificando os limites da pesquisa.

1.4.1. Pesquisa bibliográfica

Consiste na busca e estudo das referências bibliográficas clássicas e contemporâneas que auxiliaram na construção e argumentação teórica de assuntos inerentes a esta tese e que amparam a discussão dos resultados, tais como: conservação do concreto aparente no patrimônio histórico, microestrutura, porosidade, corrosão de armadura por carbonatação e sistemas de proteção de superfície.

1.4.2. Pesquisa documental

Esta etapa subsidiou o trabalho com informações inerentes à obra em estudo (edifício Vilanova Artigas), bem como de outras obras do patrimônio arquitetônico que foram pesquisadas para amparar a compreensão do processo de degradação e conservação do concreto aparente. Esta etapa auxiliou com informações importantes sobre detalhes de projeto, características construtivas, materiais utilizados na construção, estado de conservação, o tipo e a extensão das intervenções realizadas de acordo com os limites impostos pela legislação de proteção do patrimônio.

Para tanto foram realizados levantamentos em documentos gráficos, fotografias, relatórios de inspeção, de ensaios e de intervenções realizadas desde a construção, para a análise e compreensão de como o edifício foi projetado, construído e de que forma a manutenção e conservação foram tratadas.

Os dados sobre o edifício Vilanova Artigas foram obtidos em documentos pertencentes ao acervo documental da USP, grande parte deles reunidos e produzido

pelo grupo de pesquisa ConservaFAU⁶ e laboratórios contratados para execução de ensaios de caracterização do concreto das empenas e avaliação do estado de conservação do edifício, além de documentos existentes sob guarda de equipes de manutenção e projetos das obras estudadas.

1.4.3. Consulta a arquivos pessoais

Esta atividade se fez necessária na busca de informações complementares a pesquisa documental e mesmo nas pesquisas bibliográficas realizadas anteriormente.

Foram contactados profissionais que, de alguma forma, estiveram envolvidas com os objetos de pesquisa e que pudessem contribuir com informações importantes inerentes à pesquisa em desenvolvimento. Portanto foram consultados acervos da equipe de manutenção e conservação dos edifícios do Museu de Artes de São Paulo - MASP (arquiteta Miriam Elwing⁷), Centro de Cultura e Lazer SESC Pompéia (Sr. José Renato Alegreti Dias e Leslie Roberta Balhe⁸ e arquiteto Marcelo Ferraz⁹) e da equipe do escritório responsável pelo projeto estrutural do edifício Vilanova Artigas (Engenheiro João Antônio Del Nero¹⁰).

1.4.4. Programa experimental em laboratório

A partir do estudo do concreto do edifício Vilanova Artigas os ensaios foram realizados em corpos-de-prova moldados com concreto (com e sem armadura) com características semelhantes ao concreto das empenas. Além de algumas características do traço, foram observadas e reproduzidas as condições da estrutura, tais como a espessura de cobrimento, a carbonatação do concreto e a corrosão das armaduras; estas últimas atingidas por meios acelerados em laboratório.

⁶Grupo de pesquisadores que atuou na realização de pesquisas e elaboração do documento intitulado Subsídios para o Plano de Gestão da Conservação do Edifício Vilanova Artigas, sede da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAUUSP) financiado pelo programa Keeping It Modern, The Getty Foundation, entre os anos de 2015 e 2018.

⁷Responsável pelo setor de projetos, infraestrutura e arquitetura do MASP

⁸ Responsáveis pelo setor de infraestrutura do Sesc Pompéia

⁹ Arquiteto responsável pelo encaminhamento dos projetos de intervenção e manutenção do complexo do Sesc Pompéia aos órgãos de defesa do patrimônio cultural; trabalhou com Lina Bo Bardi à época da obra do Sesc Pompéia.

¹⁰ Engenheiro civil, sócio do escritório Figueiredo Ferraz desde a época dos projetos do MASP e do edifício Vilanova Artigas.

Os produtos/sistemas utilizados nas pesquisas desta tese foram selecionados a partir das evidências encontradas em pesquisa bibliográfica sobre a sua eficácia no tratamento de concretos carbonatados em edifícios com características semelhantes ao estudado nesta tese e que se apresentaram disponível no mercado brasileiro.

- A) Inibidores de corrosão: base aminoálcool e sais de amino álcoois (I1) e o outro a base de aminoálcool e carboxilato de amina (I2);
- B) Realcalinizante: químico à base de solução alcalina de alta difusibilidade composta de hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de cálcio (Ca (OH)₂) e hidróxido de potássio (KOH) - (R);
- C) Hidrofugante: à base de silano com elevado teor de sólidos e amina (HA).

Não foi possível avaliar a eficiência dos produtos/sistemas a longo prazo, nem em estágio de corrosão avançado, devido ao tempo necessário para execução dos ensaios, principalmente a aceleração do processo de corrosão dos corpos de prova.

A pesquisa laboratorial, embora requeira algumas simplificações, permite conhecer melhor os mecanismos de ação dos produtos testados e seus efeitos, reduzindo as incertezas do desempenho antes de uma eventual aplicação na superfície de edificações. O detalhamento do projeto experimental em laboratório é apresentado no capítulo 5.

1.4.5. Programa experimental em campo

Os ensaios de campo foram realizados em um dos pilares externos do edifício (P3) em razão da existência de um pequeno trecho de armadura exposta, o que facilitou a avaliação do potencial de corrosão sem necessidade de ações invasivas no concreto. Além disso, contribuíram para essa escolha a facilidade de acesso à superfície dispensando o uso de andaimes e a localização do pilar em região de pouco trânsito de pedestres. Desta forma as características de textura do concreto das empenas não estão evidenciadas nestas análises de campo.

Como sinalizado no item anterior, a tese limitou-se a estudar dois inibidores de corrosão de migração, um realcalinizante químico e um hidrofugante com alta

concentração de compostos ativos. No entanto, com o desenrolar das análises de campo percebeu-se a necessidade de avaliar também o desempenho de um hidrofugante semelhante ao que fora aplicado nas empenas na última obra de intervenção, ou seja, um hidrofugante comercial à base de silano/siloxano (HS).

O detalhamento do projeto experimental em campo é apresentado no capítulo 5.

1.5. ESTRUTURAÇÃO DA TESE

Além deste **Capítulo 1** a tese é composta de mais 7 capítulos.

O **Capítulo 2** - Desafios da conservação do concreto aparente do patrimônio da arquitetura moderna brasileira este capítulo é dividido em duas frentes de estudo, a primeira consistiu na pesquisa conceitual para determinar como o presente trabalho aproxima-se do campo da conservação do edifício de valor histórico e cultural. O significado do tombamento para obras arquitetônicas e como estas devem ser tratadas com relação a sua conservação e intervenções.

Com a realização desta pesquisa percebeu-se a importância de verificar também como o patrimônio arquitetônico em concreto aparente está sendo conservado, em termos práticos, em edifícios com características similares às do edifício Vilanova Artigas; então se realizou a pesquisa sobre a conservação dos edifícios do MASP e do SESC Pompéia, além do da FAUUSP, que consiste na segunda frente de pesquisa do capítulo 2.

Para tanto, além de pesquisas bibliográficas, foram realizadas visitas técnicas para observar e analisar o estado de conservação e os resultados de obras de intervenções realizadas e consulta a arquivos pessoais de profissionais envolvidos tanto no projeto e construção, quanto na manutenção e intervenções realizadas.

Com estas informações foi possível um melhor entendimento de como é conduzida a conservação do patrimônio da arquitetura moderna brasileira e qual é a importância de um sistema de manutenção predial preventiva na conservação destes bens.

O **Capítulo 3** – O concreto do edifício Vilanova Artigas: neste capítulo são apresentados os dados obtidos na extensa campanha de ensaios no edifício Vilanova

Artigas, entre os anos de 2016 e 2017, incluindo inspeção e ensaios de campo e análise em laboratório de amostras extraídas do edifício, realizados pela equipe ConservaFAU, IPT e LCT- Poli Minas.

Inicialmente, no capítulo 3, foram analisados os resultados da inspeção que permitiram o aprofundamento cognitivo necessário para compreender o edifício e o atual estado de conservação, e para amparar o desenvolvimento do programa experimental desta tese.

Na sequência, a partir dos resultados dos ensaios realizados no concreto e na armadura das empenas, são apresentados os conceitos fundamentais sobre a microestrutura e carbonatação do concreto e corrosão da armadura buscando compreender as características que podem influenciar a aplicação e o desempenho dos produtos/sistemas objeto desta pesquisa.

O **Capítulo 4** – Os sistemas de proteção de superfície: trata-se ainda de um capítulo teórico/conceitual sobre os sistemas de proteção de superfície que foram propostos nesta tese. Além de conceituar e apresentar as características de cada sistema, buscou-se compreender como estes produtos estão sendo aplicados em obras e investigados em pesquisas laboratoriais para auxiliar nos capítulos de programas experimentais e análise dos resultados.

O **Capítulo 5** – Programa experimental: detalha o programa experimental, os métodos e os arranjos experimentais que foram realizados em três etapas, 1) estudos piloto: estudo do traço do concreto e reagentes de ninidrina; 2) estudos de campo: aplicação e avaliação da eficiência e alteração de cor dos produtos aplicados no pilar do edifício Vilanova Artigas; 3) ensaios de laboratório: avaliações da ação dos produtos/sistemas, avaliação da profundidade de penetração e avaliação das alterações das propriedades e microestrutura do concreto com a aplicação dos produtos/sistemas, para tanto os ensaios foram realizados em corpos de prova CPs de concreto e de concreto com armadura.

No **Capítulo 6** - resultados e análise dos ensaios de campo: são apresentados e analisados os resultados dos ensaios executados na superfície do concreto aparente no Edifício Vilanova Artigas.

O **Capítulo 7** - resultados e análise dos ensaios de laboratório: são apresentados e analisados os resultados obtidos tanto nos corpos de prova moldados com armadura como nos sem armadura.

O **Capítulo 8** - conclusões: são apresentadas a conclusão e considerações finais desta tese, com ponderações se a hipótese foi ou não confirmada, avaliação de pontos bem e malsucedidos no trabalho e propostas de continuidade de futuros trabalhos.

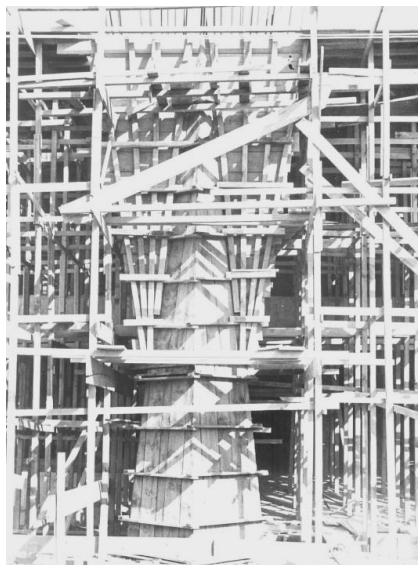
Finalizando a tese são relacionadas todas as fontes de pesquisa utilizadas como suporte para a elaboração deste trabalho, além do apêndice com resultados dos ensaios realizados e anexos que contém especificações do projeto original do edifício Vilanova Artigas entre outros documentos citados no trabalho.

2. DESAFIOS DA CONSERVAÇÃO DO CONCRETO APARENTE DO PATRIMÔNIO DA ARQUITETURA MODERNA BRASILEIRA

A conservação do patrimônio da arquitetura moderna brasileira em estruturas de concreto armado aparente enfrentam grandes desafios. Vários destes edifícios já completaram 50 anos ou mais de serviço e ainda continuam em pleno funcionamento, sendo que alguns atingiram graves níveis de deterioração da estrutura por corrosão da armadura por carbonatação em função das especificações de projeto e características do processo construtivo.

Dentre as especificações de projeto utilizadas na época das construções estão: pequena espessura de cobrimento de armadura, textura da superfície do concreto marcada com as formas de madeira em estado bruto, geometria complexa e esbelta dos elementos estruturais e ausência de proteção de superfície. No que se refere às características do processo construtivo são observados os seguintes aspectos: uso de espaçadores rudimentares e em pequena quantidade, dificuldade de moldagem e, frequentemente, concretos com menores resistências, não utilização de aditivos fluidificantes ou plastificantes que auxiliassem na redução da relação água/cimento. Consequentemente os concretos apresentam elevada porosidade, irregularidades e descontinuidades na superfície. Estes padrões aumentam a vulnerabilidade e aceleram o processo de degradação do concreto (OLIVEIRA *et al*, 2020). O sistema construtivo da estrutura do edifício Vilanova Artigas pode ser visto na Figura 3.

Figura 3: Imagens de: (a) Formas e cimbramento do pilar externo registradas em visita à obra em 1967, durante a aula de cálculo estrutural do Professor Figueiredo Ferraz e (b) perspectiva das fôrmas e cimbramento das lajes e vigas internas do edifício.



(a)



(b)

Fotos: (a) de Luciano Fiaschi e (b) Fernando Cabra durante visita a obra com Vilanova Artigas em 1967. Fonte: acervo equipe ConservaFau.

Os desafios emergem do questionamento de como preservar as superfícies arquitetônicas. As características do material e das técnicas construtivas que determinam os valores patrimoniais são, ao mesmo tempo, fatores que influenciam negativamente a durabilidade dessas estruturas. Além disso, à época da construção desses edifícios a compreensão do desempenho do concreto, especialmente quanto à sua durabilidade, ainda estava em desenvolvimento, o que favorecia a ideia prevalente de que o concreto dispensava cuidados ao longo de sua vida útil.

Discussões como estas se fazem necessárias por dois motivos. Primeiramente devido a resultados insatisfatórios de intervenções recentes em estruturas de edifícios que apresentaram aspectos visuais fragmentados, descaracterizando-os e apresentando evidências de continuidades de anomalias relacionadas à corrosão das armaduras. Em segundo lugar na busca da extensão da vida útil do patrimônio que talvez possam ser conseguidos com sistemas de manutenção preventiva associado com um sistema de proteção de superfície e monitoramento de estruturas.

Neste contexto este capítulo visa discutir dois aspectos: as limitações e dificuldades impostas às intervenções ao patrimônio moderno a partir de aspectos teórico-metodológicos da conservação, apresentando as questões do ato de

tombamento que dificultam a conservação destes edifícios e o segundo aspecto a importância da manutenção preventiva para a conservação destes edifícios. São apresentadas intervenções em edifícios da arquitetura moderna brasileira, executados com grandes extensões de concreto aparente, como os edifícios Vilanova Artigas, MASP e SESC Pompéia. São relativamente recentes as iniciativas, em nível mundial, focadas em pesquisas técnico-científicas e protocolos para a conservação do patrimônio de concreto da arquitetura moderna com exposto em Redondo *et al.* (2021).

Embora a publicação nessa temática esteja aumentando, o cotejamento de resultados ainda é dificultado, especialmente, pela falta de:

- indicação do método de ensaio;
- uniformidade na apresentação dos resultados;
- falta ou insuficiência de informações para o conhecimento do histórico da obra e de suas características que determinam a eficiência dos reparos;
- clareza sobre a análise a ser feita; há uma certa confusão entre análise da eficácia e da durabilidade do reparo e da durabilidade de uma obra reparada;
- parâmetros que permitam o cotejamento entre resultados obtidos em dois ou mais trabalhos de manutenção.

Exemplos de intervenções no patrimônio arquitetônico no cenário internacional (edifício do Pentágono, o New York Hall of Science e o edifício da fundação Joan Miró), também são apresentados com destaque ao uso de sistemas de proteção de superfície usando inibidores de corrosão.

2.1. IMPORTÂNCIA E DESDOBRAMENTOS DO ATO DE TOMBAMENTO

Mas o que significa o ato de tombamento, em termos práticos, na conservação do concreto aparente de elementos estruturais de grande escala da arquitetura moderna?

Segundo Rabello (2015) o **tombamento** é um instrumento jurídico que funciona como uma forma de proteção do patrimônio cultural brasileiro e tem por objetivo impor a preservação de bens materiais aos quais se atribui valor cultural para a comunidade na qual estão inseridos. A autora ainda enfatiza que o interesse público da preservação de bens culturais por meio do tombamento foi legalizado nos artigos 215 e 216 da Constituição Federal de 1988, sendo que no §1º do artigo 216 o tombamento é mencionado como um dos instrumentos que podem ser utilizados na preservação do patrimônio cultural.

Rabello (2009, p. 96) explica que:

“O que motiva o tombamento é a existência fática de valor cultural no bem; este valor cultural pode ter conteúdo histórico, artístico, arqueológico, bibliográfico, etnográfico, ou de qualquer outro tipo ou categoria do conhecimento, ainda que não mencionada na lei ordinária, mas de legítima e reconhecida expressão cultural.”

Segundo Kühl *et al.* (2011) um dos efeitos do tombamento é o controle sobre as alterações que forem realizadas neste bem, devendo estas ações seguirem as legislações e solicitar as devidas autorizações aos órgãos competentes no Brasil como IPHAN¹¹, CONDEPHAAT¹² E CONPRESP¹³. Os autores ainda enfatizam que em intervenções com maior porte do que uma manutenção deve ser considerada como conservação/restauração e um dos princípios básicos das intervenções são a mínima alteração e a compatibilidade de técnicas e materiais.

No entanto, sem uma abordagem consistente no enfrentamento da conservação do patrimônio, o tombamento não garante a sua proteção, como pontua Camargo (2014, p. 216):

“[...] Mesma tombada tanto pelos órgãos de preservação municipal quanto estadual [a FAU] enfrentou graves problemas de deterioração e as intervenções realizadas foram pouco respeitadas [...]”

¹¹ Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional;

¹² Conselho de Defesa do Patrimônio Histórico, Arqueológico, Artístico e Turístico do Estado de São Paulo;

¹³ Conselho Municipal de Preservação do Patrimônio Histórico, Cultural e Ambiental da Cidade de São Paulo.

2.1.1. Base teórico-metodológica

A base teórico-metodológica deste trabalho se baseou em três documentos principais sendo o primeiro a norma EN 16853 (2017), na qual buscou-se uniformizar as definições referentes ao patrimônio cultural e conservação, o segundo é a Carta de Burra do ICOMOS (2013) com outros termos importantes como preservação e manutenção.

O terceiro documento consultado foi o *The Cadiz Document*, de Harboe, *et al.* (2021), um guia para intervenção no patrimônio arquitetônico de concreto publicado pelo ICOMOS em 2021, com o qual, conjuntamente com os outros dois documentos citados anteriormente, é apresentado um fluxograma adaptado para elaboração das etapas do processo e implementação do projeto de conservação do concreto aparente em obras com significado cultural.

Segundo a norma EN 16853 (2017), o **patrimônio cultural** são entidades tangíveis e intangíveis com significado para a geração presente e futura, sendo que o mesmo documento entende significado como a combinação de todos os valores atribuídos a um objeto. O valor é a importância individual ou que uma sociedade dá a um objeto, sendo que estes valores podem ser de diversos tipos como artístico, simbólico, histórico, social, econômico, científico, tecnológico, etc. Os valores atribuídos a um patrimônio cultural podem mudar de acordo com as circunstâncias e contexto, no entanto sempre que se atribuir um valor ao patrimônio este deve ser qualificado quanto ao seu tipo.

O mesmo documento define a **conservação ou conservação – restauração** como medidas e ações destinadas a salvaguardar o patrimônio cultural respeitando a sua importância, incluindo a sua acessibilidade às gerações presentes e futuras. A conservação inclui a conservação preventiva, a conservação corretiva e a restauração. Todas as ações de conservação devem ser baseadas em evidências documentais e/ou materiais.

No documento do ICOMOS (2013), carta de Burra, o termo **conservação** compreende todos os processos voltados à tutela do bem para preservar o seu

significado cultural e designar os cuidados a serem dispensados para preservar-lhe as características.

As técnicas empregadas na conservação exigem a manutenção e devem, a princípio, ser empregadas as técnicas tradicionais, no entanto quando houver necessidade de utilizar-se técnicas modernas, estas devem estar amparadas com bases científicas e que apresente uma eficácia garantida (ICOMOS, 2013).

A **conservação preventiva** por sua vez são as ações destinadas a evitar ou minimizar danos futuros, deterioração, perdas e qualquer intervenção invasiva EN 16853 (2017).

Segundo a carta de Burra, ICOMOS (2013) a **preservação** é uma manutenção no estado da substância de um bem e a desaceleração do processo pelo qual ele se degrada. A preservação se limita à proteção, manutenção e à eventual estabilização da substância existente, não sendo admitidas técnicas que destruam o significado cultural do bem, sendo que a **manutenção** é o termo que está relacionado com a proteção contínua da substância, do conteúdo e do entorno de um bem.

Em ICOMOS (2013) a **restauração** é o procedimento para o restabelecimento de um bem em um estado anterior conhecido, só sendo efetivada se existirem dados suficientes que testemunhem este estado anterior do bem e se o restabelecimento deste estado conduz a valorização do significado cultural do referido bem. Na restauração há a remoção de elementos acrescentados para que se retorne as condições anteriores. A restauração se baseia no princípio do respeito ao conjunto de testemunhos disponíveis, sejam materiais, documentais ou outros. O termo restauração em algumas comunidades profissionais do campo do patrimônio cultural imóvel abrange todo o campo da conservação.

Para a conservação das estruturas do patrimônio arquitetônico de concreto aparente, embasada nos princípios teóricos do restauro, é importante pautar-se nos princípios apresentados nas diretrizes do ICOMOS (2013) e ICOMOS (1964) e a partir das interpretações de Kühl *et al.* (2011) e Oliveira *et al.* (2020) e Araujo; Oliveira; Simão (2021):

- **Mínima intervenção:** retirada mínima de material e intervenção complementar à medida que as intervenções anteriores demonstrarem ou não a sua validade. Nestes casos faz-se necessário a realização de estudos prévios para avaliar a condição da estrutura, caracterizar o material do tecido original e avaliar as melhores condições para a realização destas intervenções, dando preferência as pequenas intervenções. No entanto estas ações são possíveis apenas quando há um planejamento e compromisso com a ação precoce na manutenção, com a experimentação contínua e feita comedidamente em pequena escala, até a identificação das técnicas mais apropriadas. Outra característica importante de ser estudada para que seja possível a mínima intervenção diz respeito às dimensões e formatos das escarificações feitas na superfície para reparos localizados, preferencialmente as extensões dos reparos devem ser as menores possíveis e realizadas de forma que permita uma melhor aderência com o substrato original do bem a ser reparado.
- **Retrabalhabilidade:** sempre que possível deve-se adotar soluções que sejam retrabalháveis, ou reversíveis, propiciando intervenções quando novas soluções sejam viabilizadas. No entanto a retrabalhabilidade pode estar associada a soluções que requerem manutenção mais frequente e que necessitam de acompanhamento do desempenho. A escolha da técnica utilizada para reparos e a proteção da superfície do bem a ser preservado deve permitir realizar manutenção regular.
- **Compatibilidade entre materiais:** dar preferência a materiais e técnicas que se assemelham com os originais, conhecido como *like-for-like materials*, no entanto devido as transformações ocorridas na construção civil nos últimos anos, como por exemplo na produção de concreto, tornou-se impossível encontrar cimento com as mesmas composições e finuras e agregados com características geológicas e granulometria semelhante. Portanto faz-se necessário adaptar-se a materiais encontrados no mercado atualmente, realizando estudo de compatibilidade técnica do material original com os novos materiais. Outro fator importante de se salientar é que o traço do concreto original é difícil de ser replicado, pois o uso do agregado graúdo não é compatível para o preenchimento das pequenas lacunas dos reparos a serem preenchidas nas

grandes superfícies de concreto. Portanto faz-se necessário adequações as condições com a realização de estudo de compatibilidade com o desenvolvimento de modelos tanto em estrutura construídas especificamente para avaliação das técnicas e materiais propostos como na estrutura a ser reparada. No caso do estudo realizados na estrutura a ser reparada este deve ser feito em pequenas áreas e em regiões de menor visibilidade.

- **Distinguibilidade das intervenções:** visa primeiramente diferenciar tecido original das intervenções realizadas e posteriormente auxiliar na documentação das intervenções efetivadas. No entanto, apesar da orientação de serem distinguíveis, nas intervenções realizadas deve-se haver cuidado para que haja harmonização, visando manter a unidade da obra com a preservação da cor e textura, sem que ocorra a fragmentação visual da obra.

Desta forma, na conservação de estruturas de concreto aparente os requisitos patrimoniais devem ser tratados conjuntamente com os requisitos de segurança, funcionalidade e durabilidade do edifício.

A conservação e a restauração, deve ser sempre precedida e acompanhada de estudos técnicos e do histórico do monumento. Além disso, devem ser realizadas com colaboração de várias ciências e técnicas que possam contribuir para o estudo e salvaguarda do patrimônio, sendo desta forma uma atividade multidisciplinar.

As ações de manutenção abordadas nesta pesquisa visam possibilitar ações preventivas evitando a perda do material original e novos reparos no concreto. Do ponto de vista técnico estas ações evitam que o edifício atinja um estágio crítico de segurança ao uso, estrutural e de funcionalidade, além de evitar os gastos com grandes campanhas de reparos, dada a escala do edifício.

No entanto, além da falta de cultura, adoção de técnicas consagradas e critérios bem definidos para se desenvolver a restauração e preservação de edifícios tombados, os problemas com preservação de concretos aparentes históricos podem ser verificados em referências internacionais como, por exemplo, Heinemann (2012) que expõe em sua tese dois pontos fundamentais: 1 - que a preservação e conservação de concretos

históricos são considerados como tarefa secundária e que raramente são realizadas investigações para o desenvolvimento da preservação deste material, além de não serem inseridas nos projetos e planejamentos de obras de reparo as demandas de conservação, 2 - são comuns os casos de falhas prematuras nas obras de preservação realizadas.

Moreira (2011) expõe que conservação de estruturas de concreto aparente desafia a teoria da conservação e quase sempre alteram a autenticidade do material.

Segundo Gaudette e Slaton (2007) em prédios de concreto histórico, uma das maiores dificuldades é desenvolver a dosagem e o envelhecimento adequado dos materiais para equiparar o concreto do reparo com o original, além disso, o conhecimento das técnicas de execução é fundamental para determinação das causas de deterioração da estrutura. Outro fator importante a ser salientado é a falta de compatibilidade entre o concreto original e os materiais utilizados no reparo, fato que pode afetar negativamente o desempenho das intervenções realizadas.

Questões com as apontadas por Heinemann (2012), Moreira (2011) e Gaudette; Slaton (2007) ficam evidentes ao se observar a figura 4 do edifício Vilanova Artigas, onde a autenticidade do material foi alterada e os reparos não conseguiram ser equiparados ao concreto original das empenas.

Figura 4: Aspecto pixelado e fragmentado dos reparos executados na intervenção realizada no edifício Vilanova Artigas entre 2012 e 2015. Fotos à esquerda e a direita superior fachada sudoeste e foto a direita inferior quina das fachadas sudoeste e sudeste do edifício FAUUSP.



(a)



(b)



(c)

Fotos: Equipe CONSERVAFAU (2016).

Portanto diante do contexto exposto acima é importante salientar que o recém-publicado documento de Cádiz (HARBOE *et al.*, 2021) traz diretrizes especialmente voltadas à conservação do patrimônio cultural das estruturas de concreto. O documento é resultado da mobilização de pesquisadores do projeto InnoVAConcrete¹⁴, em parceria com especialistas do Comitê Científico Internacional – ISC20C do ICOMOS, motivados pela necessidade e urgência da preservação desse patrimônio.

O documento traz os princípios gerais para a conservação desses edifícios, respeitando as bases do documento de Madri – Nova Deli (INTERNATIONAL COMMITTEE ON TWENTIETH CENTURY HERITAGE - ISC20C, 2017) que trata da conservação, lato sensu, do patrimônio cultural do século XX.

Na contextualização do tema, o documento de Cádiz assinala que, dada a possibilidade do concreto ser moldável nas mais diversas formas, as estruturas do

¹⁴ Projeto focado na busca de novas soluções para a conservação do patrimônio e financiado pelo programa Horizon 2020 da União Europeia | <https://www.heritageresearch-hub.eu/project/innovaconcrete/> | <https://cordis.europa.eu/project/id/760858>

patrimônio de concreto são, predominantemente, monolíticas e exibem as mais diferentes volumetrias e acabamentos, com significativas variações de textura e tonalidade. Distintamente do reparo na alvenaria que tem a superfície discretizada, o reparo das superfícies das estruturas de concreto aparente, em razão dessas características, impõe significativos desafios para manter a continuidade visual e estrutural.

A partir de uma compromissada interpretação da realidade, o documento de Cádiz também destaca que a intervenção nas estruturas de concreto deve considerar o histórico das campanhas de reparo já realizadas. Uma vez que muitas estruturas são reparadas emergencialmente para restabelecer a segurança estrutural, segurança ao uso e funcionalidade das edificações, a investigação detalhada desses reparos faz-se necessária, sendo uma oportunidade única de avaliar o desempenho do edifício reparado em condições reais de utilização.

Reiterado pelos documentos citados, o entendimento de como deve se dar o processo de conservação da materialidade é claro: qualquer intervenção requer um projeto que articula profissionais em várias áreas técnicas, projeto que deve ser antecedido por um plano de conservação (Conservation Plan). O diagrama da Figura 5 ilustra as macro etapas do processo de conservação, organizadas a partir das disposições e diretrizes da Carta de Burra (THE BURRA CHARTER, 2013), do Documento de Madri-Nova Deli (INTERNATIONAL COMMITTEE ON TWENTIETH CENTURY HERITAGE, 2017) e do Documento de Cádiz (HARBOE *et al.*, 2021).

Figura 5: Macro etapas do processo de conservação.



Fonte: Adaptado de The Burra Charter (2013); International Committee on Twentieth Century Heritage (2017); Harboe *et al.*, (2021).

O plano de conservação requer, igualmente, a articulação de profissionais de diversas áreas técnicas e deve partir do estudo do histórico do edifício, das alterações pelas quais passou e da sua condição física e de seus materiais e técnicas usados na

construção; passando pela identificação e compreensão dos seus significados culturais; chegando ao reconhecimento das vulnerabilidades do edifício e os desafios e limitações para implementação das ações de conservação. A partir desse aprofundamento cognitivo o Plano de Conservação é elaborado atribuindo responsabilidades entre as partes intervenientes na conservação do edifício e fornecendo diretrizes para as intervenções como, por exemplo, orientações para limpeza e reparos nas superfícies de concreto, além de informar que alterações, e em que extensão, são toleráveis nessas superfícies.

As dificuldades enfrentadas em grande parte das intervenções, podem ser elencadas:

- inexistência de um plano de conservação: na falta de diretrizes claras e baseadas na experiência da engenharia de reabilitação de estruturas de concreto, as intervenções raramente resultam nas melhores soluções, seja do ponto de vista estético e técnico;
- insuficiência de dados para informar o Plano de Conservação, quando existente, ou seja, na falta de informações sobre materiais e técnicas que já tenham sido extensivamente testados, avaliados e validados na conservação do concreto, nas suas várias configurações, tipos e condições de utilização dos edifícios de concreto, especialmente de concreto aparente;
- não reconhecimento da necessidade de um projeto detalhado de conservação envolvendo profissionais com experiência em restauro e especialistas que identifiquem as melhores técnicas, materiais e as alterações toleráveis nas intervenções;
- limitações, ou mesmo restrições, da legislação brasileira para seleção e contratação, via processo licitatório, de equipes técnicas, para projeto e obra, com comprovada expertise na área de restauro; essas limitações e restrições impactam especialmente a contratação de serviços e obras pelos gestores da administração pública, responsáveis pela tutela dos seus próprios bens tombados.

Buscando compreender a condição real do edifício, e encontrar soluções para o resultado insatisfatório da última grande intervenção realizada no edifício Vilanova Artigas, um grupo de professores da FAUUSP apresentou um projeto o qual foi

contemplado com recursos internacionais na *Getty Foundation* para o desenvolvimento de um documento para dar subsídios para o plano de gestão e conservação do edifício apresentados em Pinheiro *et al.* (2017). A elaboração deste documento foi amparada por pesquisa documental (documentos textuais e desenhos), pesquisa iconográfica (imagens do acervo da própria FAUUSP, imagens fornecidas por professores e estudantes e de acervos particulares), pesquisa bibliográfica (livros sobre a produção de Vilanova Artigas, sobre o modernismo no Brasil e em São Paulo, obras monográficas sobre a FAU, além de dissertações e teses sobre esses temas) e levantamento de campo, com registro pormenorizado do estado atual do edifício.

Esses levantamentos e estudos propiciaram um avanço no entendimento do edifício e da sua história, consubstanciando importantes resultados, ainda inexistentes à época, para consolidar o Plano de Conservação do edifício, seguindo as diretrizes dos documentos patrimoniais.

Sobre a declaração do significado, disponível em Kühl *et al.* (2018, p. 29), além da relação forma-função, das características espaciais, da autoria do projeto entre outras características projetuais, o edifício Vilanova Artigas é culturalmente significativo:

“[...] 4. Pela expressividade construtiva que explora a plasticidade do concreto armado de modo sem precedentes no panorama da arquitetura brasileira do período;

[...]

7. Pelo papel de marco na Cidade Universitária, tanto do ponto de vista da importância arquitetônica quanto de sua presença na paisagem.”

Essas duas características têm forte impacto da percepção do edifício e são dependentes da integridade visual das empenas. Portanto, as superfícies externas de concreto aparente estão vinculadas ao significado cultural do edifício e devem ser respeitadas em toda e qualquer intervenção.

Quanto às vulnerabilidades do edifício, o texto de Kühl *et al.* (2018, p. 29) prossegue:

“PRINCIPAIS VULNERABILIDADES

1. O desempenho do sistema de proteção do edifício em relação às intempéries: **empenas (tarefa 2) e cobertura (tarefa 3)**;

[...]

7. Os problemas ligados à gestão, com incidência concomitante de várias instâncias de decisão, muitas vezes sem a necessária articulação entre elas, **gerando sobreposição de competências e falta de agilidade [...]**”

Como de praxe, um estudo detalhado não deixa dúvidas de que as superfícies de concreto das empenas e da cobertura se constituem na mais desafiadora vulnerabilidade material do edifício Vilanova Artigas.

Do ponto de vista da gestão, aponta-se a sobreposição de competências como óbice à celeridade do processo de decisão e implementação de ações, sabendo que no caso do edifício a sobreposição se dá entre as competências da Faculdade, Prefeitura do Campus e Administração Central da Universidade; além da compatibilização das decisões das duas instâncias de proteção – do Estado e do Município – que não têm necessariamente entendimentos e posturas alinhados (KÜHL *et al.*, 2018, p.29).

2.1.2. Abordagem projetual, escala do edifício e frequência das intervenções na conservação do concreto aparente.

A abordagem projetual interfere diretamente na qualidade da construção e determina o nível de intervenção necessário, como apresentado em Oliveira, *et al.* (2020) com os exemplos em termos de qualidade do *National Theatre em Londres* – projeto de Sir Denys Lasdun, construído entre 1969 e 1976, com armadura de aço galvanizado e espessura de cobrimento de 38 mm (1 ½ polegada) e apresentado em Tompkins (2008), e o *Sydney Opera House* – projeto de Jørn Utzon, construído entre 1959 e 1973 com projeto prevendo a vida útil de projeto de 250-300 anos, (TAYLOR, 2018). Estas características projetuais resultam geralmente em intervenções discretas e pontuais.

As questões sobre a especificação dos materiais e técnicas utilizadas nos reparos e proteção das estruturas devem ser profundamente discutidas e apontadas nas abordagens projetuais e documentos complementares das obras. As técnicas mais comuns de reparos, segundo Oliveira *et al.* (2020) são duas: a primeira muito utilizada no campo da engenharia de recuperação, executada com argamassas de reparo industrializadas de base cimentícia modificada com polímeros, sem preocupação com a compatibilização estética do reparo com o concreto, pois, em geral, há um “estucamento” da superfície, também com produtos industrializados ou com pasta de cimento aditivada com polímeros, antes do acabamento. A segunda técnica muito utilizada trata-se da já citada no item 2.1.1 *like-for-like material*. No entanto a adoção de uma ou outra técnica depende muito das características arquitetônicas do edifício e das dificuldades apresentadas na execução de determinada técnica e no controle de qualidade do concreto produzido *in loco*, como apresentado em Oliveira, *et al.* (2020, p. 68) sobre a utilização desta técnica para o edifício Vilanova Artigas:

“...em especial, a recomposição das lacunas usando o conceito like-for-like material, ao invés de argamassa industrializada, resultaria na concretagem de 940 áreas distintas nas fachadas, exigindo um projeto especial de fôrmas, em razão das dimensões das empenas, com estruturas auxiliares ou uso de fixadores nas fachadas que, certamente, trariam acréscimos à imagem do edifício.”

Entretanto soluções intermediárias em intervenções no concreto foram utilizadas no *National Theatre em Londres*, apresentado em Douglas, (2016) e no complexo de residências universitárias *Collegi na Universidade de Urbino* expostos em *Università Degli Studi di Urbino Carlo BO* (2018), com a utilização de argamassa industrializada aplicada manualmente e aplicação de argamassa “cosmética” feita com estudos prévios e execução de protótipos buscando harmonizar a cor e textura com o concreto do entorno, com estudos para determinação de variações cromáticas, assim como os desenvolvidos nas pesquisas de Castro (2018).

Garantir a unidade visual de grandes superfícies de estruturas monolíticas como é o caso do edifício Vilanova Artigas, é um grande desafio, ao contrário de projetos como o apresentado em Castro (2018) do conjunto residencial habitat 67 de Montreal, figura 6, onde o arranjo volumétrico e a dispersão dos reparos nas fachadas minimizam o impacto visual e mantem a unidade da obra.

Figura 6: Residencial Habitat 67, Montreal (a) vista do complexo; (b) detalhe do reparo na fachada de uma unidade habitacional.



(a)



(b)

Fonte: Castro (2018).

Outra forma de minimizar os impactos visuais dos reparos pode-se ser observado no conjunto esportivo do Sesc Pompéia, figura 7, devido a manutenções programadas e frequência na execução de reparos percebe-se que as intervenções realizadas vão se integrando ao concreto mais antigo e devido a ação do tempo, vão modificando a coloração dos reparos sem se transformarem em pontos destoantes na grande extensão de concreto armado aparente, mantendo-se desta forma a unidade visual do edifício.

Figura 7: Edifício de circulação e serviços do Sesc Pompéia: (a) vista geral do edifício, (b) detalhe de reparos pontuais executados em diferentes intervenções executados com argamassa industrializada.



(a)



(b)

Fotos: Tatiana Simão (2018).

2.2. EDIFÍCIOS DA ARQUITETURA MODERNA EM CONCRETO APARENTE NO BRASIL

Vilanova Artigas e Lina Bo Bardi foram grandes representantes da arquitetura moderna brasileira, que em suas obras icônicas apresentavam a busca de uma imagem arquitetônica marcante e uma cultura nacionalista com o uso do concreto aparente. Alguns destes exemplos são retratados abaixo nas obras do Edifício Vilanova Artigas, MASP e SESC Pompéia, onde são apresentados de forma sucinta os edifícios e como a conservação e manutenção destes edifícios são tratadas.

2.2.1. Edifício Vilanova Artigas

O edifício é um exemplar da arquitetura moderna paulista, brutalismo paulista¹⁵ ou também conhecida como escola artiguista segundo aponta Contier (2015). Foi projetado pelos arquitetos João Batista Vilanova Artigas¹⁶ e Carlos Cascaldi, entre 1960 e 1966 e construído entre de 1967 e 1969.

O prédio foi projetado para abrigar a Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo que estava funcionando em um edifício doado em 1946, pelos irmãos Sílvio e Armando Álvares Penteado¹⁷.

O edifício foi executado com materiais simples e modestos, segundo as palavras de um dos autores do projeto, predominantemente em concreto aparente, sendo o grande volume externo, denominado como empenas, realizado com a textura dos veios da madeira natural estampada e internamente um acabamento mais liso realizado com forma de compensado. O edifício tem uma área construída de 21.263

¹⁵ O termo brutalismo paulista, segundo Contier (2015), ficou consagrado em publicações de Yves Bruand que defendeu sua tese em 1973 sobre arquitetura contemporânea no Brasil e conceituou a Escola de Vilanova Artigas. Contier ainda aponta que para Bruand, o brutalismo de Artigas refletia “*uma posição disciplinadora para o rápido crescimento dos países não industrializados no segundo pós-guerra.*” (CONTIER, 2015, pg. 24).

¹⁶ Vilanova Artigas foi engenheiro-arquiteto formado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPU SP), em 1937.

¹⁷ Esta residência foi doada em 1946 a Universidade de São Paulo - USP pelos irmãos Sílvio e Armando Álvares Penteado condicionada a permanência da FAU. A doação se concretizou por intermédio do Engenheiro Luiz Inácio Romeiro de Anhaia Melo (1891-1974) então professor da escola Politécnica e após a realização de uma reforma de adequação, passou a ser o espaço designado às aulas da então criada Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.

m², executados com um volume de concreto de 6.500 m³, como pode ser visto em Vergili (2016, p. 130). As empenas têm comprimento de 110,20m por 66,20m de largura¹⁸, que se mantém resistente e imponente desde sua inauguração em 1969.

2.2.1.1. O material a ser preservado do Edifício Vilanova Artigas

O edifício da FAUUSP apresenta toda a estrutura em concreto armado aparente moldado *in loco*, sendo que as empenas, que constituem a fachada do edifício, com função de vigas–paredes foram executadas em concreto aparente, sendo executadas internamente com o uso de formas de compensado, com um acabamento liso e externamente com formas de tábuas de pinho com largura aproximada de 300 mm, com característica acentuada da textura da madeira das formas impressas no concreto aparente.

Segundo Simões (2004, p. 3.2) o edifício Vilanova Artigas

“Tratava-se de obra pioneira, com presença marcante da arquitetura brutalista paulista, ditada principalmente pelo uso do concreto aparente em sua potencialidade, enquanto inovação tecnológica, ênfase para a adoção de grandes vãos estruturais com singular ousadia, integração dos espaços interiores, liberdade de expressão formal e outros pormenores técnico-estéticos”.

O concreto das empenas nesta obra foi utilizado como estrutura e acabamento e segundo recomendações da carta assinada por José Carlos de Figueiredo Ferraz apresentada em Contier (2015, p. 293) o concreto estrutural deveria ser executado com resistência de 320 kgf/cm² o que equivaleria 32 MPa¹⁹.

Com o pequeno cobrimento das armaduras, em uma atmosfera agressiva como a de um grande centro urbano industrial que é a cidade de São Paulo, há uma aceleração do processo de carbonatação da estrutura, reduzindo a alcalinidade do concreto, resultando na despassivação do aço e na degradação física do material em função da corrosão das armaduras. As condicionantes ambientais são determinantes nos processos de degradação do concreto, notadamente, a umidade relativa, a temperatura e os poluentes atmosféricos.

¹⁸ Dados obtidos no livro o edifício da FAUUSP de Vilanova Artigas de 2016, capítulo intitulado FAU em números, escrito por Rodrigo Vergili.

¹⁹ Megapascal (MPa) unidade do Sistema internacional (SI) de unidades utilizado atualmente para designar resistência característica do concreto, para efeito simplificado de conversão 1 MPa \cong 10 kgf/cm².

Dados das séries históricas, apresentados em Pinheiro *et al.* (2017), mostram que, aproximadamente, nos últimos 60 anos a umidade relativa média na cidade de São Paulo variou de 65 a 85%, coincidente com a faixa ideal para a carbonatação do concreto entre 60 e 85% segundo Medeiros, Andrade e Helene (2011). Nesse mesmo intervalo de tempo, a temperatura média variou na faixa de 15°C a 25°C²⁰.

2.2.1.2. Intervenções nas empenas

Foram realizadas 3 obras de intervenção nas empenas da FAUUSP, sendo as duas primeiras pequenas: a primeira realizada em 1981 no pilar P3; a segunda em 1999-2000, no pilar P48. Estas duas obras foram de recuperação estrutural das cabeças dos pilares, com substituição do aparelho de apoio. O procedimento adotado foi a remoção do concreto danificado, introdução de barras e placas de aço como complemento de armadura do pilar e posterior concretagem e instalação de novos aparelhos de apoio de elastômero sintético fretado (Neoprene, marca comercial), colados com adesivo a base de epóxi. Para recompor o concreto foi utilizada forma de madeira com abertura tipo cachimbo. Na documentação referente intervenção de 2000 há os primeiros registros de recomendações para a realização dos reparos nas empenas e aplicação de proteção de superfície que não alterasse as características do edifício tombado.

A terceira obra de intervenção foi de maior proporção, realizada a partir dos dados contidos no Relatório Técnico 136/2010 da PhD – Engenharia Civil e Consultoria (HELENE; BRITTEZ; ANTUNES, 2010). Segundo Castro *et al.* (2016) e Pinheiro *et al.* (2017)²¹ as especificações para a execução das obras de intervenção foram fundamentadas na experiência prévia dos especialistas da empresa de consultoria, contratada para realizar inspeções nas empenas em 2010. As especificações foram fundamentadas na observação da superfície das empenas, sem ensaios de campo e laboratoriais; as soluções apresentadas foram as amplamente empregadas pela engenharia para reparo de concreto armado sem, no entanto, priorizar o patrimônio

²⁰ As séries históricas de dados meteorológicos obtidas nos arquivos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) na estação Mirante de Santana, em São Paulo, no período de 01/01/1960 a 01/01/2016. Os dados de interesse foram umidade relativa média e temperatura média compensada, apresentadas em Pinheiro, *et al.* (2017).

²¹ Disponível em http://www.getty.edu/foundation/initiatives/current/keeping_it_modern/report_library/

arquitetônico tombado, e sem um conhecimento detalhado para o restauro do edifício e do material original.

A obra foi executada entre 2012 e 2015, sendo realizada a recuperação estrutural das empenas e das vigas da cobertura do edifício. A contratação foi através de concorrência pública com as seguintes características compondo o edital: Tipo de Licitação: MENOR PREÇO. Execução: INDIRETA. Regime de execução: EMPREITADA GLOBAL. O edital teve como escopo a execução da recuperação estrutural do concreto e armaduras das empenas e das vigas da cobertura do edifício, para remoção de trechos de concreto que estavam destacados, tratamento de armadura e fechamento com argamassa de reparo, impermeabilização da cobertura, além de outros serviços complementares.

De acordo com Pinheiro *et al.* (2017) a execução foi pela Jotabeton Engenharia, empresa com experiência em recuperação estrutural, mas sem tradição em conservação de bens tombados. A PhD Engenharia foi contratada em julho de 2013 para assessorar tecnicamente a FAUUSP durante a obra. No entanto, apesar desta obra de recuperação do concreto armado ser de um edifício tombado com importância histórica, o edital de licitação não exigiu comprovação de experiência prévia em restauro de materiais históricos, sendo exigida somente experiência em reparo de concreto armado.

Pinheiro *et al.* (2017, p. 45) expõem que a obra foi realizada em momento crítico, onde parte do concreto das empenas já estava soltando e pondo em risco a segurança dos usuários do prédio. O mesmo documento enfatiza que a exigência do edital era experiência em reparo de concreto armado sem ter sido exigida experiência prévia em restauro.

“Embora a recuperação de concreto armado apresentasse a peculiaridade de pertencer a um edifício de importância histórica, o edital da licitação não exigiu que as empresas envolvidas ou seus profissionais comprovassem experiência prévia em restauro de materiais históricos, sendo exigida somente experiência em reparo de concreto armado.”

(PINHEIRO *et al.* 2017, p.45).

O quadro 1 apresenta um resumo das etapas da obra de intervenção de 2012-2015 do edifício da FAUUSP com a especificação dos procedimentos licitados e os realmente executados.

Quadro 1. Resumo das especificações do memorial de licitação (materiais e técnicas) versus atividades realizadas durante a obra (materiais utilizados e técnicas adotadas) de recuperação das empenas do edifício Artigas, entre 2012 e 2015.

ETAPA	ESPECIFICADO	REALIZADO
(1) Primeira limpeza da superfície de concreto aparente	Lavagem com jato de água potável (pressão entre 1000 e 1500 psi ou 7 a 10,5 MPa) para remoção de material particulado e contaminantes depositados na superfície. Partes soltas do concreto seriam removidas com a lavagem.	Conforme especificado, porém sem registro da pressão utilizada.
(2) Limpeza com produtos químicos	Remoção de manchas de corrosão com solução de ácido oxálico (10%). Remoção de manchas de eflorescência com solução de 5 a 10% de ácido muriático ou solução de 10% de ácido fosfórico.	Limpeza manual feita com escova de cerdas de aço em etapa posterior à aplicação da argamassa de reparo item (6).
(3) Segunda limpeza da superfície de concreto aparente	Idem à primeira lavagem.	O cumprimento desta etapa não foi detectado nos registros de obra.
(4) Remoção do concreto solto e preparo da lacuna	Ensaio de percussão e identificação visual para determinar áreas a recuperar. Delimitação das áreas com disco de corte com profundidade mínima de corte de 5 mm; escarificação do concreto desagregado com materlete de baixo impacto (5 kg).	Atividades cumpridas conforme especificação, porém com recortes feitos sem controle da ortogonalidade das arestas e sem respeito à modulação das tábuas. Delimitação das áreas a serem recuperadas com profundidade de corte próxima à espessura de cobrimento da armadura.
(5) Reparação das armaduras	Limpeza das armaduras para remoção dos produtos de corrosão e substituição das armaduras quando medida perda de mais do que 10% da seção transversal.	Aparentemente, atividades cumpridas conforme especificação.
(6) Argamassa de reparo	Argamassa à base cimento modificada com polímeros e reforçada com fibras, comercialmente disponível no mercado da marca EMACO S88 da BASF ou produto equivalente.	Argamassa à base de cimento, produto bicomponente composto por cimento Portland, agregados finos selecionados, aditivos especiais, polímeros acrílicos e fibras.
continua		

Continuação do quadro 1

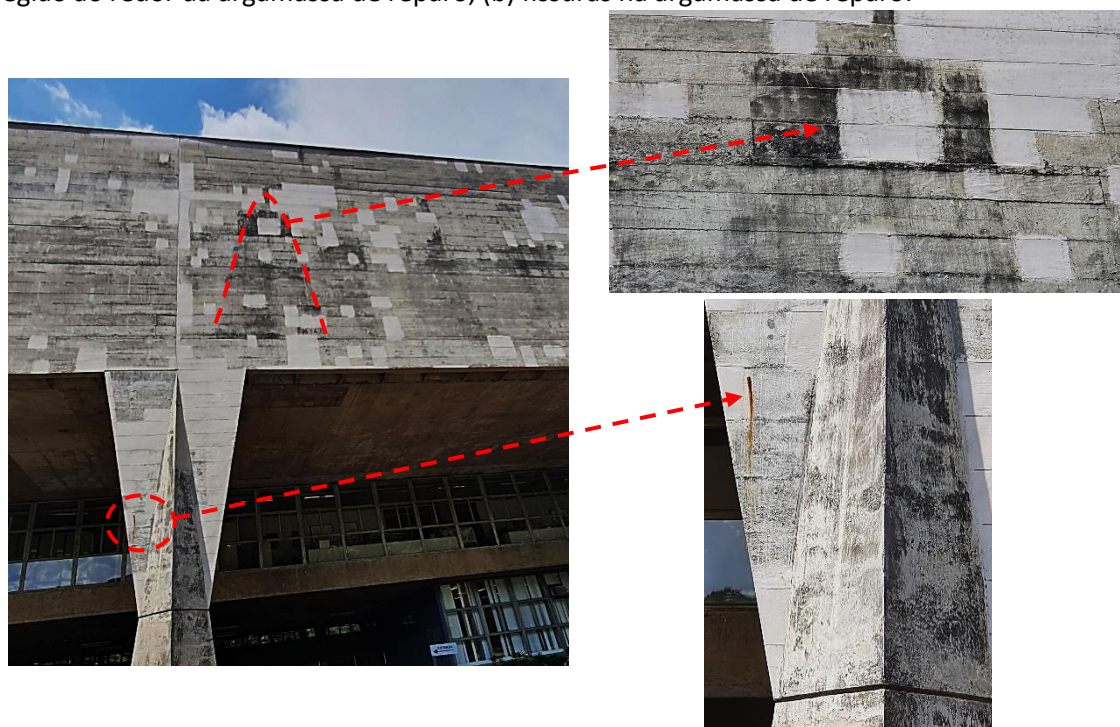
ETAPA	ESPECIFICADO	REALIZADO
(7) Testes para ajuste da cor e da textura	Não há especificação da metodologia de ajuste de cor e textura; apenas a indicação de que a argamassa de reparo deveria ser aditivada com alvaiade, cimento branco ou rejunte branco. Adicionalmente, há a indicação de as amostras de traços deveriam ser submetidas à fiscalização no prazo de 45 dias do início da obra e que a Fiscalização teria até 4 meses para indicar qual o traço a ser usado.	Testes iniciados após o início dos trabalhos de recuperação, fato que resultou na paralisação da obra e eventual demolição de reparos já executados em razão da não conformidade dos reparos com as amostras de teste. Não houve método para dosagem da argamassa e para avaliação das amostras produzidas. Aparentemente, um único traço foi usado para todas as empenas, sem considerar as diferenças cromáticas do concreto.
(8) Aplicação da argamassa de reparo	A aplicação manual de camada com espessura máxima de 20 mm sobre substrato saturado com superfície seca. Intervalo de aplicação de camadas sucessivas entre 6 e 24h, até espessura máxima de 100 mm. Não há especificação para aplicação de pintura anticorrosiva sobre a armadura. O fabricante da argamassa indicada, BASF - EMACO S88, recomenda a aplicação de primer rico em zinco sobre a armadura.	A aplicação da argamassa parece ter sido feita conforme as especificações; não foi aplicada pintura anticorrosiva sobre as armaduras. O fabricante da argamassa selecionada recomenda a aplicação de pintura anticorrosiva sobre a armadura.
(9) Cura úmida	Cura úmida por aspersão de água durante 4 dias.	Aparentemente, atividade realizada conforme especificação.
(10) Tratamento da superfície	Etapa não especificada.	Tratamento de superfície com nata de cimento aditivada com pigmento e adesivo acrílico, com o objetivo de atenuar a variação cromática entre reparos e concreto original.
(11) Proteção da superfície com hidrofugante	Aplicação de hidrofugante à base de silano/siloxano diluído em solvente. Condições de aplicação: umidade relativa do ar inferior a 80% e umidade superficial do substrato abaixo de 5%.	Aplicação, supostamente, conforme especificação técnica, porém com conflitos na ordem de execução das atividades, ou seja, com a aplicação do hidrofugante antes do tratamento de superfície - para atenuar variação cromática - que deveria precedê-lo.
(12) Proteção de superfície com verniz	Aplicação de verniz acrílico puro (sem estireno) após a aplicação do hidrofugante.	Por recomendação de representantes da FAUUSP, a aplicação do verniz foi eliminada.

Fonte: Pinheiro *et al.* (2017).

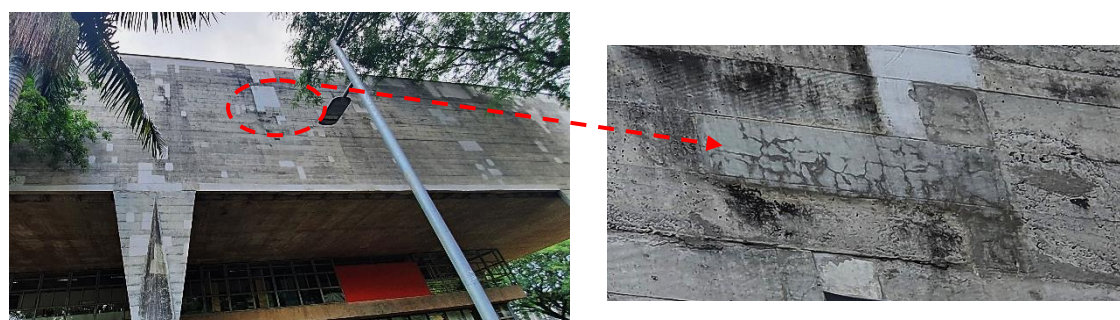
As pesquisas realizadas no projeto *Getty* permitiram avaliar de forma substancial os trabalhos executados na intervenção, o estado do concreto e dos reparos das empenas. Os resultados destas pesquisas trouxeram contribuições importantes que estão apresentados nos itens abaixo e na figura 8. Estas contribuições foram apresentadas no relatório técnico elaborados pelo IPT e no documento intitulado “Subsídios para um Plano de Gestão da Conservação” Edifício Vilanova Artigas (Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo - FAUUSP), Pinheiro *et al.*, (2017):

- Realização de cerca de 731 m² de reparos estruturais nas empenas, equivalendo à substituição de, aproximadamente, 24% da área da superfície do concreto original, restando ainda cerca de 76% do tecido original do edifício a ser preservado;
- Exames visuais na face externa das empenas, após a entrega da obra, indicaram a presença de 413 pontos de manchas que sugeriam estado ativo de corrosão das armaduras das empenas;
- Medidas eletroquímicas de potencial e taxa de corrosão e de umidade, realizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, confirmaram o estado ativo de corrosão nas armaduras das empenas e uma distribuição espacial variável do teor de umidade;
- Inspeção nas argamassas de reparo recentemente realizados (intervenção 2012-2015) apresentaram manifestações patologias precoces, como fissuração e carbonatação, sugerindo a perda da capacidade de proteção no tempo mínimo pretendido de vida útil dos reparos (15 anos);
- Detecção da frente de carbonatação com profundidade média de 20 mm medida a partir da face externa das empenas, alcançando as armaduras de controle de fissuração (armaduras de pele) que são as mais vulneráveis à corrosão;
- Falha no desempenho do hidrofugante aplicado detectada por observação direta de regiões umedecidas após períodos de chuva;

Figura 8: Empena SO do edifício Vilanova Artigas após intervenção executada: (a) ponto de corrosão na união da argamassa de reparo e concreto original e manchas de umidade na região ao redor da argamassa de reparo; (b) fissuras na argamassa de reparo.



(a)



(b)

Fotos: Tatiana Simão, (2018).

Como ilustram as imagens da Figura 8, os resultados das intervenções realizadas apresentaram-se insatisfatórios, resultando num aspecto visual pixelado e fragmentado que causam desconforto visual e estético e a descaracterização do material original. Aspectos relacionados ao desempenho técnico dos reparos são apresentados e discutidos no capítulo 3.

2.2.2. Edifício do MASP

O edifício do Museu de Arte de São Paulo Assis Chateaubriand (MASP), outra obra emblemática da arquitetura moderna brasileira, feita com vigas de concreto

protendido e armado aparentes, com a marca das tábuas das formas carimbada, como apresenta Cárdenas (2015) foi projetado em 1957 e inaugurado em 1968, na Avenida Paulista, em São Paulo, portanto em 2018 o edifício completou 50 anos de uso.

O edifício é composto por três partes com um total construído 10.272 m² segundo Cárdenas (2015) distribuídos em: uma parte inferior, situada abaixo do nível da Avenida Paulista, com dois pavimentos, composto por: Hall Cívico, Biblioteca, Restaurante, Mezanino, Auditórios, uma parte superior do edifício também com dois pavimentos, com: Exposições, Administração e a Pinacoteca e no nível da Avenida Paulista, a Esplanada Lina Bo Bardi, inicialmente chamada de Belvedere e popularmente conhecida como vão livre do MASP. O edifício também foi executado em concreto aparente com estampa das texturas das formas evidentes, sendo que apenas no final da década de 1980, após mais de 20 anos de sua inauguração o edifício teve suas vigas e pilares protegidos por pintura, como será explicado posteriormente.

Em documento elaborado com o nome Dados técnicos de Bardi ([19--]), o edifício é classificado como *“uma arquitetura de todo simples, a estrutura, ponto central desta arquitetura, alcança a simplicidade em uma grandiosidade pura, tanto pelas suas dimensões quanto pela clareza da solução.”*

Segundo o mesmo documento a parte superior do edifício apresenta vão livre total de 74 m, que se apoiam em quatro pilares vazados com dimensões de 4,00 X 2,5 m e quatro grandes vigas protendidas, sendo duas para a cobertura e duas para suportarem os dois andares abaixo da cobertura. Foram executados concretos com tensões médias de ruptura à compressão aos 28 dias de 580 kg/cm² o que equivaleria a 58 MPa, no entanto segundo Cárdenas, (2015 p. 90) as vigas da cobertura utilizaram concreto com resistência média a compressão de 250 kgf/cm², 25 MPa.

Na publicação Lima (1989, p.14), reportagem intitulada Museu embrulhado, assinada por Helder Lima, foram apresentadas questões sobre a falta de manutenção do edifício do MASP *“As trincas externas e internas espalhadas pelo prédio em parte resultam da acomodação da estrutura, mas também se originam da falta de qualquer manutenção durante os vinte anos de sua ocupação”.*

Após 21 anos da inauguração, em 1989 houve a primeira grande intervenção no edifício do MASP, realizada com plena anuência de Lina, com a impermeabilização total da cobertura refeita, inclusive das duas vigas protendidas e a pintura das mesmas e dos pilares em vermelho segundo Cárdenas (2015, p. 41), como pode ser visto na figura 9, informação confirmada em consulta de documentos pessoais do arquiteto Marcelo Ferraz²².

Figura 9: MASP na década de (a) 1980 e (b) em 2018, antes e depois das intervenções executadas no concreto das vigas e pilares, realizadas em 1989.



(a)



(b)

Fotos: (a) Luiz Ossaka [198-] Arquivo do Centro de Pesquisa do MASP e (b) Eduardo Ortega (2015).

2.2.3. SESC Pompéia

Projeto também de Lina Bo Bardi, que teve início em 1977. O projeto e a obra foi entregue em duas etapas, sendo a primeira em 1982, com a inauguração da fábrica de tambores dos irmãos Mauser restaurada segundo preceitos da carta de Veneza e transformada num espaço para ateliês de cerâmica, pintura, marcenaria, tapeçaria, gravura e tipografia, laboratório fotográfico, estúdio musical, sala de danças, teatro, restaurante/choperia, espaço para exposição, jogos, biblioteca, com um grande espelho d'água e lareira, que como Lina mesmo relata no livro organizado pelo IPHAN e SESC:

²² Informação obtida em consulta a documentos pessoais em 16 de outubro de 2018 com o arquiteto Marcelo Ferraz, atualmente sócio do escritório Brasil Arquitetura, que também foi estagiário e funcionário do escritório de Lina Bo Bardi.

“... Nunca esqueço o surrealismo do povo brasileiro, suas invenções, seu prazer em ficar todos juntos, para dançar, cantar. Assim dediquei meu trabalho da Pompeia aos jovens, às crianças, à terceira idade: todos juntos.”

(FERRAZ, 2015)

A segunda etapa da entrega do projeto do SESC Pompéia foi realizada em 1986, composta pelo bloco esportivo com duas torres, sendo uma das quadras esportivas e piscina coberta e outra dos vestiários, salas de exercícios interligados por sete passarelas executadas em concreto protendido e uma área de circulação no térreo com um deck de madeira executada sobre o córrego Água Preta, região considerada zona *non aedificandi*, batizada como “rua da praia”. Além disso, há uma torre de reservatório d’água com 70 m de altura que remete à chaminé da antiga fábrica. Os edifícios do centro esportivo, passarelas e reservatórios d’água foram executados em concreto aparente com a estampa das formas de madeira semelhante ao processo executado no edifício Vilanova Artigas e no MASP, figura 10. No entanto na torre do reservatório d’água há um diferencial criado por Lina e sua equipe; trata-se de uma textura semelhante à de uma renda, buscando homenagear o arquiteto mexicano Luis Barragán e remeter a memória das rendadeiras cajazeiras muito apreciadas por Lina no período que esteve na Bahia, figura 11. Para a execução da torre foram utilizadas formas de madeira compensada e sacos de tecido que permitiam que o concreto escorresse e criasse o efeito desejado remetendo à memória das rendas. Esta técnica conferiu ao concreto um acabamento mais uniforme e com um detalhe semelhante ao de uma pingadeira, garantindo desta forma um concreto com melhor durabilidade.

Figura 10: Edifícios em concreto aparente do Sesc Pompéia e detalhes do reservatório da caixa d'água com seu acabamento remetendo às rendas do período que Lina esteve na Bahia.



Fotos: Tatiana Simão, 2018.

Segundo Marcelo Ferraz²³ na execução da obra do Sesc Pompeia foi realizado projeto de formas com o projetista Toshio Ueno e utilizado concreto usinado e bombeado. O projeto de estrutura foi realizado pelo escritório Figueiredo Ferraz. Em consulta aos projetos de estrutura verificou-se que os cálculos estruturais dos edifícios executados em concreto aparente foram executados para concreto com f_{ck} de 18 e 20 MPa e cobrimento de armadura²⁴ projetado de 2 e 2,5 cm respectivamente.

Figura 11: Detalhe das formas para moldagem do concreto do reservatório d'água do Sesc Pompeia, sistema desenvolvido pela Lina Bo Bardi para homenagear o arquiteto mexicano Luís Barragán e remeter a memória das rendeiras cajazeiras.



Fonte: Vainer; Ferraz, (2013).

²³ Informação pessoal obtida em entrevista realizada em 16 de outubro de 2018.

²⁴ Informação obtida em consulta a projetos estruturais do edifício, pertencentes ao acervo do escritório Figueiredo Ferraz.

Diferentemente do que ocorre com os edifícios Vilanova Artigas e MASP, edifícios que tiveram pouco cuidado com a manutenção e conservação, segundo Sr. José Renato Alegreti, coordenador de infraestrutura do SESC Pompéia, o edifício do SESC passa por inspeção visual anual com funcionários do setor de infraestruturas do SESC, além de inspeção bianual feita por empresas especializadas em estruturas. Quando os relatórios técnicos das inspeções apontam a necessidade de intervenções no concreto, os reparos são realizados. A cada 5 anos faz-se a limpeza e o tratamento geral de todo concreto aparente e das alvenarias com tijolos aparentes com produtos específicos; os trabalhos realizados pelos funcionários do SESC são orientados por equipe de consultoria e amparado em normas técnicas.

No quadro 2 é apresentado um resumo das três obras modernista brasileiras executadas em concreto armado aparente sintetizando informações relevantes quanto as características do concreto e condições de manutenção dos edifícios.

Quadro 2: Resumo com características do concreto, condições de manutenção e informações sobre tombamento dos edifícios FAUSP, MASP e SESC Pompéia.

Edifício / arquiteto / administração e recursos	Tombamento / Ano	Ano de projeto / inauguração	Projetista de estrutura	Característica do concreto	Condição de manutenção
FAUUSP / Vilanova Artigas (administração e recursos públicos)	CONDEPHAAT 1982 CONPRESP 1991	Projeto: 1960 a 1966 Inauguração: 1969	Escritório Técnico Figueiredo Ferraz	Aparente, textura das formas, resistência de 320 kg/cm ² cobrimento nominal da armadura entre 0,5 e 1 cm	Pouca com apenas 1 obra de grande proporção realizada entre 2012 e 2015 para recuperação do concreto estrutural, que resultou no aspecto pixelado das empenas.
MASP / Lina Bo Bardi (administração e recursos privados)	IPHAN 2008 CONDEPHAAT 1991 CONPRESP 1982	Projeto: 1957 a 1968 Inauguração: 1968	Escritório Técnico Figueiredo Ferraz	Aparente, textura das formas, resistência de 250 kg/cm ² (vigas intermediárias) e 580 kg/cm ² (grandes pilares e vigas)	Duas obras de grande proporção, uma realizada em 1989, que resultou na pintura das vigas e pilares como forma de proteção da estrutura, no e em 2001 com modernização dos sistemas de infraestrutura. As vigas e pilares foram repintados 5 vezes entre 1990 e 2016.
SESC Pompéia / Lina Bo Bardi (administração privada e recursos públicos)	IPHAN 2015 CONPRESP 2009	Projeto: 1977 a 1986 Inauguração: 1982 – 1ª etapa (galpões da fábrica em tijolinho) e 1986 – 2ª etapa (conjunto esportivo em concreto aparente)	Figueiredo Ferraz Consultoria e Engenharia de Projeto Lda.	Aparente, textura das formas, com resistência 18 MPa cobrimento de 2 cm e 20 MPa cobrimento de 2,5 cm. Houve projeto das formas realizado pelo projetista Toshio Ueno.	Inspeções frequentes na estrutura de concreto e reparo localizado, caso necessário, além de tratamento geral do concreto a cada 5 anos.

Fonte: elaborado pela autora com dados de projetos de estruturas das respectivas obras e entrevistas com Marcelo Ferraz.

2.3. INICIATIVAS INTERNACIONAIS PARA CONSERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO DA ARQUITETURA EM CONCRETO APARENTE

Os trabalhos apresentados a seguir, de três obras de conservação do concreto armado aparente, acrescentam dados importantes as discussões: as paredes do edifício do Pentágono (Edelson, 2007), figura 12, o *New York Hall of Science* - projetado pelo arquiteto Wallace K. Har, para a Feira Internacional de Nova York de 1964-1965 (Buchner; Pepi, 2015), figura 13 e Fundação Joan Miró - projeto do arquiteto Josep Lluís Sert, inaugurado em 1975 (*Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja*, 2015), figura 14.

Nos três edifícios o mecanismo dominante de deterioração do concreto é a corrosão das armaduras por carbonatação. A espessura de cobrimento das armaduras e a profundidade de carbonatação, apresentadas no quadro 3, sendo dos edifícios do Pentágono e do New York Hall of Science da mesma ordem de grandeza quando comparadas às do edifício Vilanova Artigas. Segundo os autores Edelson, (2007) e Buchner e Pepi, (2015) a resistência à compressão do concreto foi inferida por meio do ensaio em testemunhos extraídos da estrutura.

Figura 12: Edifício do Pentágono: (a) vista das paredes após a recuperação do concreto aparente e (b) aparência do concreto antes (esquerda) e depois (direita) da aplicação da camada final de silicato de potássio.



(a)



(b)

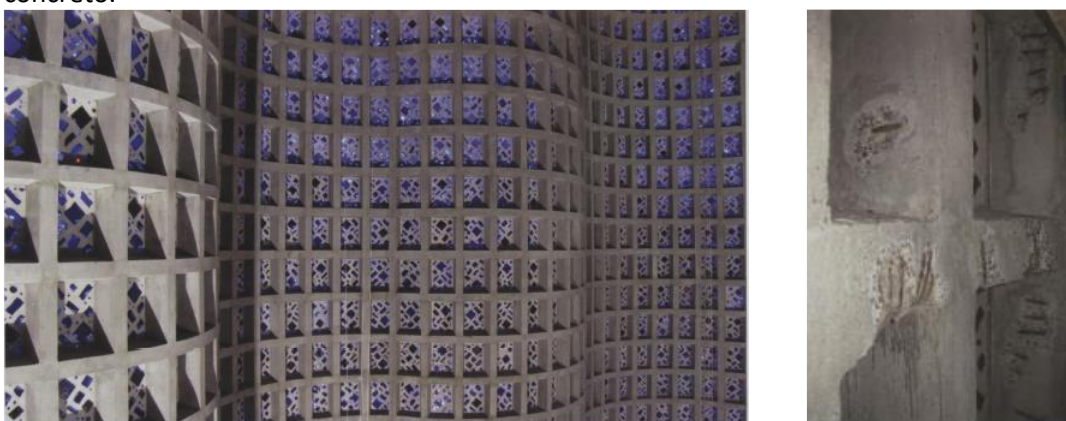
Fonte: Edelson (2007).

Os tratamentos adotados para conservação do concreto nos edifícios do Pentágono e New York Hall of Science resultaram de um extenso programa de

investigação (ensaios *in loco* e em laboratório) que precedeu o início das obras, envolvendo o trabalho colaborativo entre projetistas, restauradores e construtores com o apoio da indústria. O objetivo da investigação, em ambas as obras, era minimizar as incertezas sobre o uso do sistema de proteção (inibidor migratório de corrosão misto - MCI[®], hidrofugante e tinta mineral) com destaque às técnicas de aplicação, compatibilidade entre os produtos, profundidade de penetração dos produtos e impacto na aparência do concreto.

Relatos de Silva e Meyer (2019) indicam que medições realizadas ao longo de 10 anos, durante os trabalhos no edifício do Pentágono Americano, demonstraram o bom funcionamento do sistema aplicado, mantendo a taxa de corrosão em valores abaixo da faixa de passivação. Silva e Meyer (2019) também destacam que a pintura à base de silicato de potássio, aditivado com pigmento, foi especificada para proteger o hidrofugante da radiação ultravioleta e para possibilitar a homogeneização da cor.

Figura 13: Edifício do New York Hall of Science: (a) superfície do concreto aparente após recuperação e (b) detalhe das armaduras corroídas durante os trabalhos de conservação do concreto.



(a)

(b)

Fonte: Buchner e Pepi (2015).

O sistema composto por inibidor migratório de corrosão misto, hidrofugante e tinta mineral foi selecionado para ambas as obras em razão da necessidade de prolongar a vida útil do concreto e, nas palavras de Edelson (2007) protegê-lo pelos próximos 50 anos. Sendo que o uso da pintura mineral à base de silicato de potássio foi especificada como meio adicional de proteção do inibidor de corrosão e do hidrofugante. Embora seja física e quimicamente compatível com o concreto

carbonatado nas obras citadas, o silicato de potássio altera a percepção cromática da superfície do concreto (Figura 12 b), portanto a especificação de sua aplicação no concreto aparente de obras tombadas deve ser cuidadosamente avaliada.

Na fundação Joan Miró, as superfícies externas do concreto aparente do edifício sede, construído com concreto de cimento branco, foram protegidas com um sistema de inibidor de corrosão organifuncional, hidrofugante e pintura acrílica branca. A instituição mantém um programa de controle de longo prazo por meio de ensaios realizados *in loco*. As amostras ensaiadas, após 10 anos da aplicação do sistema de proteção (*Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja*, 2015) sugerem que a densidade de corrosão se mantém em valores inferiores a $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, considerado um limite seguro que indica nível desprezível de corrosão na armadura (*ANDRADE et al.*, 2004).

Figura 14: Fundación Joan Miró. À esquerda: fachada principal do edifício. À direita: detalhes da superfície do concreto das fachadas com pintura.



Fotos: Cláudia Oliveira (2017).

Quadro 3: Quadro comparativo das características e do tratamento de superfície de 3 edifícios submetidos a reparos do concreto aparente.

	Pentagon Lightwell Walls (EDELSON, 2007)	New York Hall of Science (BUCHNER; PEPI, 2015)	Fundação Joan Miró (INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN EDUARDO TORROJA IETcc, 2015)
Período da construção / inauguração	1941 - 1946	~1965	1975
Resistência à compressão (testemunhos)	~24MPa	~22MPa	-
Espessura típica do cobrimento da armadura	12,5 mm	1,6 a 63,5 mm	-
Profundidade de carbonatação	76 a 102 mm	~31 mm	-
Obras de recuperação e proteção do concreto aparente, incluindo o programa de investigação	2003 – 2012*	2005 – 2010	2005
Produtos utilizados na proteção de superfície do concreto moldado <i>in loco</i>	Inibidor migratório de corrosão misto Cortec MCI2020 V/O + hidrofugante (silano 100%) + silicato de potássio (tinta mineral)	Inibidor migratório de corrosão misto Cortec MCI2020 V/O + hidrofugante (KEIM Ecotec) + silicato de potássio (tinta mineral)	Inibidor de corrosão MasterProtect 800 (anteriormente conhecido como Protectosil CIT) hidrofugante e pintura acrílica anticarbonatação

Fonte: Elaborada pela autora com dados de Edelson (2007), Buchner e Pepi (2015) e Instituto De Ciencias De La Construcción Eduardo Torroja IETcc (2015).

*Informação pessoal obtida junto à Cortec, em reunião com representantes da empresa em 06/12/2018.

Embora a documentação apresentada tenha trazido importantes informações práticas sobre o sistema de proteção, ainda não foram encontrados resultados recentes publicados sobre o seu desempenho em médio prazo nos edifícios do Pentágono, no New York Hall of Science e na fundação Joan Miró.

A despeito dos bons resultados obtidos, segundo os especialistas, a continuidade das pesquisas é necessária para quantificar o efeito da camada de pintura usada em combinação com o inibidor de corrosão e o hidrofugante. Considerando os princípios da mínima intervenção e retrabalhabilidade, convém que o desempenho do sistema de proteção seja avaliado sem a camada final de pintura.

2.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO

Concluindo, este capítulo 2 procurou elucidar a importância tanto do respeito do patrimônio arquitetônico moderno e as necessidades de atender os conceitos das cartas patrimoniais no que se refere à manutenção, conservação e restauração destes edifícios, como também buscou compreender de que forma a preservação destes edifícios podem ser afetados por fatores como:

- O setor (público, privado ou misto) ao qual os edifícios estão vinculados ou são administrados podem gerar falta de protocolos de gestão e são fortemente influenciados pelo posicionamento dos gestores e/ou proprietários do edifício;
- Falta de recursos financeiros e/ou falta de planejamento para alocação desses recursos para a manutenção e conservação dos edifícios;
- Falta de estudos detalhados sobre o edifício e o material de suporte, anteriormente às obras de conservação;
- Falta de rotina de monitoramento e/ou vistorias técnicas no edifício;
- Falta de equipe técnica com formação e capacitação para as intervenções no patrimônio (arquitetos, engenheiros, construtores, operários e equipe de manutenção);

Portanto, pode-se afirmar que os desafios são muitos, e principalmente de ordem gerencial e técnica e requer trabalho muito próximo ao meio produtivo para garantir a confiabilidade da ação dos produtos e dos serviços realizados.

Diante disso a manutenção e conservação de estruturas de edifícios em concreto sujeitas a corrosão, mesmo que tenham sido realizados reparos com sucesso, é necessário um constante monitoramento e verificação das condições das armaduras

principais, capacidade de resistência e estabilidade dos elementos estruturais visando não atingir custos muito altos, onde Raisdorfer *et al.* (2015) salienta que intervenções realizadas em fase de projeto apresentam custos baixos, na fase de execução o custo apresenta-se 5 vezes maior, numa fase de manutenção preventiva o custo torna-se 25 vezes mais cara que na fase de projeto e por fim quando a intervenção é realizada numa manutenção corretiva este custo passa a ser até 125 vezes mais cara.

A importância do gerenciamento ativo e presente nos serviços de conservação fica evidente quando comparado os edifícios Vilanova Artigas, MASP e SESC Pompéia, como pode ser visto no quadro 2, onde é apresentado de forma sucinta algumas informações sobre os três edifícios citados, para compreender-se claramente como as ações de manutenção, preservação e conservação do patrimônio tombado são tratadas aqui no Brasil nestes edifícios com características construtivas similares.

3. CONCRETO DO EDIFÍCIO VILANOVA ARTIGAS

No presente capítulo são apresentados os resultados das investigações realizadas em campanha de ensaios anterior, executada entre os anos de 2016 e 2017 para a caracterização do concreto das empenas do edifício Vilanova Artigas, no âmbito de um dos 3 eixos do Projeto FAU *Getty*, a Tarefa 3 (Task 3).

As investigações foram feitas com o propósito de aprofundar o conhecimento do concreto e das armaduras das empenas das fachadas do edifício, observando as diretrizes da Carta de Burra (THE BURRA CHARTER, 2013). Portanto, no início dos trabalhos um projeto de investigação foi submetido à aprovação dos órgãos de proteção dos bens tombados (CONPESP E CONDEPHAAT). Destaca-se que, em razão das limitações impostas pelos órgãos foi autorizada a extração de apenas quatro testemunhos (com diâmetro de 50 mm e comprimento equivalente à espessura da empena, ou seja, 200 mm), tendo sido sugerida pelos técnicos dos referidos órgãos a extração de um testemunho por empena, além disso foi autorizada a extração de várias amostras da viga, no entanto de apenas uma das vigas da cobertura. Ainda quanto às restrições de intervenção nas empenas, foi autorizada apenas a escarificação das áreas já reparadas (com argamassa de reparo) para a avaliação do estado de corrosão das armaduras. Tais decisões, cujos desdobramentos são detalhados nos itens a seguir, levaram à redução dos ensaios de caracterização dos materiais.

São apresentados alguns dos estudos da Tarefa 3²⁵ focando nas características do concreto e das armaduras que qualificam os materiais, buscando investigar: (a) as manifestações patológicas evidenciadas na vistoria; (b) se a condição é compatível com o tempo de serviço; (c) se há vestígios não visíveis de deterioração interna. São destacadas as características que podem influenciar a aplicação e o desempenho dos produtos/sistemas de proteção de superfície estudados nesta tese.

²⁵ O programa completo de inspeções, levantamentos e ensaios pode ser encontrado em Pinheiro *et al.* (2017).

3.1. ETAPAS DA INVESTIGAÇÃO

A Investigação requer uma abordagem em múltiplas escalas (Figura 15). Na escala natural do edifício, na qual o concreto é considerado material macroscopicamente homogêneo, a percepção é voltada à volumetria, orientação e extensão das superfícies a serem estudadas; o entorno imediato também é estudado identificando interferências que afetem o desempenho da estrutura como, por exemplo, massa arbórea que altera o microclima no entorno do edifício e prolonga o tempo de molhamento do concreto.

Na escala dos elementos a aproximação revela características da edificação, tais como as anomalias superficiais do concreto aparente, fissuras, evidências do método construtivo como o posicionamento dos moldes das fôrmas e juntas de concretagem, disposição construtiva das armaduras, propriedades de superfície com a absorção de água, manifestações patológicas como os pontos de depósitos de produtos de corrosão (Figura 8, capítulo 2).

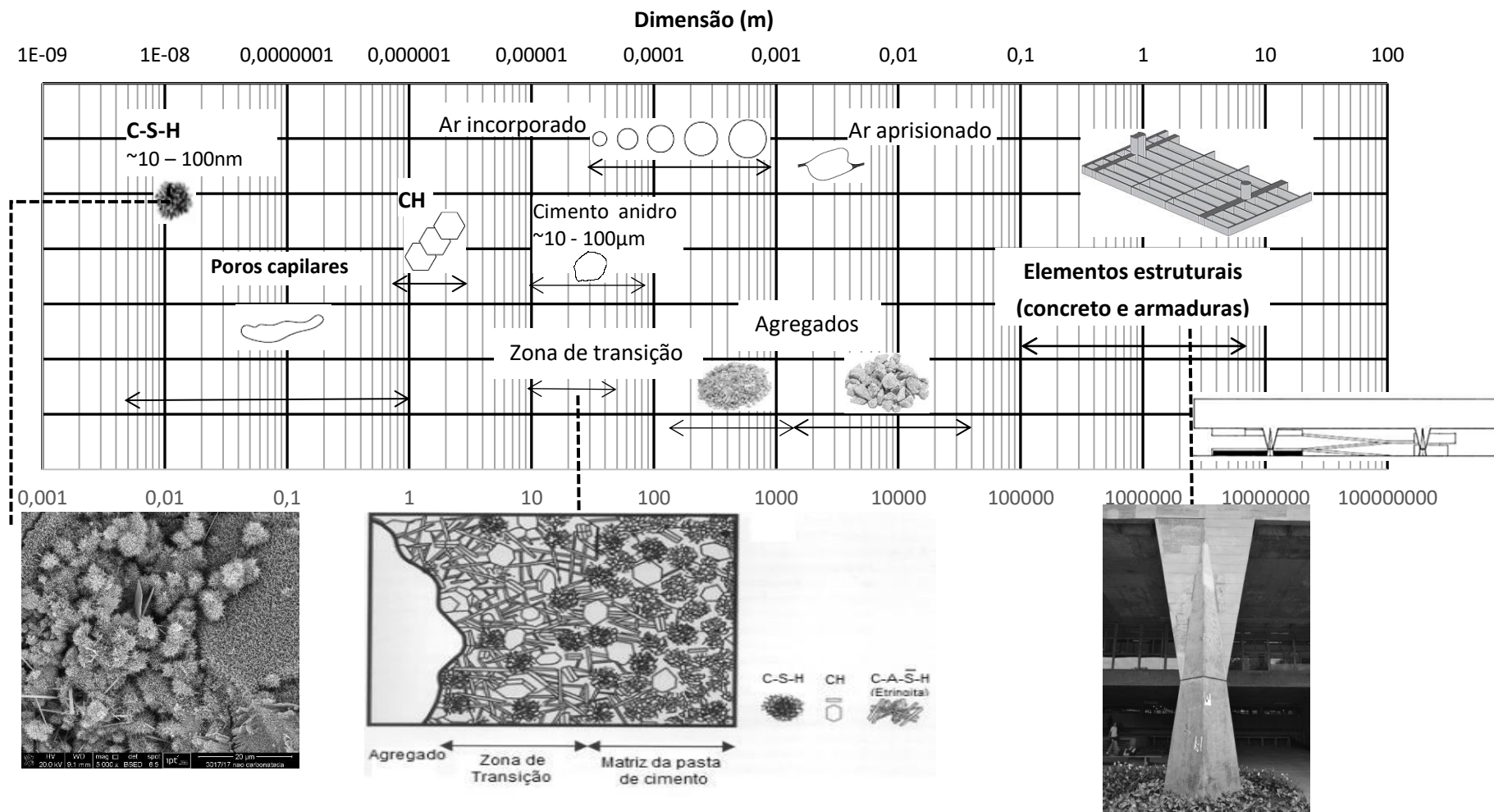
O estudo prossegue na escala do material com a identificação dos agregados, do provável traço do concreto, da resistência mecânica, frente de carbonatação, corrosão da armadura, volume e distribuição de poros, zona de transição entre agregado e pasta e das fases hidratadas e anidras perpassando pelas várias escalas internas do material.

A partir da compilação da documentação sobre o projeto e a construção do edifício foram realizados levantamentos e ensaios *in loco* visando:

- mapear áreas reparadas na campanha de intervenção de 2012-2015 por meio do escaneamento a laser;
- identificar pontos com depósitos de produtos de corrosão das armaduras;
- medir a espessura de cobertura das armaduras das empenas;
- medir absorção superficial de água e localizar áreas umedecidas pela chuva;
- identificar características superficiais, prováveis etapas de concretagem e definir áreas para extração de testemunhos e realização dos ensaios eletroquímicos nas armaduras;

Os resultados são apresentados a seguir: **(a)** superfície das empenas e amostragem; **(b)** caracterização do concreto e **(c)** avaliação do estado de corrosão das armaduras.

Figura 15: Escalas dos componentes (sólidos e poros) do concreto armado.



Fonte: Oliveira (2017) a partir de MEHTA; MONTEIRO, 2008; CONSTANTINIDES; ULM, 2004; JEANNINGS; BULLARD, 2011.

3.2. LEVANTAMENTOS DE ENSAIOS *IN LOCO* E AMOSTRAGEM

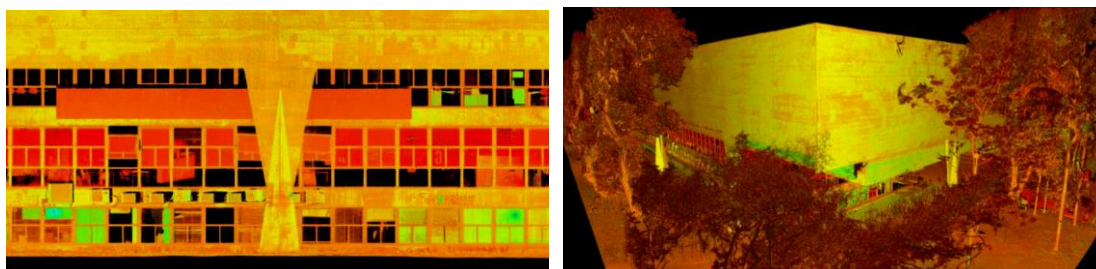
Foram realizados diversos levantamentos e ensaios *in loco*, entre eles: mapeamento dos reparos, pontos de corrosão nas empenas, espessura do cobrimento da armadura, absorção de água e umedecimento das superfícies e realizada extração da amostragem onde foi avaliada a profundidade de carbonatação e posteriormente foi realizada a caracterização do concreto conforme apresentado a seguir.

3.2.1. Mapeamento dos reparos

Os reparos foram mapeados por meio da técnica de varredura a laser²⁶ em 2016. Juntamente com o mapeamento de anomalias e o estado geral das fachadas, o levantamento permitiu a identificação dos formatos, posicionamento e o perímetro das áreas dos reparos criando uma base para estudos futuros de conservação do edifício.

A técnica permitiu a identificação de 71 a 88% da área total de reparos, dependendo da orientação da empena, e foi complementada com a análise visual e com registros fotográficos. A Figura 16 e 17 trazem ilustrações do resultado do mapeamento e a quantificação feita.

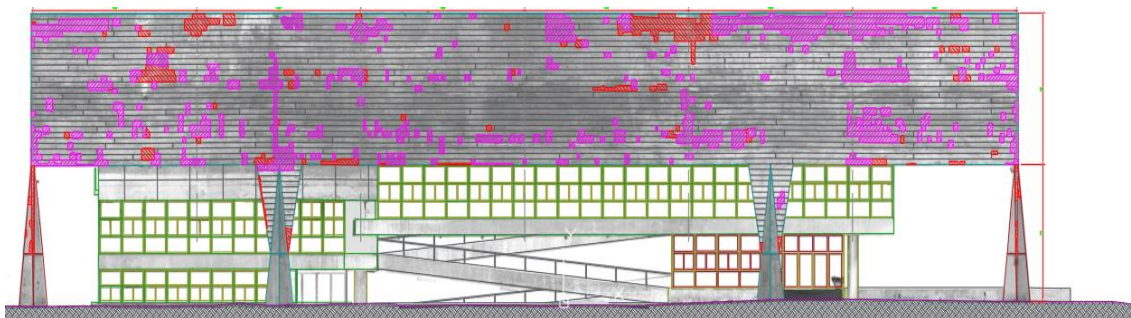
Figura 16: Acima: Imagens geradas pelo escaneamento a laser das fachadas do edifício Vilanova Artigas.



Fonte: BALZANI; MAIETTI; KÜHL (2017).

²⁶ Mapeamento feito pela equipe do Development of Integrated Automatic Procedures for Restoration of Monuments (DIAPReM), do Departamento de Arquitetura da Universidade de Ferrara, Itália.

Figura 17: Fachada Noroeste com a identificação das áreas reparadas na intervenção de 2012-2015.



Fonte: Acervo Equipe ConservaFAU (2016).

Tabela 1: Áreas das empenas e áreas dos reparos realizados na intervenção de 2012-2015.

Descrição	Empenas				Total
	SO	SE	NE	NO	
Área superficial da empena (m ²)*	993	588	901	589	3071
Número de reparos	295	146	305	194	940
Fração de área reparada (%)	16	24	37	16	24
Área de reparos (m ²)	159	141	333	94	727

*Superfície com textura do molde de madeira bruta, inclui a superfície das empenas propriamente ditas e as áreas laterais dos pilares extenos.

Fonte: Pinheiro *et al.* (2017) e Araújo, Oliveira e Simão (2021).

3.2.2. Levantamento de pontos de corrosão

Como exposto ao longo deste trabalho o edifício Vilanova Artigas apresentou manchas com cor marrom avermelhadas meses após o término da obra de intervenção. O levantamento do número de pontos foi executado, visualmente com o apoio de um binóculo, no primeiro semestre de 2016. Os resultados podem ser observados nas Tabela 2 e 3

Tabela 2: Pontos de corrosão nas empenas levantados por observação visual (a olho nú e com o auxílio de binóculos). Condição registrada no primeiro semestre de 2016.

Empena	Área (m ²)	Total de pontos de corrosão
Sudoeste	907,5	153
Sudeste	544,5	58
Nordeste	808,5	71
Noroeste	544,5	131
Total	2.805	413

Fonte: Pinheiro *et al.* (2017).

Tabela 3: Total de pontos de corrosão nos pilares externos. Condição registrada no primeiro semestre de 2016.

Empena	Nº do pilar	Total de pontos de corrosão
Sudoeste	49	10
	50	4
Sudeste	36	4
	5	4
Nordeste	4	8
	2	1
	1	2
Noroeste	35	1

Fonte: Pinheiro *et al.* (2017).

Algumas hipóteses foram levantadas sobre o aparecimento destas manchas marrom avermelhadas em Pinheiro *et al.* (2017):

- surgimento de novos focos de corrosão das amaduras;
- resultado da eventual oxidação da pirita (FeS₂) detectada nos agregados graúdos das amostras das duas empenas. Algumas manchas, em forma de cauda de cometa, assemelham-se ao padrão descrito por Jana (2008) e Pereira *et al* (2016) do depósito de hidróxido de ferro resultante da reação do sulfeto de enxofre com a umidade e oxigênio;

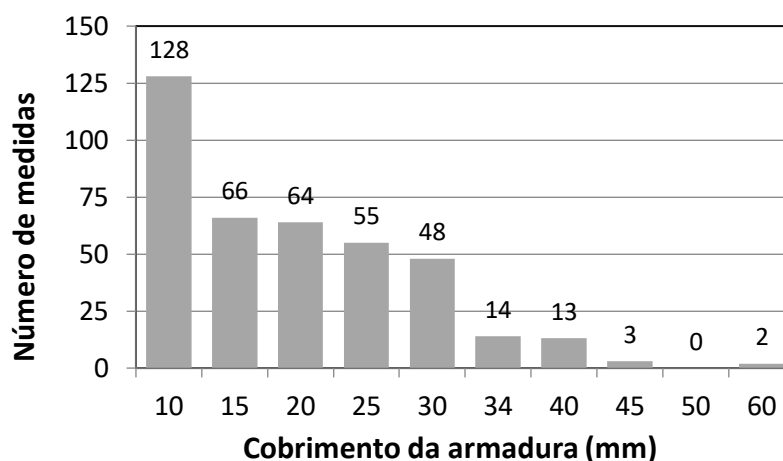
De forma aleatória, os pontos surgiram na superfície dos reparos, na interface entre reparo e concreto e também na superfície do concreto. Diante da visibilidade intensa destes pontos marrom avermelhados que podem ser eventualmente resultados da presença de pirita e da dispersão por toda a superfície das empenas,

havia a proposta de realizar nova coleta de amostra para investigar a origem dos depósitos de corrosão sobre o concreto que não foi autorizada devido a limitação imposta de escarificação apenas das áreas já reparadas essa investigação não foi realizada.

3.2.3. Cobrimento das armaduras

A medida do cobrimento das armaduras foi realizada por meio de um detector de metais em 393 medições nas empenas. A Figura 18 ilustra a distribuição dos valores medidos indicando que quase 50% da espessura de cobrimento apresentou resultados inferiores a 20 mm. Observa-se a predominância de valores abaixo do critério da norma vigente à época do projeto ²⁷ que indicava cobrimento de 20 mm para vigas ao ar livre, independentemente de ser cobrimento de armaduras de controle de fissuração ou de armaduras principais. Os cobrimentos estão aquém dos 30 mm recomendados atualmente pela NBR 6118, (2014)²⁸ para a estrutura em questão em quase 80% das espessuras medidas.

Figura 18: Intervalos das espessuras de cobrimento das armaduras das empenas, a partir de 393 medidas feitas com detector de metais (covermeter) nas empenas NE, SE, SO. Os resultados dos levantamentos da empena NO estavam incompletos, portanto, não foram apresentados.



Fonte: de Andrade Oliveira (2021)

²⁷ A época da construção estava em vigor a NB 1 / 1960 que, em seu item C – Proteção da armadura (p. 16) exigia-se cobrimento mínimo de 2,0 cm para vigas, pilares e arcos ao ar livre

²⁸ Segundo a NBR 6118/2014 item 7.4.7.2 - Para garantir o cobrimento mínimo (c_{\min}), o projeto e a execução devem considerar o cobrimento nominal (c_{nom}), que é o cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução (Δc). Assim, as dimensões das armaduras e os espaçadores devem respeitar os cobrimentos nominais, estabelecidos na Tabela 7.2, para $\Delta c = 10$ mm, ou seja, 30 mm para classe de agressividade II, moderada em atmosfera urbana.

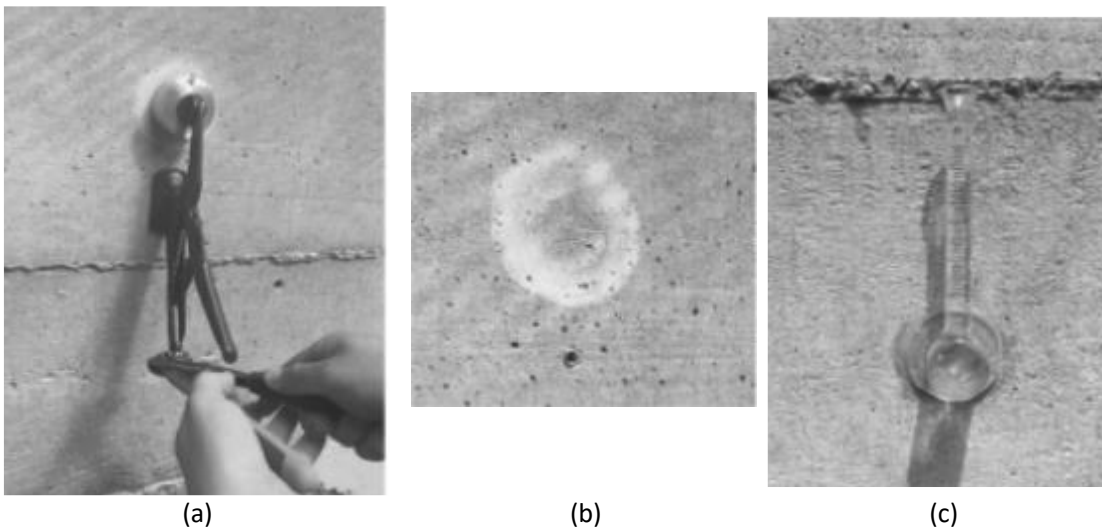
3.2.4. Absorção de água e umedecimento das superfícies

Por meio de ensaios *in loco*, foi determinada a capacidade do concreto em absorver água. A absorção superficial de água é caracterizada pelo fenômeno da capilaridade e permite inferir as propriedades da superfície do material que determinam a durabilidade do concreto.

Inicialmente, foi testado um método semi-destrutivo, figura 19 (a e b) usando um dispositivo (Poroscope C-P-6000 C-P-6050, James Instruments) para medir a absorção de água superficial, com um dispositivo fixado na superfície do concreto. Nas diversas tentativas, não foi possível obter resultados confiáveis devido à dificuldade de acoplamento do dispositivo (câmara preenchida com água a baixa pressão) à superfície do concreto, mesmo em regiões sem muitas irregularidades, sendo desta forma abandonado este método de avaliação. Dificuldades semelhantes foram encontradas por Marie-Victoire; Bouichou; Jourdan (2017) na tentativa de utilizar um equipamento denominado AUTOCLAM© para determinar a absorção inicial de água (sortividade) do concreto do patrimônio arquitetônico. Os autores sugerem que as dificuldades se devem à rugosidade superficial do concreto.

O teste do cachimbo (tubo de Karsten) originalmente descrito em Rilem (1980) foi então adotado; ensaio não destrutivo que avalia a absorção superficial de água, por capilaridade, do material a baixa pressão, figura 19(c).

Figura 19: Imagens de: (a) Fixação da câmara para o teste com o poroscópio. (b) Ampliação da área porosa em concreto para fixar a câmara do poroscópio. (c) Cachimbo fixado na fachada.



Fotos: Acervo da equipe Conserva FAU, 2017.

O cachimbo é um método amplamente utilizado para o estudo de revestimentos de alvenaria e construção em pedra. Embora para fins comparativos, também é um método indicado para controlar a aplicação de impermeabilizante em estruturas de concreto, dada a impossibilidade de extrair testemunhos para verificar a penetração do impermeabilizante (Raupach & Büttner, 2014, p.94).

Adotou-se como referência a norma EN 16302:2013 (European Standard, 2013), com medições do nível de água no capilar, realizadas nos seguintes intervalos: 5, 10, 15, 20, 30, 60, 120 e 180 minutos. O resultado é apresentado em $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0,5}$ para efeito de comparação com dados de pesquisas realizadas com argamassas de revestimento. O coeficiente de absorção de água, conforme descrito em Duarte *et al.* (2020), pode ser obtido graficamente como o coeficiente angular da linha do gráfico que correlaciona a massa de água absorvida por área ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) e o tempo em \sqrt{h} .

Os tubos foram fixados com silicone que, após os testes, foi retirado com água quente, detergente neutro e ação mecânica com escova com cerdas de náilon, não deixando vestígios perceptíveis.

Apesar de várias tentativas, apenas uma tentativa foi concluída. Trata-se do ensaio da fachada SE, realizado em abril de 2017, num dia sem precipitação, com temperatura e umidade relativa de 24°C e 82%, respectivamente. A umidade superficial da área de teste, medida por meio de instrumento com sensor capacitivo, variou entre 4 e 7%.

No momento do teste, a proteção por hidrofugante (base silano-siloxano, aplicada em 2014) ainda apresentava efeito residual. O resultado do teste, considerando o tempo de medição de 180 min, indicou um coeficiente de 0,2177 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0,5}$. Diante da escassez de resultados referenciais de ensaios não destrutivos realizados em estruturas de concreto, adotam-se resultados de ensaios realizados em argamassas, amplamente difundidos na literatura. Os ensaios realizados por Apps (2011), por exemplo, indicam um coeficiente médio de absorção de água variando de 0,05 a 0,28 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0,5}$ para argamassa cimentícia pré-dosada com adição de resina. O ensaio realizado na fachada SE evidencia que o concreto, nas condições atuais, apresenta absorção superficial de água dentro de uma faixa compatível com argamassas de revestimento à base de cimento.

Quando houver a viabilidade de extrair pequenos testemunhos para a medição da absorção superficial de água, os resultados dos ensaios laboratoriais podem ser comparados com a referência de $0,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0,5}$, indicada como o valor máximo de absorção do exposto superfície da água em EN 13057 (2002) para estruturas de concreto em geral. Portanto, é necessário correlacionar o coeficiente obtido em ensaios de laboratório com o coeficiente obtido em campo, por meio de ensaios não destrutivos (com o cachimbo, por exemplo) nas condições climáticas e de umidade do concreto. O objetivo dessas correlações é propor soluções de baixo impacto para a conservação do patrimônio de concreto.

Ressalta-se que, dada a escala do edifício em questão, a realização e calibração desses ensaios torna-se inviável sem uma infraestrutura que garanta o acesso às fachadas com relativa facilidade e segurança.

3.2.5. Amostragem e profundidade de carbonatação

A pesquisa documental associada à inspeção visual levou à estimativa de 14 lotes na concretagem das empenas. No entanto a limitação de extração de apenas quatro testemunhos, imposta pelo CONPRESP E CONDEPHAAT, resultou na escolha de dois locais de extração para a obtenção de amostra mínima para a realização dos ensaios essenciais. Foram extraídos dois testemunhos das faces nordeste (NE) e noroeste (NO) (OLIVEIRA *et al.*, 2020). Destaca-se que a superfície externa das empenas, considerando apenas as vigas-parede, totaliza 2.805m^2 .

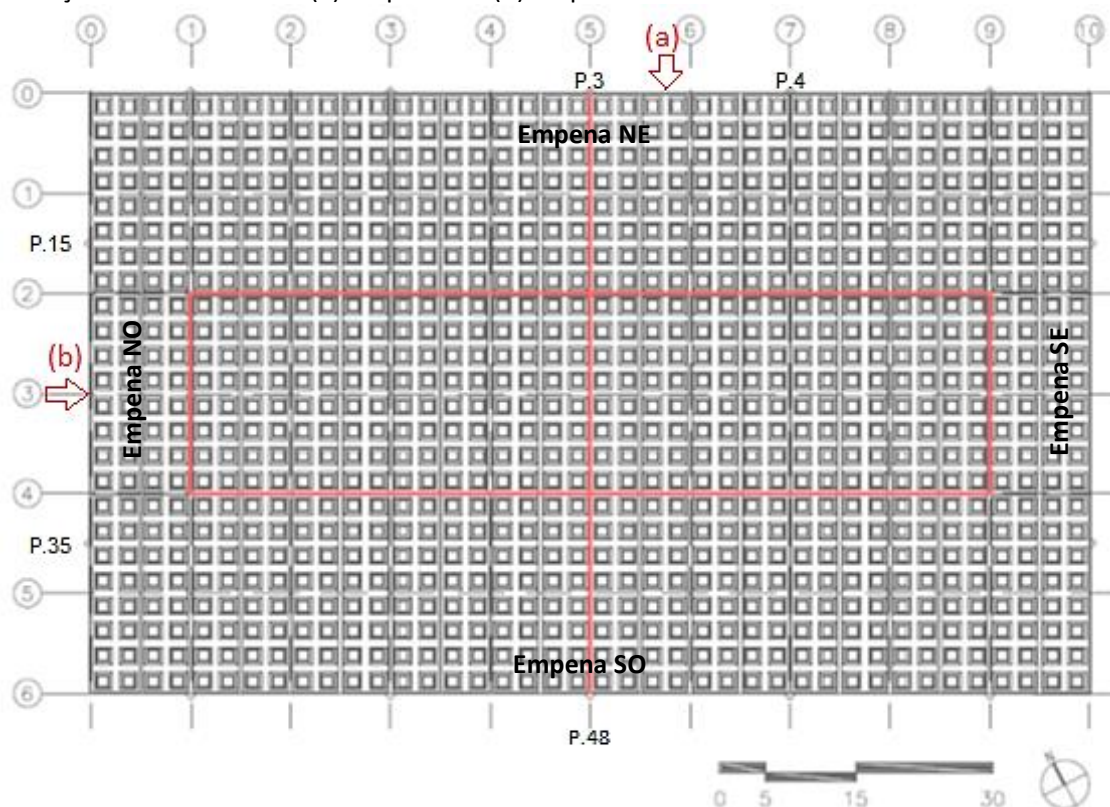
Os critérios adotados para definição dos locais de extração de testemunho das empenas, segundo em Pinheiro *et al.* (2017), foram os seguintes:

- Empenas com a maior (empena NE) e menor (empena NO) área de reparos estruturais feitos na intervenção de 2012-2015, ver figura 17 e tabela 1;
- Regiões com menor densidade de armadura, considerando o espaçamento entre estribos e a máxima distância possível das armaduras principais;
- Regiões pouco solicitadas, para tanto foram usadas como referência as disposições do item 21.3 Furos e abertura da NBR 6118 (ABNT, 2014);

- Facilidade de acesso ao local da extração mediante o posicionamento seguro da plataforma elevatória e espaço mínimo seguro para operação da máquina de extração dos testemunhos;
- Critérios para extração de testemunhos da NBR 7680-1 (ABNT, 2015).

As regiões de localização dos testemunhos extraídos estão apresentadas na figura 20, planta de cobertura.

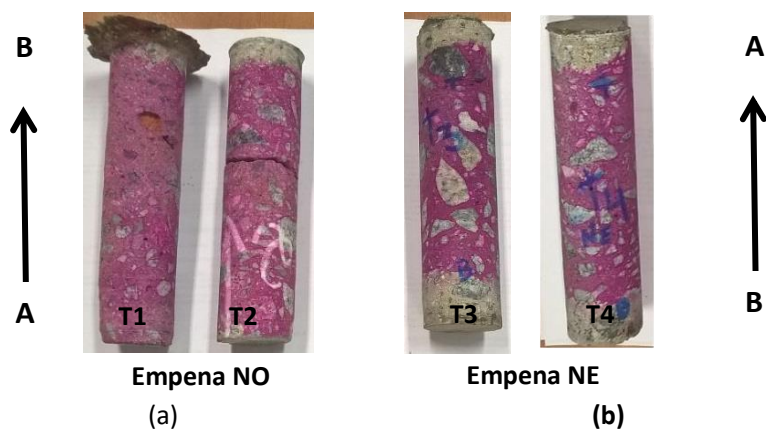
Figura 20: Planta de cobertura do edifício Vilanova Artigas com a indicação dos locais de extração de testemunhos (a) Empena NE (b) Empena NO.



Fonte: Adaptado de Pinheiro *et al.* (2017).

Na figura 21 pode-se observar os testemunhos extraídos das empenas. Após extração os testemunhos foram aspergidos com solução de fenolftaleína para a identificação da profundidade de carbonatação.

Figura 21: Testemunhos extraídos das empenas: (a) à esquerda empena NO; (b) à direita empena NE. A seta indica o sentido da movimentação da máquina no momento da extração do testemunho. A extremidade (A) equivale à face externa das empenas NO (T1 e T2) e NE (T3 e T4) respectivamente.



Fonte: Adaptado Pinheiro *et al.* (2017).

A profundidade de carbonatação, observada na Figura 21 pela região que permanece na cor original do concreto com pH inferior a 8,3, difere entre as empenas e entre suas faces interna e externa. Na empena NO a profundidade média é de 1 mm²⁹ na face externa e de 16 mm na face interna. Na empena NE a profundidade média é de 20 mm na face externa e de 34 mm na face interna.

Esses valores são coerentes e podem ser considerados baixos, quando cotejados aos resultados obtidos em edificações similares, de concreto armado aparente, com 50 ou 60 anos de serviço, localizadas em ambiente urbano tais como 25 a 95 mm (PAGLIOLICO, DOGLIONE, TULLIANI, 2014), 11 a 41 mm (UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI URBINO CARLO BO, 2017, p. 207).

3.3. CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

A tabela 4 apresenta de forma resumida os ensaios realizados, as características e quantidade de corpos de prova utilizados em cada ensaio e o local de extração.

²⁹ A profundidade de carbonatação média de 1 mm, medida na face externa dos testemunhos extraídos da empena NO, não é usual, no entanto a contraprova não pode ser feita em função da não autorização da extração de novas amostras.

Tabela 4: Ensaios de caracterização do concreto das empenas do edifício Vilanova Artigas.

Ensaio	Corpo-de-prova (CP)*		Numeração da área de amostragem	Local da extração
	Característica	Quantidade		
Resistência à compressão (f_c)	Cilíndrico d (**) =50mm $1,5 < h/d (***) < 2$	2/área	1	Fachada NE
			2	Fachada NO
Reconstituição do traço	Massa de 1kg/área a partir de resíduos dos CPs submetidos aos ensaios de f_c e E_{ci}		1	Fachada NE
			2	Fachada NO
Ensaio	Corpo-de-prova (CP)		Numeração da área de amostragem	Local da extração
	Origem	Característica		
Petrografia		1lâmina/área (região carbonatada e não carbonatada)	1	Fachada NE
			2	Fachada NO
Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	Parte remanescente dos cilindros dos quais serão obtidos os CPs para resistência à compressão	seção de fratura prisma de dimensão máxima de 20 mm/área (região carbonatada e não carbonatada)		Mesmas áreas de ensaio da petrografia
		seção polida prisma de dimensão máxima de 20mm/área (região carbonatada e não carbonatada)		
Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)		cubo de aresta 10mm/área (região carbonatada e não carbonatada)		

Notas: (*) foram realizadas extrações e análises do concreto da viga de cobertura, no entanto o concreto apresentou resistência a compressão e características diferentes do concreto das empenas, não sendo apresentados os resultados e análises pois o foco deste trabalho é o concreto aparente das empenas. No entanto os ensaios de MAV foram realizados com material extraído das amostras da viga de cobertura.

(**) d: diâmetro nominal do testemunho cilíndrico extraído da estrutura de concreto

(***) h/d: relação altura/diâmetro do corpo-de-prova submetido ao ensaio de resistência à compressão.

Fonte: Pinheiro *et al.* (2017).

Os resultados dos ensaios realizados para a caracterização do concreto estão apresentados nas tabelas 5 a 8 e nas figuras 22 a 30.

3.3.1. Resistência à compressão

A resistência média à compressão dos CPs preparados a partir dos testemunhos extraídos do edifício objeto de estudo, com valores já corrigidos pelos coeficientes k1, k2, k3 e k4, constam na Tabela 5. O ensaio de resistência a compressão foi executado de acordo com NBR 7680 (ABNT, 2015).

Tabela 5: resultados da determinação da resistência a compressão do concreto pela NBR 7680/2015.

Local de extração do testemunho	nº de CPs rompidos	Média de Resistência MPa (*)
Empena Fachada Noroeste - NO	3	38,23
Empena Fachada Nordeste - NE	3	38,03

(*) Concreto classificado como do grupo I, classe de resistência C35 de acordo com a NBR 8953:2015, como apontado no relatório do Instituto de Pesquisa Tecnológico (2018), no entanto a resistência característica de projeto pode ser classificada como classe C30 (320 Kgf/cm²).

Fonte: Pinheiro *et al.* (2017).

Como exposto anteriormente, a resistência característica especificada em projeto (σ_{c28}) foi de 320 kgf/cm² o que equivaleria 32 MPa³⁰.

A tendência ao aumento da resistência com a idade do concreto é inerente à continuidade das reações de hidratação do cimento, no entanto em Tango (1990) pode-se ver um estudo mais aprofundado deste crescimento de resistência de corpos de prova armazenados em laboratório, que fazem parte de uma série histórica do IPT e foram rompidos com idades de até 50 anos.

Mas em estruturas em uso não há a mesma reação com o aumento da resistência em função de deformações lentas do concreto, exposição ao intemperismo e agentes agressivos e outros fatores que reduzem a resistência do concreto.

Segundo Almeida, Silva e Désir (2014) resultados de ensaios de testemunhos de diâmetro 100 mm, extraídos do bloco concretado em laboratório, apresentaram resultados, aproximadamente, 10% inferiores aos resultados obtidos nos ensaios das amostras moldadas em laboratório.

³⁰Megapascal (MPa) unidade do Sistema internacional (SI) utilizado atualmente para designar resistência característica do concreto, para efeito simplificado de conversão 1 MPa \cong 10 kgf/cm².

Helene (2011) enfatiza que o crescimento da resistência do concreto de 28 dias a 50 anos na maioria dos casos reais, é superior a 16%.

No caso do concreto do edifício Vilanova Artigas, considerando a resistência de projeto e a ensaiada nos testemunhos extraídos das empenas tem-se um crescimento de quase 19%.

A análise que se pode fazer com relação à evolução da resistência do concreto ao longo do tempo é baseada na expressão da NBR 6118:

Equação 1: evolução da resistência a compressão ao longo do tempo da NBR 6118

$$f_{cj} = \exp\left\{s \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right]\right\} \cdot f_{c28\text{dias}}$$

onde:

f_{cj} = resistência à compressão do concreto na idade de j dias;

$f_{c28\text{ dias}}$ = resistência a compressão do concreto aos 28 dias³¹;

s = coeficiente de crescimento da resistência em função do tipo de cimento = 0,25 para CIIIE 32

t = idade do concreto em dias

$$f_{cj} = \exp\left\{0,25 \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{28}{50 \cdot 365}}\right]\right\} \cdot 32$$

$f_{cj} = 40,69$ MPa

Pelos cálculos realizados com base na expressão da NBR 6118 o concreto deveria atingir na idade de 50 anos a resistência de 40,69 MPa, com valores próximos dos resultados nos ensaios de resistência a compressão obtidos no concreto das empenas (média 38,13 MPa) realizados nos testemunhos extraídos do edifício.

Em razão da falta de representatividade das áreas de amostragem não se pode afirmar que uma única resistência característica foi adotada na moldagem das empenas. No entanto o valor é compatível com resistências à compressão de 36,7; 26,8 e 33,3 MPa, obtidas na avaliação de uma edificação similar, uma marquise de

³¹ Para efeitos de simulação da resistência do concreto do edifício Vilanova Artigas, como não há registro do $f_{c28\text{ dias}}$ = resistência a compressão do concreto aos 28 dias, adotou-se a resistência característica especificada em projeto (σ_c), ou seja, 320 kgf/cm² o que equivaleria 32 MPa

concreto aparente em Varsóvia (Warszawa Śródmieście WKD), avaliada no âmbito do projeto InnovaConcrete³².

3.3.2 Reconstituição do traço

A reconstituição do traço do concreto foi feita por meio da análise química com a determinação de umidade, perda ao fogo, resíduo insolúvel e óxidos (anidrido silícico SiO₂, óxidos de ferro e alumínio R₂O₃, óxido de cálcio CaO, óxido de magnésio MgO e anidrido sulfúrico SO₃), de acordo com Procedimento CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-042 "Concreto e Argamassa – Reconstituição de traço" e apresentado em Quarcioni, (1998). Os valores médios dos traços das empenas são apresentados na Tabela 6 e os parâmetros usados no cálculo do consumo de cimento foram:

- Massa específica do cimento: 2,91g/cm³;
- Massa específica dos agregados: 2,65 g/cm³;
- Massa específica da água: 1,00g/cm³;
- Relação água/aglomerante: 0,5;
- Índice de vazios: 2%.

Tabela 6: Valores médios em massa do traço do concreto endurecido do edifício Vilanova Artigas.

	Edifício Vilanova Artigas	
	resultados da reconstituição do traço (em	
	Empena NO	Empena NE
Cimento (%)	20,6	19,5
Agregado silicoso (%)	80,2	80,3
Traço (cimento: agregado)	1:3,9	1:4,1
Consumo de Cimento (kg/m ³)	424	409
a/c	0,5*	

(*) parâmetro adotado para o cálculo do consumo de cimento na reconstituição do traço no método utilizado pelo IPT do concreto do edifício Vilanova Artigas.

Fonte: Pinheiro *et al.* (2017)

Os resultados são coerentes com traços adotados à época da execução do edifício, como aponta o engenheiro Abílio de Azevedo Caldas Branco³³ (1967) em seu manual

³² Resistências à compressão inferidas por meio do ensaio de testemunhos extraídos da estrutura que, à época do ensaio tinha, aproximadamente, 55 anos de serviço. A estrutura de concreto aparente integra o complexo de um terminal ferroviário em Varsóvia, Polônia. Dados disponíveis em <https://dmt.innovaconcrete.eu/case-study/warsaw>. Acesso em nov/2022.

intitulado “Concreto – Dosagem em pêsos ou em volume”. Por exemplo, um dos traços do manual de Caldas Branco, em massa 1:1,63:2,94:0,49, tem consumo de cimento de 387 kg/m³ e é indicado para aplicações especiais. O consumo de cimento estimado também tem correlação com o valor médio de 344,25 kg/m³, obtido na avaliação da marquise de concreto aparente em Varsóvia (Warszawa Śródmieście WKD - ver nota 32).

Estes resultados foram utilizados como parâmetros do traço piloto e para a moldagem dos corpos de prova para a realização dos ensaios do programa experimental desta tese, apresentado no capítulo 5.

3.3.3 Análise petrográfica e microscopia óptica

A análise petrográfica realizada de acordo com NBR 7389 – 1 e NBR 7389-2 ABNT, (2009) sugere os seguintes resultados das amostras analisadas.

Quanto aos agregados miúdos:

- Na empena NO: areia natural quartzosa, com tamanho de grãos de 0,15 a 2,5 mm, grãos angulosos e de esferecidade baixa;
- Na empena NE: areia natural quartzosa, com tamanho de grãos de 0,15 a 2,5 mm, grãos angulosos e de esferecidade baixa;

Quanto aos agregados graúdos:

- Na empena NO: natureza metamórfica (gnaisse), dimensão máxima de 3,0 cm, com grãos predominantemente equidimensionais, angulosos;
- Na empena NE: natureza metamórfica (gnaisse), dimensão máxima de 2,0 cm, com grãos predominantemente alongados, angulosos;

Quanto a matriz da pasta de cimento:

- Na empena NO: abundância de núcleos belíticos (C₂S) parcialmente ou não hidratados, raros cristais de alita (C₃S) parcialmente hidratados, portlandita

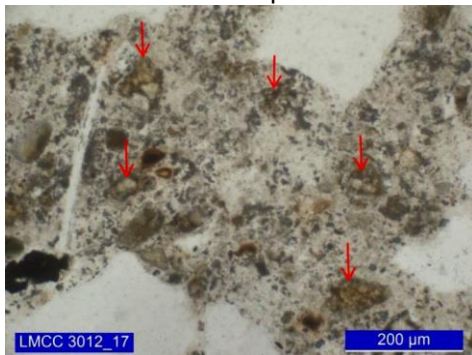
³³ BRANCO, A. de A. C. **Concreto – Dosagem em “pêsos” ou em volume – 12 traços em sequência**. Rio de Janeiro: Companhia Brasileira de Artes Gráficas, 1967. Acesso em jan 2017. Disponível em Notas de Aula do Prof. Eduardo C. S. Thomaz no link http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/caldas_branco.pdf

dispersa na pasta ou na interface pasta/agregado, C-S-H em micromassa densa e entremeada à portlandita;

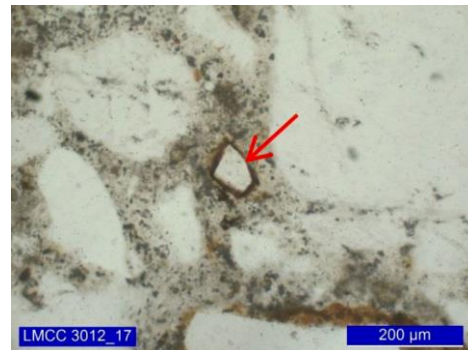
- presença de grãos de escória anidros ou parcialmente hidratados;
- Na empena NE: abundância de núcleos belíticos (C_2S) parcialmente ou não hidratados, raros cristais de alita (C_3S) parcialmente hidratados, portlandita dispersa na pasta ou na interface pasta/agregado, C-S-H em micromassa entremeada à portlandita; a amostra da empena NE apresenta maior tem micropososidade na pasta se comparada à amostra da empena NO;

Com a análise petrográfica ficou explícita a presença da escória o que sugere o uso de Cimento Composto com escória figura 22 (a) e (b). A Figura 23 indica presença de pirita em amostras do concreto das empenas, portanto fica evidente a necessidade de um estudo mais detalhado da oxidação da pirita em presença de umidade, como possível causa do aparecimento de algumas manchas marrons avermelhadas nas empenas, como apontado nas pesquisas de Jana (2008) e Pereira *et al* (2016).

Figura 22: Imagem microscópica do concreto da empena da Fachada Noroeste, com presença de núcleos anidro de clínquer e escória.



(a) Fachada Noroeste - NO - T1 face externa. Abundantes núcleos anidros de clínquer (indicados por setas vermelhas). Polarizadores paralelos, com condensador.



(b) Fachada Noroeste - NO - T1 face externa. Ao centro da imagem, indicada por seta vermelha, escória com halo ferruginoso. Polarizadores paralelos, com condensador.

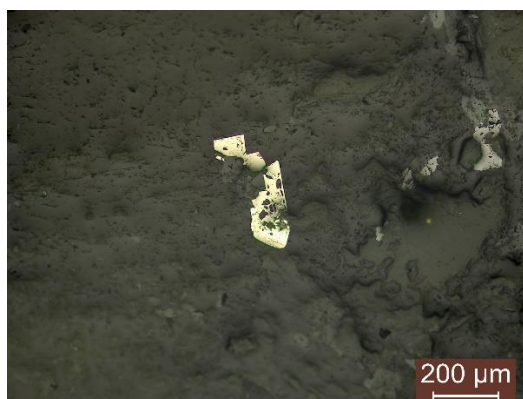
Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, (2018).

Figura 23: Imagem microscópica do concreto das empenas Noroeste e Nordeste, indicando presença de pirita (FeS_2)



Fotomicrografia: NO Seção polida. Cristais de pirita (FeS_2), amarelo, em borda do agregado. Polarizadores paralelos, microscopia de luz refletida.

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, (2018).

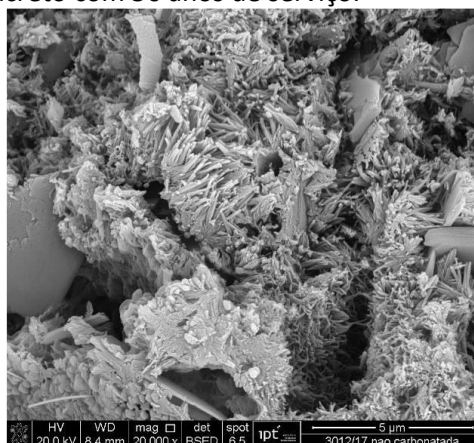


Fotomicrografia: NE Seção polida. Cristais de pirita (FeS_2), amarelo, em borda do agregado. Polarizadores paralelos, microscopia de luz refletida.

3.3.4. Microscopia Eletrônica de Varredura

Na figura 24 uma imagem de MEV, elétrons retroespalhados, de uma superfície de fratura do concreto com detalhe dos cristais de C-S-H, produto da hidratação dos silicatos de cálcio (C_2S e C_3S), com cristalinidade, morfologia e composição bastante variadas.

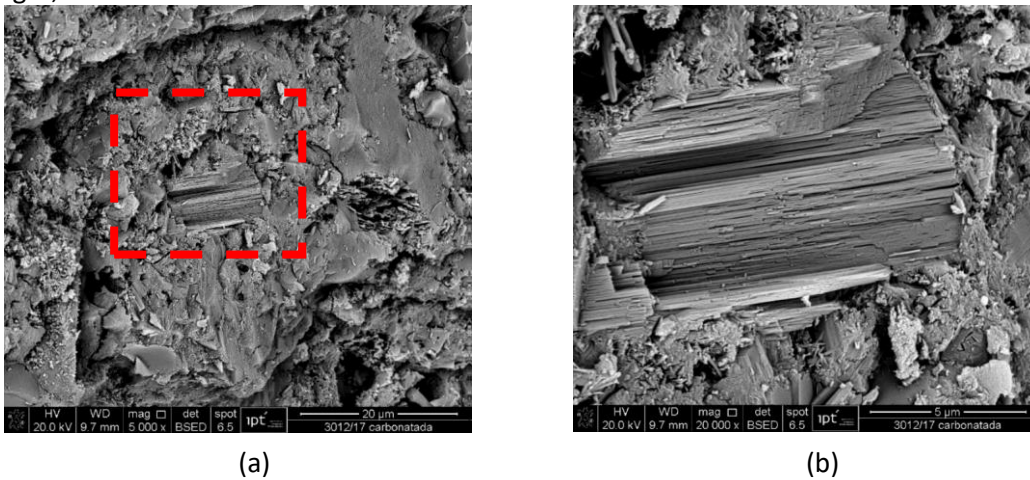
Figura 24: Cristais de C-S-H de amostra de concreto extraída do edifício Vilanova Artigas, edifício com estrutura de concreto com 50 anos de serviço.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, (2018).

Na figura 25 é possível observar em detalhe a imagem de MEV do hidróxido de cálcio (CH) (portlandita) da superfície de fratura de uma amostra de concreto, este tende a formar cristais grandes com morfologia prismática hexagonal.

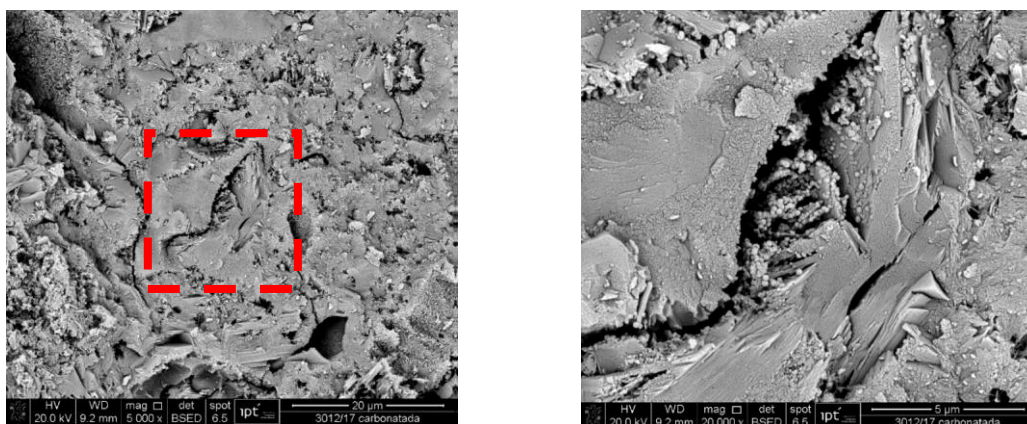
Figura 25: Imagem de: (a) micromassa de C-S-H densa com algumas placas de portlandita (CH), etringita e aluminatos de cálcio hidratados (b) Detalhe da imagem anterior (quadrado vermelho) mostrando a portlandita (CH), amostra de concreto extraída do edifício Vilanova Artigas, edifício com estrutura em concreto com mais de 50 anos.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, (2018).

Nas figuras 26 e 27 (a) e (b) são apresentadas as imagens de MEV da superfície de fratura de amostras da região carbonatada do concreto extraído da empena NO e NE respectivamente. Nestas imagens foi possível identificar os compostos característicos do processo de hidratação do cimento assim como elementos presentes do processo de deterioração do concreto, como o carbonato de cálcio advindo do processo de carbonatação do concreto.

Figura 26: Visualização da seção fraturada de MEV, CP retirado da região carbonatada do testemunho extraído da empena NO.



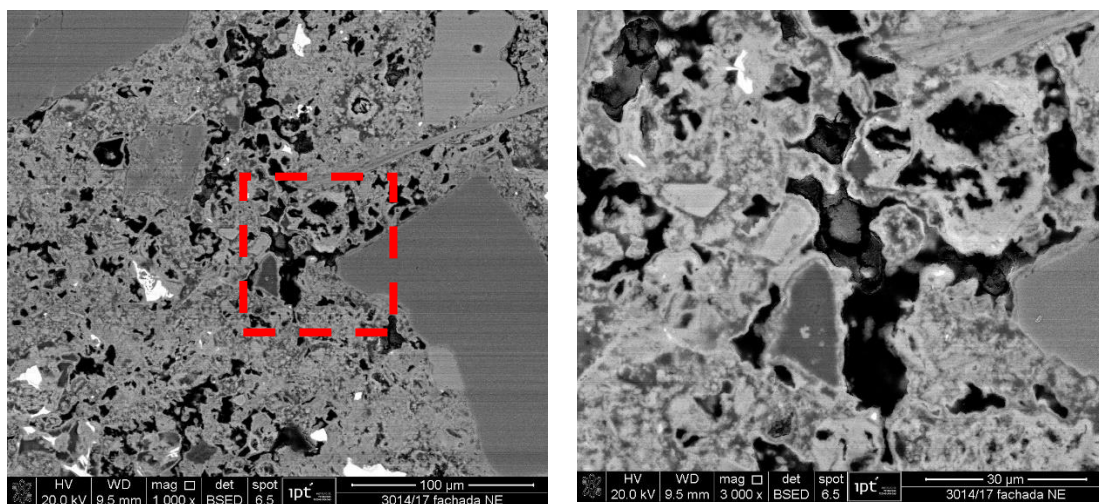
(a) Fachada Noroeste – NO, porção carbonatada. Dentro do quadrado vermelho provável fragmento de escória bordejada por portlandita. No entorno, micromassa de C-S-H densa com algumas placas de portlandita. Elétrons retroespalhados.

(b) Fachada Noroeste – NO, porção carbonatada. Detalhe da imagem anterior (quadrado vermelho) mostrando borda de provável fragmento de escória com presença de aluminatos em cristais diminutos arredondados e portlandita. Elétrons retroespalhados.

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, (2018).

Na figura 27 (a) e (b), imagem do MEV de seção polida é possível observar o processo de degradação do concreto com uma região porosa da pasta lixiviada, sendo que os pontos em preto da imagem representam os vazios. Na microscopia ótica foi observada através de análise de imagem uma maior porosidade total na amostra do concreto extraído da empena NE do que na NO.

Figura 27: Visualização da seção polida na MEV. CP retirado da região carbonatada do testemunho extraído da empena NE.

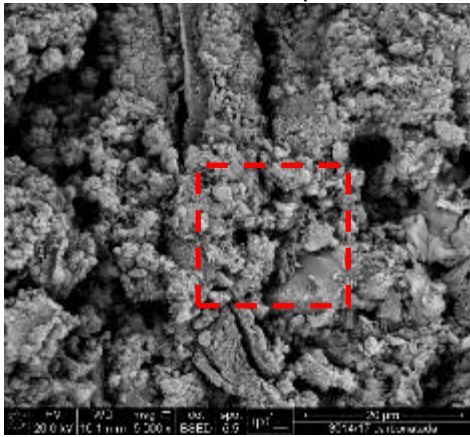


(a) zona porosa indicando lixiviação do ligante. Os vazios estão representados em preto.
 (b) ampliação da porção do quadro em vermelho. Elétrons retroespalhados.

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, (2018).

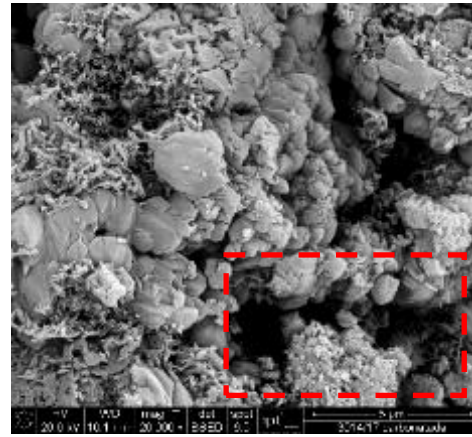
Na figura 28 (a) e (b), pode-se observar a presença de carbonato de cálcio, C-S-H além de região porosa com ligante lixiviado. O carbonato de cálcio precipita colmatando os vazios da pasta e, potencialmente, reduzindo a porosidade como pode ser observado nos resultados dos ensaios de porosimetria de mercúrio que apresentados nas figuras de 29 e 30 nas tabelas 7 e 8.

Figura 28: Visualização da seção fraturada de MEV, CP retirado da região carbonatada do testemunho extraído da empena NE.



(a) Fachada Nordeste – NE, porção carbonatada. Superfície de fratura. Zona microporosa com cristais de carbonato de cálcio, oriundos de carbonatação, e cristais fibrosos de C-S-H. Elétrons retroespalhados

Fonte: Pinheiro *et al.* (2017).



(b) Fachada Nordeste – NE, porção carbonatada. Superfície de fratura. Detalhe dos cristais de carbonato (tabulares) e de C-S-H (fibrosos) da imagem anterior (quadrado vermelho). Elétrons retroespalhados.

Nas análises realizadas não foram detectadas evidências de manifestações patológicas internamente no concreto.

No programa experimental a análise no MEV foi utilizada para observar se houve alteração na barra de aço após aplicação do inibidor de corrosão na superfície do concreto carbonatado.

3.3.5. Porosimetria de intrusão de mercúrio (PIM)

Esta técnica é aplicável para análise de poros com tamanhos entre 300 μm a 3 nm.

Foram realizados ensaios em amostras carbonatadas e não carbonatadas para as empenas NE, NO. Os resultados são apresentados nas figuras 29 e 30 e nas tabelas 7 e 8. As determinações de porosimetria por intrusão de mercúrio foram realizadas em equipamento Auto Pore IV – Micromeritics, com procedimento de acordo com a ISO 15901/2005. O volume de mercúrio que penetra na amostra é função da pressão hidrostática aplicada que é relacionada ao diâmetro dos poros.

Trata-se de uma técnica que apresenta limitações de análise, não sendo muito adequada para estudos da nanoporosidade, além disso, segundo Campos, (2017) os resultados trazem algumas incertezas sobre o verdadeiro tamanho e distribuição dos

poros, visto que esta análise é realizada considerando-se o formato dos poros cilíndricos, o que não ocorre de fato. Outra questão que prejudica a análise desta técnica é que quando há interconexão entre dois poros, é necessária a aplicação de pressão para o mercúrio superar o efeito de capilaridade e ocupar o segundo poro.

No entanto, apesar de todas estas limitações, a técnica é útil para análises comparativas, viabilizando o cotejamento dos resultados entre as amostras carbonatadas e não carbonatadas para a compreensão dos padrões encontrados no concreto analisado.

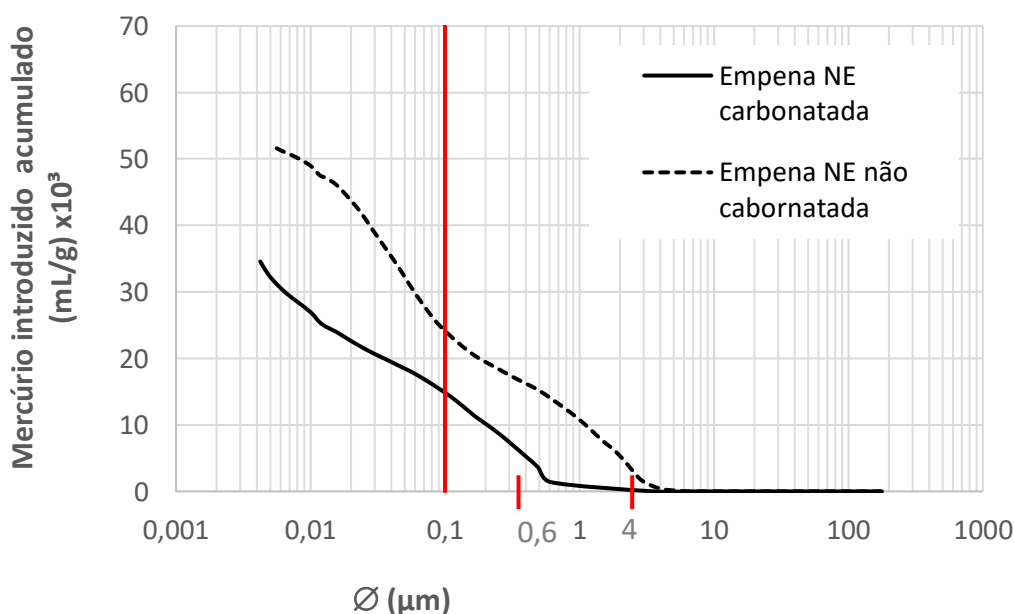
Tabela 7: Volume de mercúrio introduzido nas amostras das empenas do edifício Vilanova Artigas (ml/g)X 10⁻³.

Diâmetro (µm)	Empena NE		Empena NO	
	carbonatada	não carbonatada	carbonatada	não carbonatada
d > 0,108	12,810	21,745	23,698	32,613
d ≤ 0,108	21,772	30,763	14,069	18,326
total (d ≥ 0,004)	34,581	52,508	37,767	50,93965

Fonte: Pinheiro *et al.* (2017).

O volume de mercúrio introduzido nas amostras carbonatadas foi menor do que nas amostras não carbonatadas, chegando a 1/3 menos na empena NE e 1/4 na empena NO, quando analisado o volume total.

Figura 29: Amostras de concreto, carbonatado e não carbonatado, em ensaio de porosimetria de mercúrio com volume de mercúrio introduzido acumulado em relação ao diâmetro dos poro contidos na amostra, retiradas da empena NE.

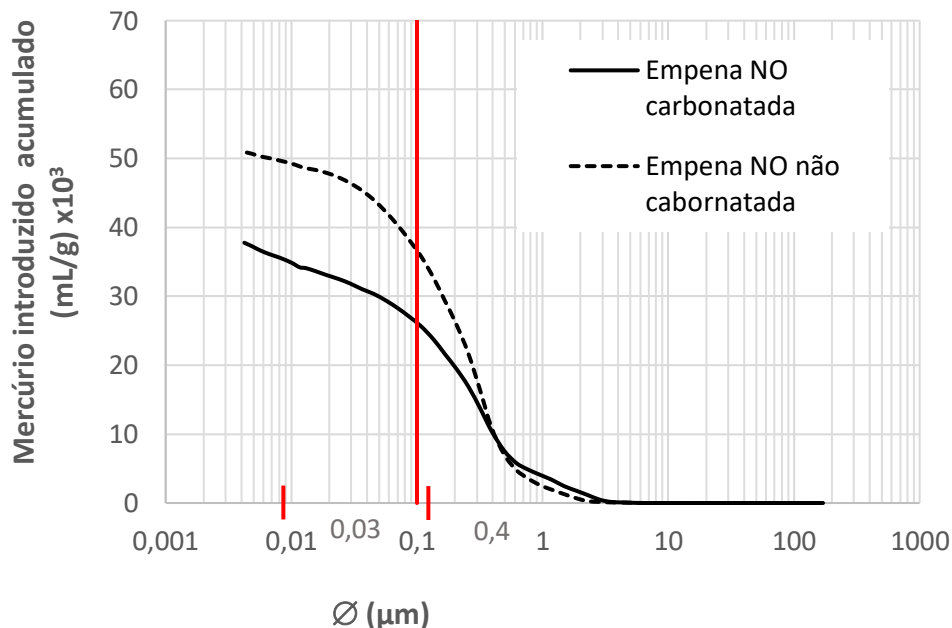


Fonte: Pinheiro *et al.* (2017).

Outras análises podem ser realizadas com os dados da tabela 7 e 8 em relação a estrutura porosa apresentada no concreto analisado que são:

- Na empena NE o volume de mercúrio introduzido nos poros com diâmetro $\leq 0,108 \mu\text{m}$ é maior do que nos poros maiores, portanto, há maior concentração de poros menores;
- As empenas apresentam menor volume de mercúrio introduzido nas amostras carbonatadas, conseqüentemente estas amostras apresentam menor porosidade;
- A empena NO apresenta maior volume de mercúrio introduzido nos poros $> 0,108 \mu\text{m}$ indicando maior volume de poros nesta dimensão dos poros da amostra.

Figura 30: Amostras de concreto, carbonatado e não carbonatado, em ensaio de porosimetria de mercúrio com volume de mercúrio introduzido acumulado em relação ao diâmetro dos poros contidos na amostra, retiradas da empena NO.



Fonte: Pinheiro *et al.* (2017).

As figuras 29 e 30 apresentam algumas informações importantes como: as curvas que relacionam o volume de mercúrio introduzido acumulado no concreto e a abertura do poro, dada por seu diâmetro equivalente e a indicação do limite mínimo (0,1 μm ou 100 nm) do tamanho de poros que exercem forte influência no transporte de massa no concreto, de acordo com Meng (1994) representado pela linha vermelha. É importante analisar a variação do volume de mesoporos em razão da sua maior

interferência no comportamento das propriedades do concreto como na resistência à compressão entre outras.

Pode-se observar na figura 29 que a amostra carbonatada da empena NE apresentou menor volume de poros do que a amostra não carbonatada, fato este que se repete nas amostras da empena NO, figura 30.

A amostra da empena NE carbonatada teve uma grande redução da porosidade na faixa de 4 a 0,6 μm (4000 a 600 nm) em relação a não carbonatada, traços vermelhos menores no eixo X. Deste ponto em diante as curvas seguiram praticamente paralelas indicando que a carbonatação não teve influência na redução dos poros com diâmetros inferiores a 0,6 μm .

Nas amostras analisadas da empena NO, o comportamento alterou-se um pouco, sendo reduzido o volume de poros da amostra carbonatada na faixa de 0,4 a 0,03 μm (400 a 30 nm), traços vermelhos menores no eixo X.

Na tabela 8 podemos confirmar as informações apresentadas nas imagens 29 e 30 com relação a porosidade e diâmetro crítico apresentados nas amostras carbonatadas e não carbonatadas.

Tabela 8: Porosidade e diâmetro crítico das amostras retiradas das empenas e da viga de cobertura. Dados obtidos por meio do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, a partir das curvas $\Delta V/\Delta \log D$ versus diâmetro equivalente e porosidade acumulada versus diâmetro equivalente.

	Empena NE		Empena NO	
	Carbonatado	Não carbonatado	Carbonatado	Não carbonatado
porosidade (%)	7,5	11,9	9,1	11,6
Diâmetro crítico (d_{crit})(μm)	0,5 *	2,0 *	0,3	0,3
	0,01 **	0,05 **		

Notas: * Considerado o primeiro ponto de inflexão da curva da porosidade acumulada.

** Considerado o segundo ponto de inflexão da curva de porosidade acumulada.

Fonte: Pinheiro *et al.* (2017).

Portanto as amostras das empenas carbonatadas apresentaram menor porosidade do que as amostras não carbonatadas. A carbonatação nos materiais cimentícios podem reduzir a porosidade total da matriz devido a formação de carbonato de cálcio nos poros do concreto que apresenta um volume maior do que o hidróxido de cálcio. Há também a alteração da distribuição do tamanho dos poros, aumentando a proporção dos poros capilares, assim como aconteceu nas amostras da empena e pode

ser também evidenciado em referencias como Araújo, (2009), Morandeu, Thiéry e Dangla (2014); Auroy, *et al.* (2015), Ashraf, (2016) entre outros pesquisadores.

A porosimetria de intrusão de mercúrio será utilizada no programa experimental para analisar se a penetração dos produtos de proteção de superfícies no concreto carbonatado alteram as condições de porosidades em relação as amostras de referência carbonatada. Além disso será também feita a avaliação de amostras de concreto referência carbonatado e não carbonatado para confirmar a redução da porosidade do concreto.

3.4. CONDIÇÃO DA ARMADURA

Dada a posição da frente de carbonatação da estrutura do edifício Vilanova Artigas, é importante examinar fundamentos do processo de carbonatação e, nas condições do edifício em análise, analisar sua influência na corrosão das armaduras e, paralelamente, na penetração dos produtos / sistemas de proteção de superfície.

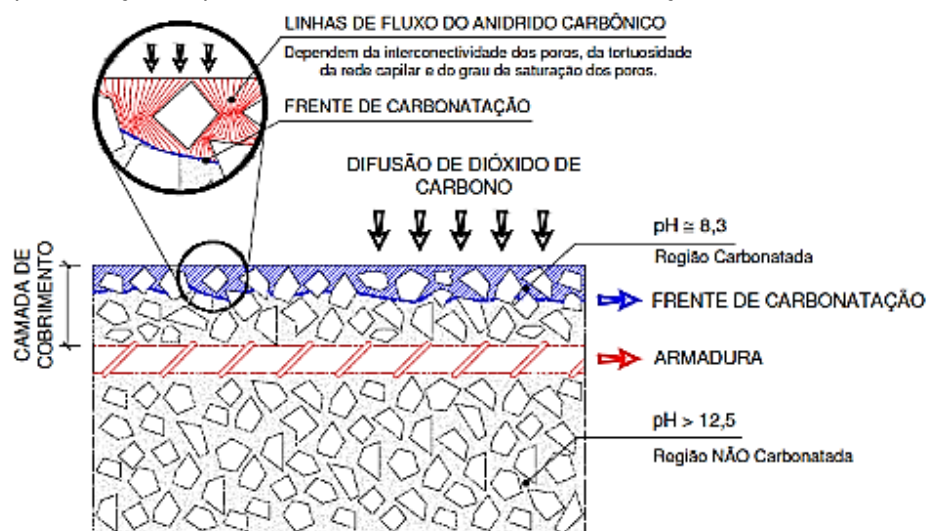
Segundo Raisdorfer *et. al.* (2015) a carbonatação é um fenômeno natural que ocorre em estruturas de concreto quando o CO_2 se difunde na rede de poros interconectados do material reagindo com espécies químicas da pasta de cimento hidratado diminuindo o pH do meio, levando à despassivação das armaduras e podendo resultar no início de um processo de corrosão.

A reação da carbonatação é um processo relativamente lento, que ocorre com o ingresso do dióxido de carbono CO_2 , presente na atmosfera (teores em torno de 0,04%), pelo processo de difusão e em estruturas porosas com poros conectados e não preenchidos com água. O CO_2 reage com o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, portlandita e com o silicato de cálcio (C-S-H) formando o carbonato de cálcio CaCO_3 desprendendo gás carbônico, liberando água adsorvida ou condensada nos poros capilares como apresentado em Morandeu, Thiéry e Dangla (2014).

Esta reação diminui o valor do pH a valores mais próximos da neutralidade, entre 8,3 e 9, afetando a estabilidade química da película protetora do aço, gerando a despassivação da armadura. Este processo de carbonatação pode ser visualizado na figura 31, onde é possível observar a redução do pH (8,3) na camada de revestimento e

o $\text{pH} > 12,5$ na camada envolvente da armadura. Como apresentado em Bertolini (2010), Oliveira (2017) e Stefanoni, Angst e Elsener (2018) alguns fatores são fundamentais para o desenvolvimento da reação de carbonatação que são: a umidade³⁴ (para dissolução dos compostos), temperatura, concentração de CO_2 na atmosfera e porosidade do concreto³⁵.

Figura 31: Representação esquemática do mecanismo de carbonatação.



Fonte: Hoppe Filho, (2008).

Várias pesquisas apontam para uma redução da porosidade da matriz da pasta de cimento Portland em função da carbonatação (GENTIL, 1996, SATO, 1998, MORANDEAU; THIÉRY; DANGLA, 2014, REUS, 2017, OLIVEIRA, 2017). O carbonato de cálcio, principal produto formado na carbonatação de concretos de cimento Portland, contribui para obstruir parcialmente os poros menores responsáveis pela absorção por capilaridade, no entanto não altera significativamente os poros de maiores dimensões. Consequentemente a carbonatação reduz a difusão e permeabilidade, principalmente em concretos com relação A/c menores (SATO, 1998).

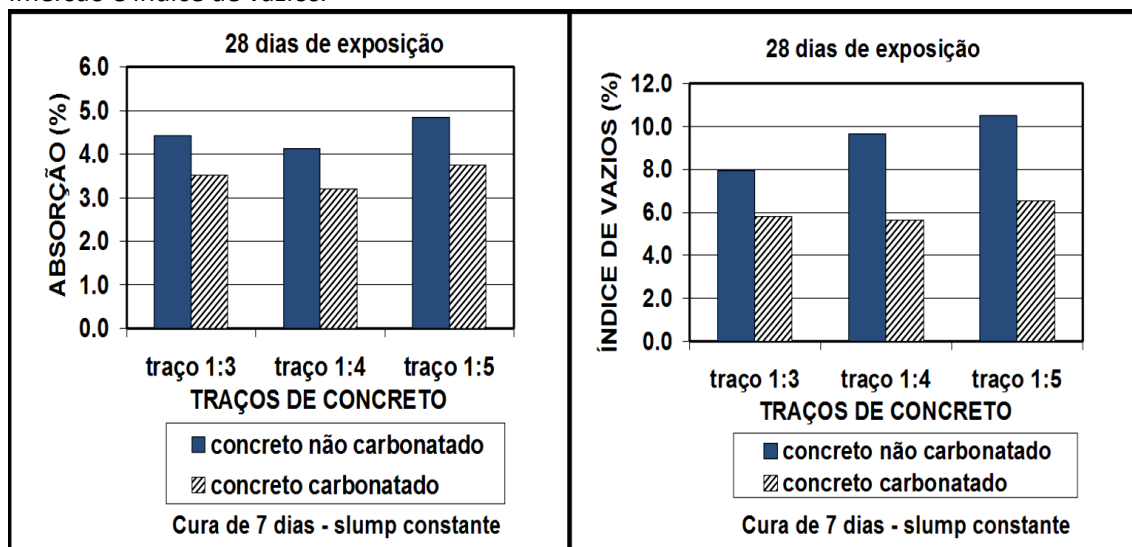
Na figura 32, Reus (2017), a partir de resultados de Medeiros e Helene (2001), ilustra a influência da carbonatação na absorção de água e no índice de vazios em três

³⁴ Faces externas de estruturas de concreto podem apresentar menor profundidade de carbonatação, pois tendem a apresentar umidade próxima aos valores de saturação, levando a taxas menores de carbonatação.

³⁵ A velocidade de carbonatação aumenta quando cresce a temperatura e concentração de CO_2 na atmosfera e uma baixa porosidade capilar da pasta, devido a uma baixa relação A/c permite reduzir a difusão do CO_2 (BERTOLINI, 2010).

traços de concretos; em todos os traços, tanto a absorção de água, quanto o índice de vazios foram menores no concreto carbonatado.

Figura 32: Comparação entre concreto carbonatado e não carbonatado quanto a absorção por imersão e índice de vazios.



Fonte: Réus (2017) adaptado de Medeiros e Helene (2001).

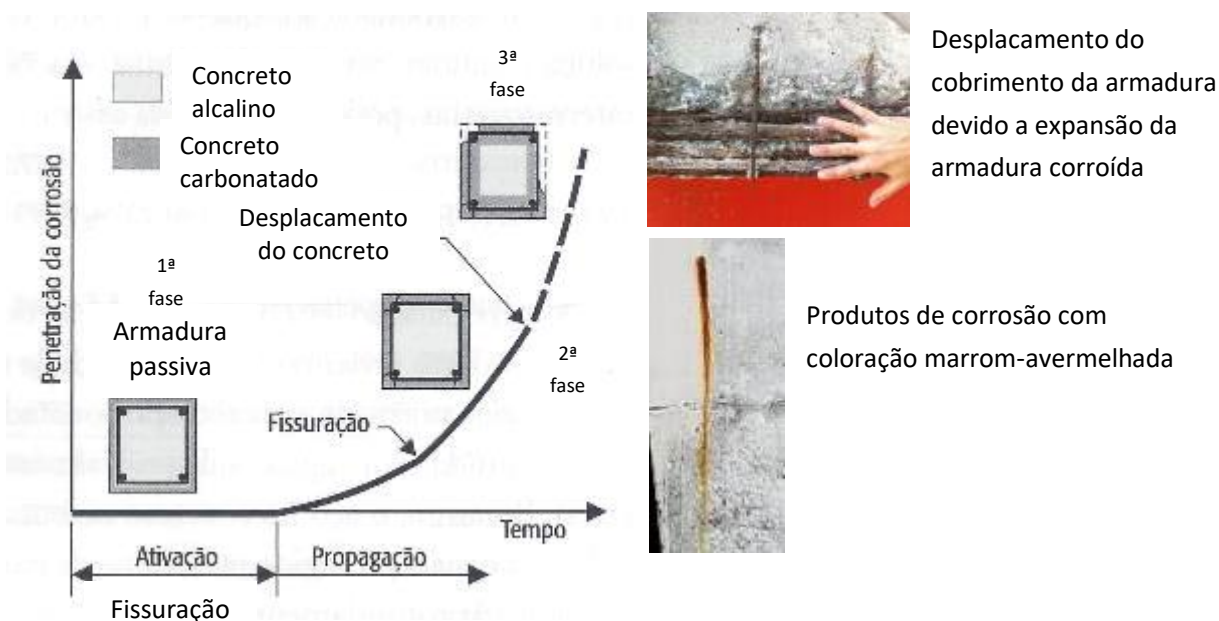
A umidade e porosidade são fatores fundamentais para o avanço da frente de carbonatação no concreto.

Uma estrutura em condições de saturação ou de concreto seco apresenta pequena velocidade de carbonatação. No caso de saturação a difusão do CO_2 é impedida e em concretos secos não é possível a reação dos compostos alcalinos do concreto com o CO_2 . Teores de umidade relativa intermediários na faixa de 60 a 85% propiciam condições que potencializam a carbonatação (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011; STEFANONI; ANGST; ELSENER, 2018). A porosidade, notadamente a porosidade da camada de cobertura, tem efeito preponderante na penetração e difusão do CO_2 . Como já comentado, a maior porosidade da superfície das estruturas de concreto aparente, moldadas com fôrmas de madeira bruta, em associação às falhas e lacunas derivadas do processo produtivo, aceleram o avanço da frente de carbonatação.

O processo de corrosão é tradicionalmente representado pelo modelo descrito por Tuutti (1982, p. 18), e pode ser observado na figura 33. No primeiro período, ativação ou iniciação, a armadura apresenta-se passivada e não corroí, nesse período

espécies químicas (gás carbônico, íons cloreto) penetram no concreto até atingirem a armadura em concentrações que levam à despassivação do aço. O segundo período, propagação, tem início a corrosão do aço propriamente dita com perda de aderência entre aço e concreto, perda da seção das barras e aumento do volume de produtos de corrosão que resultam a fissuração da capa de cobrimento da armadura.

Figura 33: Modelo de corrosão descrito por Tuutti (1982) com modificações de Bertolini (2010). As fotos ao lado trazem evidências características das duas fases do processo corrosivo.



Fonte: adaptado Bertolini (2010) com fotos de Oliveira (2013) e Tatiana Simão (2018).

Bertolini (2010) explica que no período de propagação ocorre a despassivação da armadura e desenvolvimento do processo de corrosão até estágios de deslocamento e risco de queda de fragmentos da estrutura. Com o processo de corrosão da armadura, em função dos óxidos de ferro que se formam e expandem de 2 a 10 vezes em relação ao volume original da armadura, gerando tensões de expansão da ordem de 15 MPa, inicialmente há o aparecimento de manchas que escorrem na superfície do concreto resultado dos produtos de corrosão com coloração marrom-avermelhada, (figura 33) e posteriormente há fissuração nas bordas da estrutura e finalmente o deslocamento do cobrimento do concreto (FERNÂNDES CÂNOVAS, 1977 apud HELENE, 1986).

Tanto a carbonatação quanto a velocidade de corrosão são muito influenciadas pelo microclima³⁶ no qual a estrutura está envolvida. As condições de umidade ambiental podem variar muito em diferentes locais da mesma estrutura, quer seja pela incidência de vento ou chuva, ou mesmo pela presença de vegetação local. Bertolini (2010) explica que o concreto seco tem resistividade elevada, mas quando umedecido tem resistividade baixa o que leva ao conseqüente aumento da velocidade de corrosão. Portanto, na empena nordeste (NE) do edifício Artigas, que está diretamente exposta às chuvas mais intensas no verão e que permanece mais tempo umedecida por sombreamento das árvores, foi registrada a maior área de reparos.

No edifício Vilanova Artigas, além de determinar a profundidade de carbonatação do concreto das empenas também foram realizados, nas áreas escarificadas, ensaios eletroquímicos como pode ser observado na figura 34. Um fato importante de se salientar do processo de escarificação da argamassa de reparo foi que as armaduras expostas estavam parcial ou totalmente embutidas no concreto original; em algumas barras, mais externas, foi detectado acúmulo de produtos de corrosão na interface barra/concreto como apresentado Araújo, Ferreira Neto e Almeida (2018). Fato este divergente das orientações de execução apontadas no relatório técnico 136/2010 da PhD elaborado por Helene; Britez; Antunes, (2010) que fundamentaram as especificações para a execução das obras de intervenção do edifício.

³⁶ De acordo com Araújo; Ferreira Neto; Almeida (2018) a vegetação intensa com solo permeável no entorno do edifício Vilanova Artigas são condição adequada para formação de um microclima com UR elevada, acima da faixa média de 75 % a 85 %. Além disso, essa vegetação (árvores próximas às fachadas) sombreia parte da superfície das empenas (principalmente NE) que é condição adequada para manter, por maiores períodos, a superfície do concreto úmida (tempo de molhamento). Além disso, admite-se que a vegetação atue como barreira à incidência de ventos sobre a superfície das fachadas, conseqüentemente, também da incidência de chuva dirigida.

Figura 34: Aspecto visual da superfície da armadura após aspersão da solução de fenolftaleína, a esquerda o concreto apresentou-se parcialmente carbonatado a direita o concreto apresentou-se carbonatado.



Fonte: Pinheiro *et. al.* (2017).

As observações registradas em todas as escarificações feitas nas empenas das áreas de reparo investigadas mostram a dificuldade da escarificação do concreto que envolve a armadura.

3.4.1. Determinação de profundidade de carbonatação

O levantamento da profundidade de carbonatação foi realizado através da técnica de aspersão de solução de fenolftaleína. As avaliações foram realizadas em regiões onde havia os reparos no concreto e posteriormente foram realizados os ensaios eletroquímicos. A aspersão da solução foi realizada em superfícies recém fraturadas e os resultados são apresentados da tabela 9.

Tabela 9: Resultados da determinação da profundidade da frente de carbonatação por empena.

Empena	Profundidade de carbonatação	
	Concreto (mm)	Argamassa de reparo (mm)
SO	14 a 38	4 a 34
NO	11 a 25	3 a 7
NE	22	3 a 15
SE	15 a 26	5 a 10

Fonte: elaborado pela autora com dados de Araújo; Ferreira Neto; Almeida, (2018).

No projeto experimental desta tese a técnica foi utilizada para a verificação da profundidade de carbonatação no processo de realcalinização química do concreto, bem como no acompanhamento da profundidade de carbonatação dos CPs colocados na câmara de carbonatação.

Nas áreas da argamassa de reparo escarificada foram realizadas as medidas de espessura de cobrimento das armaduras. De acordo com resultados apresentados em Araújo; Ferreira Neto; Almeida, (2018) esta avaliação da espessura de cobrimento por empena apresentou-se da seguinte forma (tabela 10).

Tabela 10: Variação da espessura de cobrimento da armadura por empena.

Empena	Espessura de cobrimento (mm)
SO	10 a 33
NO	14 a 17
NE	8 a 12
SE	7 a 20

Fonte: Elaborado pela autora com dados de Araújo; Ferreira Neto; Almeida, (2018).

Pode-se observar nos dados apresentados na tabela 10 que a empena SO apresentou a maior variação de cobrimento de armadura chegando a uma variação de 23 mm (10-33mm), posteriormente as empenas SE com uma variação de 13 mm (7-20 mm), a NE de 4 mm (8 a 12 mm) e pôr fim a empena NO (14 a 17 mm). Outro fato importante de ser observado com relação a empena NE foi que esta não apresentou o cobrimento mínimo exigido a época da construção pela NB - 1 (1960), que era de 20 mm para vigas, pilares e arcos ao ar livre. Esta mesma empena foi a que apresentou maior área de reparo (333 m² com 37% de área da superfície em reparos).

3.4.2. Ensaio eletroquímico

As avaliações de taxa (icorr) e potencias de corrosão (Ecorr) foram realizadas em áreas da empena pré-definidas onde também foram realizados ensaios de inspeção visual mais detalhadas, determinação de som cavo e determinação do teor de umidade, além da medida da profundidade de carbonatação e do cobrimento da armadura. Com estas informações convergentes numa mesma área de análise é possível um conhecimento melhor da condição eletroquímica do material, os resultados estão na tabela 11.

Araujo *et al.* (2017) explica que a avaliação da densidade de corrente de corrosão por unidade de área, também denominada taxa de corrosão expressa em $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ é utilizada para identificar regiões passivas e ativas de corrosão e avaliar a efetividade de reparos.

No entanto para medir a taxa de corrosão (i_{corr}) é necessário o posicionamento do sensor do equipamento diretamente sobre a armadura, previamente localizada.

O potencial de corrosão (E_{corr}) é avaliado por uma série de medidas realizadas na superfície da estrutura a ser analisada e o resultado é apresentado em Volt (V) ou milivolt (mV). Em campo, segundo Araujo et al. (2017) a diferença de valores de potencial entre regiões possibilita localizar de forma aproximada, a área ativa de corrosão, pois há uma elevação gradual dos valores de E_{corr} entre áreas ativas e passivas de uma macrocélula de corrosão.

De acordo com Araújo; Ferreira Neto; Almeida, (2018) as medidas da taxa de corrosão foram realizadas com uso do equipamento CorroMap da empresa Force Technology que consta de sensor com embutimento (central) de eletrodo de referência de prata cloreto de prata com solução interna de cloreto de potássio - EPCP (Ag/AgCl, KCl sat.) de valor de 209 mV vs eletrodo padrão de hidrogênio. Explica-se que o uso de eletrodo de referência é fundamental para as medidas eletroquímicas, sendo este um sistema eletroquímico em equilíbrio e, portanto, de valor de potencial conhecido e estável ao longo do tempo (ARAUJO *et al.* 2017). Há também um contraeletrodo anular de zinco (diâmetro externo de 6 cm). Esse sensor é colocado em contato com a superfície do concreto e entre o contraeletrodo e a armadura é aplicada a corrente anódica (pulso de 10 s).

Tabela 11: Resultados das avaliações de taxa de corrosão e potencial de corrosão das empenas do edifício Vilanova Artigas.

Empena	avaliações eletroquímicas do concreto		
	Potencial de corrosão* médio nos reparos (E_{corr}) (mV)	Taxa de corrosão média nos reparos (i_{corr}) $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Estado eletroquímico atribuído e risco de corrosão
SO	63,7	2,1	Ativo / Severo
NO (2 áreas de reparo)	-22,6 e 21,1	1,8 e 1,1	Ativo / Severo
NE (2 áreas de reparo)	93,5 e 178,6	1,6 e 1,5	Ativo / Severo
SE (2 áreas de reparo)	25 e -94,5	0,6 e 1,4	Ativo / Moderado a Severo

*utilizado eletrodo de referência de prata cloreto de prata com solução interna de cloreto de potássio – (Ag/AgCl KCl Sat.)

Fonte: Elaborado pela autora com dados de Araújo; Ferreira Neto; Almeida, (2018).

Para a medida de potencial de corrosão (E_{corr}), foi utilizado o equipamento CorroMap, que consta de sensor com embutimento (central) de eletrodo de referência de prata cloreto de prata com solução interna de cloreto de potássio - EPCP (Ag/AgCl, KCl sat.) de valor de 209 mV vs eletrodo padrão de hidrogênio.

Com as medidas da taxa de corrosão, de acordo com Andrade *et. al* (2004) a avaliação do risco de corrosão das armaduras do concreto do edifício Vilanova Artigas está de moderado a severo ($0,5$ a $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ moderado e $>1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ severo). Conforme pode ser visto em Araújo *et al.* (2017), o potencial de corrosão de armaduras em estado ativo de corrosão em concreto carbonatado apresenta valores de potencial de corrosão entre $+209$ a -291 (Ag/AgCl KCl Sat.).

No projeto experimental as medidas de potencial de corrosão foram utilizadas para avaliar a eficiência no controle da corrosão tanto nos corpos de prova no laboratório como em avaliação em campo como será apresentado no capítulo 5. Salienta-se que não foi realizada as medidas da taxa de corrosão em campo pois há necessidade de localizar exatamente a armadura e posicionar o eletrodo sobre ela e com a presença de produtos estas leituras são mais difíceis, então adotou-se apenas as medidas de potencial de corrosão que poderiam ser correlacionadas as informações de campo com laboratório.

3.5. CONSIDERAÇÕES SOBRE A CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO DO EDIFÍCIO VILANOVA ARTIGAS

Os resultados dos levantamentos *in loco* servem como parâmetros para o estudo do concreto das superfícies externas do Edifício Artigas, mas não podem ser generalizados pela limitação das amostras ensaiadas. Uma quantidade de testemunhos considerada representativa ainda é impraticável em razão das restrições legais impostas à proteção do bem tombado.

Dos levantamentos *in loco* algumas conclusões podem ser tiradas com base nas amostras analisadas:

- O concreto das empenas apresentou resistência na ordem de 38 MPa;

- Na reconstituição do traço obteve-se um traço médio de 1:4 relação cimento / agregados em massa, com consumo médio de cimento de 420 kg/m³ e relação a/c 0,5 referência adotada no método de reconstituição utilizado;
- O concreto das empenas apresentou menor quantidade de poros nas amostras carbonatadas em relação as não carbonatadas. Além disso, as amostras analisadas apresentam um aumento significativo no volume de mercúrio introduzido nos poros com dimensões inferiores a 0,1 µm, tamanho de poros que exerce forte influência no transporte de massa no concreto.
- As análises feitas ao microscópio em corpos de prova de seção polida, permitiram identificar regiões mais porosas com pasta lixiviada; as amostras retiradas da empena NE apresentaram maior porosidade superficial, o que é coerente com a maior porcentagem de reparos na intervenção realizada. No contexto das análises realizadas não foi encontrada degradação ou manifestações patológicas graves que levem a considerar o edifício em condições críticas;
- Os ensaios eletroquímicos das armaduras de pele apresentaram resultados de potencial de corrosão em estado ativo e taxa de corrosão severa (> que 1 µA/cm²);

As empenas do edifício, apesar de todos os pontos apresentados, até o momento não apresentam manifestações patológicas graves, embora exijam ações para manutenção corretiva de danos localizados. Nessas condições ações de cunho preventivo devem ser planejadas e implementadas para evitar um novo ciclo de intervenções invasivas e a conseqüente descaracterização das suas superfícies.

Os resultados foram cotejados com dados de trabalhos experimentais sobre o patrimônio arquitetônico do século XX. Embora os trabalhos publicados sejam ainda escassos, o cotejamento evidencia que o concreto do edifício Artigas tem propriedades condizentes com concreto de outros edifícios similares, quanto à resistência mecânica e ao consumo de cimento. Nos trabalhos consultados ainda é explicitada a dificuldade de intervir nos edifícios a partir de incertezas associadas às limitações de investigação, como também à falta de resultados sobre o desempenho dos reparos no longo prazo. Apesar de desafiadora, a conservação dessas estruturas requer a continuidade das

investigações, preferencialmente, combinando ações em campo e ensaios laboratoriais.

Esses desafios não são restritos ao patrimônio cultural de concreto aparente. Angst *et al.* (2020) apontam que, a despeito do crescente volume de publicações nos últimos 100 anos, há poucas experiências documentadas sobre as condições que levam as edificações, com armaduras corroídas por carbonatação, a danos estruturais. Essa lacuna se deve à escassez de investigações feitas em estruturas em serviço após a despassivação da armadura, ou seja, no estágio de propagação da corrosão.

Hansson (2022) também identificou essa lacuna ao detectar que, desde a descrição do modelo da corrosão em Tuutti (1982), o foco preferencial das pesquisas tem sido nos parâmetros que determinam a despassivação do aço e o início do estágio de propagação. Entretanto, Hansson (2022) destaca que poucos pesquisadores como Andrade e Molina (1993) reconhecem que, em termos práticos, a vida útil da estrutura não se limita ao final do estágio de iniciação.

Os experimentos de Andrade e Molina (1993) permitiram a conclusão de que, nas condições de realização dos ensaios, a abertura de fissura do cobrimento da armadura no limite de 0,3 mm não representa, necessariamente, a intensificação da taxa de corrosão e que a perda da seção da barra não afeta o estado limite último da estrutura. Para esse limite de abertura de fissura, pode-se considerar que o período de propagação é parte da vida útil da estrutura desde que a taxa de corrosão seja inferior a $10 \mu/\text{cm}^2$.

Como consequência dessa reflexão pode-se depreender que, especialmente para o patrimônio de concreto aparente, as decisões tomadas em grandes intervenções não devem ser dependentes do modelo de que a perda da passivação do aço leva à irreversível deterioração da estrutura. Antes é recomendável avaliar a durabilidade a partir de uma visão sistêmica, compreendendo a severidade, a extensão e as consequências dos danos que a corrosão traz às estruturas.

Essa não é uma tarefa fácil, dada a complexidade dos fenômenos envolvidos na corrosão das armaduras nas estruturas de concreto. Quanto maior for o

aprofundamento cognitivo do estado das estruturas, menos incertezas no processo de decisão. Isso está de acordo com os princípios da conservação do patrimônio que requer, antes de tudo, a manutenção e monitoramento constantes. Como pontua Broomfield (2007, p. 14) a complexidade também se revela pelo fato de que a teoria eletroquímica se aplica às condições de equilíbrio e em condições de contorno bem definidas, no entanto a corrosão é um processo dinâmico e, portanto, a interpretação e análise de resultados são aproximações da condição real e podem gerar conclusões distorcidas caso essas limitações não sejam consideradas.

ARAUJO *et al.* (2017) destacam que as anomalias da superfície dos elementos estruturais potencializam a prematura corrosão da armadura pelo fato de que essas anomalias resultam na concentração diferencial de umidade e de aeração do concreto levando à maior penetração de agentes agressivos. Anomalias como fissuras, lacunas superficiais, segregação, variação de espessura de revestimento, juntas de concretagem não tratadas podem ser encontradas em estruturas correntes, no entanto, no patrimônio arquitetônico de concreto aparente do século XX essas anomalias são muito frequentes. Reitera-se que as principais causas são a falta de rigor na etapa de execução e a insuficiência de técnicas construtivas mais apropriadas à execução de obras esculturais, formal e estruturalmente inovadoras à época.

O desafio é, portanto, identificar o limite aceitável das alterações necessárias à correção dessas anomalias – que naturalmente se agravam com o tempo - com o intuito de não descaracterizar a superfície, mas garantir a sobrevivência do próprio edifício.

4. OS SISTEMAS DE PROTEÇÃO DE SUPERFÍCIE EM CONCRETOS PARA A CONSERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO MODERNO

O presente capítulo apresenta o referencial teórico sobre o uso de produtos / sistemas de proteção de superfície para o concreto armado aparente como: inibidores de corrosão migratórios de base orgânicas mistos, realcalinizantes químicos e hidrofugante.

A utilização destes produtos ou sistemas na preservação do concreto aparente em patrimônio histórico apresenta-se viável, pois atende os requisitos de serem técnicas pouco invasivas que alteram minimamente as características visuais e táteis do material a ser protegido (BROOMFIELD e MACDONALD, 2003; SALMOND REED ARCHITECTS, 2003; LAMBERT e FOSTER, 2009; HEINEMANN, 2012; CUSTANCE-BAKER e MACDONALD, 2014; PINHEIRO *et al.*, 2017).

No entanto, ainda existem algumas lacunas no estudo do efeito destes produtos quando aplicados em superfícies de concretos carbonatados, com armaduras apresentando processo de corrosão, profundidade de penetração, além da eficiência deste ao longo do tempo.

Os produtos à base de inibidor migratório de corrosão misto começaram a ser usados na década de 1986 (DREW, MEYER; HICKS, 2012). Ao final dos anos 1990 e início dos anos 2000, começaram a ser divulgados resultados de aplicações desses inibidores, como medida de proteção de estruturas existentes, bem como procedimentos para a avaliação do desempenho dos produtos (BJEGOVIC; MIKSIC; STEHLY, 2000). Nos anos 2000, os inibidores migratórios de corrosão foram incluídos no conjunto de normas europeias (EN 1504 parte 9³⁷) entre os princípios e métodos de proteção e reparo das estruturas de concreto. Portanto, o recente uso e avaliação da eficácia dos inibidores de corrosão de estruturas em geral, justificam posicionamento cauteloso e o clamor pela necessidade de aprofundamento do debate por parte dos profissionais que trabalham com a conservação do concreto de valor histórico.

³⁷ EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1504-9:2008: products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 9: General principles for the use of products and systems

Marie-Victoire e Bouichou (2019) reportam a restauração de uma pequena edificação de valor cultural, entre 2000 e 2006, incluindo o uso de inibidor migratório de base inorgânica no concreto severamente deteriorado pela corrosão das armaduras por carbonatação e por cloretos. Apesar dos ciclos de manutenção, após 11 anos a estrutura requeria nova intervenção em razão do nível de deterioração alcançado.

Para Marie-Victoire, Bouichou e Jourdan (2017) inibidores de corrosão de base orgânica têm efeito, predominantemente, preventivo; os inorgânicos, por sua vez, podem ter efeito no controle da corrosão, mas o tamanho da molécula limita a profundidade de penetração no concreto reduzindo a durabilidade do tratamento.

Quanto ao uso do realcalinizante, observam-se muitos estudos da técnica de realcalinização eletroquímica desde meados dos anos de 1990, no entanto trata-se de uma técnica invasiva, que necessita de aplicação de corrente elétrica externa a armadura. Marie-Victoire, Bouichou e Jourdan (2017) destacam que inúmeras pesquisas demonstraram a eficácia da realcalinização eletroquímica do patrimônio arquitetônico de concreto, no entanto o efeito protetivo não se mantém em médio e longo prazos, independentemente do suprimento de corrente (corrente impressa ou ânodo de sacrifício), da densidade de corrente e da duração do tratamento ou do tipo de eletrólito. Mesmo para estruturas de concreto comuns, a eficácia da realcalinização tem sido questionada por pesquisadores experientes no estudo da corrosão. Dados experimentais obtidos por Sahal *et al.* (2011) evidenciam a reativação do processo corrosivo decorridos 12 meses da suspensão do tratamento com corrente impressa aplicada à armadura.

Já a realcalinização química é pouco invasiva, no entanto as pesquisas são mais recentes e são poucos os trabalhos publicados, principalmente na utilização em edifícios do patrimônio arquitetônico, apesar de ser indicada pelos especialistas em conservação como apresentado nos textos de Broomfield e Macdonald (2003); Salmond Reed Architects (2003); Lambert e Foster (2009); Heinemann (2012); Custance-Baker e Macdonald (2014).

A hidrofugação está entre as proteções preferidas e tem sido empregada há décadas para a proteção da superfície de estruturas de concreto aparente em geral. Desde a primeira série de conferências dedicadas ao campo da hidrofugação dos

materiais de construção (DE VRIES, 1995; BISSIG, 1995³⁸) pesquisas têm evoluído, inclusive quanto à durabilidade dos hidrofugantes (BÜTTNER; RAUPACH, 2008), até aplicações mais recentes, inclusive no patrimônio arquitetônico de concreto (COURARD *et al.*, 2014; MARIE-VICTOIRE; BOUICHOU; JOURDAN, 2017; SHEN *et al.*, 2019; DI MUNDO *et al.*, 2020). Mas recentemente a associação dos hidrofugantes e inibidores migratórios de corrosão têm demonstrado a sua viabilidade para a aplicação na proteção do concreto de edifícios históricos (Edelson, 2007; Buchner; Pepi, 2015; Instituto de Ciencias de La Construcción Eduardo Torroja IETCC, 2015; Slaton; Gaudette; Patterson, 2018; Silva; Meyer, 2019) particularmente em razão da discreta alteração, segundo alguns pesquisadores, das características visuais e táteis do concreto aparente.

A despeito dos resultados documentados, a proteção do patrimônio arquitetônico, em particular, requer estudos prévios para o conhecimento dos fatores intrínsecos e extrínsecos (propriedades do material, estado de conservação, características da edificação, temperatura e umidade dos ambientes, entre outros) que condicionam o desempenho do sistema de proteção de superfície. Além disso, o estudo aprofundado dos mecanismos de ação e dos métodos de aplicação garante maior confiabilidade na escolha dos produtos.

4.1. INIBIDOR DE CORROSÃO³⁹

De acordo com a ISO 8044 (2015, tradução nossa) o inibidor de corrosão é uma substância química que diminui a taxa de corrosão, quando presente no sistema de corrosão em concentração adequada, sem alterar significativamente a concentração de qualquer outro agente corrosivo.

Estes produtos agem criando uma barreira ou película protetora na superfície do material, retardando ou até mesmo impedindo as reações de corrosão (CALLISTER JR,

³⁸ Hydrophobe International Conference Series - <http://www.hydrophobe.org/index.html>

³⁹ De acordo com a norma ISO 8044 inibidor de corrosão é caracterizado como: *chemical substance that when present in the corrosion system, at a suitable concentration, decreases the corrosion rate* <https://www.iso.org/obp/ui/- iso:std:iso:8044:ed-4:v1:en:term:2.12>, *without significantly changing the concentration of any corrosive agent.*

1990; GENTIL, 1996; CRIVELARO, 2002; TRITTHART, 2003; MAINIER; SILVA, 2004; BRYCKI *et al.*, 2018; RIVETTI *et al.*, 2018).

Os inibidores de corrosão são uma alternativa quando comparados a outros métodos de proteção e reparo devido ao baixo custo, facilidade de aplicação além de poderem ser utilizados em ações preventivas ou corretivas da estrutura (RIVETTI *et al.*, 2018).

Para que a aplicação de inibidores de corrosão seja satisfatória é necessário considerar alguns aspectos como (GENTIL, 1996):

- Causa da corrosão – para escolha adequada do inibidor;
- Custo da utilização e manutenção do edifício – deve ser verificado se excede ou não o custo das perdas originadas pelo processo corrosivo. Nesta avaliação deve-se levar em conta fatores como: aumento de vida útil da estrutura; tempo do edifício parado para a aplicação; prevenção de acidente por quedas de partes corroídas da estrutura e aspecto visual da superfície da estrutura;
- Propriedades e mecanismos de ação dos inibidores de corrosão: verificar tanto a compatibilidade e penetrabilidade sobre a superfície do concreto, como a interação e reação com outros produtos ou sistemas de proteção que venham a ser aplicados. Esta avaliação tem como objetivo evitar efeitos secundários prejudiciais, como: redução da ação dos demais sistemas (hidrofugante e realcalinizante) e queda da eficiência do inibidor;
- Aplicação e controle do tratamento da superfície: diluição do produto, número de demãos, condições locais e ambientais, cura, compatibilidade com outros tratamentos, manutenção.

Os inibidores geralmente atuam de duas maneiras: 1) formação de película ou 2) formação de uma camada adsorvida na superfície metálica.

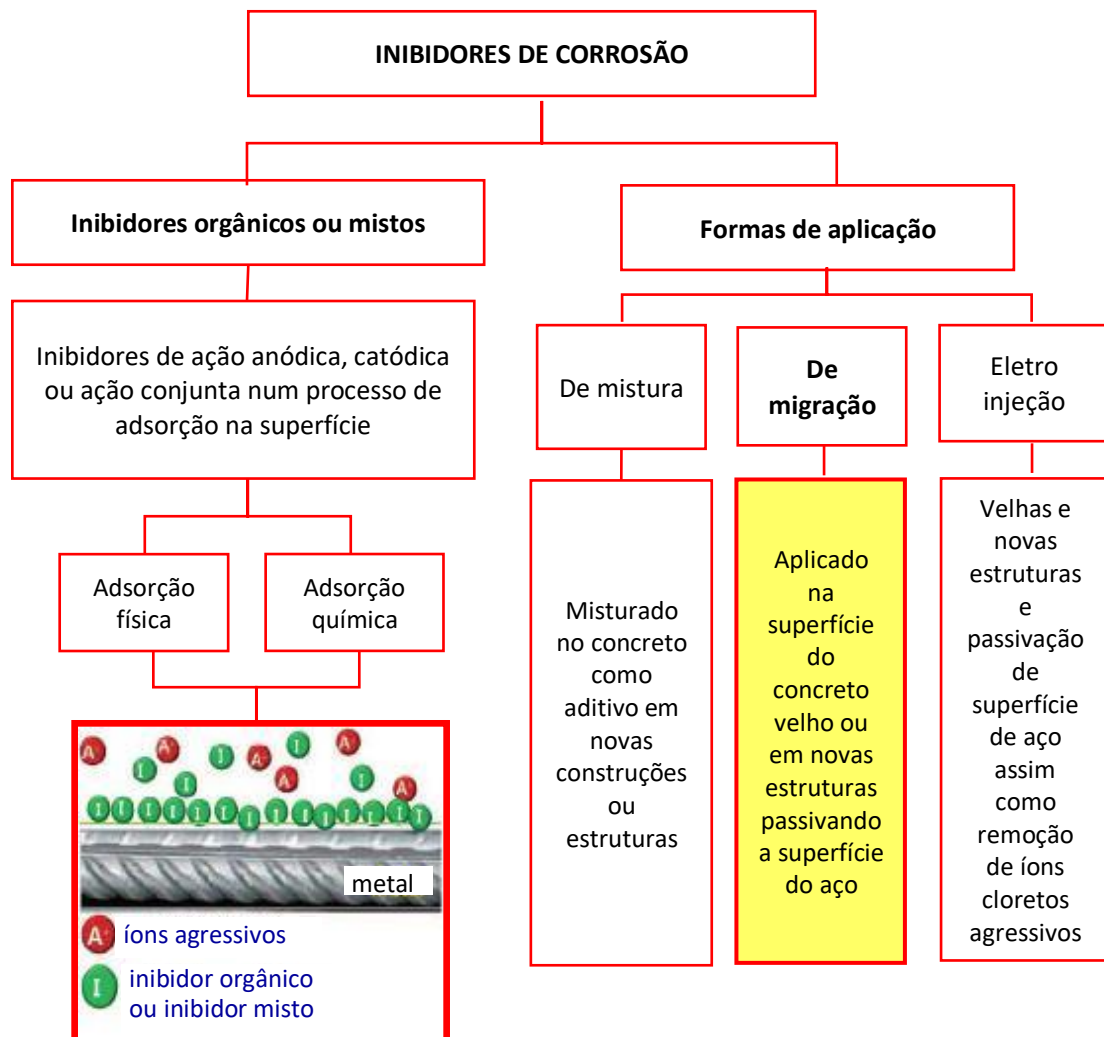
Várias são as formas de se classificar os inibidores de corrosão, para tanto estas serão apresentadas no quadro 4 e figura 35.

Quadro 4: Classificação dos inibidores de corrosão.

Classificações	Sub-classificações	Conceito da classificação
Quanto à composição	Orgânicos	São compostos orgânicos onde o processo de inibição se dá usualmente por adsorção. As moléculas orgânicas inibem a corrosão pelo processo de adsorção química que ocorre na superfície do metal, criando uma camada de proteção e dificultando reações anódicas e catódicas na superfície. Normalmente estes inibidores são à base de aminas ou aminoálcool.
	Inorgânicos	São compostos inorgânicos como cromatos, nitritos, fosfatos, silicatos e boratos.
Quanto à segurança	Seguro	Inibidor que quando presente em concentração insuficiente para proteger toda a superfície do metal provoca corrosão uniforme, e não danos localizados.
	Perigoso	Inibidor que quando presente em concentração insuficiente para proteger toda a superfície do metal provoca corrosão localizada, principalmente corrosão por pite, gerando em muitos casos corrosão mais acentuada do que sem o uso de inibidor.
Mecanismos de ação	Anódicos	Inibidor que atua controlando as ações anódicas através da formação de película protetora de óxido de ferro sobre a superfície metálica, reduzindo a velocidade de corrosão. Os produtos formados aumentam a polarização anódica, deslocando o potencial de corrosão para valores mais positivos. Exemplos destes inibidores são: nitrito de sódio, nitrito de cálcio, cromato de potássio, benzoato de sódio, molibdato de sódio, molibdato de amônia e fosfato de sódio.
	Catódicos	São os inibidores que aumentam a polarização catódica, controlando a corrosão e deslocando o potencial de corrosão em direções mais negativas. Alguns exemplos destes inibidores são sulfitos e sais de Cálcio e de Magnésio.
	Mistos	Inibidores que interferem tanto nas reações anódicas quanto catódicas, provocando o deslocamento do potencial de corrosão em ambas as direções. Alguns exemplos de inibidores mistos são: aminoalcohol, polifosfato e base amina.
Quanto ao comportamento	Oxidantes	Inibidores que não precisam de oxigênio dissolvido para manter a passivação do metal.
	não-oxidantes	Inibidores que necessitam da presença de oxigênio para a manutenção do filme de passivação composto por óxidos.
Forma de aplicação	De mistura	Compostos que são misturados ao concreto e argamassa de reparo como se fossem aditivos, usados com o objetivo de prevenção da corrosão.
	De superfície, ou migratórios	São inibidores utilizados para diminuir o processo de corrosão ou usados para proteção e em reparos de estruturas com corrosão de armadura. São aplicados na superfície do concreto, penetram na camada de revestimento de estruturas existentes e migram até a superfície do metal criando uma película protetora. Entre estes inibidores estão aldeídos, aminas, nitrogenados, ureia e outros.

Fonte: a partir de Gentil (1996); Crivelaro (2002); Silva (2006); Mennucci (2006) e Bertolini (2010); Rivetti *et al.* (2018); Lee *et al.* (2018).

Figura 35: Classificação dos inibidores de corrosão.



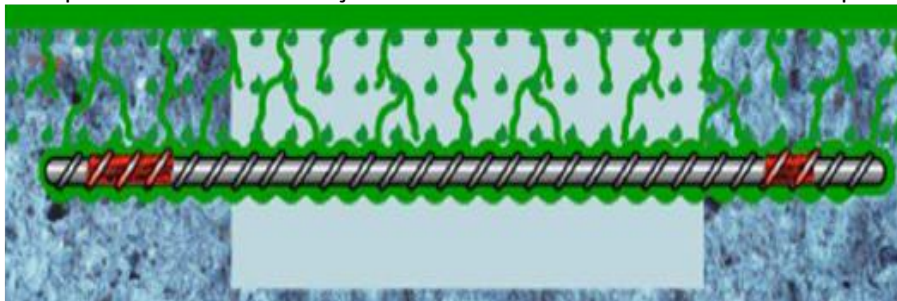
Fonte: adaptado de LEE *et. al.* (2018).

A adsorção dos inibidores de corrosão pode ser física, quando o inibidor orgânico interage com a superfície metálica com interações fracas - força de Van Der Waals. A adsorção física ocorre através de forças de natureza eletrostática entre o inibidor e o metal, possuindo uma baixa energia de ativação. A adsorção também pode ser química, quando a interação entre o inibidor orgânico e a superfície do metal é forte - ligação covalente (RODRIGUES, 1997, apud MENNUCCI, 2006).

Segundo Brycky *et al.* (2018) a adsorção do inibidor de corrosão não é puramente física ou química, sendo que a adsorção é influenciada pela estrutura química dos inibidores orgânicos, natureza e carga de superfície, distribuição de carga na molécula e tipo de meio agressivo (pH e/ou potencial de eletrodo).

Nesta tese o foco da pesquisa é o inibidor de corrosão aplicado na superfície do concreto de estruturas existentes, orgânicos, misto. Estes inibidores são conhecidos como *surface applied inhibitor* ou também designados pelo termo *migrating corrosion inhibitor* (MCI®)⁴⁰ ou inibidor migratório de corrosão (nome em português definido pela Cortec). De acordo com os fabricantes, os produtos do mercado impregnam a superfície das estruturas e penetram no concreto por meio de mecanismos de absorção por capilaridade, difusão na fase líquida e de vapor e por migração iônica (figura 36).

Figura 36: Mecanismo de migração do inibidor de corrosão orgânico (OCI) depois da difusão do líquido e do vapor mostrando a adsorção final no metal formando uma camada protetiva.



Fonte: MEYER (2017).

Segundo Castro e Paiva (2010) o MCI é um composto orgânico baseado inicialmente na tecnologia de aminoálcool, tendo evoluído para tecnologia de carboxilato de amina, comercializado pela empresa americana Cortec. Tais informações foram verificadas na leitura das Fichas Técnicas e Fichas de Informações de Segurança de Produto Químico (FISPQ) de alguns inibidores de corrosão comercializados no mercado brasileiro.

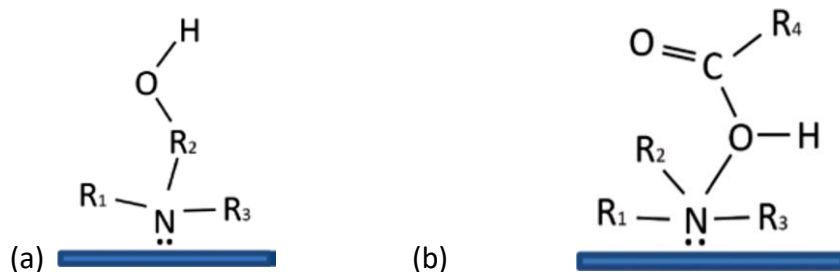
A adsorção do grupo amina na superfície do aço se dá por meio da atração entre dipolos; a molécula de carboxila, por outro lado, se orienta perpendicularmente à barra de aço repelindo a água ou interagindo com outros radicais para formar camadas firmemente ligadas ao metal e que também apresentam características de repelência à água (Figura 37).

Como apresentado em Myrdal, (2010), a molécula MCI é adsorvida na superfície do metal, formando uma camada molecular protetora, o nitrogênio é responsável por sua

⁴⁰ MCI® (*migrating corrosion inhibitor*) marca registrada da empresa CORTEC (CASTRO; PAIVA, 2010)

forte ligação com o metal, enquanto a cauda de hidrocarboneto (carboxilato) da 'Molécula MCI' cria uma camada hidrofóbica que ajuda a repelir a umidade do aço.

Figura 37: Imagens de: (a) Ilustração simplificada do inibidor à base de aminoálcool, onde R1, 2, 3 e H ou grupo alquila OH grupo final da cauda (b) inibidor de carboxilato de amina, em que R1, 2, 3 é H ou grupo alquila OH grupo final da cauda.



Fonte: MEYER, (2017).

No presente trabalho são estudados dois tipos de inibidores de corrosão orgânico de superfície, produtos importados, mas encontrados no mercado brasileiro: um à base de aminoálcool (I1) e outro uma mistura de aminoálcool e carboxilato de amina (I2). Segundo Lipošćak, Meyer e Mikšić (2019) com o aminoálcool, normalmente, há um ligeiro atraso o início da corrosão e as correntes de corrosão são reduzidas pela metade em comparação com amostras de controle após o início da corrosão. Com carboxilatos de amina o tempo para início da corrosão pode duplicar, ou até triplicar, e uma vez que a corrosão começa as taxas são reduzidas de 5 a 15 vezes em comparação com amostras de controle.

Broomfield e Macdonald (2003) expõem que os inibidores de corrosão são aplicáveis em várias situações, sendo mais indicados quando o concreto se apresenta carbonatado, com cobertura das armaduras menor do que 20 mm com uma superfície penetrável (porosa). Após a aplicação do inibidor, os autores recomendam a aplicação de hidrofugante. No entanto, mesmo com a necessidade de aprofundamento dos estudos, os autores apresentam como principal vantagem do uso do inibidor o fato de ser uma técnica pouco invasiva, além de relativamente barata.

Algumas questões ainda necessitam de estudos mais aprofundados, principalmente no que se refere à:

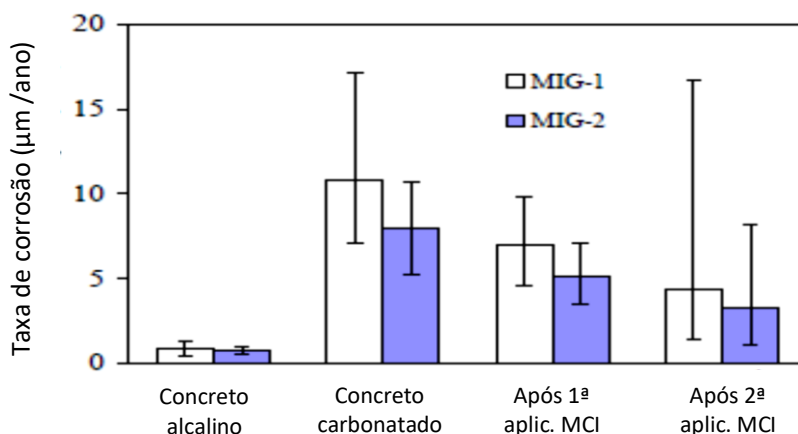
- Eficiência das técnicas de aplicação de inibidores químicos para armaduras com estágio avançado de corrosão, como pode ser visto em Ferreira *et al.* (2017); Araújo, Melo Neto e Helene (2017) e Reus, Jesus e Medeiros (2017);

- Eficiência dos inibidores de superfície em concretos carbonatados;
- Comportamento em longo prazo, incoerência entre algumas medidas de potencial de corrosão após impregnação de inibidores migratórios, e quanto ao mecanismo de ação destes produtos (CASTRO; PAIVA, 2010).

Os poucos estudos do uso de inibidor de corrosão em concreto carbonatado indicam pontos divergentes como apresentado a seguir:

- Em estudos de inibidores a base de carboxilato de amina misturado no concreto na dosagem mínima de 1,6 a 2% em relação a massa de cimento proporcionou uma inibição efetiva da corrosão para concreto carbonatados YONGMO; HAILONG; MIKSIC, (2004);
- Em dois trabalhos de Bolzoni, *et al.* (2006); Bolzoni *et al.* (2014) com concreto carbonatado pode-se perceber uma redução da taxa de corrosão de valores da ordem de 10 $\mu\text{m}/\text{ano}$ para 5 $\mu\text{m}/\text{ano}$, com 2 tipos de inibidores de corrosão migratório a base de amina como pode ser observado na figura 38, no entanto essa redução é atingida após aplicação de uma segunda demão, mantendo-se o concreto seco por várias semanas, segundo os pesquisadores apontam;

Figura 38: Medida de taxa de corrosão em barra de aço em concreto carbonatado, o inibidor migratório aplicado após o início da corrosão.



Fonte: BOLZONI *et al.*, 2006 e BOLZOLNI *et al.*, (2014).

- A carbonatação não apresentou influência nos estudos dos inibidores a base de aminoálcool nas pesquisas de Söylev; Richardson (2008);
- Os estudos de inibidores a base de amina em barras de aço com redução de pH de 12,66 para 8,66 por borbulhamento de CO_2 , com a aplicação de 1% de amina, no

final do ensaio os potenciais de corrosão apresentaram valores da ordem de – 86 mV, ou seja, com probabilidade de corrosão < 10% (BOLINA; CASCUDO,2013);

- A partir de uma parceria com a indústria, a pesquisa de Tritthart (2003) trouxe importantes resultados sobre a ação dos inibidores à base de aminoálcool e composto secundário à base de fósforo, no concreto carbonatado e não carbonatado. Destaca-se aqui a conclusão de o aminoálcool não reage com os compostos hidratados do concreto, permanecendo dissolvido na água do poro, o que garante a sua mobilidade no meio. O composto à base de fósforo forma sais insolúveis no meio alcalino, bloqueando os poros o que dificulta a penetração do produto. Quanto ao mecanismo de transporte das espécies, a difusão na água do poro parece ser o mecanismo predominante, embora mais lento do que o divulgado pelos fabricantes. O propalado transporte via gasosa parece ter uma importância secundária. O questionamento do pesquisador é quanto à capacidade do aminoálcool de prover, sozinho, o efeito inibidor;
- A pesquisa experimental de Söylev; McNally e Richardson (2007) sugere que inibidores de superfície (à base de aminoálcool) não afetam a resistência à compressão e à tração, bem como a resistência de ligação entre aço e concreto. Os pesquisadores também concluíram que a redução da absorção de água resulta do bloqueio dos poros por novos compostos formados, corroborando os resultados de Tritthart (2003). Para um dos traços de concreto usados nos ensaios Söylev; McNally e Richardson (2007), com relação água/cimento (a/c) 0,65, o inibidor levou à redução da absorção de água a 1/3 da absorção do concreto de referência. Söylev; McNally e Richardson (2007) destacam que o bloqueio dos poros do concreto é um efeito superficial, uma vez que a porosidade e a massa específica do concreto tratado não diferiram significativamente das propriedades do concreto de referência;
- Inibidor à base de aminoálcool com um componente ácido, não especificado pelos pesquisadores (Zheng et al, 2012), reduziu o coeficiente de absorção de água por capilaridade, variando com a relação a/c do concreto. Se comparados ao concreto de referência, a redução do coeficiente ($g / (m^2 \cdot h^{1/2})$) foi de 66% e de 62%, respectivamente, para a/c 0,40 e 0,50. Para concreto com a/c 0,60 não houve redução significativa da absorção de água segundo os pesquisadores (ZHENG *et al.*,

2012), o que difere de resultados da pesquisa de Söylev; McNally e Richardson (2007). Zheng *et al.* (2012) recorrem aos resultados de Söylev; McNally e Richardson (2007) para explicar que a redução da absorção de água, mas não informam qual é o componente - ou provável componente - ácido na formulação do inibidor usado na pesquisa;

- pesquisa experimental de Ormellese *et al* (2011) mostra que inibidor migratório, à base de amina terciária e compostos inorgânico à base de fosfato, penetra no concreto, principalmente, por absorção capilar; que a penetração é de 20 mm, profundidade medida após 4 meses da aplicação do produto; que o concreto impregnado com inibidor tem menor absorção de água, o coeficiente de absorção é reduzido da faixa de 5 a 7 $\text{g.m}^2.\text{s}^{1/2}$ (0,30 a 0,42 $\text{kg/m}^2.\text{h}^{1/2}$) para faixa de 2,6 a 4,7 $\text{g.m}^2.\text{s}^{1/2}$ (0,16 a 0,28 $\text{kg/m}^2.\text{h}^{1/2}$). Os autores destacam que a redução da absorção de água se dá, prioritariamente, pelo efeito do bloqueio dos poros capilares resultante da provável interação do inibidor com constituintes da pasta de cimento hidratado;
- Por fim, na pesquisa de Zhang; Zhu; Qu; (2019), sobre a realcalinização eletroquímica associada à aplicação de inibidor de superfície em concreto carbonatado com armadura corroída, os resultados apontam que ambas as formulações - a base de carboxilato de amina e aminoálcool ou apenas a base de aminoálcool - apresentaram desempenho eficiente. No entanto os autores não distinguem a contribuição da realcalinização eletroquímica e dos inibidores no controle da corrosão.

Segundo Castro e Paiva (2010) os ensaios realizados nos inibidores de corrosão devem ser agrupados segundo os parâmetros que interferem na proteção do concreto que, de acordo com os pesquisadores, são:

- Profundidade e mecanismo de penetração: estes podem otimizar a aplicação do produto;
- Durabilidade do tratamento e previsão do comportamento em longo prazo;
- Mudança nas propriedades, mecanismos de ação e interferência na microestrutura do concreto;
- Eficácia: esta pode ser avaliada por meio de técnicas convencionais de redução de medidas eletroquímicas da taxa de corrosão que incluem a medida de perda de massa da amostra dos metais, potencial de corrosão e de análise de soluções.

Portanto esta pesquisa busca responder a questionamentos apresentados e a avaliação do desempenho do produto e é pautada em três parâmetros: 1) profundidade de penetração; 2) eficácia e 3) interação com a microestrutura do concreto. O quadro 5 traz as técnicas comumente usadas por pesquisadores para a medição dos parâmetros enunciados. A durabilidade do tratamento e a ação a longo prazo não são estudados neste trabalho.

Quadro 5: Parâmetros e técnicas de avaliação de inibidores de corrosão.

Parâmetros	Técnicas	Referências
Profundidade de penetração	Avaliação expedita com uso de ninidrina* e outros reagentes de amina (como kits indicados por fabricantes)	Bavarian; Reiner (2004), Wombacher; Maeder; Marazzani (2004) Heiyantuduwa; Alexander; Mackechnie (2006), Miksic <i>et al.</i> (2013), Shen; Hicks (2014) Fiedlerová <i>et al.</i> (2015), Gross (2018), Morais; Rueda Junior; Schenke (2021).
	Absorção por capilaridade / absorção por imersão	Ormellese <i>et al.</i> (2011); Silva; Monteiro (2016).
	Análise qualitativa com cromatografia gasosa	Castro e Paiva (2010).
	Espectroscopia fotoelétrica de raio X (XPS)	Shen; Hicks (2014); Bavarian; Reiner (2004) e Bavarian; Reiner (2004a).
Eficácia	Potencial de corrosão**: técnica comumente utilizada para avaliar o estado eletroquímico e a probabilidade de ocorrência de corrosão da armadura após a aplicação dos inibidores de corrosão	Bjegovic; Stehly; Miksic (1999); Bjegovic; Miksic; Stehly (2000); Crivelaro (2002); Bavarian e Reiner (2004); Bavarian e Reiner, (2004a); Bolzoni, <i>et al.</i> (2006); Bolzoni, <i>et al.</i> (2014); Vedalakshmi, Rajagopal e Palaniswamy (2009); Vieira <i>et al.</i> (2010); Castro e Paiva (2010); Meyer (2011); Meyer (2017) Drew; Meyer e Hicks (2012); Bolina e Cascudo (2013); Silva e Monteiro (2016); Lee <i>et al.</i> (2018); Rivetti, <i>et al.</i> (2018); Silva e Meyer (2019); Lipošćak, Meyer e Mikšić (2019) e Zhang; Zhu e Qu (2019).
Interação com a microestrutura	Microscopia eletrônica de varredura – MEV <i>Scanning electronic microscopy</i> - SEM)	Bavarian; Reiner (2004); Bavarian (2004); Castro; Paiva (2010); Jeyalakshmi <i>et al.</i> (2014); Karthich <i>et al.</i> (2016); Lee <i>et al.</i> (2018); Zhang; Zhu; Qu (2019).
	Porosimetria por intrusão de mercúrio – PIM (<i>Mercury intrusion porosimetry</i> – MIP)	Karthich <i>et al.</i> (2016); Lee <i>et al.</i> (2018).
	Espectroscopia de raios X por dispersão de energia (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy – EDX)	Jeyalakshmi <i>et al.</i> (2014); Karthich <i>et al.</i> (2016); Lee <i>et al.</i> (2018).

*A **ninidrina** é um reagente para detecção de aminas em superfícies porosas. A reação da ninidrina e os aminoácidos produz um produto de coloração púrpura conhecido como púrpura de Ruhemann, (ALVES, 2013, p 18 e 20).

** esta técnica é normalmente utilizada pela facilidade de ser realizada em condições reais de uso, no entanto, sempre que viável deve ser complementada com medidas da taxa de corrosão.

Fonte: Elaborado pela autora com as referências indicadas no quadro.

Para alguns autores (JOHNSON; LEE, 2004; MENNUCCI, 2006) o concreto impregnado com inibidor de corrosão dispensa manutenção, considerando que se

trata de medida preventiva que visa retardar o início do processo corrosivo. A classificação de medida preventiva pode amparar diretrizes de fabricantes de que a reaplicação do produto é dispensável.

No que se refere ao uso dos inibidores de corrosão migratórios Gross (2018) aponta que os benefícios teóricos do MCIs para o concreto histórico com valores estéticos são inquestionáveis. Esses benefícios são ainda maiores onde há necessidade de preservação da autenticidade e aparência do concreto original. No entanto, a viabilidade dos MCIs para a conservação do patrimônio de concreto depende de melhores métodos de monitoramento e ensaio projetados especificamente para a avaliação do tratamento e de estudos mais aprofundados nos riscos do tratamento. Esses estudos precisam se concentrar no concreto histórico e nas questões específicas que este material apresenta em relação à corrosão e ao tratamento para que possam ser usados como evidência empírica no campo da conservação arquitetônica.

Morais; Rueda Junior; Schenke (2021 p. 67) apontam as dificuldades para a avaliar a penetração dos inibidores de corrosão:

“Ainda não há um ensaio estabelecido nas normativas internacionais para avaliação da capacidade de penetração dos inibidores por migração, portanto os fabricantes dos produtos são atualmente os responsáveis por fornecer grande parte das informações técnicas referentes aos ensaios compatíveis para identificação da capacidade de migração dos produtos para cada tipo de projeto.”

Face a inexistência de dados sobre o desempenho de edifícios tratados com inibidores migratórios, além das especificidades não reveladas pelos fabricantes sobre a formulação dos produtos e da sua interação com a estrutura interna do concreto, ainda há incertezas sobre eficácia dos produtos comerciais no longo prazo, bem como incertezas sobre a necessidade e a frequência de reaplicação.

Ainda que pesem as incertezas, pesquisadores têm ratificado a declaração de Tritthart (2003) de que o uso dos inibidores de superfície em estruturas de concreto, face o baixo custo e a versatilidade de aplicação, continua sendo de interesse à investigação.

4.2. REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA

Segundo Ferreira *et al.* (2017) a realcalinização é uma técnica que visa reestabelecer as condições de alcalinidade da matriz cimentícia, elevando o pH do concreto, buscando reestabelecer a possível repassivação da armadura sem uma ação destrutiva significativa da estrutura. Araujo, (2009) apresenta três mecanismos para reestabelecer a alcalinidade do concreto ao redor da armadura, que são: 1) absorção e difusão de solução alcalina por ação capilar, chamada de realcalinização química, esta técnica não necessita de campo elétrico e fluxo de corrente para ser aplicado e nem é necessário remover o concreto carbonatado; 2) produção de íons hidroxilas (OH^-) e 3) fluxo eletro-osmótico, que transporta solução alcalina para o interior dos poros capilares do concreto. No entanto os mecanismos 2 e o 3 necessitam de corrente elétrica e formação de campo elétrico, são chamadas de realcalinização eletroquímica.

Nesta tese, como objetiva-se preservar o concreto aparente da arquitetura moderna de forma que haja a menor intervenção possível a pesquisa focou na realcalinização química realizada pela superfície do concreto.

A realcalinização química, segundo Araújo (2009) consiste na absorção por capilaridade e difusão de soluções alcalinas para o interior do concreto carbonatado. Os íons alcalinos do realcalinizante reagem com os produtos contidos na fase líquida do concreto formando novos produtos que elevam o pH do concreto carbonatado levando à repassivação da armadura.

As soluções comumente empregadas em estudos sobre a realcalinização química contêm: NaOH, KOH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Na_2CO_3 e solução tripla contendo NaOH, KOH e Na_2CO_3 (REUS, 2017). Segundo Araujo *et al.* (2007, apud Araujo, 2009) as soluções alcalinas de carbonato de sódio (Na_2CO_3), hidróxido de potássio (KOH) e uma mistura alcalina de carbonato de sódio (Na_2CO_3), hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de sódio (NaOH) são capazes de elevar o pH do concreto a 12,5, condição mantida após um ano e meio da aplicação de acordo com verificação feita em corpos de prova mantidos em laboratório.

No quadro 7 serão apresentados o resumo de algumas pesquisas realizadas com soluções alcalinas, suas concentrações, materiais e dimensões dos corpos de prova,

relação a/c, profundidade de carbonatação, tempo em semanas para realcalinizar e métodos de aplicação.

Com as informações do quadro 6 pode-se observar que os resultados variam em função da espessura do concreto carbonatado e da relação a/c, variando de 1 semana para a solução tripla com espessura de carbonatação de 15 mm, em concreto com relação a/c de 0,7 a 10 semanas para solução de carbonato de sódio em argamassa com espessura carbonatada de 25 mm e relação a/c 0,5. Ou seja, concreto com menor relação a/c e maior profundidade de carbonatação demora mais para realcalinizar.

Em pesquisa realizada por Teixeira (2002, *apud* Araujo, 2009) a realcalinização química em argamassas, executada com relação a/c 0,4, mostrou-se bastante eficiente, necessitando de apenas 17 dias para realcalinizar por completo 2,5 cm de cobrimento, no entanto a concentração de carbonato de sódio utilizada foi de 20 g/ml enquanto nas pesquisas de Araujo (2004 *apud* Araujo, 2009) e Sá (2006) a concentração do carbonato de sódio era de 3 g/100 ml.

A realcalinização química é uma técnica pouco invasiva que não apresenta mudanças visuais e táteis significativas na superfície aplicada, pois é realizada com a aspersão ou aplicação com trinchas de produtos à base de espécies alcalinas sobre a superfície da estrutura. Na realcalinização química, a elevação do pH do concreto ocorre de fora para dentro como pode ser visto na figura 39.

Reus, Jesus e Medeiros (2017) investigaram a eficácia dos realcalinizantes químicos aplicados por meio de spray, trincha, manta e imersão. Os resultados mostraram que os métodos de aplicação dos produtos indicados pelos fabricantes (spray e trincha) não atingiram as profundidades de penetração esperadas, no entanto as técnicas de manta e imersão são eficientes e capazes de realcalinizar o concreto carbonatado, mostrando o potencial satisfatório para os produtos pesquisados desde que sejam alterados os modos de aplicação.

Quadro 6: Resumo de soluções alcalinas utilizada em realcalinização química.

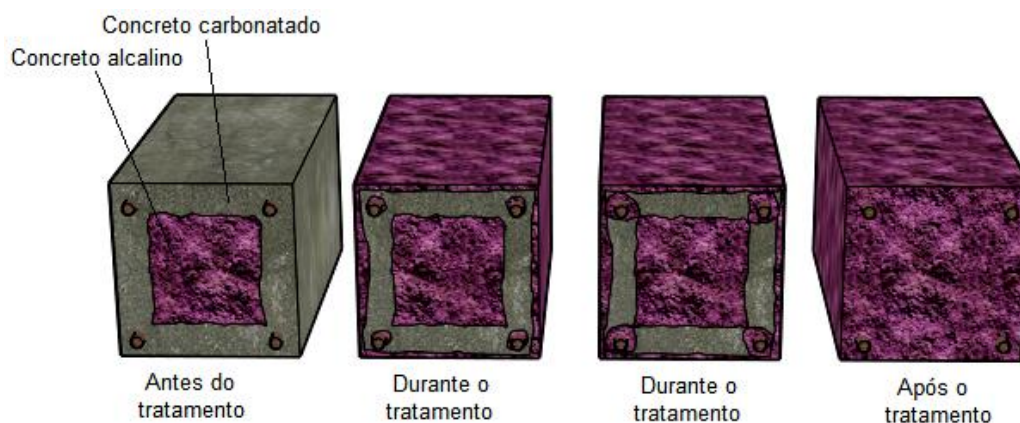
Autor	Solução alcalina	Concentração das soluções (mol/l)	Material e dimensão CPs	Relação a/c	Profundidade de carbonatação (mm)*	Tempo para realcalinizar profundidade carbonatada (semanas)	Método de aplicação
Araujo (2004)	Na ₂ CO ₃	0,28M	Argamassa 5X10 cm	0,5	25	9	Ciclo de molhagem e secagem (2 dias imerso e 5 dias secando a temperatura de 25°C e UR de 50%).
	KOH	2,67M				5	
	Tripla (Na ₂ CO ₃ +NaOH+KOH)	0,09M de Na ₂ CO ₃ 0,38M de NaOH 0,89M de KOH				7	
Sá (2006)	Na ₂ CO ₃	0,28M	Argamassa 5X10	0,5	25	10	Ciclo de molhagem e secagem (2 dias imerso e 5 dias secando a temperatura de 25°C e UR de 50%)
	KOH	0,27M				5	
	Tripla (Na ₂ CO ₃ +NaOH+KOH)	0,09M de Na ₂ CO ₃ 0,38M de NaOH 0,89M de KOH				8	
Moreira (2006)	Tripla (Na ₂ CO ₃ +NaOH+KOH)	0,09M de Na ₂ CO ₃ 0,38M de NaOH 0,89M de KOH	Concreto 20X4X4 cm	0,7	15	1	Imersão
Araujo (2009)	Na ₂ CO ₃	1M	Argamassa 5X10	0,65	15	9**	Ciclo de molhagem e secagem (2 dias imerso e 3 dias secando a temperatura de 40°C na estufa)
	KOH	2,5M				7**	
	Ca(OH) ₂	Saturada				não realcalinizou**	

*profundidade de carbonatação medida com solução de fenolftaleína em todos os casos

** Araujo (2009) mediu a realcalinização com solução de fenolftaleína (8,3 < pH < 10,0), os demais autores utilizaram solução de timolftaleína (9,3 < pH < 10,5).

Fonte: Adaptado de Reus (2017).

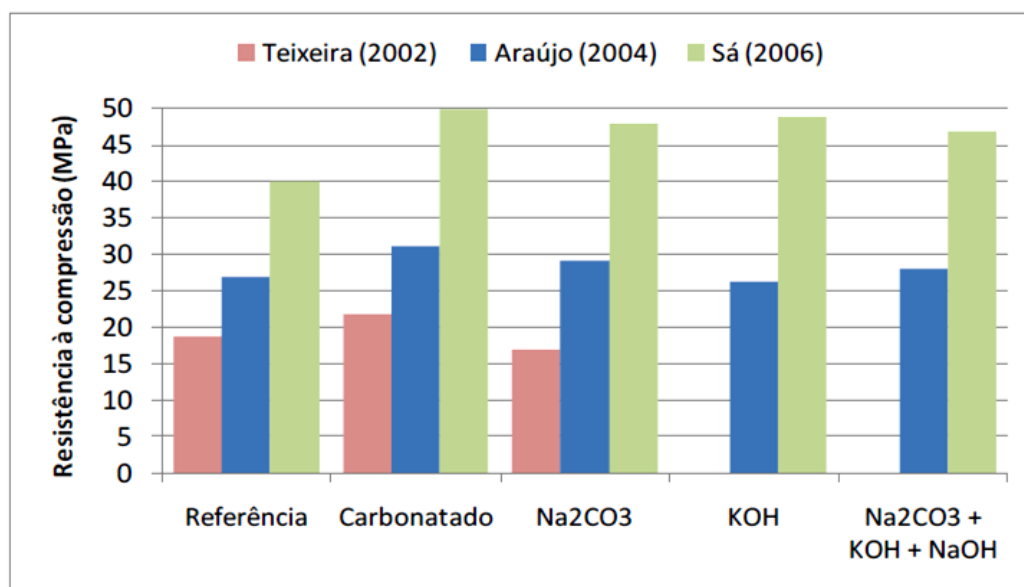
Figura 39: Evolução da realcalinização química ao longo do tempo.



Fonte: Reus, (2017)

Com relação às propriedades do concreto realcalinizado, foram realizados estudos da resistência à compressão por Teixeira, (2002 apud Araujo, 2009), Araujo (2004 apud Araujo, 2009) e Sá (2006). Os resultados são apresentados na figura 40, mas pode-se observar que no estudo de Teixeira (2002 apud Araujo 2009) houve uma redução da resistência do concreto realcalinizado em comparação ao de referência e ao carbonatado, por outro lado nas pesquisas realizadas por Araujo (2004 apud Araujo, 2009) e Sá (2006) houve um acréscimo na resistência dos corpos de prova realcalinizados em relação ao de referência, mas uma redução se comparado ao corpo de prova carbonatado. Na pesquisa de Teixeira (2002 apud Araujo 2009) foram utilizadas em argamassa com traço 1: 3,5:0,7 e concentração de carbonato de sódio de 20 g/100ml as pesquisas de Araujo (2004 apud Araujo, 2009) e Sá (2006), foram realizadas com a argamassa no traço 1:3:0,5 e carbonato de sódio na concentração de 3 g/100ml. Segundo Teixeira, (2002 apud Araujo, 2009) esta perda de resistência, “*é provavelmente, devido aos novos produtos formados no interior da estrutura realcalinizada, sendo estes menos resistentes do que os produtos hidratados originais no concreto*”. No entanto as divergências de resultados entre os trabalhos de Teixeira (2002 apud Araujo 2009) e os trabalhos de Araujo (2004 apud Araujo, 2009) e Sá (2006) podem estar relacionado a maior relação água/cimento e maior concentração de carbonato de sódio utilizada nas pesquisas de Teixeira (2002 apud Araujo 2009).

Figura 40: Resultados de resistência à compressão em corpos de prova de referência, carbonatados e realcalinizados.



Fonte: Araujo, (2009).

A verificação da eficiência do realcalinizante pode ser feita com a aspersão de soluções de indicadores de pH como indicado na figura 42 ou através do controle de medidas de potencial de corrosão com obtenção de valores $> -200\text{mV}$ (ARAUJO; MELO NETO e HELENE, 2017), os dois métodos são adotados no programa experimental desta tese.

No entanto Araújo (2009) expõe dois pontos relevantes e que necessitam ser aprofundados: primeiro no que se refere à eficiência desta técnica em concretos que apresentem regiões de cobertura menores do que 10 mm e sobre a recomendação de um revestimento de alto desempenho sobre a superfície do concreto para que seja mantida a proteção obtida com a realcalinização, além de inspeções periódicas e medidas de potencial de corrosão na estrutura tratada. Araújo (2009) e Gonzáles *et al.* (2011) recomendam que as técnicas de realcalinização sejam mais utilizadas em caráter preventivo quando a carbonatação se encontra apenas no revestimento sem atingir a armadura. Nos concretos carbonatados quando as armaduras atingiram alto grau de corrosão, Araujo (2009) e Araujo; Melo Neto e Helene (2017) questionam a eficiência do realcalinizante. Nestes casos ainda existem dúvidas sobre a eficiência do produto.

Na presente tese será utilizado realcalinizante a base de solução alcalina de alta difusibilidade composta de hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de cálcio (Ca (OH)₂) e

hidróxido de potássio (KOH), produto importado, mas disponível no mercado brasileiro aplicado com pincel e a verificação da sua eficiência será realizado por aspersão de indicadores de pH e medidas de potencial de corrosão como feito nos diversos trabalhos consultados. No entanto para verificar a eficiência da penetração do realcalinizante será testada a aplicação com o uso de manta envolto em plástico filme e posterior aspersão de indicadores de pH, assim como na aplicação com pincel, semelhante ao realizado em Araujo (2009), Araujo, Melo Neto e Helene, (2017) e Reus, Jesus e Medeiros (2017).

Em pesquisa apresentadas em Zhang *et al.* (2013) o uso conjunto de realcalinização eletroquímica e inibidor de corrosão foi testado em concreto de uma antiga construção de Shangai, da década de 1950. O concreto apresentava 80 mm de profundidade de carbonatação e armadura com 1 mm de espessura de oxidação. Nas amostras (50 X 50 X 70 mm) cortadas da estrutura foi aplicado realcalinizante (Carbonato de Cálcio -1M - Na_2CO_3) e inibidor (dimetiletanolamina (DMEA) - $(\text{CH}_3)_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$). Os resultados obtidos foram: o realcalinizante elevou o pH da solução, no entanto não ocorreu a repassivação da armadura pois a textura grosseira da superfície oxidada não permitiu a formação do filme passivo sobre a armadura. Os autores concluíram que a ação conjunta do inibidor com realcalinizante auxilia na melhora da passividade e durabilidade da estrutura (ZHANG, *et al.* 2013).

Zhang *et al.* (2013) e Zhang; Zhu e Qu (2019) apresentam um estudo de aplicação conjunta de inibidor migratório de corrosão com realcalinização eletroquímica, complementado com observações ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) e medidas eletroquímicas. Estes autores concluem que a aplicação conjunta das 2 técnicas, inibidor de corrosão e realcalinização eletroquímica, pode aumentar a resistência a corrosão e a durabilidade da estrutura, pois em ambiente alcalino o inibidor da corrosão tem o seu efeito potencializado.

4.3. HIDROFUGANTE⁴¹

Como exposto no capítulo 3 a penetração de umidade no concreto é um dos fatores essenciais para que ocorra o início do processo corrosivo da armadura no concreto, portanto os métodos ou sistemas que reduzam a absorção e difusão da umidade no interior do concreto tendem a reduzir o processo de deterioração. Diante disso, o estudo de produtos ou sistemas que reduzam a absorção de água complementa a proposta desta tese.

O hidrofugante é um material de proteção de superfície do concreto através do qual o produto penetra nos poros capilares e altera o ângulo de contato entre as paredes dos poros e a água, tornando o concreto mais repelente e desta forma diminuindo a umidade interna do concreto, um dos elementos que pode acelerar a degradação do concreto (KAZMIERCZAK, 2005).

Os produtos de proteção de superfície podem ser classificados de diversas formas, como em função do tipo de resina, ao tipo de exposição, com relação à formação ou não de película, classificação esta que é apresentado na figura 41.

Esta classificação divide os protetores de superfície em três classes:

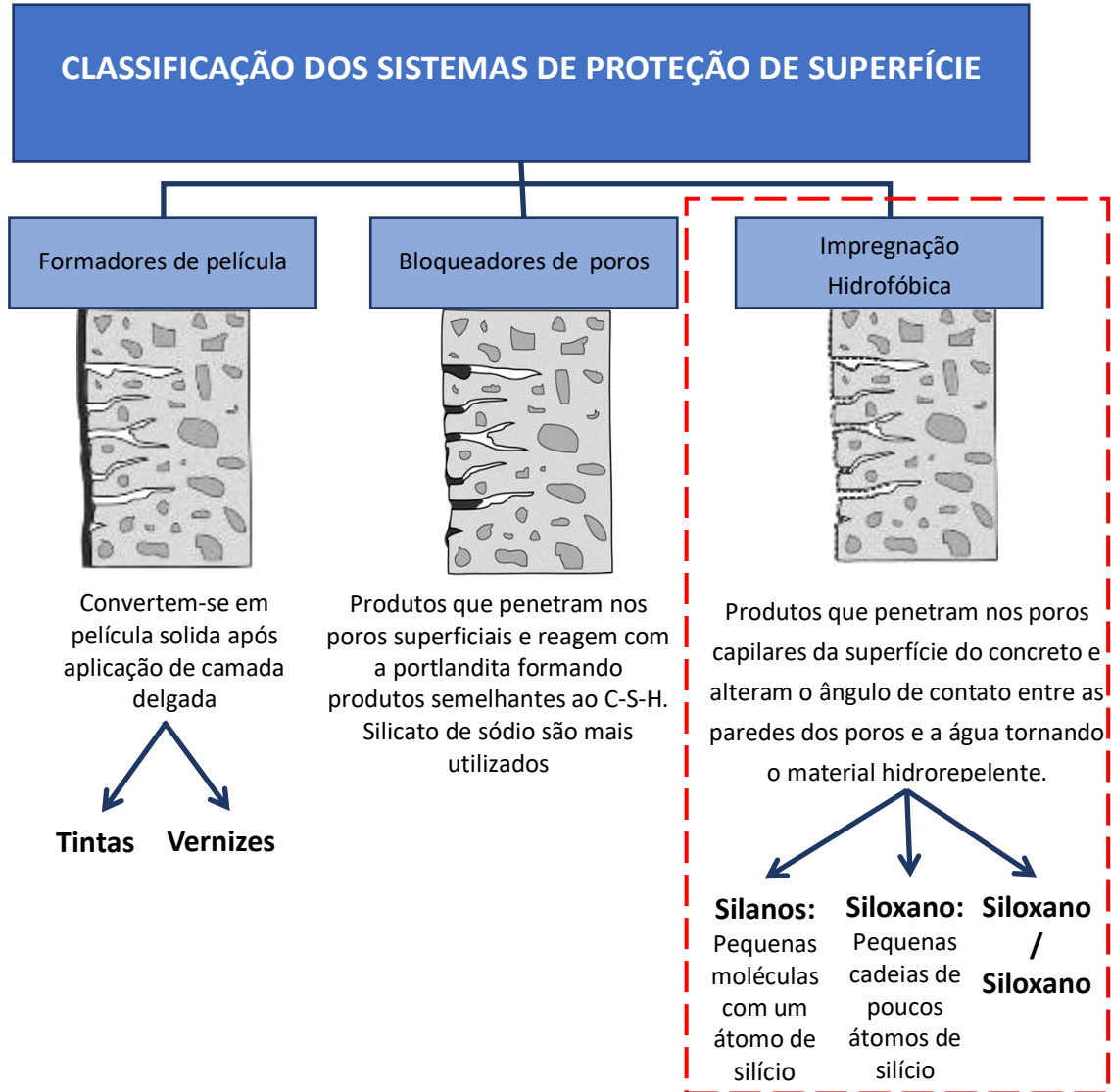
1) os formadores de película: classe na qual estão presentes as tintas e vernizes, no entanto como são produtos que modificam as características visuais da superfície onde são aplicadas, não são de interesse para o presente trabalho, portanto não serão aprofundados;

2) bloqueadores de poros: uso de produtos compostos por silicatos, que penetram nos poros superficiais e reagem com a portlandita (C-S-H) formando uma camada menos porosa na superfície do concreto alterando a sua penetração de água. O silicato de sódio é o produto mais usado para este tratamento. Em pesquisa realizada esta técnica apresentou redução na absorção de água por sucção capilar, causando menor

⁴¹ Na norma EN 1504-2, (2006) o termo adotado é impregnação hidrofóbica que tem como definição o tratamento do concreto destinado a produzir uma superfície repelente a 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 da aparência e os componentes ativos podem ser silano, siloxano ou a mistura dos dois.

penetração de água do meio externo e consequentemente a limitação do acesso de umidade implicando em redução do processo de corrosão (MEDEIROS e HELENE, 2008; MEDEIROS, PEREIRA e HELENE, 2012);

Figura 41: Classificação dos sistemas de proteção de superfície para concreto.

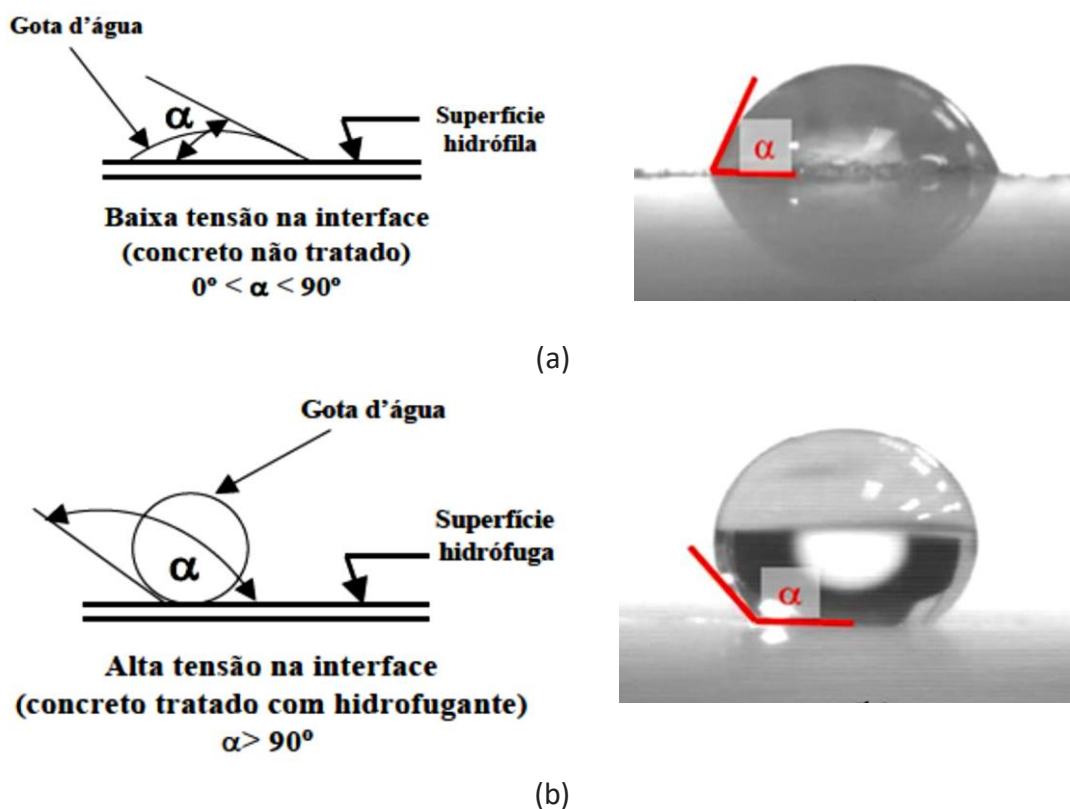


Fonte: Adaptado de Medeiros et al (2015) ; e Kazmierczak, (2005).

3) impregnação hidrofóbica: são mecanismos de proteção de superfície que menos interferem no aspecto final do material. Seu princípio consiste em impedir ou dificultar a absorção da água que penetra nos poros capilares pela mudança do ângulo de contato entre as paredes dos poros e a água, transformando o concreto de material hidrófilo (absorve água) em material hidrófugo (repele a umidade), como pode ser visto na figura 42. Os produtos para impregnação hidrofóbica originam em resinas de silicone que se apresentam como silanos, siloxanos ou a mistura destes dois.

Maranhão e Loh (2010) indicam que os produtos comumente utilizados na hidrofugação de materiais porosos, entre eles rochas, argamassas e concretos, são à base de silicones, especialmente silanos (diâmetro de 10 e 25 Å), que são produtos incolores, normalmente vendidos em concentrações mais altas (em geral maiores que 20%) reagem quimicamente com materiais a base de sílica e alumina e são muito voláteis e siloxanos (diâmetro de 25 a 100 Å), que também são produtos incolores, são menos voláteis e reagem quimicamente com substratos neutros.

Figura 42: Interação e ângulo de contato entre a água e a superfície do concreto (a) concreto não tratado, superfície hidrofílica ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$) (b) concreto tratado, superfície hidrofóbica ($\alpha > 90^\circ$).

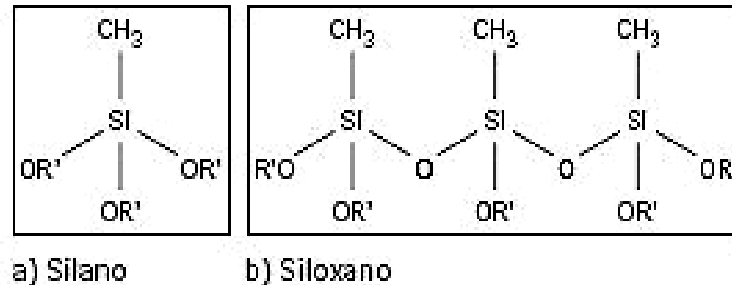


Fonte: Adaptado de Medeiros; Gomes; Helene, (2006) e Medeiros *et.al.* (2015).

Os silanos e siloxanos, por serem moléculas de pequenas dimensões (Figura 43 e 44) são capazes de penetrar em substratos pouco porosos como granitos e concretos de elevada resistência. No entanto, os silanos conseguem penetrar inclusive nos microporos do concreto (< 2 nm), enquanto os siloxanos penetram apenas nos mesoporos ($2 < d < 50$ nm) e macroporos ($d > 50$ nm) do concreto. Adicionalmente, os produtos à base de silano-siloxano apresentam aderência aos substratos silicosos, boa

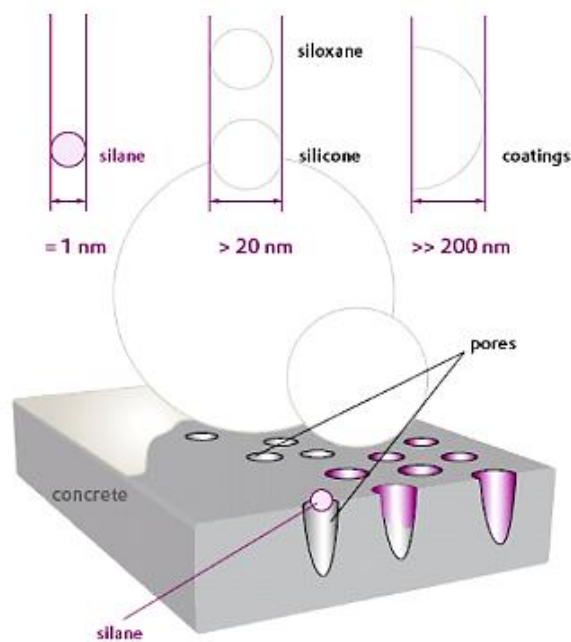
repelência à água, durabilidade para materiais expostos ao intemperismo, além de não alterarem a aparência da superfície sobre a qual são aplicados.

Figura 43: Estrutura de hidrofugantes à base de silicone.



Fonte: Mayers, (1998) ; Selley, (2006 apud Maranhão; Loh, 2010)

Figura 44: Representação esquemática de penetração de tratamentos de superfície nos poros do concreto.



Fonte: Studte, ([20--], p. 7)

A mistura silano/siloxano, a mais comum comercializada no Brasil atualmente, apresenta vantagens de aplicação em substratos diversos. Porém as concentrações de sólidos (ou espécies ativas) dos produtos comerciais 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 comprovam 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, com 99% ou 100% em massa, propiciaram as maiores profundidades de penetração de até 3 mm, da mesma forma como Malaga (2015) constatou em sua pesquisa. As investigações de Basheer e Cleland (2011) corroboram o padrão verificado por outros autores, ou seja, maiores profundidades de penetração do hidrofugante para composições com teores superiores a 40% de silano, em contraposição à penetração propiciada pela combinação de silano-siloxano.

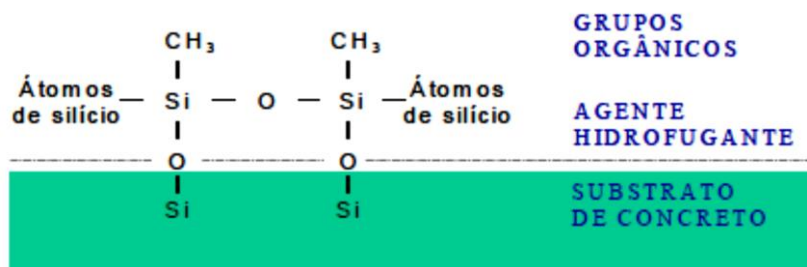
Um efeito negativo destacado por vários autores é a repelência entre sucessivas camadas de hidrofugante, fato recorrente no emprego de emulsões aquosas com baixo teor de espécies ativas, produtos mais comumente comercializados. A maior velocidade de reação desses produtos pode resultar na rápida formação da camada hidrorrepelente no interior dos poros antes da aplicação da camada seguinte, principalmente quando as orientações de aplicação do fabricante não são rigorosamente seguidas, reduzindo o potencial de hidrofugação. Evidências desse efeito foram observadas na última campanha de intervenção no edifício Vilanova Artigas.

Na extensa revisão sobre sistemas de proteção de superfície do concreto, feita por Pan *et al.* (2017a; 2017b), estão compiladas evidências experimentais de que os produtos à base de silano com elevados teores de espécies ativas na forma de creme (creme e gel são sinônimos usados na indústria dos hidrofugantes), têm maior poder de penetração no concreto em razão da menor velocidade de reação quando comparados à mistura silano-siloxano ou aos produtos à base de silano e solvente orgânico. A maior profundidade de penetração também colabora para o aumento da resistência à abrasão e, conseqüentemente, para maior durabilidade da camada hidrofugante. Quanto ao desempenho de hidrofugante em creme em teste de envelhecimento realizado na pesquisa de Shen *et al.* (2019) os resultados mantiveram a durabilidade em todos os aspectos, demonstrando a menor influência na aparência, baixa perda de peso e hidrofobicidade estável devido à sua alta profundidade de penetração.

Do ponto de vista prático, esse tipo de hidrofugante, geralmente, é aplicado em uma única demão, ou em sucessivas demãos que não se repelem em razão da já mencionada menor velocidade de reação, no entanto, trata-se de um produto que ainda não é frequentemente usado na proteção do concreto no Brasil. Em razão de ser importado apresenta dificuldade de ser encontrado no Brasil além disso, está deixando de ser fabricado segundo informação de fabricantes.

Pesquisas nos últimos 20 anos têm comprovado a maior eficácia dos hidrofugantes à base de silanos (radicais de menor dimensão se comparados aos siloxanos), com elevado teor de sólidos em creme ou gel, quando usados como proteção de superfícies de concreto aparente. Portanto, como esclarecem Maranhão e Loh (2010), a composição, ou seja, o tipo de radical alquila (grupo organo-funcional) e o tipo de radical alcóxi (-OR) também determinam o desempenho dos sistemas de hidrofugação à base de silicões. O primeiro radical é responsável pela hidrofugação propriamente dita, o segundo é responsável pela adesividade à superfície do concreto (figura 45).

Figura 45: Diagrama de representação da aderência química dos agentes hidrofugantes ao substrato de concreto.



Fonte: Medeiros; Gomes e Helene, (2006).

Assim, hidrofugantes disponíveis comercialmente e rotulados como sendo de elevado desempenho, como os produtos à base de silano com cadeias longas do grupo organo-funcional (tipo iso-octil), atendem critérios de desempenho da norma europeia EN 1504-2:2009 que os qualificam como produtos indicados para proteção de superfície, considerando profundidade de penetração superior a 10 mm que viabiliza desempenho e durabilidade condizentes com a necessidade de proteção do patrimônio em concreto armado.

Selander (2010) nas conclusões de sua pesquisa aponta que o desempenho do tratamento das impregnações hidrofóbicas a longo prazo pode ser dividido em efeitos de superfície e efeitos de profundidade, sendo que o efeito de superfície em termos de efeitos visuais ou medidas de ângulo de contato desaparece em poucos anos, normalmente no primeiro ano após o tratamento. Isso ocorre por motivos como a poeira e partículas, luz ultravioleta e abrasão. Com relação ao efeito de profundidade o autor aponta que se o tratamento de superfície funcionar bem logo após o tratamento e se tiver uma profundidade de penetração suficiente o efeito será duradouro, sendo esperado um bom desempenho por pelo menos 15 anos.

O mesmo autor salienta que hidrofugantes com compostos de cadeia longa do grupo alquila (o que é responsável pela hidrorrepelência) penetra mais profundamente e tem efeito mais durável por não ser muito afetado pelo UV e os hidrofugantes de superfície são os com baixa concentração de espécies ativas, geralmente à base de silanos e siloxanos, e tem efeito superficial, tanto é que após a aplicação a água forma gotas na superfície dando a falsa ideia de que está tudo certo, por um longo tempo, mas em pouco tempo o efeito de repelência desaparece.

Como apontam Marie-Victorie, Bouichou e Jourdan (2017), pesquisadores experientes que testaram vários métodos na conservação do patrimônio em concreto armado aparente, os tratamentos com realcalinização apresentam eficiência logo após o tratamento, mas os estudos com relação a durabilidade destes tratamentos não foram conclusivos. Os inibidores de corrosão orgânicos migratórios têm moléculas menores que os de base mineral apresentando maior penetração, no entanto, atuam melhor com o efeito de prevenção. Diante destas constatações a aplicação de impregnações hidrofóbicas tornou-se a alternativa mais indicada para controlar as condições que levam a corrosão da armadura no patrimônio de concreto aparente carbonatado, além de limitar a entrada de água não alteram o aspecto original do concreto.

Para realizar a avaliação da eficiência do hidrofugante, como ainda não existem normas brasileiras específicas para embasar os ensaios, pesquisadores utilizam as normas de absorção de água por imersão (NBR 9778) e absorção de água por

capilaridade (NBR 9779), como realizados por Medeiros; Gomes e Helene (2006), ou normas internacionais como para avaliar a profundidade de penetração do hidrofugante EN 1504 – 2 (2006) e EN 14630 (2007), a de absorção de água por imersão EN 13580:2002 e a de absorção de água pelo método do cachimbo (tubo de Karsten) EN 16302, (2013) como apresentado em Cailleux (2017).

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi dividido em 3 partes: estudos piloto, ensaios em campo e ensaios em laboratório.

5.1. ESTUDOS PILOTO

Foram realizados dois estudos piloto sendo um para definição do traço do concreto a ser utilizado e outro para definir um método para detectar a presença de inibidor de corrosão à base de amina no concreto.

O primeiro estudo foi orientado à dosagem do concreto com características semelhantes às do concreto das empenas do edifício Vilanova Artigas conforme dados apresentados no capítulo 3. Nas condições disponíveis para a realização do programa experimental, o objetivo foi obter um concreto com características próximas àquelas obtidas na investigação do concreto das empenas do edifício. Sendo impossível reproduzir em laboratório um concreto com 50 anos de serviço e com os materiais usados na produção do edifício, e sendo inviável obter mais amostras e testemunhos da estrutura, foram eleitas duas características principais para os estudos de dosagem: a classe de resistência à compressão e a porosidade da pasta. As referências iniciais foram as obtidas na reconstituição do traço disponíveis em Pinheiro *et al.* (2017).

Face à inexistência de método normatizado, bem como da impossibilidade de acesso aos insumos usados por fabricantes em ensaio colorimétrico para o controle da aplicação dos produtos⁴², o segundo estudo buscou meios de determinar a penetração do inibidor no concreto. A partir de uma consulta feita ao professor Dr. Jorge César Masini, do Departamento de Química Fundamental do Instituto de Química da Universidade de São Paulo, o estudo se concentrou no uso de um reagente para aminas primárias, a ninidrina.

Diante desta informação e com o aprofundamento da pesquisa foi identificada a utilização da ninidrina na prática forense para revelar impressão digital. A revelação

⁴² Ao fornecedor do inibidor 1 (I1) foram solicitados os insumos, reunidos em um kit de ensaio, mas em razão das limitações de importação impostas pela pandemia da Covid-19 não foi possível o uso do kit. Quanto aos insumos do fornecedor do inibidor 2 (I2), vendidos como um kit de ensaio, não eram mais comercializados à época do desenvolvimento desse programa experimental.

pode levar horas, mas pode ser acelerada com o aquecimento em temperaturas de 50 a 70°C, como apresentado em Chemello (2006). Além disso, também foi localizada a pesquisa de Fiedlerová *et al.* (2015) que trata especificamente de um método laboratorial usando solução de ninidrina para detecção de inibidores à base de amina em corpos-de-prova de concreto.

5.1.1. Definição do traço

Foram adotadas inicialmente as seguintes proporções: cimento : agregados em massa de 1:4; consumo de cimento 400 kg/m³ e relação água/cimento de 0,50. O uso de aditivo plastificante foi descartado para evitar possíveis interferências nas análises dos produtos / sistemas de proteção de superfície.

Foi usado cimento CII E 32, agregado graúdo com dimensão máxima 12,5 mm para viabilizar a moldagem de CPs cilíndricos com dimensões Ø 5 x 10 cm e garantir cobrimento de 20 mm da armadura. A tabela 12 traz as características genéricas dos materiais usados.

Tabela 12: Caracterização dos materiais para execução do traço piloto em concreto.

Propriedades determinadas	Resultado
Cimento CII - E 32	
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	
Dimensão máxima (Dmax)	12,5

Fonte: Elaborado pela autora.

Com a relação a/c 0,50, sem o uso de aditivo plastificante, o concreto apresentou consistência seca, slump 0, o que dificultaria a moldagem dos CPs, especialmente os CPs com barra de aço. A relação a/c foi alterada para 0,53 e, mantendo-se o teor de argamassa seca (α) de 50%, o traço utilizado para moldar todos os corpos-de-prova do programa experimental foi 1:1,5:2,5:0,53 (em massa).

Foram moldados CPs cilíndricos ($\varnothing 10 \times 20 \text{cm}$) que permaneceram em cura úmida por 28 dias. Os ensaios para caracterização do concreto do traço piloto estão contidos na tabela 13.

Tabela 13: Resultados caracterização do concreto do edifício Vilanova Artigas e do traço piloto.

Caracterização	Concreto do edifício Vilanova Artigas	Concreto do traço piloto
Traço	1:4:0,5 ¹	1:1,5:2,5:0,53
Slump (mm)	Não localizado na documentação	5
Absorção de água (%) ³	6	6,6
Índice de vazios (%) ³	13,5	14,38
$\rho_s = \text{seca}$ ³	2,25	2,18
$\rho_{\text{sat}} = \text{saturada}$ ³	2,39	2,32
$\rho_r = \text{real}$ ³	2,6	2,54
Resistência à compressão (MPa)	32 ²	32,55
Teor de vazios do concreto obtido por porosimetria por introdução de mercúrio (MIP) (%)	11,6 e 11,9 ⁴	11,3

¹ Traço obtido na recomposição de traço apresentado no item 4 (cimento : agregados : água).

² Resistência recomendada em carta de orientações do Engenheiro José Carlos de Figueiredo Ferraz apresentada em Contier (2015 p. 293) o concreto estrutural deveria ser executado com resistência de 320 kgf/cm², equivalente a 32 MPa.

³ Resultados obtidos na investigação do concreto da viga de cobertura do edifício Vilanova Artigas, mas que não faz parte desta pesquisa por ter sido classificado em classe de resistência (C50) diferente da classe de resistência do concreto das empenas (C30). No entanto, os resultados obtidos para as propriedades físicas como a absorção de água, volume de vazios e massa específica são característicos da faixa de valores para concretos normais e podem ser usados como referência para o traço piloto. Segundo a NBR 9778:2005 os resultados da massa específica podem ser expressos em gramas por centímetro cúbico (g/cm³) ou ser adimensional, considerando a massa específica da água igual a 1 g/cm³

⁴ Resultados da análise do testemunho de concreto extraído das empenas da NO e NE respectivamente.

5.1.2. Método para detecção de inibidor de corrosão no concreto

Neste estudo utilizou-se a ninidrina ($C_9H_6O_4$) com três formulações.

O teste exploratório foi feito com a formulação de um produto comercial, em spray, utilizado para análise forense de identificação de impressões digitais. O resultado pode ser observado na figura 468. Houve uma leve alteração da cor, com tons de roxo, como resultado da reação da ninidrina com a amina presente no inibidor aplicado na superfície do corpo-de-prova. Por se tratar de um produto importado e custo elevado, buscou-se alternativas.

Figura 46: Estudo piloto com aplicação de ninidrina em CP de concreto com aplicação de inibidor de corrosão a base de amina.



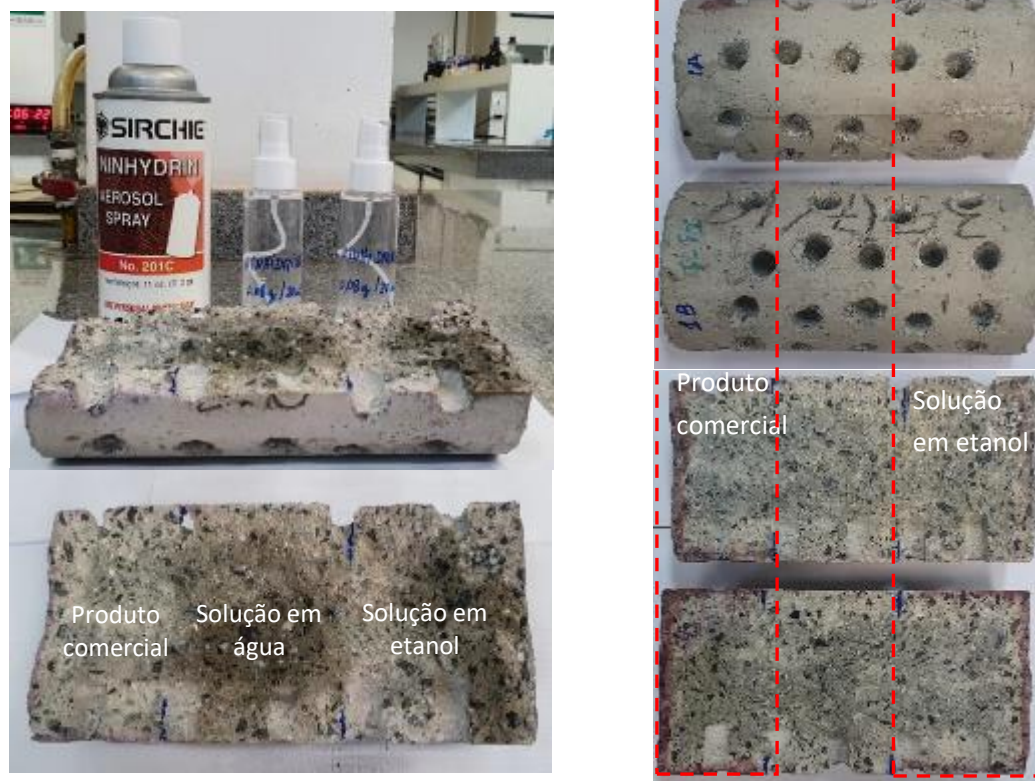
Fotos: Tatiana Simão, 2020.

Como alternativa uma segunda e a terceira formulações utilizaram ninidrina em pó, respectivamente, em solução aquosa na proporção 0,08 g de ninidrina / 20 ml de água e em solução alcóolica usando a mesma proporção 0,08 g de ninidrina / 20 ml de etanol. As soluções foram aspergidas na superfície de fratura (face interna do CP) de concreto tratados superficialmente com o inibidor 1. Para efeito comparativo o produto comercial também foi usado em conjunto com as formulações feitas em laboratório. A avaliação da reação do reagente foi em temperatura ambiente (figura 49 a esquerda -I1).

Numa segunda tentativa da aplicação do reagente, no mesmo CP foi aspergido tanto na face interna (figura 47 a direita inferior) quanto na externa (figura 47 a direita

superior) as três soluções da mesma forma que na primeira tentativa obtendo-se uma reação mais visível na face interna do corpo de prova e uma leve reação na face externa.

Figura 47: Aspersão da ninidrina na face interna do CP com inibidor 1 nas 3 formulações, 1º terço o comercial, 2º terço solução a água e 3º terço solução a etanol realizada em temperatura ambiente.



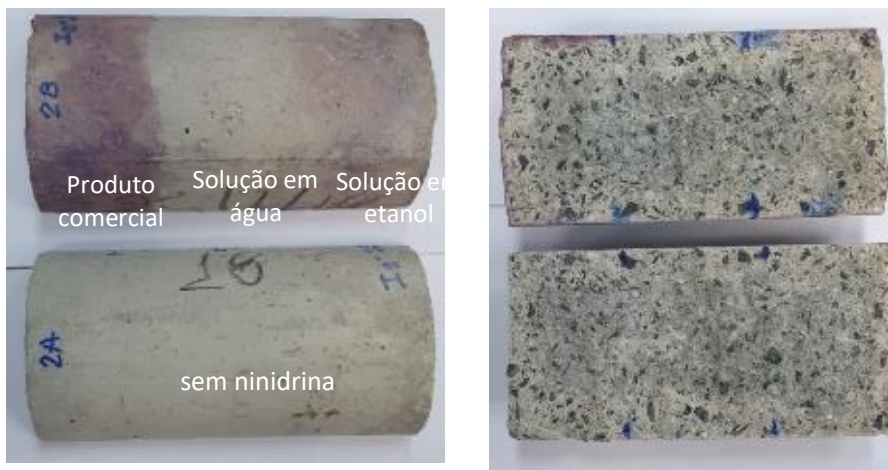
Fotos: Tatiana Simão, 2021.

Numa terceira tentativa de aplicação do reagente utilizou-se outro CP, tratado superficialmente com o inibidor 2 (I2) e aplicou-se as 3 soluções do reagente (comercial, solução em água e solução em etanol), que foram aspergidas na superfície de fratura (face interna do CP – figura 50 a direita), bem como na face externa (face interna do CP – figura 48 a esquerda) do corpo de prova, no entanto a aplicação ocorreu em duas etapas, sendo que nas duas etapas após a aplicação do reagente foi utilizado ar quente⁴³ em velocidade baixa (uso de secador de cabelo) sobre a superfície aspergida e posteriormente feita a análise visual.

⁴³ A utilização do ar quente para melhor ativação da reação baseou-se em três publicações: 1) da orientação de uso da ninidrina comercial com aplicação na prática forense 2) nos procedimentos para a identificação da presença de inibidor de corrosão apresentados por um dos fabricantes que utilizou dois reagentes não identificados (anexo 2) e na publicação de Fiedlerová *et al.* (2015), que utiliza a ninidrina com uma solução tampão para detectar a presença de amina.

Nesta tentativa pode-se observar uma reação colorimétrica mais intensa, principalmente na face externa do CP com a aplicação da solução comercial.

Figura 48: Aspersão da ninidrina, em duas aplicações, na face externa e interna do CP com inibidor 2 nas 3 formulações, 1º terço o comercial, 2º terço solução em água e 3º terço solução em etanol 0,08g/20 ml, com avaliação realizada após aquecimento da superfície com ar quente em velocidade média proveniente de secador de cabelo após aplicação cada aplicação do reagente.



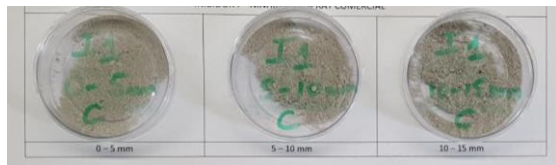
Fotos: Tatiana Simão, 2021.

Numa quarta etapa testou-se o reagente nos pós do concreto⁴⁴ com inibidor de corrosão extraídos do CP em três profundidades de 0-5 mm, de 5-10 mm e de 10-15 mm e aspergiu o reagente. Neste estudo alterou-se a concentração da solução de ninidrina para 1,2 g de ninidrina para 100 ml de etanol absoluto (equivalente a 0,24 g para 20 ml de etanol absoluto, um aumento de 3 x em relação ao 1º teste que foi de 0,08g de ninidrina para 20 ml de etanol absoluto). Esta alteração na concentração da solução foi em função de buscar resultados colorimétrico semelhantes ao obtido com a solução spray comercial. Portanto na parte superior da figura 49 (b e c) pode-se observar a aplicação da ninidrina em spray comercial e na parte inferior a solução com etanol absoluto. Além disso pode-se observar o resultado de apenas 1 aplicação, figura 49 (b) e 2 aplicações do reagente, figura 51 (c) sobre os pós do concreto e após a secagem do mesmo em temperatura ambiente.

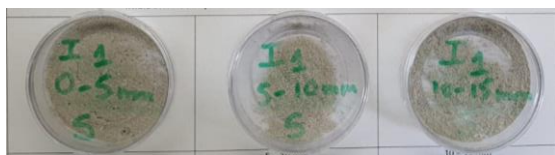
⁴⁴ O pó do concreto foi extraído do CP com furadeira de impacto em baixa velocidade a seco para não produzir calor e umidade excessiva e alterar a avaliação da profundidade de penetração do inibidor de corrosão, pois segundo Gross (2018) a presença de calor e água em excesso na perfuração do concreto pode alterar a localização e a quantidade do MCI.

Figura 49: Aspersão da ninidrina no pó de concreto com inibidor de corrosão 1 (I1) a base de amina em três profundidades, de 0-5 mm, de 5 a 10 mm e de 10 a 15 mm a) sem reagente, b) com aplicação dos reagentes apenas 1 vez, c) aplicação dos reagentes 2 vezes após secagem completa da primeira aplicação.

Inibidor I – sem reagente, preparado para aplicar spray comercial

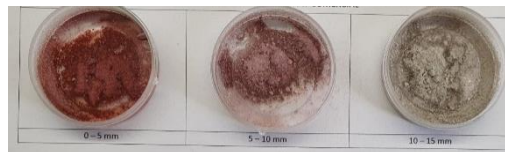


Inibidor I – sem reagente, preparado para aplicar solução

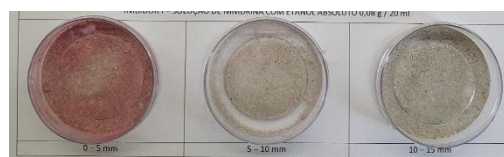


(a) Sem reagente.

Inibidor I – ninidrina spray comercial

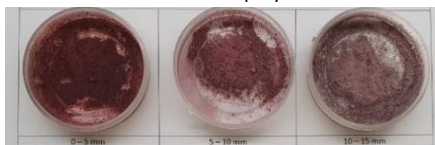


Inibidor I – solução de ninidrina com etanol absoluto 1,2 g / 100 ml

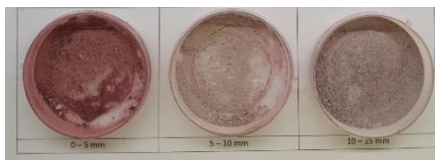


(b) Acima - com reagente comercial e na parte inferior solução preparada com etanol absoluto 1,2 g de ninidrina para 100 ml de etanol inferior 1 aplicação.

Inibidor I – ninidrina spray comercial



Inibidor I – solução de ninidrina com etanol absoluto 1,2 g / 100 ml



(c) Acima - com reagente comercial e na parte inferior solução preparada com etanol absoluto 1,2 g de ninidrina para 100 ml de etanol inferior 2 aplicações.

Fotos: Tatiana Simão, 2021.

O pó foi colocado em recipientes de plástico onde foram aspergidos inicialmente 1 vez o reagente e posteriormente uma segunda vez após a secagem completa em temperatura ambiente da primeira aplicação. No entanto foram aplicados apenas duas das formulações, a comercial e a solução em etanol, pois foram as que obtiveram resultados melhores nos testes anteriores.

Na foto 49 é possível observar o teste sem o reagente, com o reagente aplicado uma vez e com o reagente aplicado pela segunda vez após secagem completa da primeira aplicação. Pode-se observar a presença de amina nas três profundidades e de forma mais intensa com duas a aplicações dos reagentes, principalmente nas

profundidades de 5-10 e de 10 a 15 mm. Outra observação é com relação a reação do reagente com o recipiente plástico. O reagente comercial dissolveu parte do plástico do recipiente do teste, portanto optou-se em realizar os ensaios posteriores em recipiente de vidro para que não houvesse interferência na análise.

5.2. ENSAIOS EM CAMPO

Estes ensaios foram realizados no edifício Vilanova Artigas, na superfície do concreto na base do pilar 3 (pilar externo). Os produtos foram aplicados em três faces da base do pilar que tem formato piramidal: faces Norte e Leste expostas à chuva e face Oeste que não é exposta diretamente à chuva embora possa ser umedecida por chuvas mais intensas. Não há registros de aplicação de qualquer produto hidrofugante nos pilares. As superfícies foram limpas, de acordo com procedimentos detalhados a seguir. O concreto está carbonatado em profundidade de, aproximadamente, 2 cm.

A escolha da área foi criteriosamente realizada, após inspeção visual detalhada em todo o edifício na busca de um local de fácil acesso para executar os ensaios, dispensando o uso de andaimes e em uma área que não interferisse na circulação de pedestres e não danificasse os canteiros ornamentais do entorno edifício. Igualmente importante foi a localização de uma área onde fosse possível realizar ensaios eletroquímicos sem a necessidade de intervir muito no concreto original (local com um pequeno trecho de armadura aparente), além de se ter a possibilidade de avaliar áreas de concreto original e argamassa de reparo. Destaca-se que os ensaios no pilar foram autorizados pela direção da FAUUSP, ouvida a Comissão Acadêmica Assessora junto a Seção Técnica de Infraestrutura (CAA-STINFRA). As atividades de campo foram divididas em 6 partes:

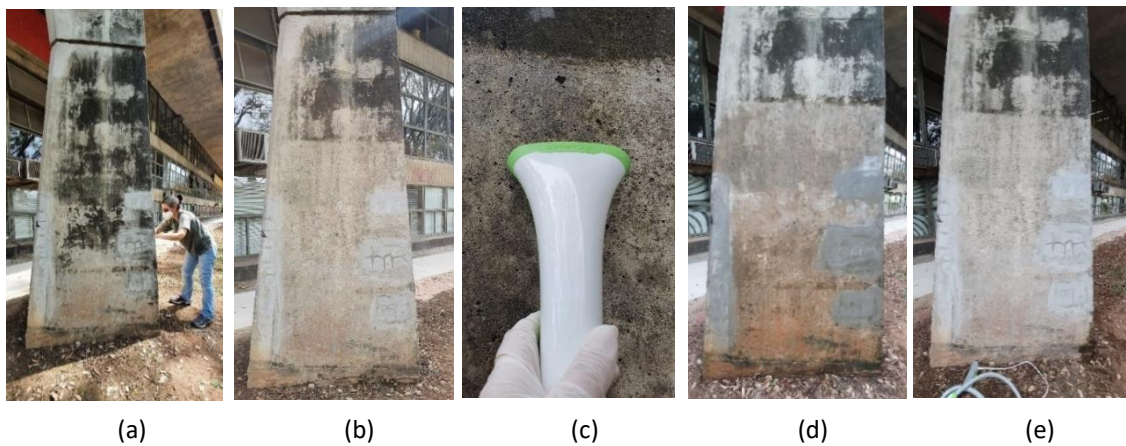
1. Inspeção preliminar
 - a. Avaliação visual do edifício;
 - b. Identificação de área para execução dos ensaios de campo.
2. Preparação da superfície do pilar
 - a. Escovação com escova de cerdas de aço e depois cerdas de nylon com água;
 - b. Limpeza do concreto com vapor;

- c. Nova escovação com escova de cerdas de aço e cerdas de nylon com água e enxague do concreto;
 - d. Escarificação e retirada de corrosão superficial da armadura exposta com uso de lixa e escova de aço em mini retífica;
 - e. Divisão de áreas para aplicação dos produtos;
3. Inspeção detalhada (uso de detector de metais)
- a. Localização das armaduras e
 - b. Determinação dos cobrimentos;
4. Leituras preliminares
- a. Determinação de umidade relativa do ar e temperaturas, do ar de superfície e temperatura de ponto de orvalho;
 - b. Umidade superficial;
 - c. Potencial de corrosão (E_{corr});
 - d. Leituras colorimétricas;
5. Aplicação dos produtos / sistemas de proteção de superfície
6. Leituras finais
- a. Umidade superficial;
 - b. Potencial de corrosão (E_{corr});
 - c. Leituras colorimétricas;
 - d. Absorção de água pelo teste do cachimbo (tubo de Karsten);

5.2.1. Procedimento de limpeza do concreto do pilar

A limpeza do pilar iniciou com testes para que o procedimento fosse executado de forma criteriosa, visando não danificar o concreto original. Inicialmente foi realizada escovação utilizando escova de cerdas de aço para retirar tanto a sujidade da poluição como colônias biológicas presentes no concreto. Posteriormente foi escovado com escova com cerdas de nylon com água e então aplicado vapor e novamente escovado com a escova de aço e com cerdas de nylon; por fim foi realizado o enxague com água em abundância (figura 50). Algumas destas técnicas foram baseadas nos procedimentos apresentados em Bouichou e Marie-Victoire (2009).

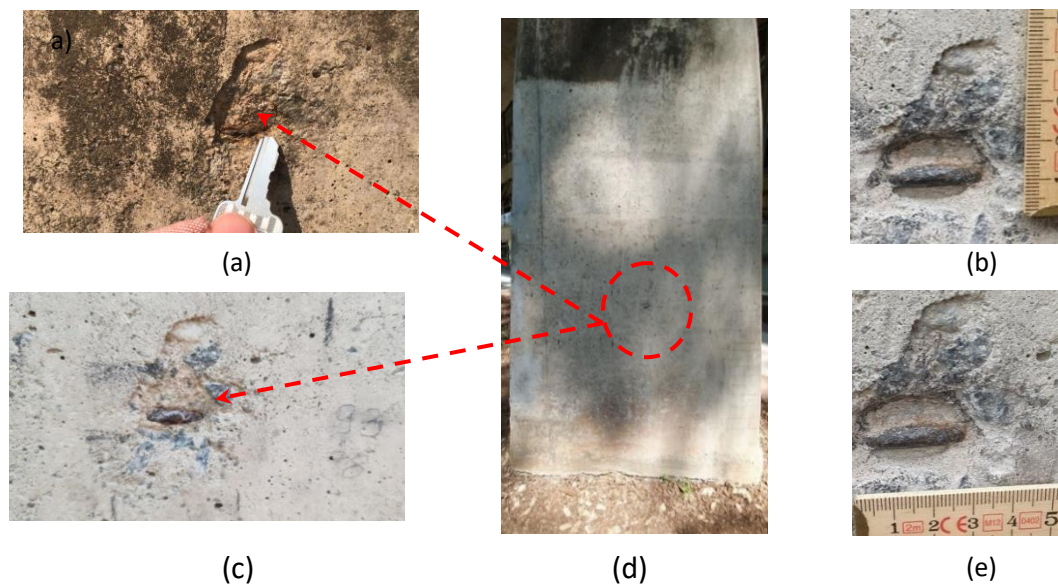
Figura 50: Sequência de limpeza do pilar 3 (a) limpeza com escova de aço a seco, b) pilar após escovação com escova de cerdas de nylon e enxague abundante com água e c) limpeza com vapor (d) pilar úmido após enxague abundante e por fim (e) pilar seco após todo o procedimento de limpeza.



Fotos: Tatiana Simão, 2021.

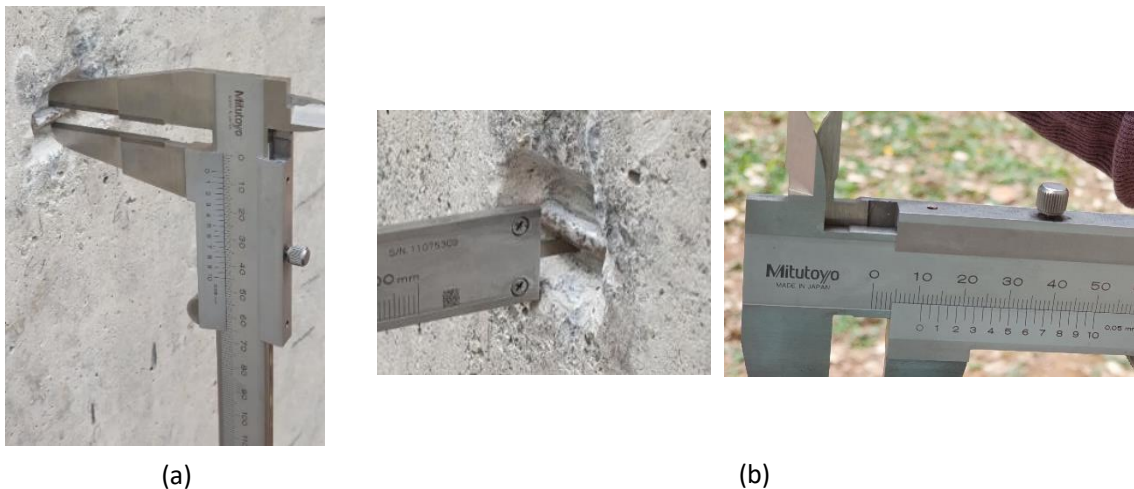
Foi necessário escarificar discretamente o concreto a fim de se permitir o contato com a armadura para realizar as leituras de potencial de corrosão. Este procedimento foi realizado com uma ponteira pequena e martelo, lima e mini retífica com os acessórios de escova de cerdas de aço e lixa para desgastar apenas superficialmente o concreto e a eliminar a camada de óxido da armadura (figura 51 e 52).

Figura 51: Armadura exposta: (a) detalhe da armadura antes da limpeza do pilar (b) armadura após limpeza do pilar (c) e (e) detalhes da armadura exposta antes da escarificação e limpeza com a mini retífica e (d) Visão geral face Norte do Pilar 3 com identificação da área da armadura.



Fotos: (a) Claudia Oliveira, 2021 e de (b) a (e) Tatiana Simão, 2021.

Figura 52: Detalhe da armadura limpa e escarificada (a) com indicação de espessura da armadura 10 mm) e (b) profundidade escarificada (10,75 mm).



Fotos: Tatiana Simão, 2021.

5.2.2. Divisão de áreas para aplicação dos produtos e localização das armaduras e espessura de cobrimento.

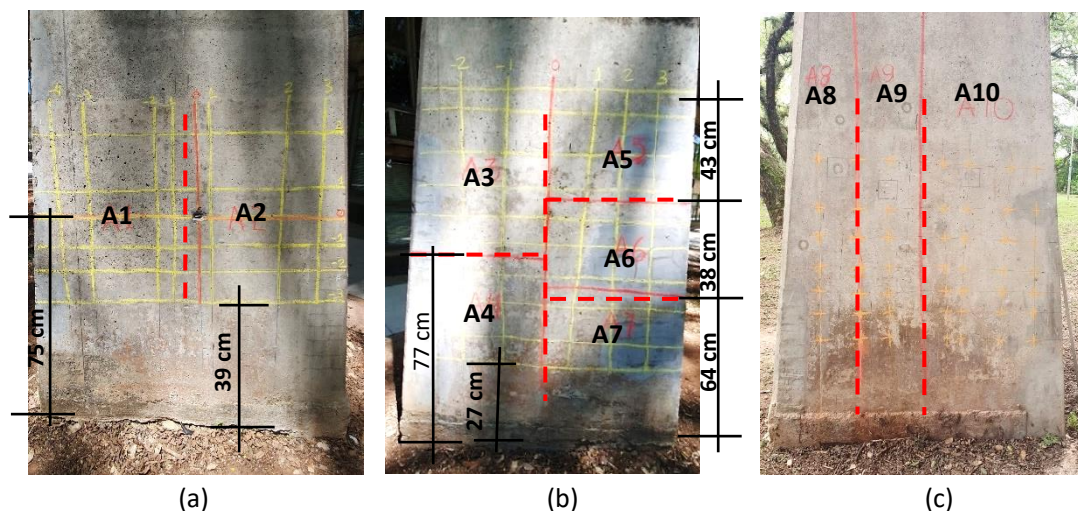
Após a escarificação do concreto ao redor da armadura exposta foi realizada a marcação das armaduras e a espessura de cobrimento com equipamento marca comercial D-TECT 150 da Bosch. Na sequência foi feita a divisão das áreas para aplicação dos produtos. A marcação foi realizada primeiramente com grafite e posteriormente com giz, que permite a remoção facilmente, figuras 53 e 54.

Figura 53: Imagens de (a) Localização e marcação das armaduras (b) detector de metais D-TECT 150 da Bosch usado para localizar as armaduras e espessura de cobrimento



Fotos: Tatiana Simão, 2021.

Figura 54: Delimitação das áreas com giz para aplicação dos produtos em (a) face Norte; em (b) face Leste e em (c) face Oeste.



Fotos: Tatiana Simão, 2021.

Foram delimitadas no total 10 áreas de aplicação de produtos/sistemas, sendo uma delas de referência, onde não foi aplicado qualquer produto. Algumas destas áreas apresentavam superfície somente de concreto e outras de concreto e argamassa de reparo, como apresentado no quadro 8.

Quadro 7: Delimitação de áreas para aplicação dos produtos/sistemas de proteção de superfície.

ÁREAS	PRODUTOS	SUBSTRATO	FACE DO PILAR
A1 0,42m ²	INIBIDOR 1 - I1 (à base de aminoálcool e sais de amino alcoois)	Concreto	NORTE
A2 0,36m ²	INIBIDOR 2 – I2 (à base de aminoálcool e carboxilato de amina)	Concreto	NORTE
A3 0,36m ²	REALCALINIZANTE + I1 + HIDROFUGANTE (HS)	Concreto Reparo	LESTE
A4 0,29m ²	REALCALINIZANTE + I2 + HIDROFUGANTE (HS)	Concreto Reparo	LESTE
A5 0,24m ²	REALCALINIZANTE - R	Concreto Reparo	LESTE
A6 0,23m ²	REALCALINIZANTE + I1 (R+I1)	Concreto Reparo	LESTE
A7 0,24m ²	REALCALINIZANTE + I2 (R+I2)	Concreto Reparo	LESTE
A8 0,21m ²	HIDROFUGANTE - HS (silano e siloxano)	Concreto	OESTE
A9 0,24m ²	HIDROFUGANTE - HA (silano e amina)	Concreto	OESTE
A10 0,42m ²	CONCRETO REFERÊNCIA	Concreto	OESTE

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

5.2.3. Leituras antes da aplicação dos produtos

Foram realizadas as seguintes leituras preliminares:

1. **Umidade relativa do ar, temperatura do ar, temperatura da superfície, temperatura de ponto de orvalho**⁴⁵. Foram realizadas 10 medidas nas áreas onde se aplicou hidrofugante de forma isolada ou associada com os demais produtos que são: áreas A3 (Recalcalinizante, inibidor 1 e hidrofugante a base de silano e amina – R+I1+HA), A4 (Recalcalinizante, inibidor 2 e hidrofugante a base de silano e amina – R+I2+HA), A8 (hidrofugante a base de silano/siloxano - HS) a e A9 (hidrofugante a base de silano e amina - HA). As medidas foram realizadas com o equipamento Positector DPM v. 3.4 da empresa DeFelsko (figura 55).

Figura 55: Equipamento Positector DPM v. 3.4 da DeFelsko para medições de umidade relativa, temperatura da superfície e temperatura do ar e temperatura de ponto de orvalho.



Foto: Tatiana Simão, 2021.

2. **Umidade da superfície do concreto**⁴⁶ antes e após molhagem da superfície por cerca de 15 minutos, com e sem aplicação de produtos foi realizado com equipamento moist 250 (figura 56);

⁴⁵ Temperatura na qual o vapor de água presente no ar ambiente passa ao estado líquido na forma de pequenas gotas por via da condensação. As técnicas de aplicação de tintas e hidrofugantes estabelecem em geral que se a temperatura do substrato esteja no mínimo 3°C acima do ponto de orvalho, (FRANCO *et al.*, 2003 *apud* CHAVES 2016).

⁴⁶ Para a aplicação dos produtos os fabricantes recomendam umidade superficial entre 5 e 6%. Foram realizadas leituras antes e depois de molhar. A superfície foi umidificada para facilitar a leitura do potencial de corrosão.

Figura 56: Equipamento de medida de umidade superficial do concreto.



Foto: Tatiana Simão, 2022.

3. **Potencial de corrosão**⁴⁷: as medidas de potencial de corrosão no pilar 3 foram realizados com o equipamento Carin Proceq, figura 57, com eletrodo de cobre em solução de sulfato de cobre (Cu/CuSO_4 sat) nas 10 áreas apresentadas no quadro 8. As medidas foram realizadas antes e 2 meses após aplicação dos produtos / sistemas.

Figura 57: Equipamento utilizado na medição de potencial de corrosão no pilar 3 e o eletrodo de cobre com solução de sulfato de cobre.



Foto: Tatiana Simão, 2022.

A leitura do potencial de corrosão foi realizada com a superfície molhada (após a aspersão de água por cerca de 15 minutos). Os parâmetros para avaliação do estado

⁴⁷ No projeto experimental as medidas de potencial de corrosão (E_{corr}) foram utilizadas para avaliar a ação da aplicação dos produtos / sistemas de proteção de superfície na corrosão das armaduras tanto nos corpos de prova em laboratório como na avaliação em campo. Salienta-se que não foi realizada avaliação da taxa de corrosão em campo, devido ao tempo elevado requerido para a sua realização em concreto carbonatado pela necessidade do posicionamento do sensor do equipamento diretamente sobre a armadura, previamente localizada, além disso, por requer um tempo elevado para a sua umidificação previamente e as medições apresentarem dificuldades de leituras em locais onde há aplicação de hidrofugantes e outros produtos. Pelo fato da taxa de corrosão de não ser medida em campo optou-se por não realizar também em laboratório.

de corrosão constam na tabela 14 para considerar a probabilidade de corrosão do aço no pilar 3.

Nesta tese a avaliação do potencial de corrosão é realizada no concreto carbonatado período inicial da propagação da corrosão, ou seja, quando há um processo corrosivo em andamento (aparecimento de manchas marrom-avermelhadas), mas ainda não há o deslocamento do concreto, visto que as armaduras do concreto das empenas como apresentado no capítulo 3 encontram-se no estado de corrosão ativo.

Tabela 14: Faixa de valores típicos de potencial de corrosão E_{corr} em campo para armadura de aço carbono para as condições do concreto do edifício Vilanova Artigas.

Condição do concreto de cobrimento	Estado provável do aço de cobrimento	Faixa de valores de E_{corr} (mV) para eletrodo externo de cobre com solução de sulfato de cobre – ECSC (Cu/CuSO ₄ sat.)
Concreto saturado com restrição de acesso de O ₂	Estado ativo com taxa desprezível	-900 a - 1000
Concreto umedecido e carbonatado	Estado ativo	+100 a -400
Concreto pouco umedecido e carbonatado	Estado ativo, mas com taxa de corrosão desprezível	+200 - 0
Concreto pouco umedecido	Estado passivo	

Fonte: Adaptado de ELSENER *et al.* (2003) e Araujo e Panossian, (2017).

4. **Percepção de alteração de cor:** para o registro da eventual alteração de cor na superfície do concreto do pilar após aplicação dos produtos (realcalinizante, inibidores de corrosão e hidrofugante). As medidas foram realizadas antes da aplicação dos produtos/sistemas e 2 meses após a aplicação dos mesmos. Foram adotados os procedimentos apresentados em Castro (2018). Medidas objetivas dos atributos da cor da superfície do concreto foram realizadas por meio de colorímetro tristímulo com o equipamento RM200 Capsure da X-Rite; para realizar as leituras foi utilizada uma máscara com abertura de 8 x 8 cm na cor preta para isolar a área a ser avaliada, figura 58.

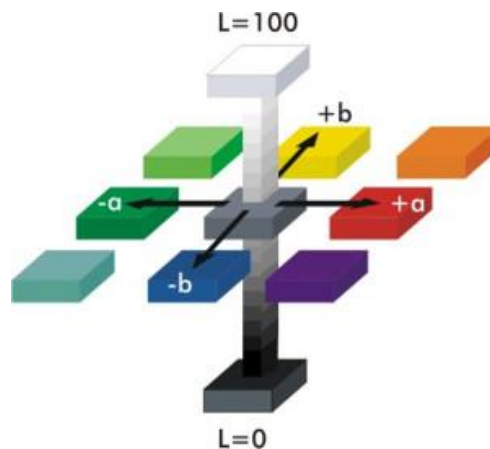
Figura 58: Imagens de (a) colorímetro tristímulo Capsure RM200 da X-Rite e (b) máscara em superfície preta com abertura de 8 x 8 cm para realização das leituras na superfície.



Fotos: Tatiana Simão, 2021.

O equipamento apresenta resultados em diversos formatos de leitura como RGB (red, green e blue), CMYK (cyan, magenta, yellow e key) CIE XYZ (coordenadas de cor), CIE $L^*a^*b^*$ (L^* - luminosidade de 0 – preto a 100 – branco, a^* do +a – vermelho – a – verde e b^* do +b amarelo ao – b azul) para a comunicação e expressão das cores figura 59.

Figura 59: Espaço de cor $L^* a^* b^*$



Fonte: Hunterlab, (2012).

As avaliações das diferenças de cor para análise comparativa da superfície antes e depois da aplicação dos produtos foram obtidas através da fórmula CIE (CIE – COMMISSION INTERNACIONAL DE L'ÉCLAIRAGE, 2004), equação 2:

Equação 2: variação colorimétrica CIE $L^*a^*b^*$

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Onde:

ΔE^* = Variação da cor;


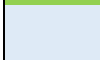





ΔL^* = (L^* área com produto – L^* área sem produto)

Δa^* = (a^* área com produto – a^* área sem produto)

Δb^* = (b^* área com produto – b^* área sem produto)

A classificação da avaliação da alteração cromática é realizada baseada nos critérios adotados na norma DIN 6174, 1997 constantes na tabela 15 e segundo Castro, (2018) este sistema adota critérios bem rígidos para a avaliação colorimétrica do concreto devido a sua grande heterogeneidade de cores inerentes do próprio material.

Tabela 15: Níveis de percepção das diferenças colorimétricas.

Diferenças (ΔE)	Classificação	sigla	
< 0,2	Imperceptível	IM	
0,2 a 0,5	Muito pequena	MP	
0,5 a 1,5	Pequena	PE	
1,5 a 3,0	Distinguível	DI	
3,0 a 6,0	Facilmente distinguível	FD	
6,0 a 12,0	Grande	GR	
>12,0	Muito grande	MG	

Fonte: Adaptado de DIN 6174, 1997

Dada a dispersão natural das medidas do ensaio em superfície de concreto aparente, foi adotada a moda como medida representativa da percepção da cor.

A moda é o valor que ocorre com maior frequência, ou o mais comum, em um conjunto de dados, sendo, portanto, 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 (HOFFMANN, 2016, p. 219), como são os dados obtidos por meio das medições feitas com o colorímetro tristímulo nesta pesquisa. Castro (2018, p. 126) explica que os parâmetros do espaço de cor (espaço de cor CIE $L^*a^*b^*$), ou seja, os dados obtidos são correspondentes ao da cor da cartela padrão – uma escala nominal nas cartelas Pantone e Munsell – identificada como a mais próxima à cor captada em cada medição.

5.2.4. Aplicação dos produtos

Os produtos foram aplicados em conformidade com as orientações de cada fabricante, sendo todos aplicados com pincel devidamente identificado para cada produto evitando contaminação.

O consumo de cada produto foi controlado por meio do volume medido num copo Becker. A síntese das orientações assim como o consumo dos produtos a ser aplicado está no quadro 8.

Quadro 8: Orientações e condições ambientais para de aplicação dos produtos.

Áreas	Produtos	Características dos produtos	Demãos e intervalo de aplicação	Condições ambientais para aplicação dos produtos
A1	Inibidor 1	pH 10 densidade 0,87 – 0,92 kg / L	De 2 a 3 demãos com consumo total de 480 mL/m ² podendo ser reduzida para 290 mL/m ² em concretos densos. Intervalo entre demãos de 1 a 6 horas. Sem exigências de cura	Temperatura do substrato e do ambiente entre 5 e 40°C; Superfície limpa e seca
A2	Inibidor 2	pH 9 – 9,5 densidade 1,03 – 1,05 kg / L	2 demãos sendo 140 mL/m ² /demão podendo ser aplicado quando seco ao toque (por volta de 15 min.) Não aplicar nada sobre o inibidor antes de 3 dias	UR do ar <85%; Temperatura do substrato entre 4 e 52° C; Temperatura ambiente < 35 °C; Superfície limpa e seca
A3	Realcalinizante + I1 + hidrofugante (HA)		O número de demãos, intervalo de aplicação e condições ambientais para aplicação dos produtos atendeu os requisitos de cada produto, sendo que o intervalo para aplicação do inibidor após o realcalinizante foi de 1 semana, mesmo não sendo exigido tempo de cura e o hidrofugante 14 dias depois do inibidor.	
A4	Realcalinizante + I2 + hidrofugante (HA)		O número de demãos, intervalo de aplicação e condições ambientais para aplicação dos produtos atendeu os requisitos de cada produto, sendo que o intervalo para aplicação do inibidor após o realcalinizante foi de 1 semana, sendo a exigência o mínimo 3 dias e o hidrofugante foi aplicado 14 dias depois do inibidor.	
A5	Realcalinizante	pH 12-14 densidade 1,02 kg / L	5 demãos com consumo de 150 mL/m ² por demão e intervalo de aplicação de 30 minutos	Temperatura do substrato e ambiente entre 5 e 40°C; Superfície limpa e seca
A6	Realcalinizante + I1		O número de demãos, intervalo de aplicação e condições ambientais para aplicação dos produtos atendeu os requisitos de cada produto, sendo que o intervalo para aplicação do inibidor após a o realcalinizante foi de 1 semana, mesmo não sendo exigido tempo de cura.	

continua

Continuação do quadro 8				
A7	Realcalinizante + I1		O número de demãos, intervalo de aplicação e condições ambientais para aplicação dos produtos atendeu os requisitos de cada produto, sendo que o intervalo para aplicação do inibidor após a o realcalinizante foi de 1 semana, mesmo não sendo exigido tempo de cura.	
A8	Hidrofugante (silano e siloxano - HS) ⁴⁸	Sem informações na ficha técnica nem na FISPQ do produto	2 demãos com consumo entre 150 e 250 mL/m ² por demão e intervalo de aplicação entre 6 e 8 minutos entre demãos. Cura mínima 24 horas.	Temperatura do substrato inferior a 26º, superfície limpa e seca*
A9	Hidrofugante (silano e amina - HA)	pH 9-10 densidade 0,87 – 0,92 kg / L	2 demãos com consumo de 230 a 330 mL/m ² , dependendo da porosidade da superfície aplicação úmido sobre úmido	UR do ar < 85% Temperatura ambiente entre 5 e 29ºC; Superfície limpa e seca
A10	Concreto referência	Sem requisitos, não será aplicado produto		

*Informações obtidas junto ao setor técnico da empresa, pois não constava na ficha técnica do produto.

Fonte: elaborado pela autora

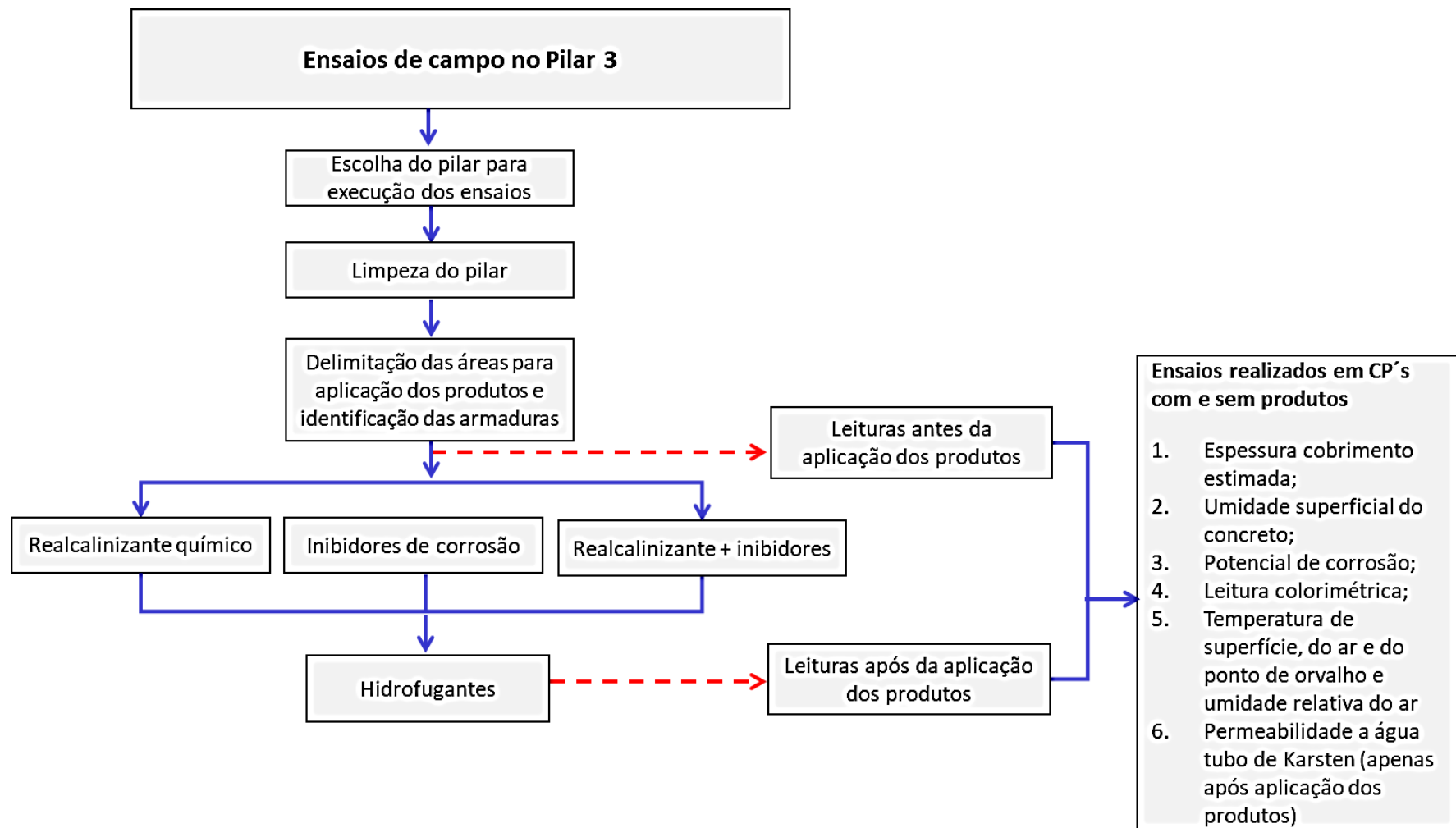
⁴⁸ Optou-se pela avaliação deste hidrofugante à base de silano/siloxano, também, além da base de silano com alto teor de compostos ativos, no decorrer das medidas de potencial de corrosão em campo, para avaliar se seria possível realizar as leituras no concreto com a aplicação do produto semelhante ao utilizado na obra de recuperação das empenas do edifício Vilanova Artigas realizado entre 2012 e 2015. Nas inspeções realizadas em 2017 houve muita dificuldade de realizar as leituras eletroquímicas de taxa e potencial de corrosão nas empenas.

5.2.5. Leituras após aplicação dos produtos

Além das mesmas leituras apresentadas no item 5.2.3 também foram realizadas as medidas de absorção superficial de água pelo método do tubo ou cachimbo, também conhecido como tubo de Karsten nos parâmetros da norma EN 16302, (2013). Os resultados são apresentados no capítulo 6.

A síntese das atividades desenvolvidas em campo no pilar 3 do edifício Vilanova Artigas são apresentados na figura 60.

Figura 60: Síntese das atividades desenvolvidas em campo no pilar 3 do edifício Vilanova Artigas.



Fonte: Elaborado pela autora, (2021).

5.3. ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Foram moldados corpos-de-prova (CPs) com o traço de concreto do estudo piloto. Alguns CPs foram moldados com uma barra de aço para os ensaios eletroquímicos. A condição padrão para o estudo dos produtos/sistemas de proteção foi o concreto carbonatado, com profundidade de carbonatação entre 15 e 20mm, correspondente às profundidades de carbonatação medidas nas empenas do edifício e garantindo que a carbonatação atingisse a barra de aço. CPs não carbonatados foram ensaiados como referência. Os estudos piloto, a moldagem e condicionamento dos PCs e os ensaios foram realizados em parceria com os seguintes laboratórios:

- Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de São Paulo (IFSP);
- No Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT): Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Centro de Tecnologia de Obras de Infraestrutura (CT-Obras), Laboratório de Corrosão e Proteção (LCP) do Centro de Tecnologia em Metalurgia e Materiais (CTMM) e Laboratório de Química e Manufaturados – BIONANOMANUFATURA;
- Laboratório de Cimento da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP);
- Laboratório de Caracterização Tecnológica LCT do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo (PMI) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP);

Estes ensaios tiveram três focos principais, 1) avaliar a eficiência dos produtos/sistemas aplicados por meio de medidas eletroquímicas de potencial de corrosão, absorção de água por capilaridade (ensaio de ascensão capilar em CPs) e ensaio de absorção superficial de água pelo método do cachimbo; 2) avaliar a profundidade de penetração dos produtos/sistemas por meio de métodos qualitativos (cromatografia a gasosa acoplada com espectrometria de massas) e com o uso de método expedito (método colorimétrico passível de ser usado em obra) e 3) avaliação da alteração das propriedades do concreto e da sua microestrutura com ensaios de resistência a compressão, MAV (massa específica, absorção de água por imersão e

volume de vazios), PIM (porosimetria por intrusão de mercúrio), MEV (microscopia eletrônica de varredura) e EDS (Espectroscopia de raios X de energia dispersiva).

5.3.1. Planejamento dos ensaios e organização das atividades

Para apresentar o programa experimental laboratorial serão expostas as variáveis desta pesquisa:

1. **Variáveis independentes:** são variáveis fixadas que tem a finalidade de observar suas reações nas variáveis dependentes.
 - a) **Produtos / sistemas de proteção de superfície:**
 - Realcalinizante químico à base de NaOH, Ca (OH)₂ e KOH (R);
 - Inibidores de corrosão à base de aminoálcool e sais de amino álcoois (I1) e outro à base de aminoálcool e carboxilato de amina (I2);
 - Hidrofugante líquido à base de silano e amina com alto teor de sólidos ativos (HA);
 - Hidrofugante à base de silano/siloxano (HS) com características semelhantes e do mesmo fabricante do utilizado na obra de recuperação do concreto finalizada em 2015 (apenas nos ensaios de MAV e absorção de água pelo cachimbo).

2. **Variáveis dependentes ou também conhecidas de controle:** são variáveis influenciadas ou explicadas pelas variáveis independentes, alterando-se em função de mudanças nas variáveis independentes. Consiste nos valores obtidos por medição de dados que buscam responder e verificar a variável independente. Estas podem ser alteradas em função da manipulação ou modificações dos procedimentos utilizados nas variáveis independentes. Na presente pesquisa as variáveis dependentes serão divididas em três etapas:
 - a) **Eficiência dos produtos** no processo de corrosão do aço: potencial de corrosão - ASTM C876 (2015) e pelo método do cachimbo/tubo de Karsten - EN 16302 (2013);
 - b) **profundidade de penetração dos produtos:** análise química qualitativa e avaliação expedita;

- c) **alteração das propriedades e microestrutura do concreto:** Resistência a compressão NBR 5732 (2018), absorção de água por capilaridade, MAV NBR 9778 (2012), NBR 9779 (2012), PIM, MEV e EDS.
3. **Variáveis intervenientes:** tem a função de ajudar a esclarecer a relação entre as variáveis independentes e dependentes assim como diminuir ou anular a influência da variável independente sobre a dependente.
- a) Traço de 1:1,5:2,5:0,53, com consumo de cimento de 400 kg/m³;
 - b) Profundidade de carbonatação entre 15 e 20 mm;
 - c) Resistência a compressão: concreto classe I - C30 com resistência de 30 MPa segundo classificação da NBR 8953, (2015);
 - d) porosidade ao mercúrio, absorção volumétrica de água, volume de vazios.

5.3.1.1. Moldagem, preparação e condicionamento dos corpos de prova

Neste item são apresentados os procedimentos adotados no preparo da armadura, para moldagem de CPs com aço, CPs sem aço, cura, carbonatação e processo de aceleração da corrosão das armaduras.

a) CPs com armadura

Nesta etapa foram moldados 66 corpos de prova cilíndricos de \varnothing 5 cm e altura de 10 cm com a inserção uma barra de aço, com bitola de 10 mm, locada no centro do CP. Considerando a tolerância de erro no posicionamento da barra, o cobrimento da armadura, entre 15 e 20 mm, reproduz valores característicos de cobrimento medidos nas empenas do edifício em estudo, conforme apresentado no capítulo 3.

Os corpos-de-prova foram executados com concreto no traço 1:1,5:2,5:0,53, sem o uso de aditivos, com cimento CII – E 32⁴⁹, areia média e agregado graúdo com D_{max}

⁴⁹ A moldagem destes corpos de prova foi realizada com cimento da marca Tupi (moldagem do 3º lote em 04/12/2019) e verificou-se que o cimento constava na lista de CLASSIFICAÇÃO DAS EMPRESAS NO PROGRAMA DE GARANTIA DA QUALIDADE do 3º Trimestre 2019 do Programa Setorial da Qualidade 019 Cimento Portland da ABCP, o que sugere que estão em conformidade com as normas da ABNT.

de 4,8 a 12,5 mm (B0), para confeccionar um concreto classe de resistência C30 (NBR 8953 / 2015).

O aço utilizado na moldagem dos CPs foi CA50 com bitola de 10 mm cortados com comprimento de 110 mm. Foram removidos quaisquer indícios de corrosão, com lixa; posteriormente as barras foram limpas com detergente químico, água e etanol, sendo então secas com papel toalha e secador de cabelo. Quando totalmente secas, foram embaladas com plástico com fechamento hermético, para dificultar o contato com a umidade ambiente e desencadear novamente o início do processo corrosivo, figura 61.

Figura 61: Procedimentos de limpeza das barras de aço e moldagem e cura dos dos CPs de \varnothing 5 x 10 cm com armadura.



(a) barra oxidadas



(b) barras lixadas



(c) limpeza com detergente



(d) secagem das barras



(e) barras embaladas em sacos herméticos



(f) moldagem dos CPs com aço



(g) CPs com aço protegido por fita parafinada em câmara úmida

Fotos: Tatiana Simão, 2020.

O adensamento do concreto foi realizado em mesa vibratória devido à dificuldade de realizá-lo manualmente pela presença do aço. Após moldados dos CPs, a porção da barra de aço exposta foi protegida com fita parafinada para evitar a corrosão durante o processo de cura do concreto. A cura foi realizada por 28 dias em câmara úmida. Após a cura do concreto os CPs foram secos em temperatura ambiente por 7 dias, na sequência

passaram por jateamento de areia para remoção dos possíveis indícios de corrosão que surgissem na barra. Posteriormente 52 CPs foram pintados na parte superior e inferior com tinta epóxi, ficando desprotegidas apenas uma região central do concreto (onde foram aplicados os produtos) e a parte superior da barra para realizar as medidas de potencial de corrosão. Posteriormente os CPs foram colocados na câmara de carbonatação, figura 62.

Figura 62: Procedimento de preparação da pintura carbonatação dos CPs com aço \varnothing 5 x 10 cm.



(a) CP retirado da câmara úmida



(b) cabine de jateamento



(c) CP jateado



(d) preparo para pintura do CP
continuação figura 62



(e) CPs com pintura epoxi



(f) CPs com aço pintados colocados em câmara de carbonatação

Fotos: Tatiana Simão, 2020.

b) CPs sem armadura

Foram moldados 108 CPs com \varnothing 10 x 20 cm de altura, 87 CPs de \varnothing 5 x 10 cm e 12 CPs prismáticos de 10 X 10 X 40 cm. Os procedimentos de dosagem, mistura, adensamento e cura do concreto foram os mesmos adotados para a moldagem dos CPs com aço. Os corpos-de-prova foram executados com concreto no traço 1:1,5:2,5:0,53, sem o uso de aditivos, com cimento CII – E 32⁵⁰, areia média e agregado graúdo com Dmax de 4,8 a 12,5 mm (B0), para confeccionar um concreto classe de resistência C30 (NBR 8953 / 2015).

c) Carbonatação dos CPs

Foram para a câmara de carbonatação 33 CP's de \varnothing 5 x 10 cm com aço, 53 CPs de \varnothing 5 x 10 cm sem aço, 88 CPs de \varnothing 10 x 20 cm e 7 CPs de 10 X 10 X 40, sob condições iniciais de temperatura de 23°C UR 65% e CO₂ em 3%, posteriormente aumentou-se o teor de CO₂ para 5%. Os CPs ficaram nestas condições até atingirem a profundidade de carbonatação entre 15 e 20 mm, o que levou cerca de 5 meses. Os corpos de prova de referência que não foram carbonatados ficaram protegidos em embalagem de plástico hermética e resistente à penetração de CO₂.

A profundidade de carbonatação foi aferida com solução padrão de fenolftaleína, de acordo com norma DIN EN 14630:2007-01, inicialmente aspergida no pó retirado de furos feitos em um CP de controle. Conforme a profundidade avançou CPs de “sacrifício” foram rompidos por compressão diametral para a medida de frente de carbonatação (figura 64).

Figura 64: Averiguação da profundidade de carbonatação do concreto em CP de sacrifício, inicialmente com o pó do concreto retirado com a furadeira e posteriormente rompendo o mesmo a tração por compressão diametral e aspergindo fenolftaleína.

⁵⁰ A moldagem destes corpos foi realizada em 4 lote, sendo que o 1º e 2º lote utilizaram cimento da marca Holcim (moldagens dia 13 e 14 de novembro de 2019), o 3º lote utilizou cimento da marca Tupi (moldagem realizada no dia 04/12/2019 os CPs com aço e alguns sem aço) e o 4º lote também utilizou cimento da marca Tupi (moldagem realizada no dia 02/12/2020). Verificou-se que os cimentos utilizados tanto da marca Holcim quanto Tupi constam da lista de CLASSIFICAÇÃO DAS EMPRESAS NO PROGRAMA DE GARANTIA DA QUALIDADE do 3º Trimestre 2019 e 2020 respectivamente do Programa Setorial da Qualidade de Cimento Portland da ABCP (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, Entidade Setorial Nacional Mantenedora e Entidade Gestora Técnica do Programa), o que sugere que os cimentos utilizados estão em conformidade com as normas da ABNT.



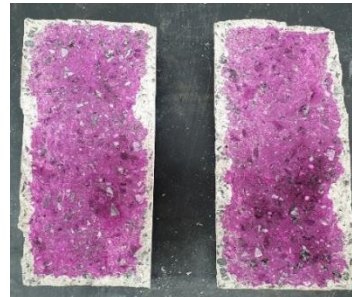
(a) Furo no CP para medida da profundidade de carbonatação



(b) Rompimento do CP por compressão diametral



(c) CP rompido diametralmente



(d) aspersão de solução de fenolftaleína para medida da profundidade de carbonatação

Fotos: Tatiana Simão, 2020.

5.3.2. Avaliação da ação dos produtos / sistemas

Neste item são detalhados os ensaios realizados para avaliar a eficiência dos produtos / sistemas em estudo para a proteção do concreto aparente do patrimônio arquitetônico, medidas de potencial de corrosão (CPs \varnothing 5 x 10 cm com aço) e pelo cachimbo (CPs 10 x 10 x 10 cm).

5.3.2.1. Avaliação dos efeitos dos produtos no processo de corrosão do aço

Após atingir a profundidade de carbonatação necessária para o desenvolvimento da pesquisa os CPs tiveram procedimentos distintos, sendo que os CPs com aço passaram por ciclos de molhagem e secagem por cerca de 9 meses (5 dias de molhagem e 2 de secagem) para acelerar a corrosão das armaduras. Este processo foi acompanhado com a medição do potencial de corrosão E_{corr} realizado quinzenalmente com multímetro e eletrodo de cloreto de prata EPCP (Ag/AgCL) com solução de cloreto de potássio KCL, 3 mol/L, figura 65.

Figura 65: Imagens de: (a) ciclo de molhagem e secagem para acelerar o processo de corrosão do aço com (b) acompanhamento da medição do potencial de corrosão; (c) CP rompido a compressão para observar barra de aço oxidada.



(a)



(b)



(c)

Fotos: Tatiana Simão, 2021.

Quando o potencial de corrosão se manteve em valores considerados em condições incertas ou com 90% de probabilidade de corrosão conforme dados da tabela 16 então foram aplicados os produtos e após 1 mês iniciou-se o controle de medidas de potencial de corrosão para avaliar a eficiência destes produtos/sistemas de proteção de superfície visando atender o objetivo que era investigar o efeito dos produtos aplicados (realcalinizante, inibidor de corrosão e hidrofugante) na variável eletroquímica de potencial de corrosão.

Tabela 16: Probabilidade de corrosão em função do potencial de corrosão.

Valores para potencial de corrosão (E_{corr}) empregando-se para a medição eletrodo de prata cloreto de prata – EPCP (Ag/AgCL em solução de cloreto de potássio KCL3 mol/L (mV)	Probabilidade de corrosão do aço carbono
Mais positivo que -92	< 10%
Entre -92 e -242	incerta
Mais negativo que -242	> 90%

Fonte: Araujo *et al.* (2017).

Foram moldados 4 corpos de prova para cada produto ou sistema aplicados, 2 extras e mais 7 sem pintura para controle de corrosão carbonatados e a mesma quantidade não carbonatados, conforme pode ser observado na tabela 17:

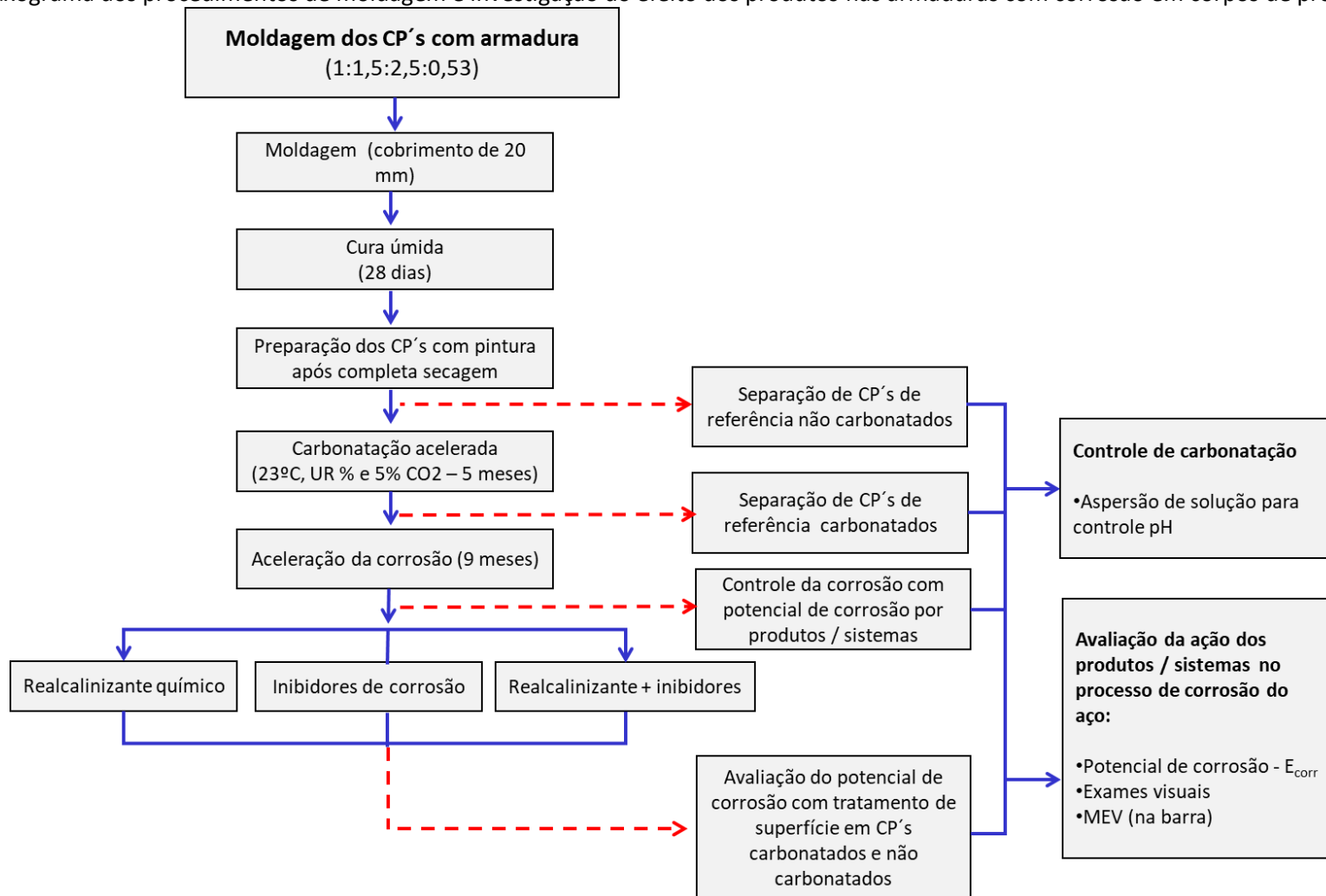
Tabela 17: Demonstrativo dos quantitativos de corpos de prova moldados com aço.

Produtos / sistemas	CPs carbonatados
Realcalinizante	4
Inibidor 1	4
Inibidor 2	4
Realcalinizante + inibidor 1	4
Realcalinizante + inibidor 2	4
Hidrofugante (HA)	4
Extra	2
Sem pintura para controle de corrosão	7
Total	33

Fonte: Elaborado pela autora

A figura 66 mostra de forma resumida o fluxograma dos procedimentos de moldagem e investigação do efeito dos produtos nos corpos de prova com aço.

Figura 66: Fluxograma dos procedimentos de moldagem e investigação do efeito dos produtos nas armaduras com corrosão em corpos de prova com aço.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

5.3.2.2. Medidas de absorção de água

Foi realizado o método de absorção pelo método do cachimbo: ensaio não destrutivo, reconhecido pelo Comitê de Normalização Europeia como método preferencialmente usado no estudo do patrimônio cultural, de acordo com a norma EN 16302 (2013). Trata-se de um método conhecido como do cachimbo ou do tubo de Karsten, descrito originalmente como Test II4 em Commission 25-PEM⁵¹ (1980). Foram usados 14 CPs 10 x 10 x 10 realizados em 3 áreas diferentes para cada interação dos produtos de forma isolada e associada, além dos CPs de referências carbonatado e não carbonatado.

5.3.3. Profundidade de penetração dos produtos / sistemas:

Com o objetivo de avaliar a profundidade de penetração dos produtos no concreto recorreu-se à cromatografia para identificar quantitativamente os constituintes dos produtos empregados neste estudo e também empregou-se métodos expeditos. Nestes ensaios foram utilizados os CPs cilíndricos de \varnothing 10 X 20 cm e 5 x 10, todos sem armadura. Os CPs foram moldados como apresentado no item 5.3.2.1 item b) e tiveram os mesmos procedimentos de cura e carbonatação explicados anteriormente. Somente depois foram aplicados os produtos de forma isolada e associada nos CPs.

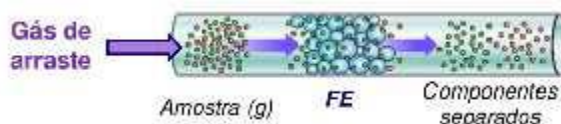
5.3.3.1. Técnica qualitativa para avaliar profundidade de penetração dos produtos

Foi utilizada a cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-EM), técnica de análise de espécies químicas simples e que apresenta sensibilidade e efetividade para separar componentes de misturas de substâncias voláteis (evaporáveis) que tenham pontos de ebulição de até 300°C e que sejam termicamente estáveis (COUTRIM, 2016).

⁵¹ Comissão de estudos da RILEM (Reunion Internationale des Laboratoires D'essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions) orientada ao desenvolvimento de métodos de ensaio para medir a deterioração em edificações e monumentos pétreos e a eficácia dos tratamentos de tratamento e proteção.

Segundo Santos *et al.* (2016) como princípio da técnica, a amostra é vaporizada e introduzida em um fluxo de gás (específico para cada detector) chamada de fase móvel (FM) ou gás de arraste. Este fluxo de gás com a amostra passa por um tubo contendo a fase estacionária (FE) que é a coluna cromatográfica onde ocorre a separação da mistura, figura 67.

Figura 67: Esquema de separação de amostra em tubo contendo a fase estacionária (FE), ocorrendo a separação da amostra em cromatografia gasosa.



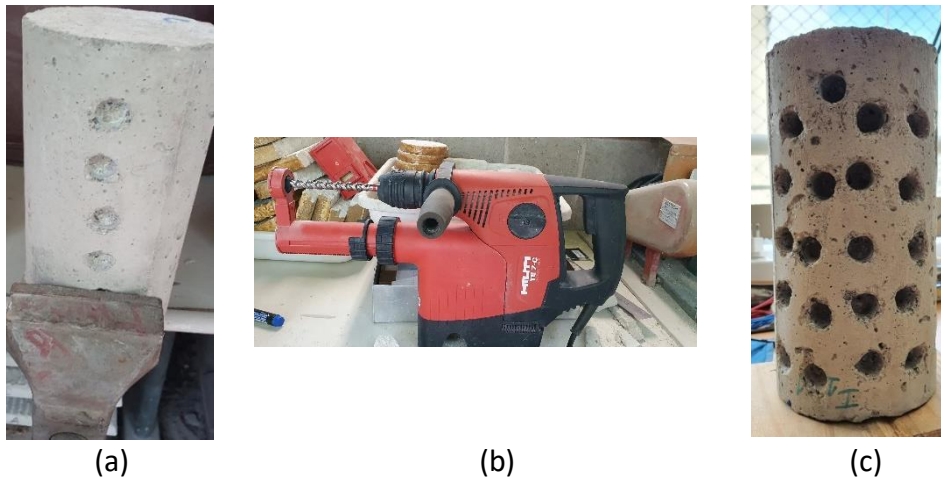
Fonte: Santos *et al.* (2016).

No procedimento dos ensaios de cromatografia gasosa foram analisadas amostras dos 2 inibidores e do hidrofugante a base de silano antes de aplicá-los nos CPs de concreto. Na sequência foram analisadas amostras do concreto impregnado com os produtos em 3 profundidades (0 a 5 mm, de 15 a 10 mm e de 10 a 15 mm). Destaca-se que esse ensaio foi realizado com amostras retiradas do concreto carbonatado.

Inicialmente os ensaios foram feitos com amostras impregnadas apenas com os produtos isoladamente (inibidores e hidrofugante). Posteriormente foram ensaiadas amostras impregnadas com a combinação de produtos. As análises foram realizadas em cromatógrafo a gás acoplado ao espectrômetro de massas (GCMS-QP2010S) marca Shimadzu, modelo GCMS-QP2010S.

A extração da amostra em pó foi realizada como apresentado no item 5.1.2, visando não alterar o material da amostra a ser analisado. Este cuidado foi necessário para preservar as características do material a ser analisado. O corte a água ou o aquecimento exagerado na retirada das amostras poderiam resultar na perda da sensibilidade da análise devido à volatilidade e solubilidade em água dos compostos de interesse, figura 68.

Figura 68: Coleta de amostra no concreto (a) início da furação do CP com na profundidade de 0 -5 mm (b) furadeira de alto impacto com recipiente para coletar pó do concreto e (c) CP com as furações completas nas 3 profundidades.



Fonte: Tatiana Simão, 2021.

Foram analisadas as seguintes amostras para detecção da presença dos produtos no concreto:

- Produtos puros líquidos: produtos Inibidor 1, Inibidor 2 e hidrofugante a base de silano;
- Em pó: amostra do concreto carbonatado e impregnado com os produtos isoladamente: inibidor 1, inibidor 2 e hidrofugante à base de silano e amina;
- Em pó: amostra de concreto carbonatado e impregnado com a combinação dos produtos: realcalinizante + inibidor 1 + hidrofugante à base de amina; realcalinizante + inibidor 2 + hidrofugante à base de amina;
- Em pó: amostra de concreto carbonatado sem impregnação de produtos retirada de apenas da profundidade 0 a 10mm.

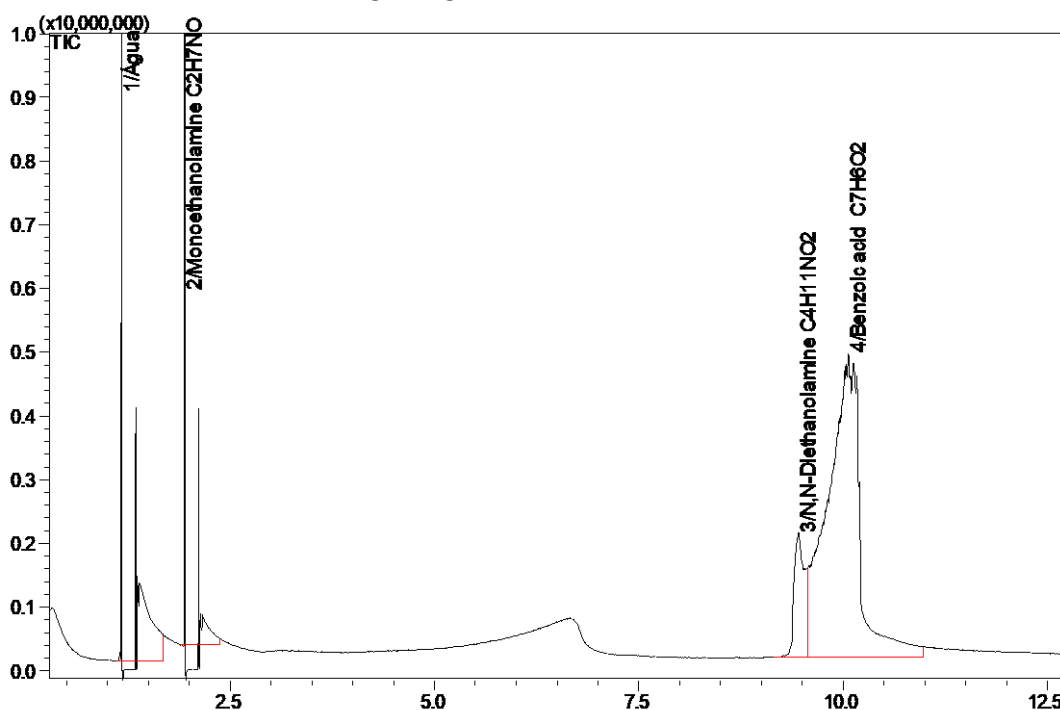
Com a análise dos produtos foi possível identificar os principais compostos dos inibidores e do hidrofugante com amina. O realcalinizante não foi analisado com essa técnica pois a cromatografia gasosa não é indicada para compostos não voláteis nas condições de operação do equipamento, segundo Chiaradia, Collins e Jardim (2008). Os resultados da identificação dos compostos são apresentados no quadro 9, obtidos a partir dos cromatogramas apresentados nas figuras 69, 70 e 71.

Quadro 9: Principais compostos e fórmulas moleculares dos inibidores e hidrofugante.

materiais	Hidrofugante com amina (HA)	Inibidor 1 (I1)	Inibidor 2 (I2)
Principais compostos e fórmulas moleculares	Dimetilaminoetanol $C_4H_{11}NO$	Monoetanolamina C_2H_7NO	2-metil-2-aminopropanol $C_4H_{11}NO$
	Pentil – trietoxisilano $C_{11}H_{26}O_3Si$	Dietanolamina $C_4H_{11}NO_2$	Ciclohexanamina $C_6H_{13}N$
	Trietoxisilanos (2 picos)	Ácido benzoico ⁵² $C_7H_6O_2$	Ácido benzoico $C_7H_6O_2$
	Aminas (2 picos)		

Fonte: Elaborado pela autora.

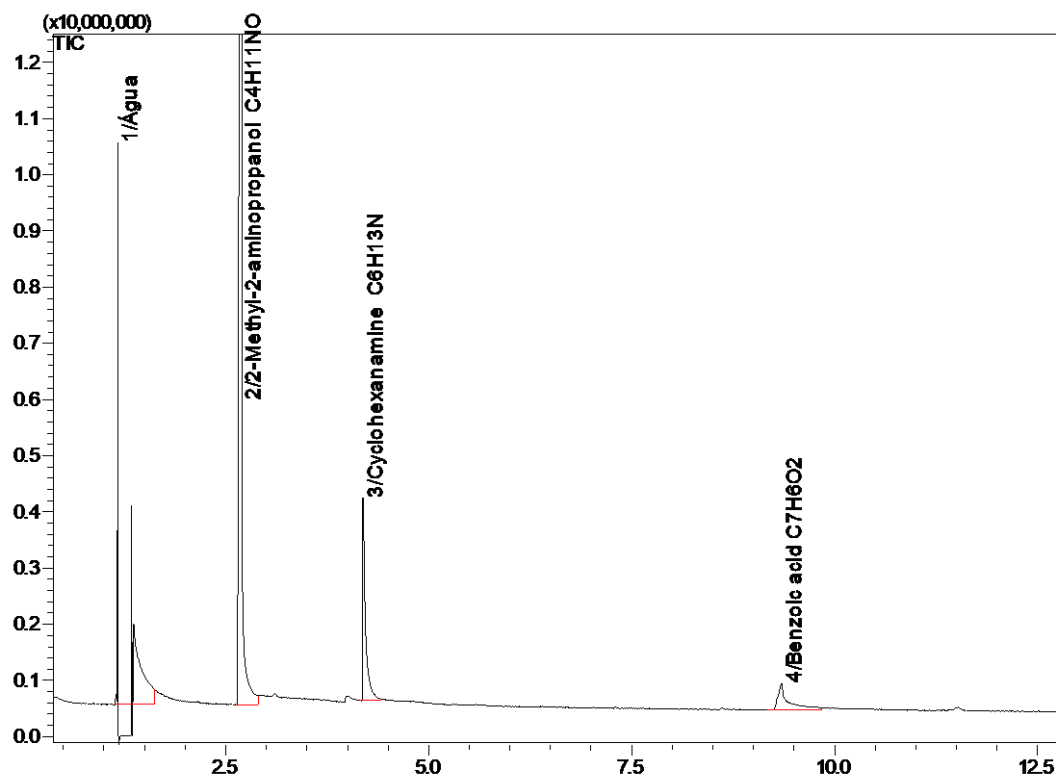
Figura 69: Concentração dos principais compostos do Inibidor de Corrosão 1 – I1 em 12,5 minutos de análise de cromatografia gasosa.



Fonte: Laboratório de Química e Manufaturados - IPT

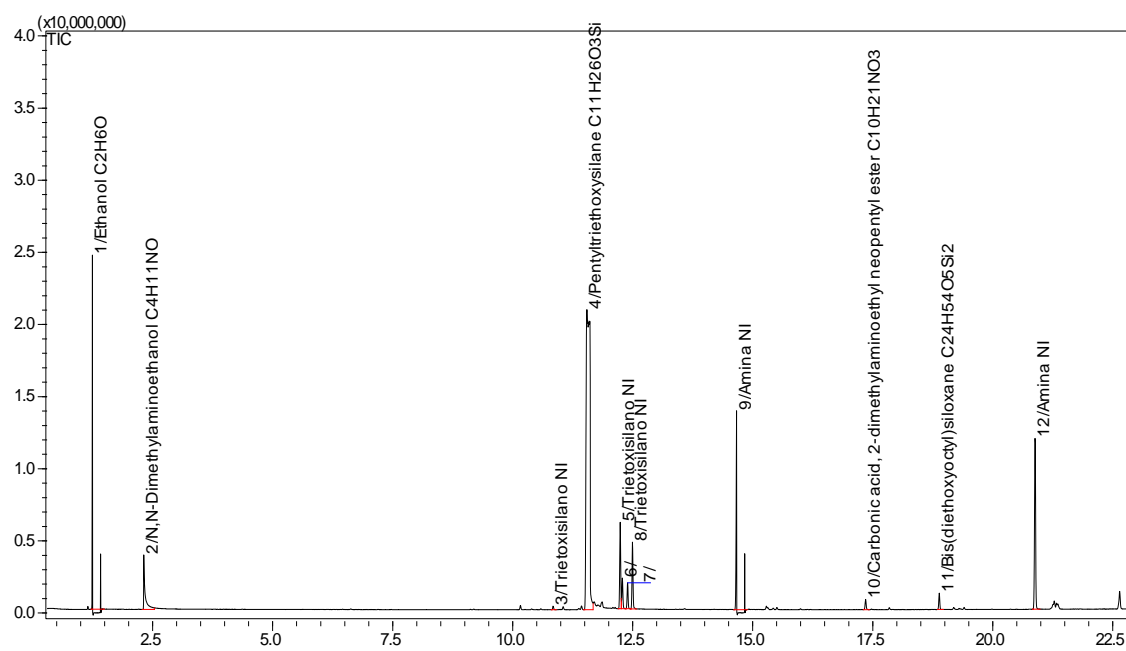
⁵² O ácido benzoico (fórmula $C_7H_6O_2$ ou C_6H_5COOH) é considerado o ácido carboxílico aromático mais simples e se apresenta como um sólido incolor cristalino (OLIVEIRA; REIS, 2017).

Figura 70: Concentração dos principais compostos do Inibidor de corrosão 2 – I2 em 12,5 minutos de análise de cromatografia gasosa.



Fonte: Laboratório de Química e Manufaturados - IPT

Figura 71: Concentração dos principais compostos do Hidrofugante com amina - HA em 22,5 minutos de análise de cromatografia gasosa.

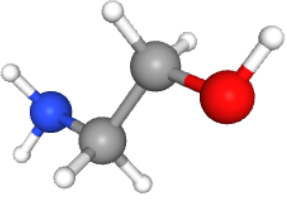
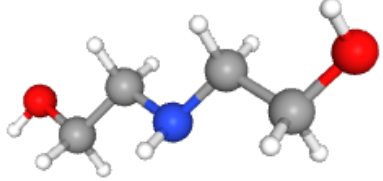
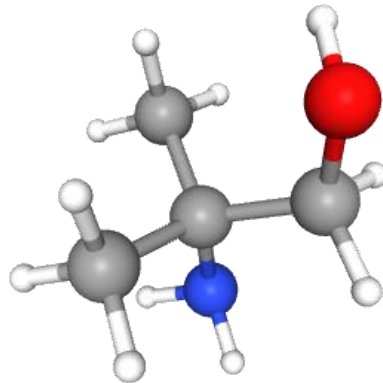
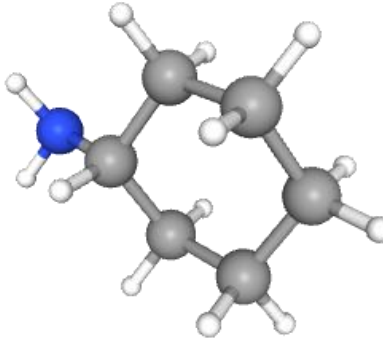


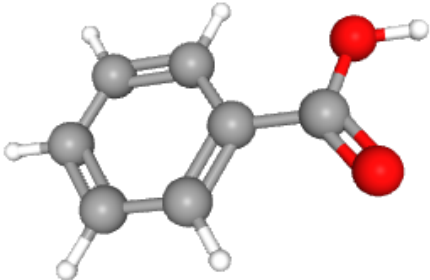

Fonte: Laboratório de Química e Manufaturados - IPT

Complementarmente são apresentadas nos quadros 10 e 11 a configuração tridimensional dos compostos detectados.

Para os inibidores os principais compostos foram detectados nos 10 primeiros minutos do ensaio. Para o hidrofugante com amina os principais compostos foram detectados ao longo de, aproximadamente, 21 minutos. Isso ocorre pois os compostos dos inibidores apresentam moléculas menores, mais voláteis e polares, distintamente dos compostos do hidrofugante que apresenta moléculas maiores e apolares ficando mais tempo retidas na coluna cromatográfica.

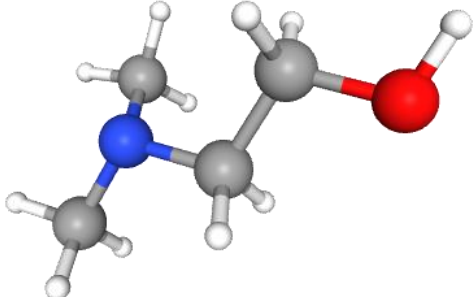
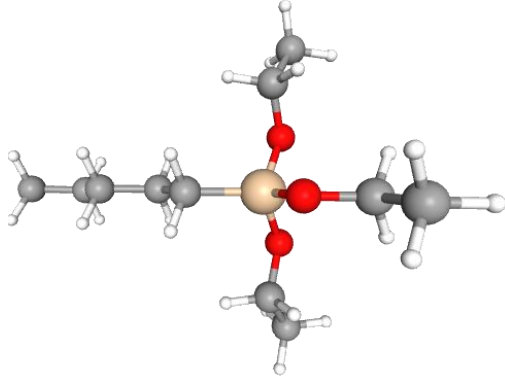
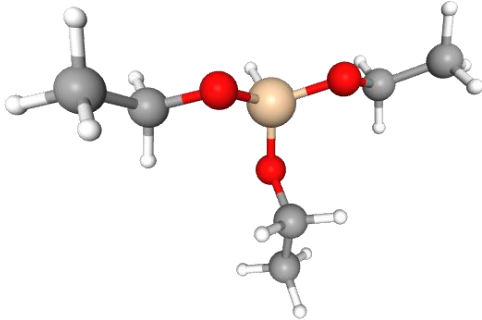
Quadro 10: Configuração tridimensional dos compostos detectados nos inibidores de corrosão.

	<p>Monoetanolamina – I1 C_2H_7NO Massa molecular: 61,08 Amina primária https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/700</p>
	<p>Dietanolamina – I1 $C_4H_{11}NO_2$ Massa molecular: 105,14 Amina secundária https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/8113</p>
	<p>2-metil-2-aminopropanol – I2 $C_4H_{11}NO$ Massa molecular: 89,14 Amina primária https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/11807</p>
	<p>Ciclohexanamina – I2 $C_6H_{13}N$ Massa molecular: 99,17 Amina Primária https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/7965</p>
<p>continua</p>	

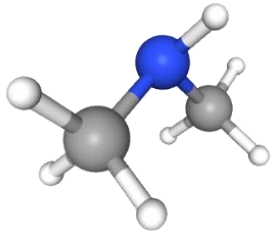

Continuação do quadro 10	
	<p>Ácido benzóico – I1 e I2 $C_7H_6O_2$ e C_6H_5COOH Massa molecular: 122,12 https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/243</p>
	

Fonte: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>

Quadro 11: Configuração tridimensional dos compostos detectados no hidrofugante.

	<p>Dimetilaminoetanol – HA $C_4H_{11}NO$ Massa molecular: 89,14 https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/7902</p>
	<p>Pentil – trietoxisilano - HA $C_{11}H_{26}O_3Si$ Massa molecular: 234,41 https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/17695</p>
	<p>Trietoxisilanos (picos 3, 5, 8) – HA $C_6H_{16}O_3Si$ Massa molecular: 164,27 https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/13830</p>

continua

Continuação do quadro 11	
	Aminas (Dimetilamina – picos 9, 12) - HA C_2H_7N Massa molecular: 45,08 https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/674
	

Fonte: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>

Entre os compostos do inibidor 1 há aminas primária (monoetanlamina) e secundária (dietanolamina). Para o inibidor 2 foram detectadas apenas aminas primárias. O ácido benzóico foi detectado em ambos os inibidores, estando em maior concentração no inibidor 1.

O hidrofugante com amina tem em sua composição o pentil-triestoxisilano com radical alquila de cadeia longa (pentil) que, segundo a bibliografia especializada, é responsável pelo bom desempenho na hidrofugação.

Busca-se com a técnica da cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas identificar a profundidade de penetração dos produtos/sistemas, buscando convalidar as análises expeditas feitas com o uso da solução de ninidrina.

5.3.3.2. Técnicas expeditas para avaliação da profundidade de penetração dos produtos

Foram usadas técnicas expeditas para identificação da profundidade de penetração dos inibidores de corrosão, do realcalinizante e do hidrofugante com amina e hidrofugante com silano/siloxano.

1) Aspersão do reagente sobre o pó com dois tipos do reagente, uma versão a solução em spray comercial e outra a solução misturada em laboratório na concentração de 1,2 g de ninidrina para 100 ml de etanol absoluto. Nesta técnica os reagentes foram aspergidos duas vezes sobre o pó de concreto com os produtos / sistemas, sendo que após cada aplicação foi exposto ao ar quente de secador de

cabelo em baixa velocidade para acelerar e intensificar a reação da ninidrina com a amina;

2) Teste com uma suspensão do pó de concreto com os produtos aplicados dissolvido em água destilada e uma solução tampão de ácido acético e uma solução de ninidrina 0,4 g de ninidrina diluída em 30 mL de etanol absoluto (96%) foram adicionados 10 mL de tampão acetato (115,5 mL de ácido acético 1M + 100 mL de hidróxido de sódio 1M), neste procedimento também houve o aquecimento das amostras antes de ser inserida a solução tampão, conforme procedimento apresentado em Fiedlerová, *et al.* (2015);

3) Teste com uma suspensão do pó de concreto dissolvido em água destilada utilizando papel de cromatografia com aspensão de solução colorimétrica. Este teste foi baseado em procedimento desenvolvido por um fabricante específico de inibidor de corrosão em função de ainda não haver ensaio estabelecido nas normativas nacionais e internacionais para avaliação da capacidade de penetração dos inibidores por migração. Este procedimento consta do trabalho de Moraes, Júnior e Schuenke (2021) e foi apresentado pelo setor técnico de um dos fabricantes dos inibidores. Em função da dificuldade de se obter as soluções utilizadas pelo fabricante neste procedimento a adaptação realizada foi a utilização do reagente colorimétrico da solução de ninidrina na concentração de 1,2 g para 100 ml de etanol absoluto, onde após colocar uma gota da amostra diluída em água destilada, a mesma foi seca com secador de cabelo e posteriormente aspergido a solução de ninidrina, que novamente foi aquecida para intensificar e acelerar a reação da ninidrina com a amina.

4) Também foi realizada a aspensão da ninidrina em CPs cilíndricos com dimensões de \varnothing 5 x 10 cm, com os inibidores aplicados de forma isolada ou associada, cortados ao meio. Buscando-se avaliar a eficiência da aplicação dos produtos foi aplicado de acordo com a recomendação do fabricante, nas aplicações realizadas de forma isolada. A aplicação foi realizada com pincel e aplicado através do envolvimento do CP em manta acrílica e filme plástico, por um período de 14 dias conforme procedimento realizado em Réus (2017) e Reus *et al.* (2017), como apresentado na figura 75.

5) Para identificar a profundidade de penetração do realcalinizante aspergiu-se soluções padrão de fenolftaleína (pH faixa de 8,3 a 10) e de amarelo de alizarina GG

(pH faixa de 10,1 a 12) na superfície do CPs com dimensões de \varnothing 5 x 10 cm cortados ao meio. Estes reagentes visam avaliar a alteração do pH, na profundidade do CP, com a aplicação do realcalinizante em corpos de prova que tiveram a aplicação deste produto de forma isolada ou associada. Buscando sanar questões apresentadas nas pesquisas de Réus (2017) e Reus *et al.* (2017), com relação a efetividade do realcalinizante aplicado com pincel, optou-se em realizar a aplicação do realcalinizante também por meio de uma manta embebida no produto e protegida por filme plástico para evitar a evaporação do produto. O envolvimento dos CPs pela manta e filme plástico foi mantido por um período de 14 dia, figura 72.

Figura 72: Corpos de prova com realcalinizante envolvidos em manta acrílica e filme plástico, para comparar com a técnica de aplicação por pincel, indicada pelo fabricante.



Foto: Tatiana Simão, 2022.

6) Para a avaliação da profundidade de penetração dos hidrofugantes foi realizada a aspersão de água com corante líquido azul sobre o CPs com dimensões de \varnothing 5 x 10 cm cortado ao meio. Como na aplicação do realcalinizante e dos inibidores também para os hidrofugantes foi utilizada a técnica de envolver os CPs em manta por 14 dias para avaliar a eficiência de penetração do hidrofugante.

5.3.4. Alteração das propriedades e microestrutura do concreto

Para avaliar a alteração das propriedades e da microestrutura do concreto os corpos de prova foram moldados, curados e carbonatados com os mesmos procedimentos apresentados no item 5.3.2.1 item b) a d). Foram moldados CPs de \varnothing 10 X 20 cm para os ensaios de resistência a compressão, permeabilidade a água por

capilaridade e MAV e CPs de \varnothing 5 X 10 para extrair amostras para o MIP. Somente após atingirem a profundidade de carbonatação entre 15 e 20 mm foram aplicados os produtos de acordo com a recomendação dos fabricantes com relação a número de demão e intervalo entre as aplicações como apresentado no quadro 9 e posteriormente realizados os ensaios para avaliação da alteração das propriedades do concreto e da sua microestrutura como descrito a seguir:

- Resistências à compressão: de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 5739 (2018) – 3 CPs para cada interação dos produtos de forma isolada e associada, além dos CPs de referências carbonatado e não carbonatado (total 39 CPs);
- Absorção de água por capilaridade: ensaio executado de acordo com a norma ABNT NBR 9779, (2012) – 3 CPs para cada interação dos produtos de forma isolada e associada, além dos CPs de referências carbonatado e não carbonatado (39 CPs) em CPs de \varnothing 10 x 20 cm;
- Massa específica, Absorção de água e Índice de vazios (MAV): de acordo com a ABNT NBR 9778 (2005) - 2 amostras para cada interação dos produtos de forma isolada e associada, além das amostras de concreto referências carbonatado e não carbonatado. Os ensaios foram realizados com os mesmos CPs após o rompimentoa dos CPs a compressão (28 CPs). Neste ensaio foram incluídos CPs com o hidrofugante a base de silano/siloxano;
- Distribuição e dimensão dos poros: porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) que abrange uma faixa de poros variando entre 1100 μ m (~1 mm) e 0,003 μ m (3 nm) para investigação do espaço poroso do concreto pois facilitam a análise de diferentes faixas de dimensões dos poros segundo Salomão (2016) – 2 amostras com dimensão cúbica de 1 cm de aresta obtido dos CPs após rompimento a compressão do CP (26 amostras);

Para a análise da microestrutura do concreto quanto às modificações provocadas pela presença das espécies químicas as técnicas usadas serão:

- MEV e EDS para investigar se houve formação de novos compostos sobre a superfície da barra de aço. Na observação ao microscópio eletrônico emprega-se a microanálise química, para detecção exploratória de espécies químicas de interesse e possível filme passivador que possa se formar na superfície da barra

que foram retirados dos CPs com aplicação de inibidor de corrosão e em barra de aço referência carbonatada. Para tanto as amostras utilizadas foram retiradas dos corpos de prova com aço que apresentaram resultados significativos após a finalização das leituras de potencial de corrosão (maiores áreas corroídas e acúmulo de produtos de corrosão de moderado a significativo) sobre a barra de aço extraída dos CPs com (total de CPs 2). No entanto visando observar melhor as barras e preservar as áreas de análise antes da preparação das amostras analisadas no MEV foi realizada microscopia óptica na barra de referência e na barra do concreto com inibidor 1 aplicado. Salienta-se que este foi um estudo exploratório como os visto que nas referências consultadas como Lee et al. (2018) Zhang, Zhu e Qu, (2019). No entanto o EDS apresenta limitações como aponta Vieira, et al. (2021), como a baixa sensibilidade a elementos mais leves que o Na (peso atômico 22,99) que é o caso do N (peso atômico 14,01), elemento constituinte dos inibidores de corrosão, além da perda de elementos voláteis. Também é importante salientar que as análises foram realizadas diretamente sobre a superfície da barra de aço sem necessidade de preparo da amostra e não foram realizadas análise de amostra em seção polida, desta forma não foi possível realizar análises químicas quantitativas.

O código adotado para cada produto / sistema aplicado nos CPs neste programa experimental pode ser observado no quadro 12 e a distribuição quantitativa de amostras por ensaios pode ser observado na tabela 18. A figura 73 apresenta de forma resumida o fluxograma dos procedimentos de moldagem e investigação do efeito dos produtos e profundidade de penetração nos corpos de prova sem aço.

Quadro 12: Produtos aplicados nos CPs de concreto com seus respectivos códigos.

Tipos de interações produtos / sistemas nos	Código dos CPs sem aço
Referência não carbonatado	REF NC
Referência carbonatado	REF C
Realcalinizante	R
Realcalinizante + hidrofugante	R + HA
Inibidor 1	I1
Inibidor 1 + Hidrofugante	I1 + HA
Realcalinizante + Inibidor 1	R + I1
Realcalinizante + Inibidor 1 + hidrofugante	R + I1 + HA
Inibidor 1	I2
Inibidor 2 + Hidrofugante	I2 + HA
Realcalinizante + Inibidor 1	R + I2
Realcalinizante + Inibidor 1 + hidrofugante	R + I21 + HA
Hidrofugante a base de silano com amina	HA
Hidrofugante a base de silano e siloxano	HS

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 18: Dados de quantidade e dimensão dos CPs por tipo de ensaio para avaliar alteração das propriedades e microestrutura do concreto.

Ensaio	Dimensão do CP	Quantidade de CP por interação	Total CPs
Resistência a compressão NBR 5739, (2018)	Cilíndrico Ø 10 x 20 cm	3	39
MAV - Massa específica, Absorção de água e Índice de vazios NBR 9778, (2005)	Cilíndrico Ø 10 x 20 cm	2 depois do rompimento a compressão	28
Absorção de água por capilaridade NBR 9779, (2012)	Cilíndrico Ø 10 x 20 cm	3	39
PIM - porosimetria por intrusão de mercúrio	Cubo 1 X 1 X 1 cm	2 extraídos dos CPs rompidos a compressão	26
MEV - Microscopia eletrônica de varredura	Amostras aproximadas de 5 cm de comprimento	Barra de aço extraída do concreto após acompanhamento de potencial de corrosão	2 amostras (1 - I1 e 1 - referência carbonatada)
Cachimbo / Tubo de Karsten EN 16302, (2013)	Cubo 10 x 10 x 10	3 áreas de uma mesma amostra	14

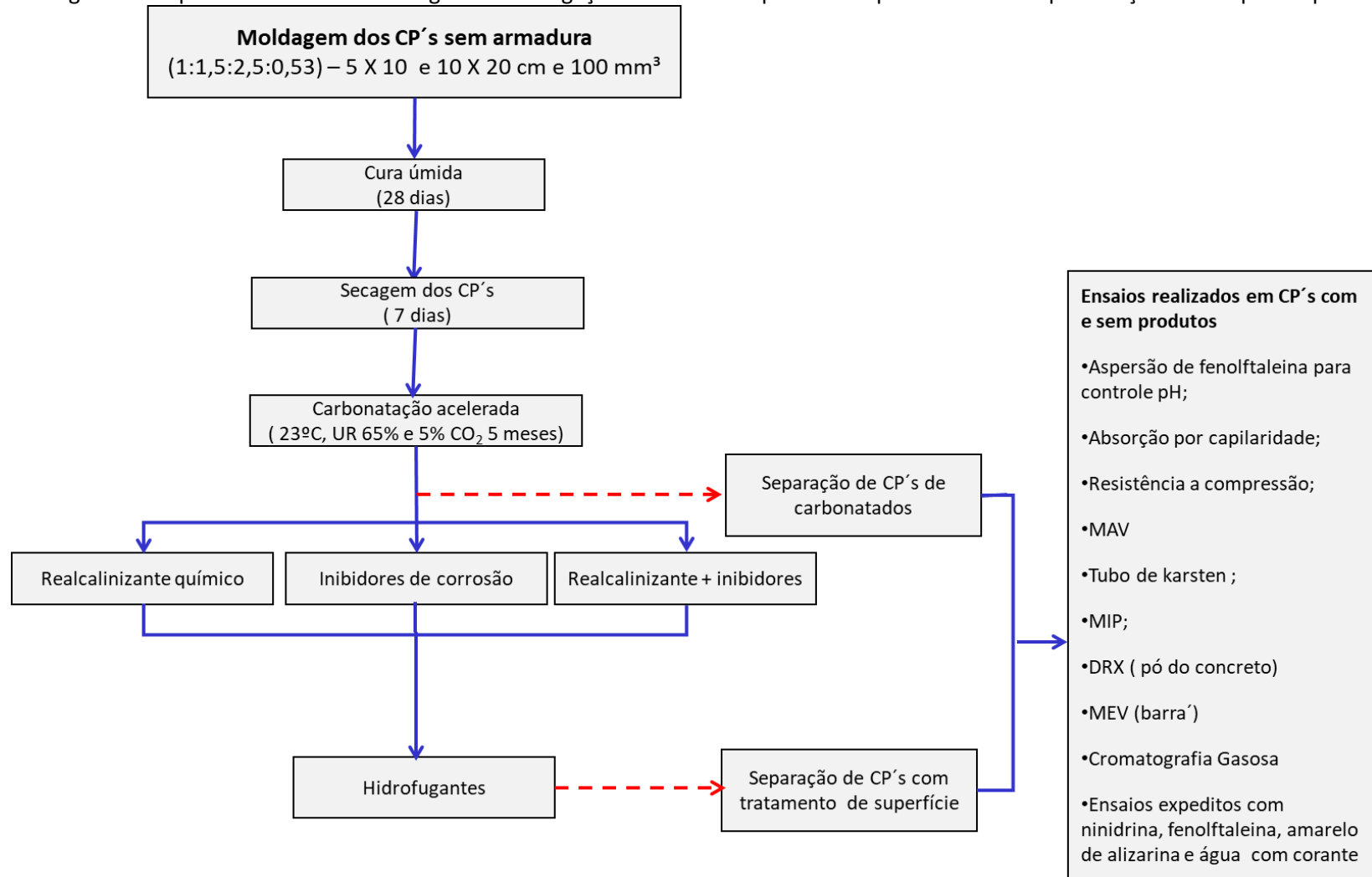
Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados de resistência a compressão, absorção por capilaridade e MAV serão analisados com o cálculo estatístico de análise de variância (ANOVA). Este método permite fazer comparações simultâneas entre duas ou mais médias de diferentes grupos, sendo possível detectar a existência de diferenças estatísticas significativas das

médias analisadas de duas formas: 1) analisando o valor-P: segundo Sant'ana [20--], quando o valor-P for menor que o nível de significância escolhido para o teste (em geral, convencionado em 0,05 – 5%), assume-se a desigualdade das variâncias, quando o valor-P for maior que 0,05 (5%) conclui-se que as variâncias não são significativas e 2) comparando o valor de F calculado com o $F_{\text{crítico}}$ tabelado: como explica Santos (2022) se o resultado de F calculado for maior do que o valor de $F_{\text{crítico}}$, indica diferença significativa entre as médias das amostras, por outro lado, se for menor do que o $F_{\text{crítico}}$ indica que não haver diferença significativa entre as médias das amostra.

Quando os resultados da ANOVA apresentarem variação significativa é necessário realizar uma análise complementar pelo teste de TUKEY, pois de acordo com Santos (2022) a ANOVA não nos diz qual das amostras é diferente, apenas que existe uma diferença significativa entre as mesmas, sendo que para identificar a amostra diferente, é preciso realizar um teste de comparação múltipla, como o teste de Tukey.

Figura 73: Fluxograma dos procedimentos de moldagem e investigação do efeito dos produtos e profundidade de penetração nos corpos de prova sem aço.



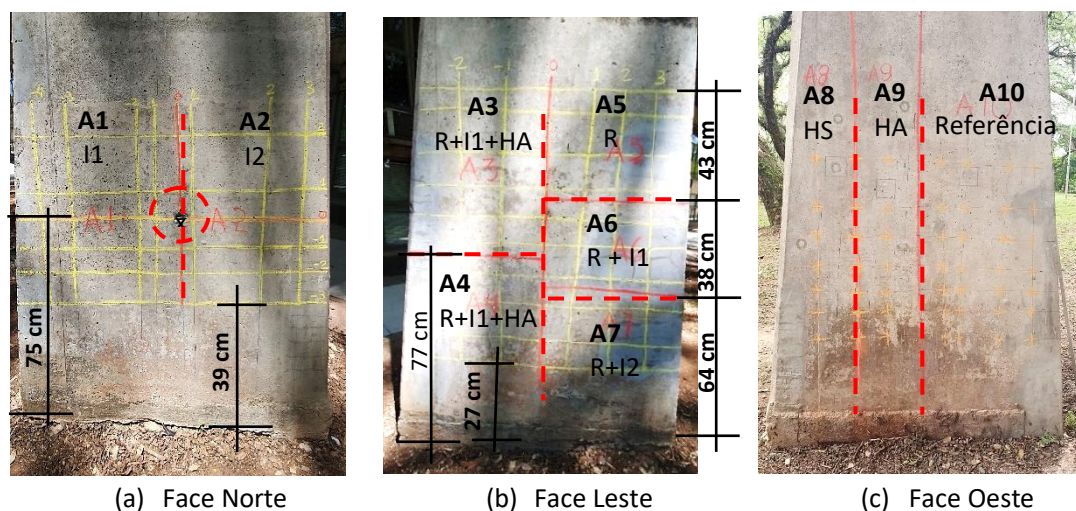
Fonte: Elaborado pela autora. (2021).

6. RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CAMPO

Neste capítulo são apresentados os resultados e análises dos ensaios realizados em campo no pilar 3 do Edifício Vilanova Artigas com os produtos/sistemas de proteção de superfície. Visando facilitar a visualização das divisões de áreas na figura 74 são apresentadas as fotos de cada uma das 3 faces estudadas com suas respectivas divisões e produtos/sistemas aplicados.

Estas divisões foram utilizadas em todos os ensaios realizados nos pilares 3 e foram divididas da seguinte forma: **Face Norte:** A1 (inibidor 1) e A2 (inibidor 2); **Face Leste:** A3 (realcalinizante + inibidor 1 + hidrofugante com amina), A4 (realcalinizante + inibidor 2 + hidrofugante com amina), A5 (realcalinizante), A6 (realcalinizante + inibidor 1) e A7 e (realcalinizante + inibidor 2) e **Face Oeste:** A8 (hidrofugante com silano e siloxano - HS), A9 (hidrofugante com amina - HA) e A10 (referência).

Figura 74: Imagem das áreas do Pilar 3 do edifício Vilanova Artigas onde foram realizados os ensaios de campo: (a) face Norte, (b) face Leste e (c) face Oeste.

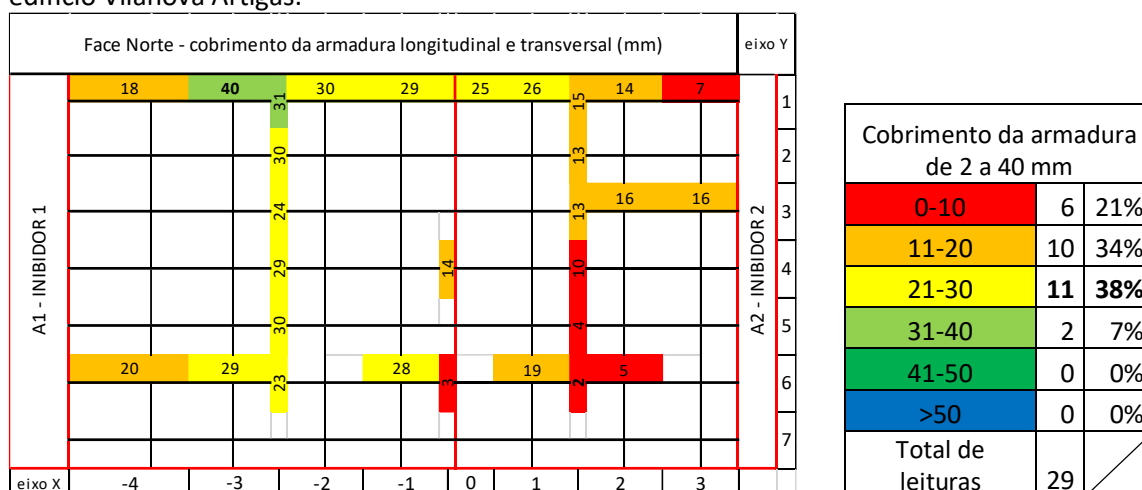


Fotos: Tatiana Simão, 2021.

6.1. ESPESSURA DO COBRIMENTO

A espessura do cobrimento da armadura foi medida com equipamento BOSCH-DTECT150, e segundo o fabricante, o equipamento detecta barras de aço em profundidade de até 150 mm, mas para o intervalo de até 50 mm as medidas são menos suscetíveis aos erros de leitura do equipamento. As leituras foram realizadas nas áreas delimitadas para aplicação dos produtos nas faces do pilar apresentadas na figura 76 e os resultados são apresentados nas tabelas 19 a 21 e figura 75.

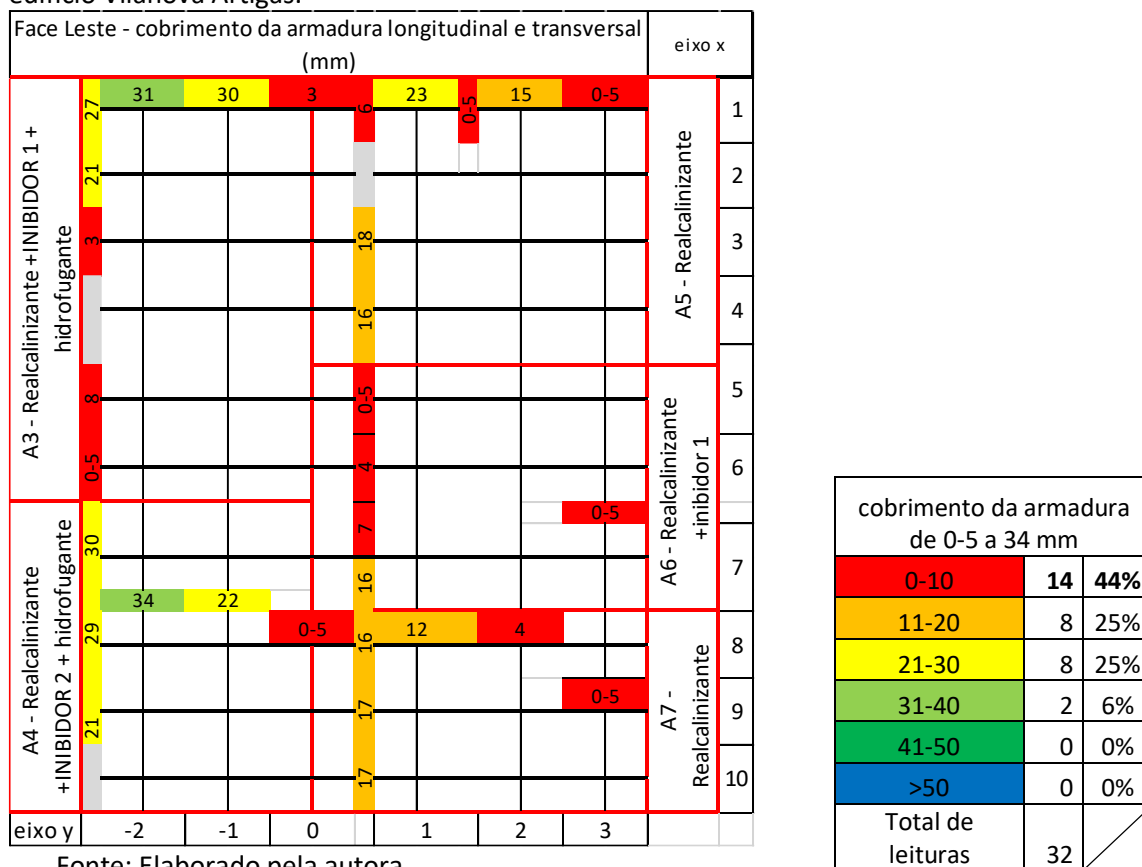
Tabela 19: Dados de leituras de espessura de cobrimento da armadura pilar P3, face norte, do edifício Vilanova Artigas.



Fonte: Elaborado pela autora

Na face norte do pilar, na tabela 19, o cobrimento de armadura varia de 2 a 40 mm sendo a maior concentração de leituras na faixa de 21 a 30 mm, acima dos valores medidos na inspeção realizada para a elaboração do plano de conservação do edifício.

Tabela 20: Dados de leituras de espessura de cobrimento da armadura pilar P3, face leste, do edifício Vilanova Artigas.

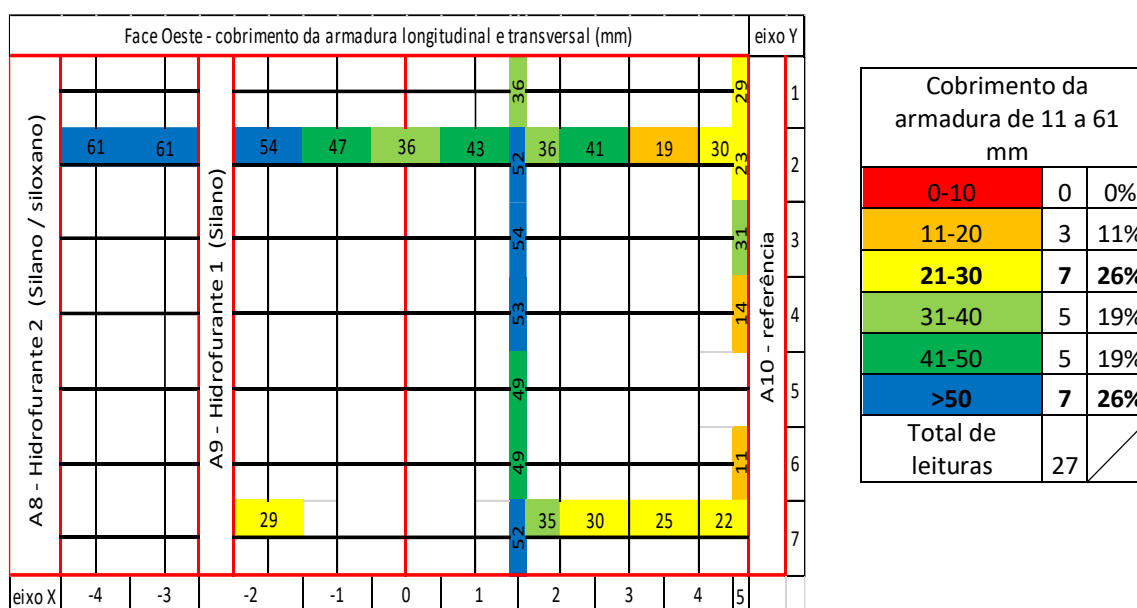


Fonte: Elaborado pela autora

Na tabela 20 os resultados da face leste do pilar apresentaram um cobrimento da armadura que varia de uma faixa de 0-5⁵³ a 34 mm, com a maior concentração de leituras na faixa de cobrimento de 0 – 10 mm (44%). Resultados condizentes com os levantamentos realizados anteriormente no edifício.

Os resultados da face oeste, tabela 21, se diferenciam das outras duas com cobrimentos variando entre 11 e 61 mm; as maiores porcentagem das espessuras de cobrimento ficaram distribuídas com resultados iguais em duas faixas de cobrimento, de 21 – 30 mm e espessuras > 50 mm com 26% em cada uma destas faixas.

Tabela 21: Dados de leituras de espessura de cobrimento da armadura pilar P3, face oeste, do edifício Vilanova Artigas.

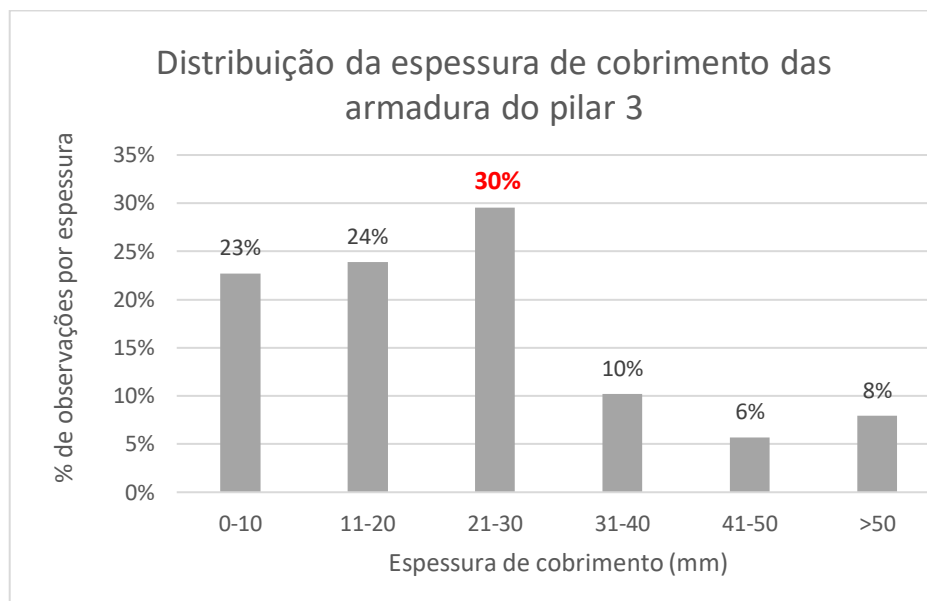


Fonte: Elaborado pela autora

Do total das medidas realizadas (88 medidas) quase a metade, 47%, estão na faixa de até 20mm, como visto na figura 77, e a porcentagem acumulada até 30 mm chega a 77%.

⁵³ Foi adotado valor de 0-5, pois nas medidas do equipamento os valores eram 0, no entanto as armaduras não estavam expostas.

Figura 75: Intervalos das espessuras de cobrimento das armaduras do pilar 3 faces Norte, Leste e Oeste, do edifício Vilanova Artigas, com dados de 88 medidas feitas com detector de metais (BOSH-D-TECT150), em 2021.



Fonte: Elaborado pela autora.

As medidas evidenciam que o cobrimento das armaduras nos pilares também não atende plenamente a recomendação de cobrimento da norma vigente à época da construção, como também não atende as disposições da atual norma de projeto e produção de estruturas de concreto armado ⁵⁴.

Um fato importante de ser observado com as leituras de cobrimento de armadura realizadas em 3 faces do pilar 3 é que possivelmente no processo de execução do concreto, na época da construção do prédio, possivelmente houve um deslocamento da armadura, deixando a face leste com concentração de cobrimento bem menor (entre 0 e 10 mm) do que na face oeste (chegando a 26% dos cobrimentos medidos entre 21-30 e outros 26% > 50 mm). Estes dados confirmam questões apresentadas nas pesquisas de Giannecchini, (2009) de Contier (2015) como as dificuldades de manter o cobrimento e alinhamento das armaduras nas construções da época.

⁵⁴ De acordo com a NBR1:1960, em seu item C – Proteção da armadura (p. 16), exigia cobrimento mínimo de 2,0 cm para vigas, pilares e arcos ao ar livre. Segundo a NBR 6118:2014, item 7.4.7.2, o cobrimento nominal de 30 mm é requerido para estruturas em ambiente de classe de agressividade II (moderada em atmosfera urbana).

6.2. TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE, DO AR E DO PONTO DE ORVALHO E UMIDADE RELATIVA DO AR

Estas medidas foram realizadas buscando-se registrar as condições ambientais de aplicação dos produtos, como apresentados no quadro 10 segundo orientações dos fabricantes. Apesar de não haver exigências explícitas sobre a temperatura de ponto de orvalho⁵⁵, foi adotado o procedimento mais conservador em razão das recomendações de alguns fabricantes de hidrofugantes, tintas e resinas para aplicação dos produtos em superfície com temperatura de, no mínimo, 3°C acima do ponto de orvalho (FRANCO et al., 2003 apud CHAVES 2016)⁵⁶.

Na tabela 22 apresenta-se o valor médio de 10 medidas de umidade relativa, temperatura do ar, temperatura da superfície, temperatura de ponto de orvalho e a diferença apresentada entre a temperatura da superfície e do ponto de orvalho. As medidas foram realizadas com o equipamento Positector DPM v. 3.4 da empresa DeFelsko, conforme apresentado no capítulo 5.

Tabela 22: Resultados das médias de 10 leituras de umidade relativa do ar temperatura do ar, temperatura da superfície, temperatura de ponto de orvalho e a diferença entre a temperatura da superfície e do ponto de orvalho realizadas no pilar 3 do Edifício Vilanova Artigas.

Médias de 10 leituras / áreas	Umidade relativa RH (%)	Temperatura do ar TA (°C)	Temperatura da superfície TS (°C)	Temperatura de ponto de orvalho TD (°C)	Superfície - ponto de orvalho TS-TD (°C)
A3	62,7	25,6	22,8	17,9	4,9
A4	60,9	25,8	22,8	17,6	5,2
A8	71,6	25,8	25,1	20,3	4,8
A9	69,9	26,1	25,1	20,2	4,9

Fonte: Elaborado pela autora

Considerando as leituras realizadas, os produtos foram aplicados conforme recomendações dos fabricantes.

⁵⁵ É a temperatura na qual o vapor de água atmosférico se condensa sobre uma superfície sólida. A condensação do vapor tem início e se mantém quando a temperatura da superfície é igual ou inferior à temperatura do ponto de orvalho do ar adjacente (ARMANI; FUNARI; SALUM, 2008).

⁵⁶ FRANCO, J. et al. Procedimentos de Proteção e Manutenção de Estruturas. In: Manual de Reparo, Proteção e Reforço de Estruturas de Concreto. Cytred, Red Rehabilitar, editores. São Paulo, 2003. cap.9, p.429-523.

6.3. UMIDADE SUPERFICIAL DO CONCRETO

Foi necessário o umedecimento das faces do pilar P3 para a medida do potencial de corrosão. A umidade das superfícies foi medida com o equipamento Moist 250, antes e depois do umedecimento, para as duas condições, antes e depois da aplicação dos produtos/sistemas. A Tabela 23 e a figura 76 trazem as leituras nas áreas antes da molhagem (AM) depois da molhagem (DM) molhagem realizada com aspersor de água por cerca de 15 minutos.

É importante salientar que as condições ambientais das leituras antes de aplicação dos produtos/sistemas, 18°C de temperatura e umidade relativa do ar 88,1% (dia 29/09/2021), foram semelhantes às condições de leitura após a aplicação dos produtos, 21°C de temperatura e umidade relativa do ar 88,4% (dia 05/01/2022).

Tabela 23: Dados de média das leituras de umidade superficial das áreas do pilar 3, antes e depois do umedecimento, com e sem aplicação de produtos/sistemas.

Faces do pilar	Média das umidades por áreas	Condição de análise	Molhagem em %	
			AM	DM
Face Norte	A1	s/ prod.	4,88	5,40
		c/ prod.	5,13	5,55
	A2	s/ prod.	5,07	5,33
		c/ prod.	5,05	5,53
Face Leste	A3	s/ sis.	5,17	5,25
		c/ sis.	5,00	5,15
	A4	s/ sis.	5,20	5,10
		c/ sis.	5,08	5,20
	A5	s/ prod.	5,10	5,25
		c/ prod.	5,13	6,58
	A6	s/ sis.	5,03	5,00
		c/ sis.	5,09	6,49
	A7	s/ sis.	5,18	5,30
		c/ sis.	5,11	6,43
Face Oeste	A8	s/ prod.	5,10	5,33
		c/ prod.	4,93	5,24
	A9	s/ prod.	5,08	5,45
		c/ prod.	5,00	5,25
A10	s/ produto	5,12	5,37	

Fonte: Elaborado pela autora.

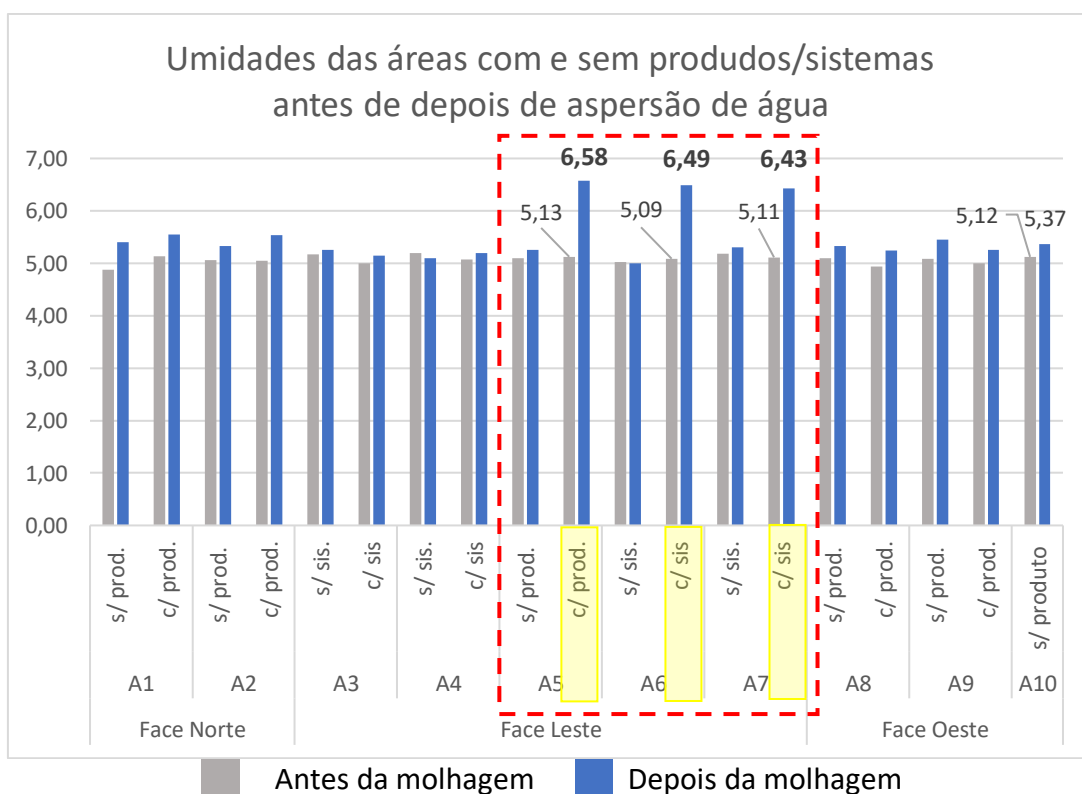
Na maioria das áreas não houve grande alteração da umidade superficial das áreas com e sem produtos/sistemas após a molhagem (DM), condição necessária para a realização das medidas de potencial. No entanto, nas áreas A5, A6 e A7 após a

aplicação dos produtos/sistemas e da molhagem os teores de umidade aumentaram cerca de 25%, 30% e 21%, respectivamente. Nas demais áreas o teor de umidade variou mais discretamente, entre 1,6 e 3,8%.

Analogamente, após a aplicação dos produtos/sistemas nas áreas A5, A6 e A7 a diferença entre a umidade superficial antes (AM) e depois da molhagem (DM) também foi notável, respectivamente, 28%, 27,5% e 25,8%. Nas demais áreas o teor de umidade variou entre 2,3% e 9,5%.

As áreas A5, A6 e A7 têm em comum a presença do realcalinizante utilizado de forma isolada ou associada com os inibidores de corrosão, mas sem a presença do hidrofugante. É provável que esse resultado seja devido à higroscopicidade dos compostos do realcalinizante [(NaOH, Ca (OH)₂ e KOH)], principalmente os hidróxidos de sódio (Silva, 2012) e de potássio (Ferreira, 20—).

Figura 76: Gráfico de umidade da superfície do concreto.



Fonte: Elaborado pela autora.

6.4. POTENCIAL DE CORROSÃO

A primeira análise é feita sobre as leituras de potenciais de corrosão medidos em campo, antes e depois dos tratamentos, apresentados nas tabelas de 24 a 27.

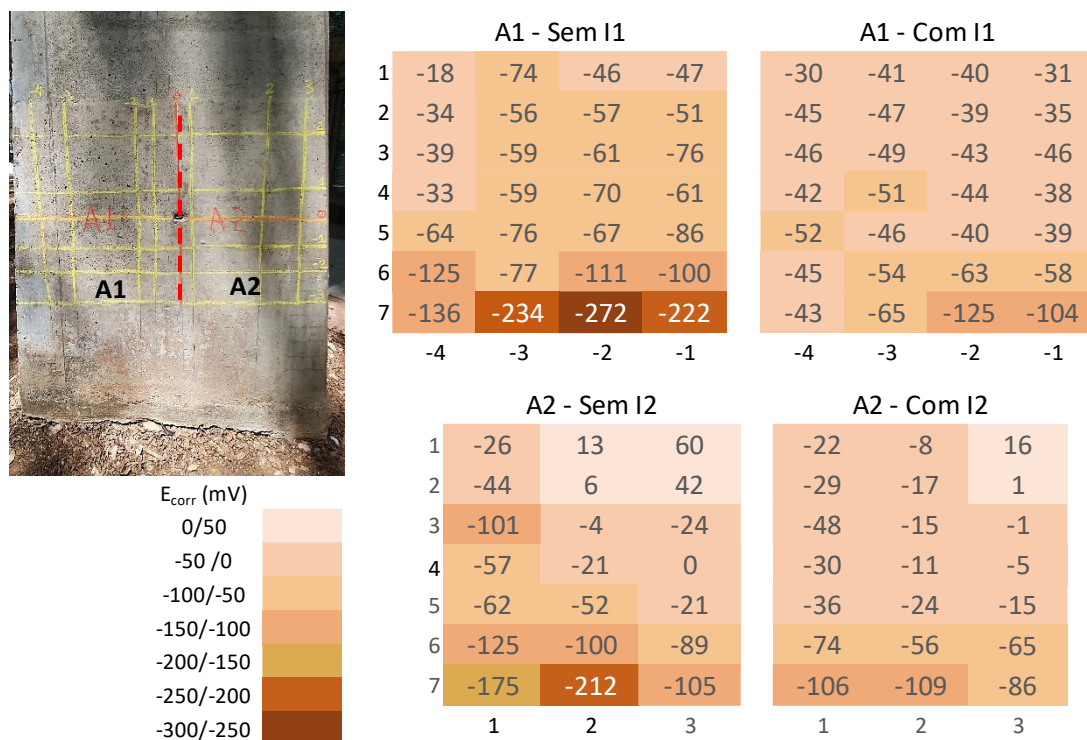
Vale destacar que todas as medidas de potencial feitas nas faces do pilar P3, usando eletrodos externos de cobre com solução de sulfato de cobre (Cu/CuSO₄), estão na faixa que indica provável estado ativo de corrosão (-400mV a +100mV) para as condições do ensaio (concreto carbonatado e úmido), de acordo com Araujo *et al.* (2017) (ver Tabela 14 capítulo 5). No entanto, a técnica é usada neste programa experimental para análises comparativas entre os tratamentos e verificação da eventual tendência dos produtos/sistemas alterarem as condições na interface armadura/concreto.

Uma observação importante feita durante as medidas, foi a provável influência da umidade ascendente do solo nas leituras de potenciais mais negativos realizadas em algumas áreas da base do pilar P3 (nas áreas A1 e A2, principalmente). Broomfield (2006, p. 49) reporta que regiões onde a disponibilidade de oxigênio é limitada, especialmente em áreas saturadas com água, os potenciais podem ser muito negativos sem, necessariamente, ser detectada a corrosão do aço; o autor complementa que em bases de pilares e paredes potenciais mais negativos podem ser observados independentemente da ocorrência de corrosão. Em Elsener *et al.* (2003) também é encontrada a mesma observação sobre a medida de potenciais mais negativos em estruturas enterradas ou submersas.

Nas leituras realizadas na área 1, tabela 24, antes de aplicar o produto, os valores de potencial ficaram entre -18 e -272 mV. Após a aplicação do inibidor de corrosão 1 percebe-se um pequeno aumento na média do potencial (ficando com valores menos negativos) e quando a análise é realizada no contexto geral das leituras observa-se que os resultados das leituras na região mais próxima à base do pilar os valores das leituras ficam bem menos negativos, chegando a reduzir o potencial a valores superiores a 160 mV (-234 para -65 mV), fato que não ocorreu nas regiões com valores menos negativos. Os valores obtidos nas medidas da área 2, inibidor 2, tabela 24, apresentaram resultados semelhantes ao da área 1, no entanto o aumento dos valores de potencial de corrosão

após a aplicação do inibidor de corrosão 2 (valores menos negativos) chegou à ordem de 100 mV. A redução do potencial na média foi menor do que o observado na área 1.

Tabela 24: Dados de medidas de potencial de corrosão E_{corr} (mV) nas áreas 1 (A1) e 2 (A2) do pilar P3, antes (a esquerda) e após a aplicação (a direita) dos inibidores de corrosão 1 (I1) e 2 (I2). Vista da face norte do pilar com a indicação das áreas A1 e A2.



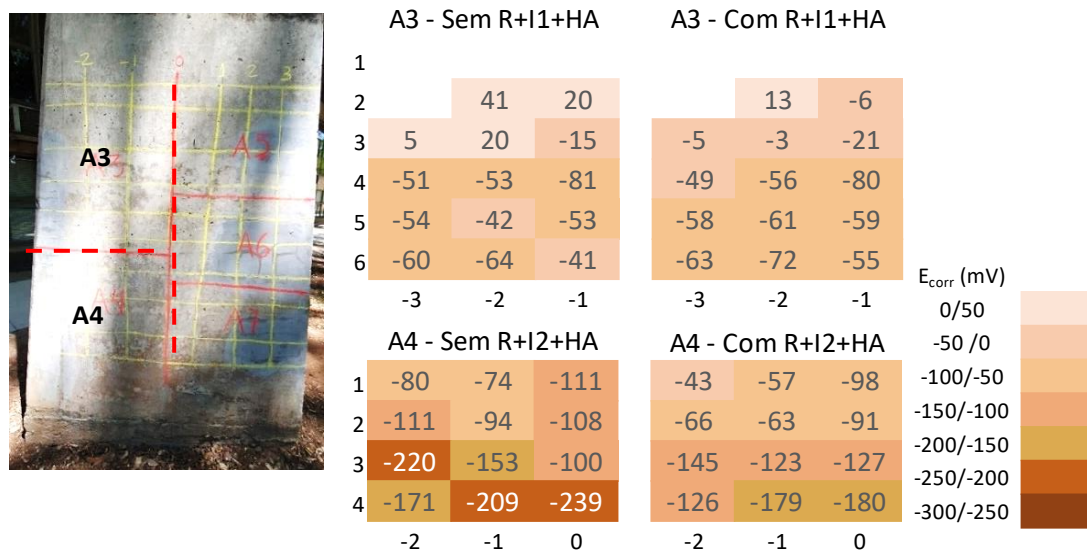
Fonte: Elaborado pela autora.

As leituras realizadas na área 3, composta pelo sistema realcalinizante, inibidor 1 e hidrofugante a base de silano e amina - HA (tabela 25) mostraram comportamento bem diferente. Nas leituras antes da aplicação dos produtos indicaram que as armaduras também apresentam potencial de corrosão ativo, mas após a aplicação dos produtos os valores tornaram-se ligeiramente mais negativos. Esta área está localizada numa região mais alta do pilar e, portanto, não propensa à provável interferência da umidade ascendente do solo.

Semelhante ao que aconteceu nas áreas 1 e 2, na área 4 (tabela 25), após a aplicação do sistema realcalinizante, inibidor de corrosão 2 e hidrofugante a base de silano e amina – HA, houve aumento dos valores de potencial de corrosão (valores um pouco menos negativos), no entanto menos significativa do que os resultados avaliados do inibidor 2 aplicado isoladamente. Ressalta-se que área é localizada na região próxima à base do pilar e, como já pontuado, suscetível à interferência da umidade ascendente

com variações mais significativas para os valores mais próximos ao solo e mais eletronegativos.

Tabela 25: Dados de Medidas de potencial de corrosão E_{corr} (mV) das áreas 3 (A3) e 4 (A4) do pilar P3, antes (a esquerda) e após (a direita) a aplicação da associação do realcalinizante (R), inibidor 1 e 2 (I1 e I2) e hidrofugante à base de silano e amina (HA): R+I1+HA e R+I2+HA. Vista da face leste do pilar com a indicação das áreas A3 e A4.



Fonte: Elaborado pela autora.

A área A5, com a aplicação de realcalinizante, é localizada na parte mais elevada do pilar. Antes do tratamento os valores da tabela 26 indicam estado ativo. Como a aplicação do realcalinizante os potenciais medidos foram mais negativos, com variação entre 1 e 45mV, valores inferiores a 50mV considerado como variação aceitável nas medições feitas por meio deste método.

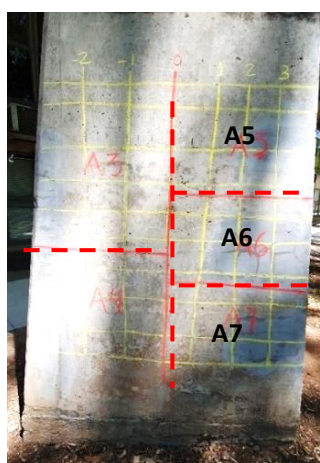
Há que se registrar, no entanto, que pesquisas reportadas por Elsener (2001) apontam medidas de potencial mais negativas em estruturas após a realcalinização eletroquímica. A redução do potencial é resultado, segundo o autor, do aumento da condutividade do meio, devido ao aumento do pH e da presença de íons sódio e bicarbonato na solução dos poros. O potencial mais negativo, explica o autor, indica que a interface aço/concreto está em meio alcalino e, portanto, o aço tende à passivação. Outro aspecto que vale ser registrado refere-se à medida da umidade superficial nessa área 5 (tabela 23 e figura 78) com aumento de 28%, passando de 5,13% antes de se aplicar produto para 6,58% após a aplicação do realcalinizante. Isso pode ter reduzido a resistividade do meio e, eventualmente, influenciado as medidas de potencial de

corrosão (com indicação de valores mais negativos). Apesar dessas ponderações, e mesmo que o cobrimento da armadura na Área 5 seja pequeno (de 0,5cm a 23cm), não é possível sugerir uma eventual influência do realcalinizante químico na interface aço/concreto.

Na área A6, onde foi aplicado o sistema realcalinizante e inibidor 1, algumas medidas do potencial ficaram mais negativas, outras menos negativas, não sendo observada alguma tendência consistente de variação. Após a aplicação do sistema na Área A6 também foi registrado o aumento da umidade da superfície de, aproximadamente, 8% embora menor do que a Área A5, variando de após a aplicação do sistema de proteção, passando de 5,09% para 5,49%. Na média, nas medidas do potencial de corrosão houve uma ligeira redução da eletronegatividade após o tratamento.

A área 7 está situada próxima à base do pilar e, provavelmente, os resultados também foram influenciados pela umidade ascendente. A aplicação do sistema realcalinizante e inibidor 2 (tabela 26) não resultou em variação consistente, apresentando potenciais maiores (menos negativos) e menores (mais negativos). A variação de umidade nesta área também foi expressiva, aumento de cerca de 26%, após a aplicação do sistema, variando de 5,11% para 6,43 %.

Tabela 26: Dados de medidas de potencial de corrosão E_{corr} (mV) das áreas 5 (A5), 6 (A6) e 7 (A7) do pilar P3, antes (a esquerda) e após (a direita) a aplicação do realcalinizante (R) associado aos inibidores 1 e 2 (I1 e I2) ou isoladamente: R+I1, R+I2 e R. Vista da face leste do pilar com a indicação das áreas A5, A6 e A7.



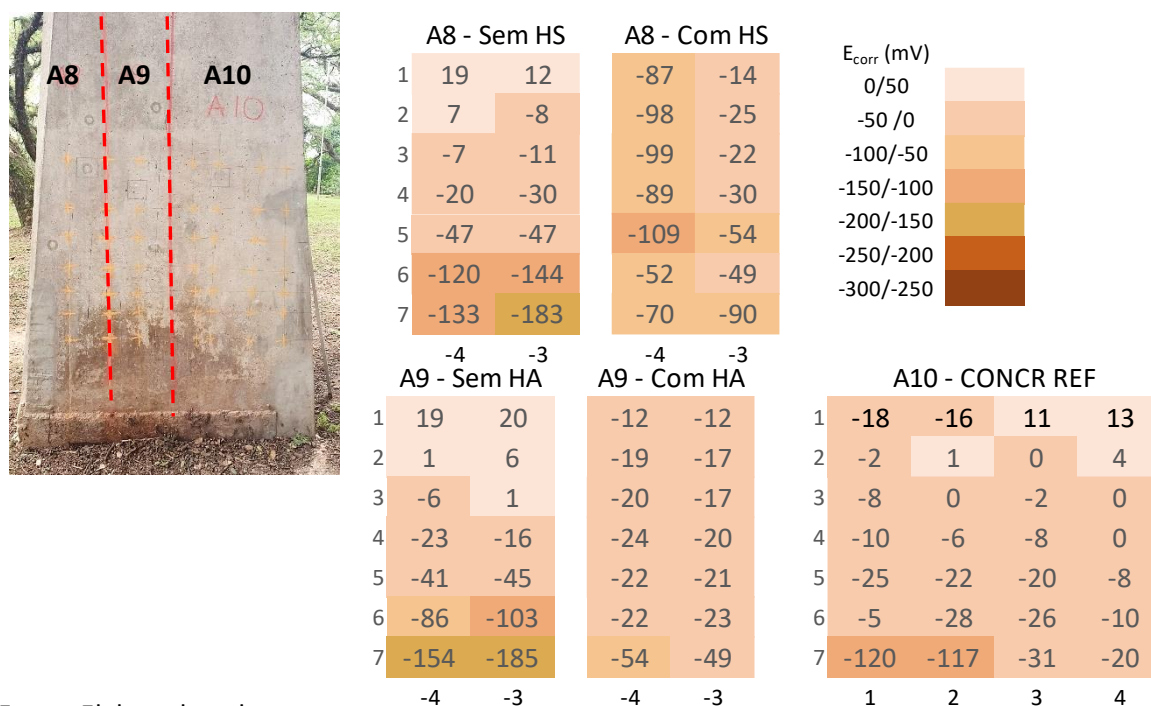
A5 - Sem R			A5 - Com R			E_{corr} (mV)	
1	2	3	1	2	3		
2	0	-13	-45		-14	0/50	
3	-30	-49	-55	-52	-66	-57	-50 / 0
4	-57		-65	-66	-74	-67	-100/-50
A6 - Sem R+I1			A6 - Com R+I1			-150/-100	
5	-50	-68	-60	-54	-70	-52	-200/-150
6	-82	-79	-61	-75	-88	-40	-250/-200
7	-126	-98	-76	-89	-71	-59	-300/-250
1	2	3	1	2	3		
A7 - Sem R+I2			A7 - Com R+I2				
8	-78		-181	-86	-106	-120	
9	-151	-107	-89	-143	-102	-114	
10	-232		-207	-132	-167	-107	
1	2	3	1	2	3		

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Área 8 (tabela 27) foi aplicado hidrofugante à base de silano/siloxano (HS) do mesmo fabricante e produto semelhante ao que foi aplicado no edifício Vilanova Artigas na obra realizada entre 2012 e 2015. Houve aumento do potencial (valores menos negativos) na área mais próxima da base do pilar, mas foi apreciável aumento da eletronegatividade (valores mais negativos) na área menos suscetível à interferência da umidade ascendente. As medidas não permitem afirmar que o produto interfere no meio, especialmente quanto ao previsível aumento da resistividade apontado como o efeito propiciado por hidrofugantes na proteção do concreto do patrimônio arquitetônico (MARIE-VICTOIRE et al, 2017).

Na área 9 (tabela 27), com hidrofugante a base de silano e amina (HA), os resultados mostraram uma variação do potencial de corrosão para valores menos negativos na base do pilar, como esperado. Cabe destacar que, embora todas as medições positivas tenham se deslocado para valores negativos, as diferenças são inferiores a 50mV (faixa aceitável de variação das medidas).

Tabela 27: Dados de medidas de potencial de corrosão E_{corr} (mV) das áreas 8 (A8) e 9 (A9) do pilar P3, antes (a esquerda) e após (a direita) a aplicação do hidrofugante à base de silano/siloxano (HS) e do hidrofugante à base de silano e amina (HA). A área 10 (A10) é a área do concreto de referência. Vista da face oeste do pilar com a indicação das áreas A8, A9 e A10.



Fonte: Elaborado pela autora.

Ainda na tabela 27 são apresentados os resultados da área 10, onde não foi aplicado qualquer produto sendo, portanto, a área de referência. Assim como nas demais áreas, na área 10 os resultados das leituras de potenciais de corrosão mostram maior eletronegatividade na região próxima a base do pilar. Além disso, mesmo sem aplicar qualquer produto/sistema de proteção de superfície esta área apresentou menor valor médio de eletronegatividade (-17 mV).

A análise comparativa do potencial de corrosão é feita também por meio da curva de distribuição acumulada de probabilidades, recurso descrito em Elsener *et al.* (2003) e em Marie-Victoire *et al.* (2012) no cotejamento do efeito de tratamentos ou de áreas com diferentes condições de conservação. Elsener e seus colaboradores (2012) destacam que a representação estatística dos dados, usando a distribuição acumulada de probabilidades, oferece resultados úteis quando a resistividade do concreto não é muito alterada pelo tratamento. Como já exposto no item anterior, com exceção das áreas A5, A6 e A7, a umidade da superfície do concreto do pilar P3 não variou significativamente, antes e depois da aplicação dos produtos, portanto considera-se o recurso válido para fins comparativos (Figura 76).

Da leitura das curvas da figura 77 pode-se observar que para a aplicação do inibidor 1 (área A1) e 2 (área A2) há uma tendência de deslocamento da curva para potenciais menos negativos após o tratamento. No relato de Elsener *et al.* (2003)⁵⁷ as medidas de potencial permitem a análise de toda a superfície do elemento tratado e o deslocamento da curva para potenciais menos negativos sugere a proteção da armadura. Assim, mesmo que ainda em quantidade insuficiente de dados, e de forma preliminar, há indícios de que os inibidores (1 e 2) podem reduzir o potencial de corrosão da armadura do concreto nas condições investigadas.

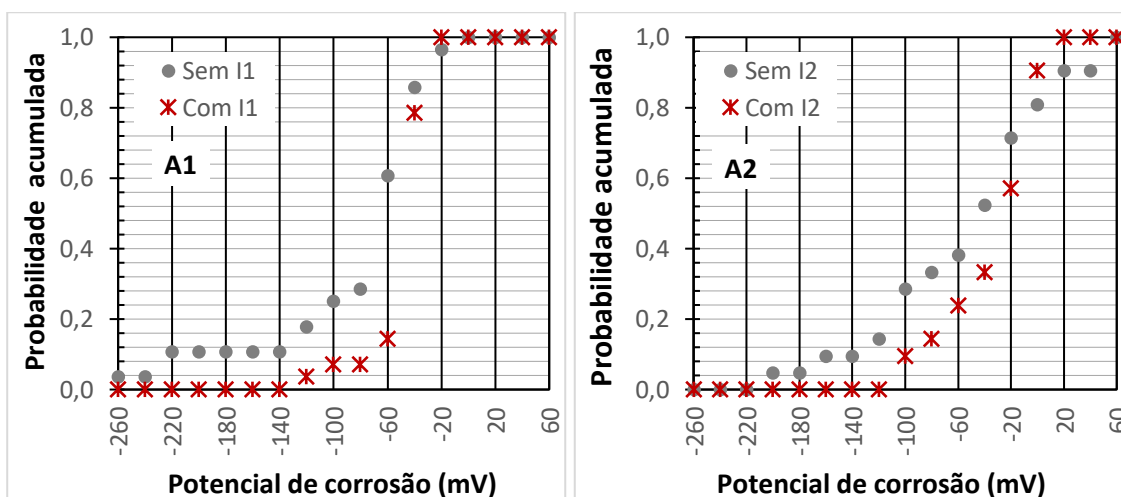
Na demais curvas o deslocamento relativo entre as curvas, antes e depois do tratamento, não é distinguível. Nas áreas A5, A6 e A7 o efeito do aumento do teor de umidade superficial após o tratamento com o realcalinizante isoladamente ou com os inibidores, como já explicado em item anterior, deve ter afetado os resultados. O hidrofugante HA aplicado em conjunto com outros produtos (nas áreas A3 e A4) ou os

⁵⁷ Elsener *et al.* (2003) relatam um tratamento de extração eletroquímica de íons cloretos da estrutura de uma ponte de concreto armado.

hidrofugantes (HA e HS) aplicados isoladamente (áreas A8 e A9), também parecem influenciar a dispersão das medidas.

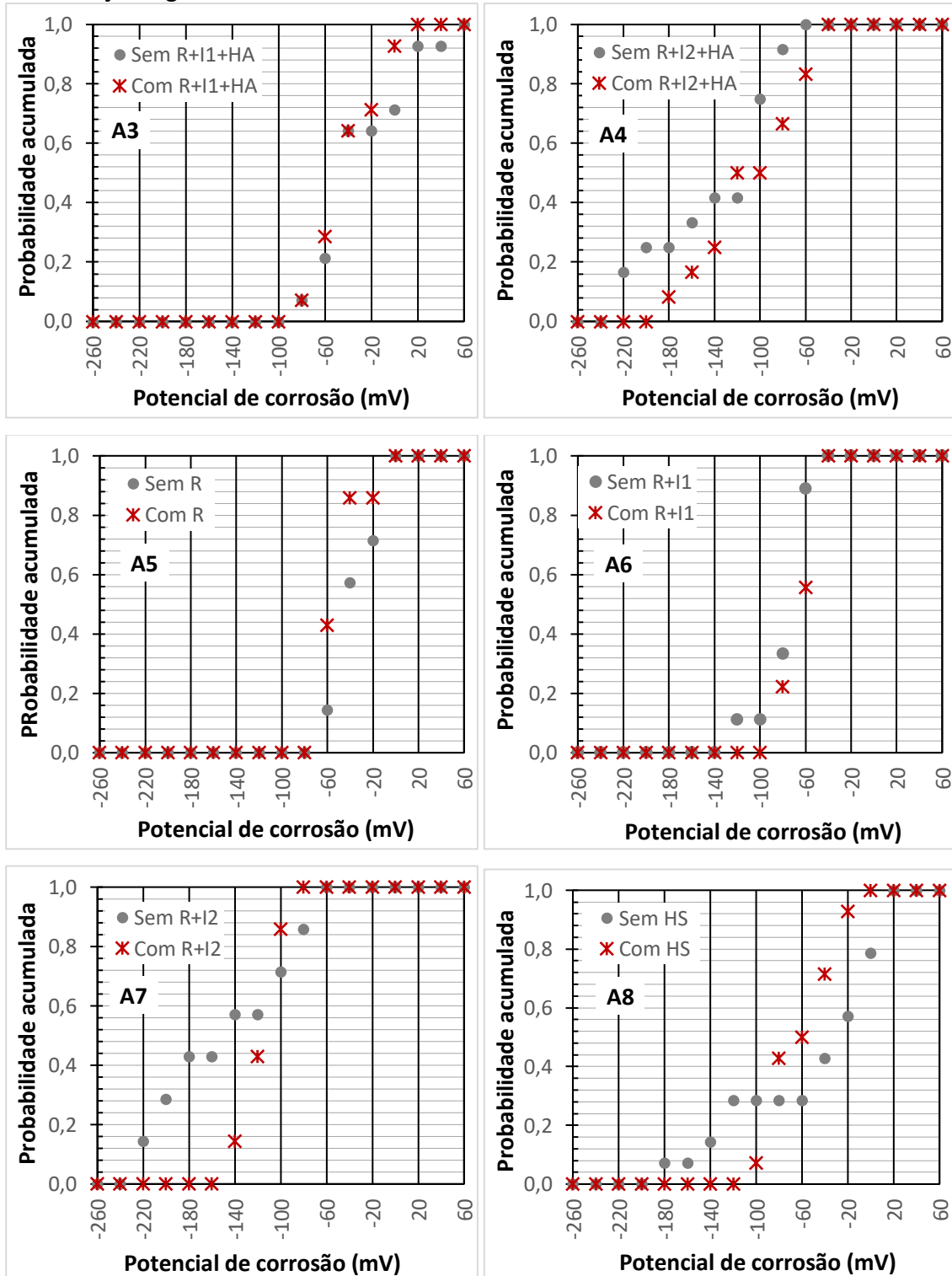
Há ainda que se observar que na área 10, considerada como a área de referência do pilar P3, a curva das probabilidades acumuladas ficou deslocada para valores menos negativos, entre todas as áreas investigadas. O maior cobrimento da armadura nessa área pode ter influenciado as medidas do potencial, influência sugerida nos trabalhos experimentais de Pour-Ghaz; Isgor e Ghods (2009). Os pesquisadores concluíram que para cobrimentos de até 2 cm a distribuição do potencial na superfície do concreto é, praticamente, a mesma da interface aço/concreto. Para cobrimentos maiores, a partir de 2 cm, o potencial medido na superfície se difere significativamente do efetivo potencial na interface aço/concreto. Portanto medidas de potencial para cobrimentos superiores a 2 cm não são adequadas para indicar possíveis alterações promovidas pelos produtos/sistemas. A variação da faixa de interferência (cobrimentos > 2 cm) deve ser verificada *in loco*, especialmente em superfícies já degradadas com o tempo e com diferentes texturas de acabamento.

Figura 77: Curvas da distribuição da probabilidade acumulada das medidas de potencial na superfície do Pilar P3, variando com a aplicação dos produtos/sistemas nas áreas de A1 a A10.



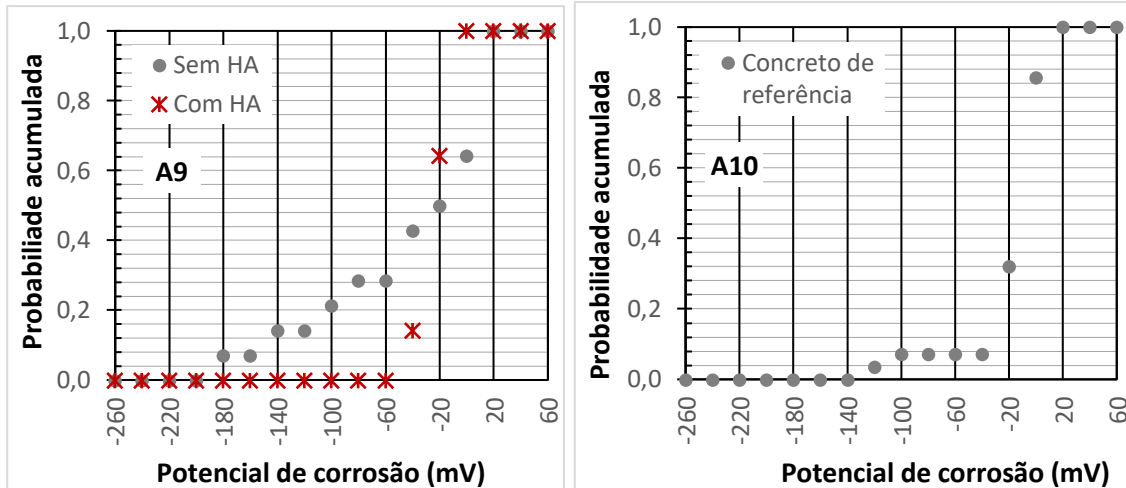
Continua...

Continuação Figura 77



Continua...

Continuação Figura 77



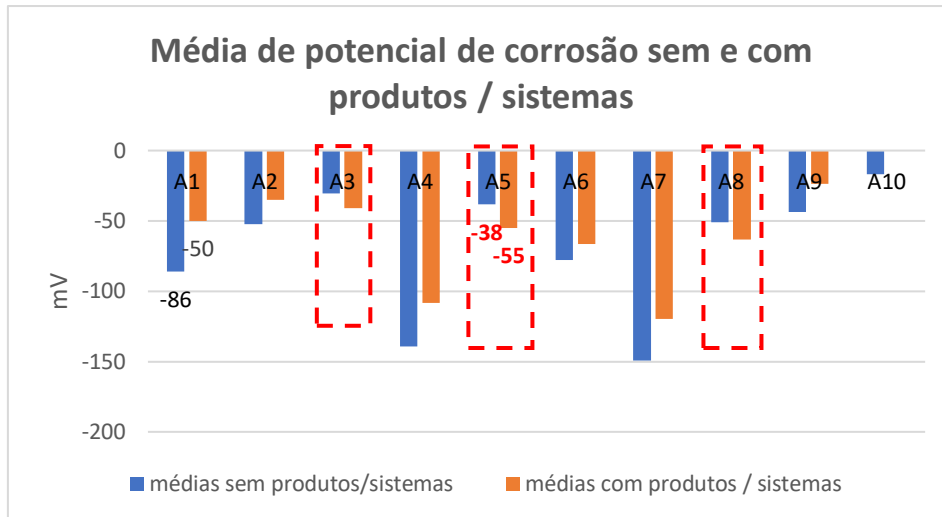
Fonte: Elaborado pela autora.

Como síntese das avaliações de potencial de corrosão, como pode ser observado na figura 78 e na tabela 28 a média dos resultados obtidos antes de depois da aplicação dos produtos/sistemas e o resumo das características das superfícies que receberam os tratamentos podemos observar que as áreas A3 (realcalinizante, inibidor de corrosão 1 e hidrofugante a base de silano), a área A5 (realcalinizante) e A8 (hidrofugante a base de silano/siloxano) apresentaram um ligeiro aumento na eletronegatividade do potencial de corrosão (com resultados mais negativos de 10, 17 e 13 mV respectivamente), no entanto não o suficiente para afirmar que não apresentaram eficiência no tratamento de proteção de superfície, pois as áreas A3 e A5 localizam-se em regiões mais elevadas da área avaliada do pilar, que inicialmente apresentaram resultado menos eletronegativos e, no geral, estes valores apresentaram menor redução de potencial de corrosão após a aplicação deste. Já na área A8, mesmo se na média houver um aumento nos valores eletronegativo, nas regiões próximas a base do pilar tiveram redução, chegando a valores de 95 mV (eixo vertical 6, -144 e -49 mV).

A área A1 apresentou a maior redução do valor de potencial de corrosão na média (redução de 56mV, se tornando menos negativo na média dos valores medidos), chegando a valores de 169 mV (de -234 para -65 mV) em leituras realizadas no eixo vertical 7, no entanto a área apresentou uma grande variação de valores, chegando em alguns pontos de leitura aumentar a eletronegatividade após a aplicação dos produtos (de -18 para -30 mV – eixo 1 vertical).

A avaliação de campo do potencial de corrosão com a aplicação dos produtos/sistemas, nas condições disponíveis e nas áreas selecionadas, não se mostrou conclusiva, mas com indícios de uma possível redução nos valores negativos nas áreas onde foram aplicados os inibidores de corrosão.

Figura 78: Média das leituras de potencial de corrosão antes e depois de aplicação de produtos / sistemas no pilar 3 do edifício Vilanova Artigas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 28: Resumo das medições feitas no pilar P3 em cada área de aplicação de produtos/sistemas: áreas (m²), cobrimento médio (barras horizontais e verticais), umidade média da superfície (%) após molhagem para realização das medidas de potencial; valores mínimos e máximos do potencial de corrosão (mV).

Identificação da Área de aplicação produto / sistemas	Área (m ²)	Média do cobrimento (mm)		Média da umidade superfície úmida (%)		Potencial de corrosão (mV)							
		Posição		Sem produto	Com produto	Sem produtos				Com produtos			
		Horizontal	Vertical			Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
A1 - I1	0,42	28	22	5,40	5,55	-272	-18	-86	60,5	-125	-30	-30	19,8
A2 - I2	0,36	16	9	5,33	5,53	-212	60	-52	66,4	-109	16	-35	34,4
A3 - R + I1 + HA	0,36	21	14	5,25	5,15	-81	41	-31	36,3	-80	13	-41	29
A4 - R + I2 + HA	0,29	20	25	5,10	5,20	-239	-79	-139	55,1	-180	-43	-108	44,3
A5 - R	0,24	18	11	5,25	6,58	-65	0	-38	22,8	-74	-14	-55	17,8
A6 - R + I1	0,23	5	7	5,00	6,49	-126	-50	-78	21,7	-89	-40	-66	15,6
A7 - R + I2	0,24	7	17	5,30	6,43	-232	-78	-149	55,7	-167	-86	-120	23
A8 - HS	0,21	61		5,33	5,24	-183	19	-51	63,6	-109	-14	-63	31,3
A9 - HA	0,24	42		5,45	5,25	-185	20	-44	62,4	-54	-12	-24	11,9
A10 - referência	0,42	31	38	5,37		-120	13	-17	30,3				

Fonte: elaborado pela autora.

6.5. LEITURAS COLORIMÉTRICAS

A avaliação colorimétrica do concreto do pilar 3 foi realizada antes (após limpeza e secagem do concreto) e após a aplicação dos produtos/sistemas de proteção de superfície com o colorímetro tristímulo RM200 Capsure da X-Rite.

Conforme explicado anteriormente o equipamento apresenta resultados em diversos formatos de leitura como RGB (red, green e blue), CMYK (cyan, magenta, yellow e key) CIE XYZ (coordenadas de cromacidade), CIE L*a*b* (L* - luminosidade de 0 – preto a 100 – branco, a* do +a – vermelho – a – verde e b* do +b amarelo ao – b azul). No entanto, os resultados utilizados foram a do sistema CIE L*a*b* e a alteração colorimétrica (ΔE^*) das áreas após a aplicação dos produtos/sistemas foram calculadas através da equação 1 apresentado na norma DIN 6174 (1997), utilizando-se como parâmetro de avaliação dos níveis de percepção humana das diferenças colorimétricas com a classificação constante na tabela 29, os resultados das avaliações no pilar 3 estão nas tabelas 30 e 31. Além disso utilizou-se o sistema RGB como forma simbólica da representação da cor, possibilitando desta forma visualizar principalmente as diferenças de cores entre o concreto e a argamassa de reparo.

Equação 3: variação colorimétrica CIE L*a*b*

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Onde:








ΔE^* = Variação da cor;

ΔL^* = (L* área com produto – L* área sem produto)

Δa^* = (a* área com produto – a* área sem produto)

Δb^* = (b* área com produto – b* área sem produto)

Tabela 29: Níveis de percepção das diferenças colorimétricas

Diferenças (ΔE)	Classificação	Sigla	
< 0,2	Imperceptível	IM	
0,2 a 0,5	Muito pequena	MP	
0,5 a 1,5	Pequena	PE	
1,5 a 3,0	Distinguível	DI	
3,0 a 6,0	Facilmente distinguível	FD	
6,0 a 12,0	Grande	GR	
>12,0	Muito grande	MG	

Fonte: DIN 6174, (1997).

Na análise realizada com os dados da tabela 30, quando realizamos o cálculo do ΔE usando como referência a moda de todas as áreas de concreto sem a aplicação dos produtos chegamos as seguintes conclusões: obtemos variação da cor no próprio concreto de imperceptível (A1, A3, A5, A8 e A9), a grande (A4 e A7) desta forma pode-se verificar que o material não apresenta homogeneidade de cores e que o critério adotado para avaliação de cores para o concreto acaba sendo muito rigoroso como discutido por Castro (2018). Por outro lado, quando a análise é realizada com as áreas dos reparos todas apresentam uma classificação de avaliação visual da diferença de cor grande ou muito grande, ou seja, muita diferença de cor, visível a olho nú em comparação à moda das leituras realizadas nas áreas de concreto.

Tabela 30: Resultados da avaliação colorimétrica da moda de 20 leituras colorimétricas das 10 áreas de estudo do pilar 3 antes da aplicação dos produtos / sistemas (algumas áreas regiões em concreto e em argamassa de reparo).

Áreas	Face pilar	L*	a*	b*	Representação RGB	Tipo de superfície	ΔE^*	Avaliação visual
A1 - I1	Norte	69,4	3,33	10,73		concreto	0,0	IM
A2 - I2	Norte	68,05	0,47	11,29		concreto	3,2	FD
A3 - R + I1 + H	Leste	69,4	3,33	10,73		concreto	0,0	IM
A4 - R + I2 + H	Leste	59,48	4,23	11,37		concreto	10,0	GR
A5 - R	Leste	69,4	3,33	10,73		concreto	0,0	IM
A6 - R + I1	Leste	68,94	3,62	11,8		concreto	1,2	PE
A7 - R + I2	Leste	57,85	0,45	11,53		concreto	11,9	GR
A8 - H	Oeste	69,40	3,33	10,73		concreto	0,0	IM
A9 - H	Oeste	69,40	3,33	10,73		concreto	0,0	IM
A10 - REF	Oeste	70,34	1,08	13,88		concreto	4,0	FD
Moda áreas de concreto		69,40	3,33	10,73		concreto	0,0	IM
A3 - R + I1 + H	Leste	68,79	-1,95	5,88		reparo	7,20	GR
A4 - R + I2 + H	Leste	73,87	2,2	5,37		reparo	7,1	GR
A5 - R	Leste	61,35	0,12	0,92		reparo	13,1	MG
A6 - R + I1	Leste	66,57	1,29	2,47		reparo	9,0	GR
A7 - R + I2	Leste	64,50	0,19	2,21		reparo	10,3	GR

Fonte: Elaborado pela autora.

Na análise feita com as leituras colorimétricas das áreas no substrato concreto comparando os valores antes e após a aplicação dos produtos/sistemas (tabela 31), utilizando os critérios constantes na tabela 29, obteve-se como avaliação que as áreas A1, A2, A4, A6 e A7 apresentam variação colorimétrica facilmente distinguível, a área A3, A8 e A9 apresentaram classificação distinguível e a área A5 apresentou-se

imperceptível, assim como a área A10 (referência) que não teve aplicação de produtos /sistemas.

Nas áreas de reparo apenas a área A4 apresentou classificação distinguível as demais foram classificadas como facilmente distinguível após a aplicação dos produtos / sistemas. Desta forma observou-se que a avaliação das áreas com a aplicação dos produtos/sistemas apresentou resultados mais favoráveis com relação a variação da percepção visual do que a avaliação do próprio concreto sem a aplicação de qualquer produto/sistema devido pouca homogeneidade do concreto.

No entanto, vale reforçar que se trata de um critério de classificação muito rígido quando aplicado para o concreto aparente que não apresenta homogeneidade de cores.

Tabela 31: Resultado da avaliação colorimétrica realizada com a moda de 20 leituras colorimétricas das 10 áreas estudadas do pilar 3 (sendo algumas áreas regiões em concreto e em argamassa de reparo), comparando-se as leituras colorimétricas antes e depois da aplicação dos produtos / sistemas.

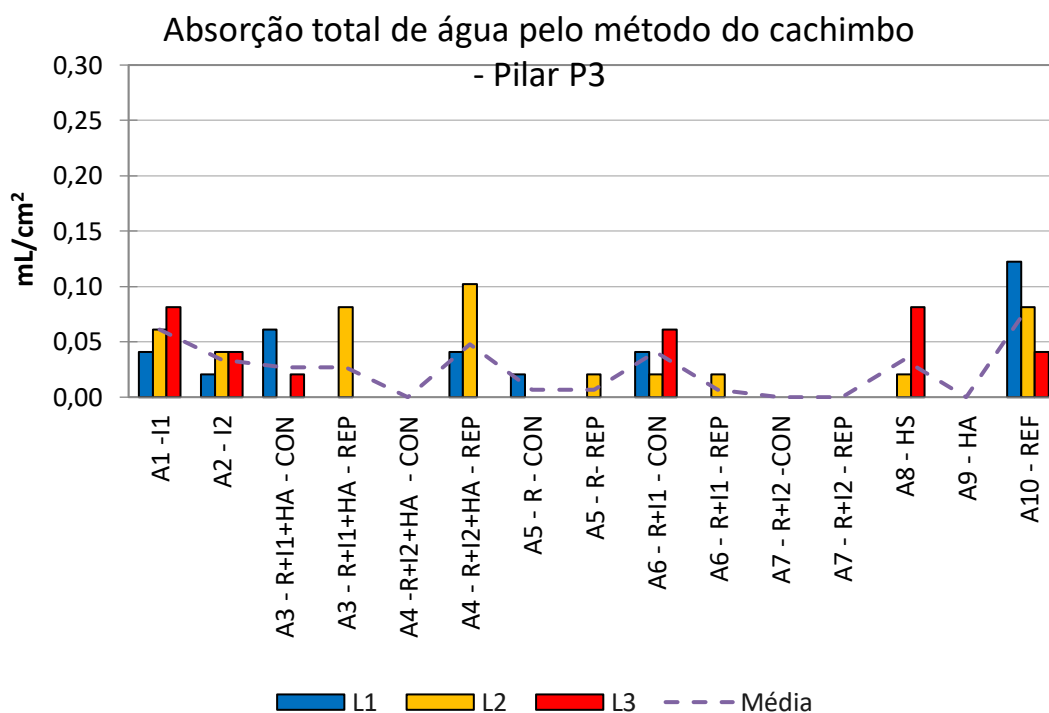
Área	Face	L*	a*	b*	Código RGB	Representação RGB	L*	a*	b*	Código RGB	ΔE^*	Avaliação visual	Superfície
sem produtos / sistemas						com produtos / sistemas							
A1 - I1	Norte	69,40	3,33	10,73	178 / 167 / 150		64,92	2,52	11,90	165 / 156 / 136	4,70	FD	CONCRETO
A2 - I2	Norte	68,05	0,47	11,29	171 / 165 / 145		69,40	3,33	10,73	178 / 167 / 150	3,21	FD	CONCRETO
A3 - R + I1 + H	Leste	69,40	3,33	10,73	178 / 167 / 150		67,28	1,81	9,46	170 / 162 / 146	2,90	DI	CONCRETO
A4 - R + I2 + H	Leste	59,48	4,23	11,37	153 / 140 / 123		64,92	2,52	11,90	165 / 156 / 136	5,73	FD	CONCRETO
A5 - R	Leste	69,40	3,33	10,73	178 / 167 / 150		69,40	3,33	10,73	178 / 167 / 150	0,00	IM	CONCRETO
A6 - R + I1	Leste	68,94	3,62	11,80	177 / 165 / 147		64,92	2,52	11,90	165 / 156 / 136	4,17	FD	CONCRETO
A7 - R + I2	Leste	57,85	0,45	11,53	148 / 138 / 119		61,53	1,25	13,81	156 / 147 / 125	4,40	FD	CONCRETO
A8 - H	Oeste	69,40	3,33	10,73	178 / 167 / 150		67,28	1,81	9,46	170 / 162 / 146	2,90	DI	CONCRETO
A9 - H	Oeste	69,40	3,33	10,73	178 / 167 / 150		71,40	2,94	9,88	183 / 172 / 157	2,21	DI	CONCRETO
A10 - REF	Oeste	70,34	1,08	13,88	179 / 170 / 148		70,34	1,08	13,88	179 / 170 / 148	0,00	IM	CONCRETO
MODA das áreas Pantone - Humus 15 - 1304 TPG		69,40	3,33	10,73	178 / 167 / 150		64,92	2,52	11,9	165 / 156 / 136	4,70	FD	CONCRETO
A3 - R + I1 + H	Leste	68,79	-1,95	5,88	167 / 168 / 157		72,19	0,80	4,07	179 / 175 / 169	4,73	FD	REPARO
A4 - R + I2 + H	Leste	73,17	2,20	5,37	184 / 177 / 169		72,19	0,80	4,07	179 / 175 / 169	2,15	DI	REPARO
A5 - R	Leste	61,35	0,12	0,90	148 / 146 / 145		66,00	0,20	2,51	161 / 158 / 155	4,92	FD	REPARO
A6 - R + I1	Leste	66,57	1,29	2,47	164 / 159 / 156		72,19	0,80	4,07	179 / 175 / 169	5,86	FD	REPARO
A7 - R + I2	Leste	64,50	0,19	2,21	157 / 154 / 154		65,92	2,84	6,76	167 / 156 / 148	5,45	FD	REPARO

Fonte: Elaborado pela autora.

6.6. ABSORÇÃO DE ÁGUA PELO CACHIMBO

O ensaio do cachimbo / tubo de karsten foi realizado de acordo com a norma EN 16302 (2013) nas 10 divisões de áreas do pilar 3, sendo que as áreas 3, 4, 5, 6, e 7 o ensaio foi realizado no concreto e também na argamassa de reparo. Os resultados apresentados na figura 79 referem-se ao volume total de água absorvida por unidade de área de contato do tubo com a superfície (mL/cm^2), como recomendado pela norma de referência.

Figura 79: Gráfico da absorção de total água (mL/cm^2 , 1 hora de ensaio) das áreas do pilar P3 pelo método EN16203:2013, usando o método do cachimbo / tubo de Karsten.



Fonte: Elaborado pela autora.

Apenas nas áreas A1 (I1), A2 (I2), A6 (R+I1 CON) e A10 (REF) foi possível obter resultados para as três (L1, L2, L3) ou, ao menos para duas leituras. Para as áreas A4 (R+I2+HA CON), A7 (R+I2 CON), A7 (R+I2 REP), e A9 (HA) todas as leituras foram nulas. Para as demais áreas uma ou duas leituras resultaram igual a zero.

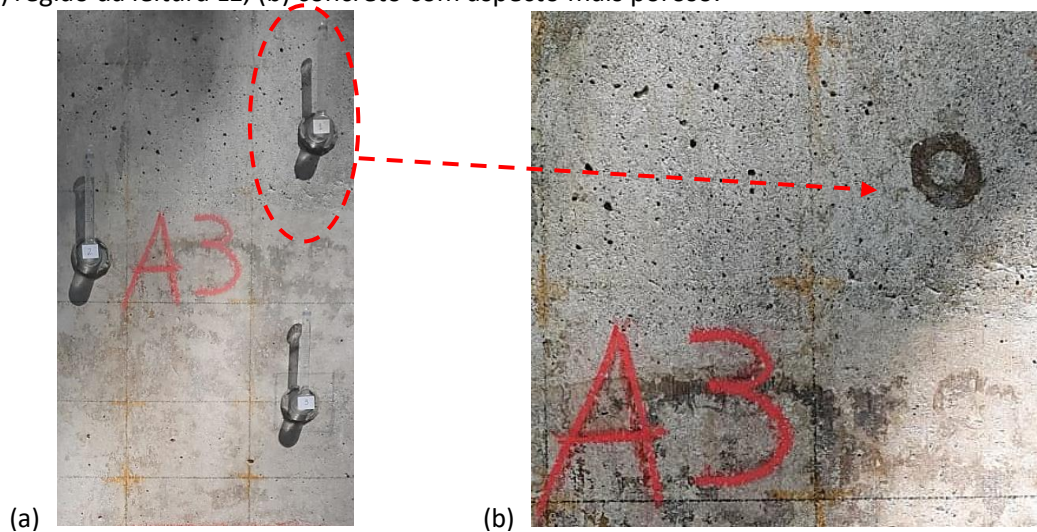
A fixação dos cachimbos para o ensaio foi precedida de uma cuidadosa observação da superfície procurando fixá-los, na medida do possível, em regiões menos heterogêneas. A área A3 apresentava características importantes; no ponto da leitura

1 (L1) do concreto (R+I1+HA CON) a superfície estava visivelmente mais porosa e no ponto da leitura 2 (L2) da argamassa de reparo (R+I1+HA REP) a superfície estava fissurada (figuras 80 e 81). Essas características da superfície levam a resultados que não representam a absorção de água por capilaridade da superfície.

No entanto, o resultado obtido para a área A 10, concreto de referência, é coerente com a expectativa; sem receber aplicação de qualquer produto ou sistema, e visivelmente mais homogênea do que as demais, foi a área que apresentou a maior média de volume de água absorvida (mL/cm²).

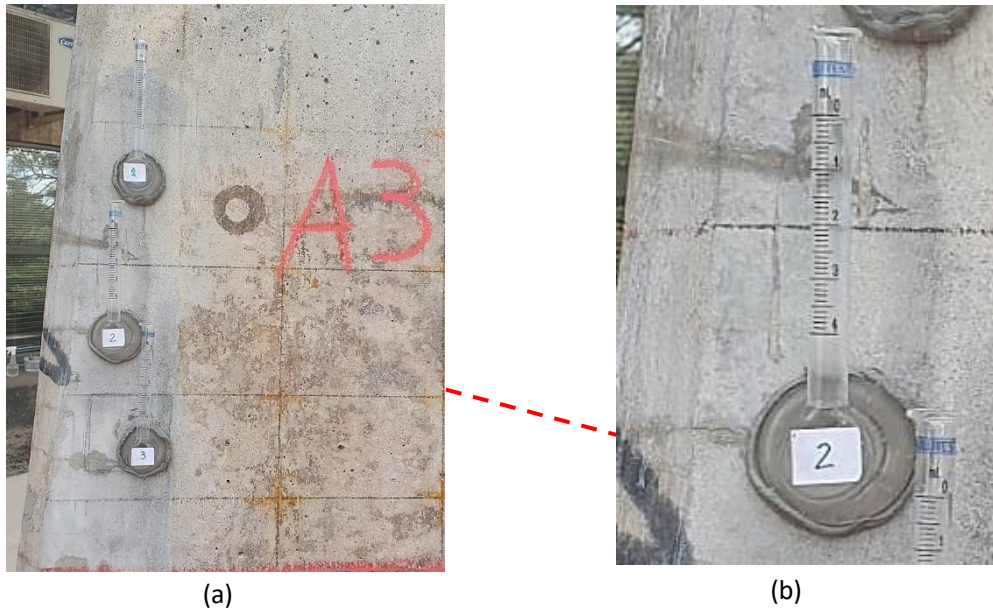
O ensaio com os cachimbos, embora seja um método não invasivo, tem baixa reprodutibilidade e elevada variabilidade. Os resultados sofrem influência das condições do substrato, notadamente quanto à presença de cavidades e irregularidades superficiais que podem ser responsáveis por esta grande variabilidade dos resultados.

Figura 80: Área A3 da leitura de absorção de água pelo método do cachimbo (tubo de karsten) em (a) região da leitura L1, (b) concreto com aspecto mais poroso.



Fotos: Tatiana Simão, 2022.

Figura 81: Leitura da absorção de águas da área A3 (a) em argamassa de reparo com fissura e (b) o detalhe da área ainda com o cachimbo.



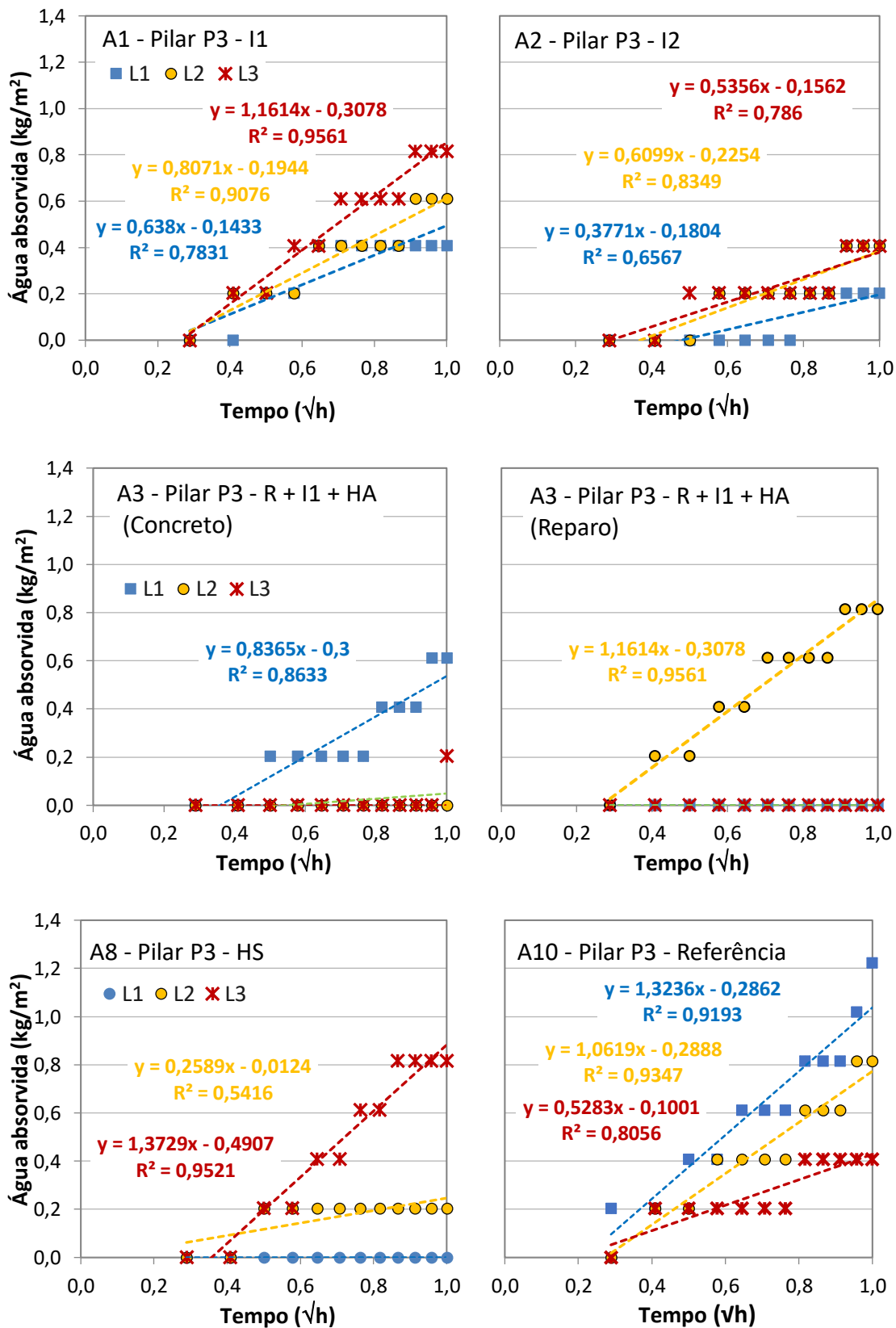
Fotos: Tatiana Simão, 2022.

Quando há resultados mais homogêneos o teste do cachimbo permite a obtenção do coeficiente de absorção superficial de água, um dos parâmetros determinantes na durabilidade na estrutura de concreto armado aparente. Por meio de gráfico da massa de água absorvida por unidade de área (kg/m^2) em função do tempo (\sqrt{h}), obtém-se retas cujas inclinações correspondem aos respectivos coeficientes de absorção de água (DUARTE *et al.*, 2020).

Os gráficos da Figura de 82 mostram as áreas cujas medidas viabilizaram obtenção de coeficientes de absorção superficial de água, no entanto, as três leituras feitas em cada área fornecem resultados muito dispersos. Mesmo para a área A10 (concreto de referência), que apresentou bons coeficientes de determinação (R^2), os valores obtidos para o coeficiente de absorção variam de 1,3236 a 0,5283 $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \sqrt{h}$.

Coeficientes de determinação menos robustos são resultantes de medidas em patamares, o que parece estar associado à penetração da água em cavidades ou fissuras da superfície do concreto e não à absorção de água por capilaridade característica da superfície investigada.

Figura 82: Resultados do ensaio com o cachimbo no pilar P3: A1 com inibidor 1 (I1); A2 com inibidor de corrosão 2 (I2); A3 com realcalinizante, inibidor de corrosão 1 (I1) e hidrofugante à base de amina (HA) aplicados sobre concreto e sobre reparo; A8 com hidrofugante à base de silano e siloxano; A10 concreto de referência.

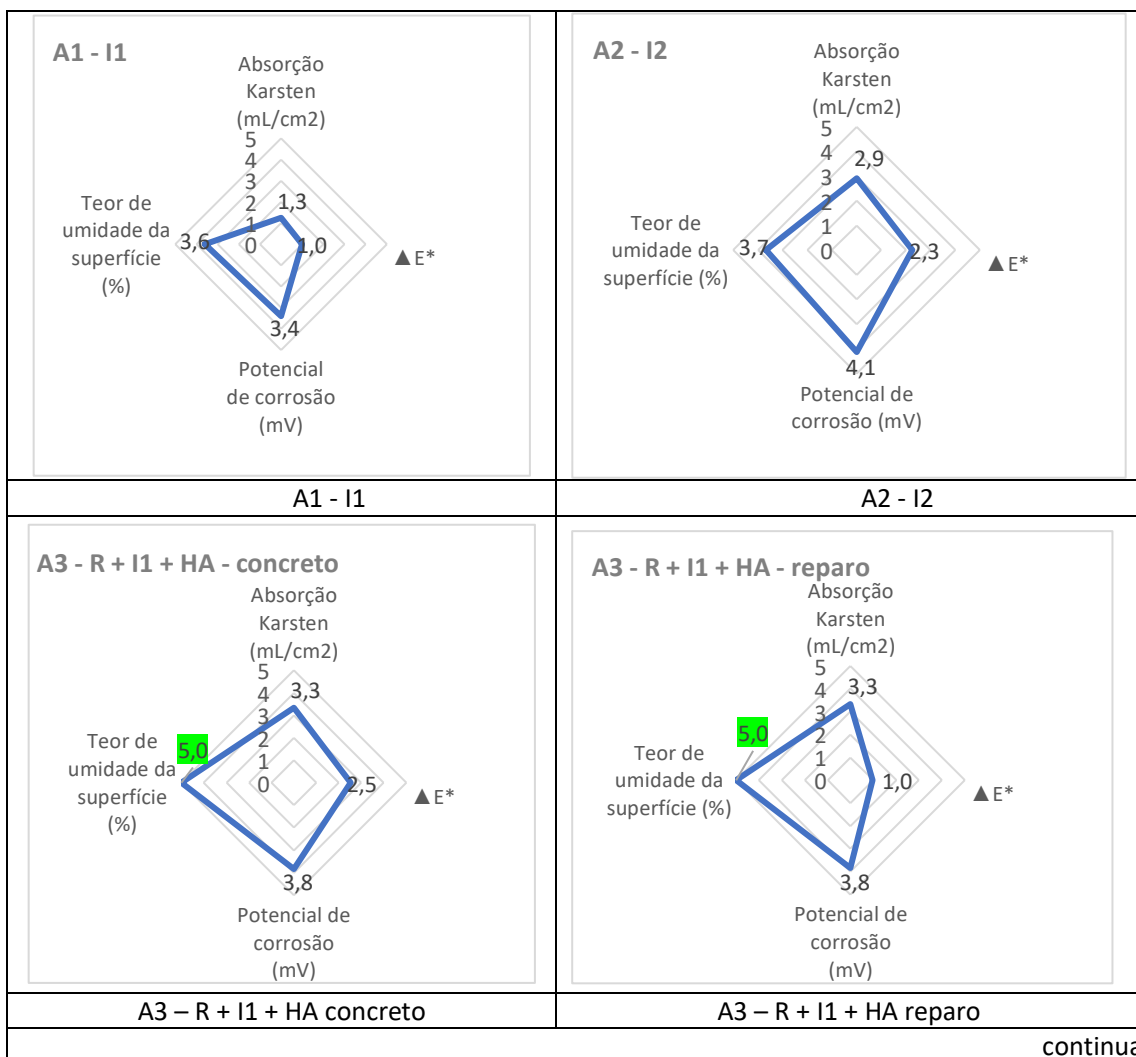


Fonte: Elaborado pela autora.

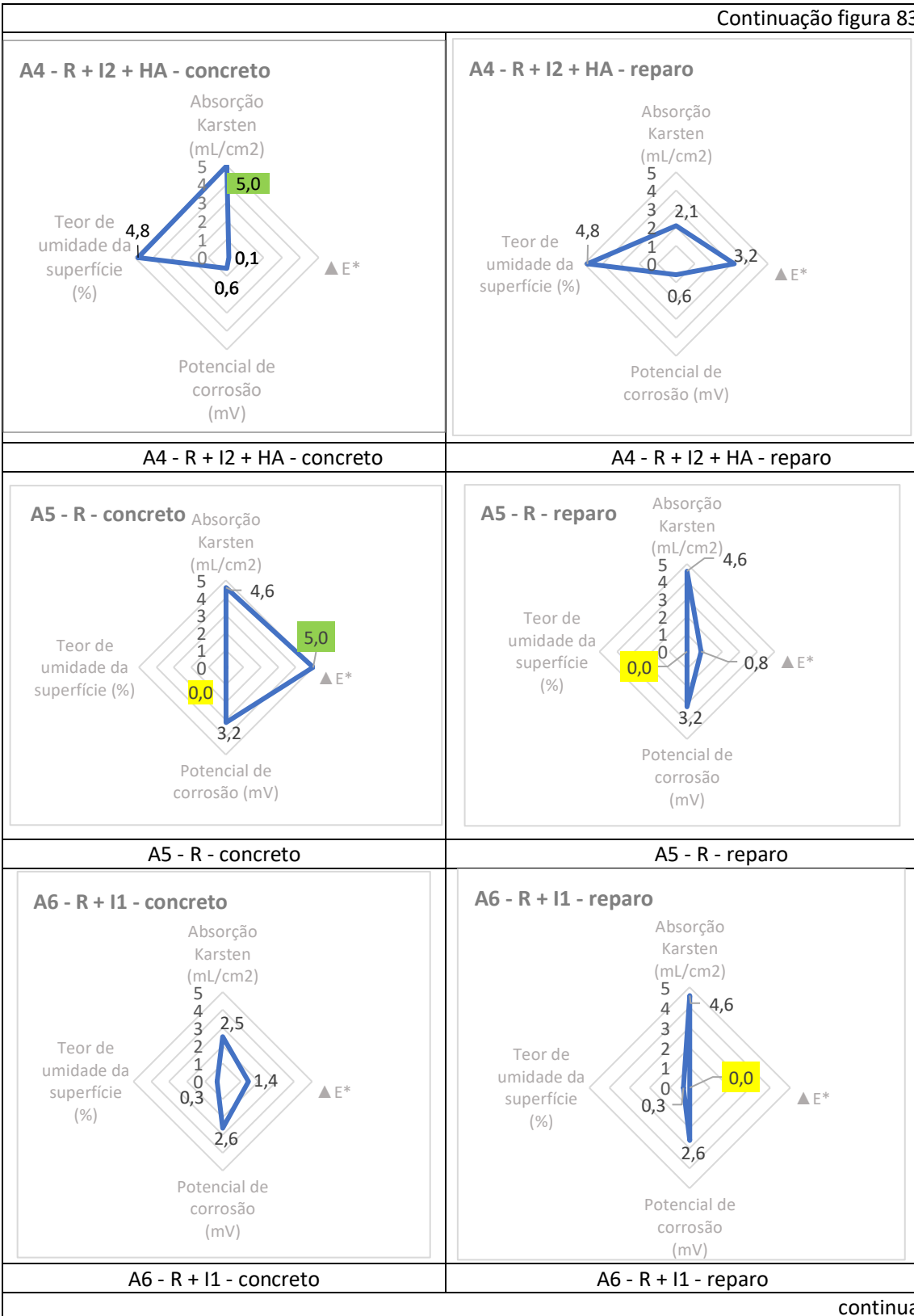
6.7. SÍNTESE DOS ENSAIOS DE CAMPO

Com o propósito de avaliar o comportamento geral de cada área com produto/sistema aplicado a partir dos resultados obtidos com as leituras realizadas no pilar 3 do edifício Vilanova Artigas considerou-se apropriado traduzir todos os resultados em uma escala paramétrica e apresentar estes resultados conjuntamente num gráfico de radar. Os resultados em forma paramétrica foram calculados elaborando-se uma escala com os resultados de cada característica avaliada [variação colorimétrica, umidade superficial, potencial de corrosão e absorção de água pelo método do cachimbo ou tubo de Karsten – EN 16302, (2013)] por produto/sistema atribuindo-se nota 0 aos piores resultados e nota 5 aos melhores resultados em cada critério. Os gráficos obtidos através desta parametrização são apresentados na figura 83.

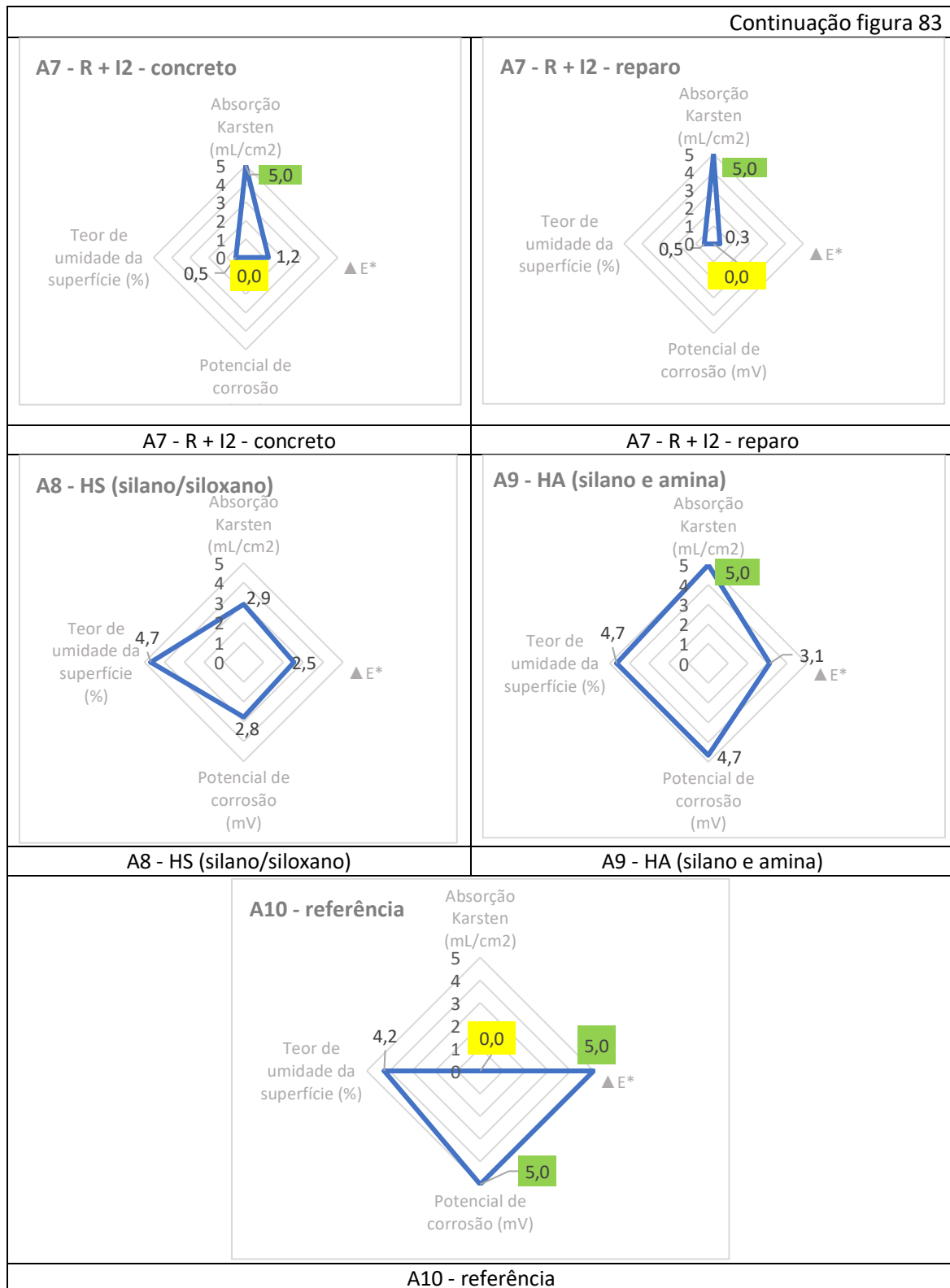
Figura 83: Gráficos das análises paramétricas por áreas dos ensaios realizados no pilar 3 do edifício Vilanova Artigas.



Continuação figura 83



continua



Fonte: Elaborado pela autora.

Fazendo uma análise por item medido no pilar temos os melhores e piores resultados de desempenho apresentado no Quadro 13.

Quadro 13: Dados da análise dos resultados dos ensaios realizados em campo.

Característica medida	Área (s) com melhor desempenho	Área (s) com pior desempenho
Umidade superficial	A3	A5
Potencial de corrosão	A10	A7
ΔE	A5 / A10	A6
Absorção de água pelo cachimbo	A4 / A7 E A9	A10

Fonte: Elaborado pela autora.

Ou seja, entre os produtos aplicados de forma isolada apenas o realcalinizante (A5) apareceu em algum item medido com o pior desempenho, por outro lado, quando os produtos foram aplicados de forma associada as áreas A3, A4 e A7 apresentaram pelo menos 1 critério de avaliação com melhor resultado, sendo que apenas a área A6 apresentou resultados mais baixos. O realcalinizante (R - A5) e o hidrofugante a base de silano e amina (HA – A9), aplicados de forma isolada apresentaram boa avaliação com relação a variação da cor (ΔE) e absorção de água, respectivamente.

Observando de forma conjunta os resultados obtidos, a princípio a área A10 - referência, figura 88, apresentou 2 resultados melhores (potencial de corrosão e ΔE^*) e um pior que é a absorção de água, no entanto como trata-se de uma área onde não foi aplicado produtos/sistemas a avaliação do desempenho destes fica sem sentido.

Desta forma, excluindo-se a área A10 observou-se entre as demais áreas a que apresentou maior número de resultados próximo do valor 5 (melhor desempenho) e maior número de resultados próximos do valor 0 (pior desempenho) em cada critério. Desta forma pode-se dizer que as áreas que apresentaram melhores e piores resultados são: A9 (HA) – melhor resultado, A7 (R+I2 – concreto) e A7 (R+I2 – reparo) – piores resultados. Ou seja, em campo os melhores resultados foram obtidos com a aplicação apenas do hidrofugante a base de silano com amina – HA e os piores resultados foram na aplicação conjunta do realcalinizante com o Inibidor 2. No entanto deve-se levar em consideração as variações apontadas nas leituras apresentada na avaliação do potencial de corrosão em função da localização das áreas A3, A5 e A6, por não estarem próximas a base do pilar e apresentarem resultados diferenciados.

Entre as principais dificuldades da realização dos ensaios em campo podem ser apontadas: a heterogeneidade da superfície do concreto, a variação de cobrimento das armaduras, a influência de posicionamento das áreas de aplicação dos projetos/sistemas que sofreram influência da umidade ascendente do solo.

7. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Os resultados dos ensaios realizados em laboratório são divididos em 3 grupos: 1) avaliação da ação dos produtos/sistemas, 2) avaliação da profundidade de penetração dos produtos/sistemas, e 3) avaliação das alterações das propriedades e microestrutura do concreto com a aplicação dos produtos/sistemas.

7.1. AÇÃO DOS PRODUTOS/SISTEMAS

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios realizados para avaliar a eficiência dos produtos/sistemas aplicados em corpos de CPs de concreto carbonatado. Foram realizados ensaios de medidas de potencial de corrosão e absorção de água pelo método do cachimbo / tubo de Karsten (EN 16203:2013).

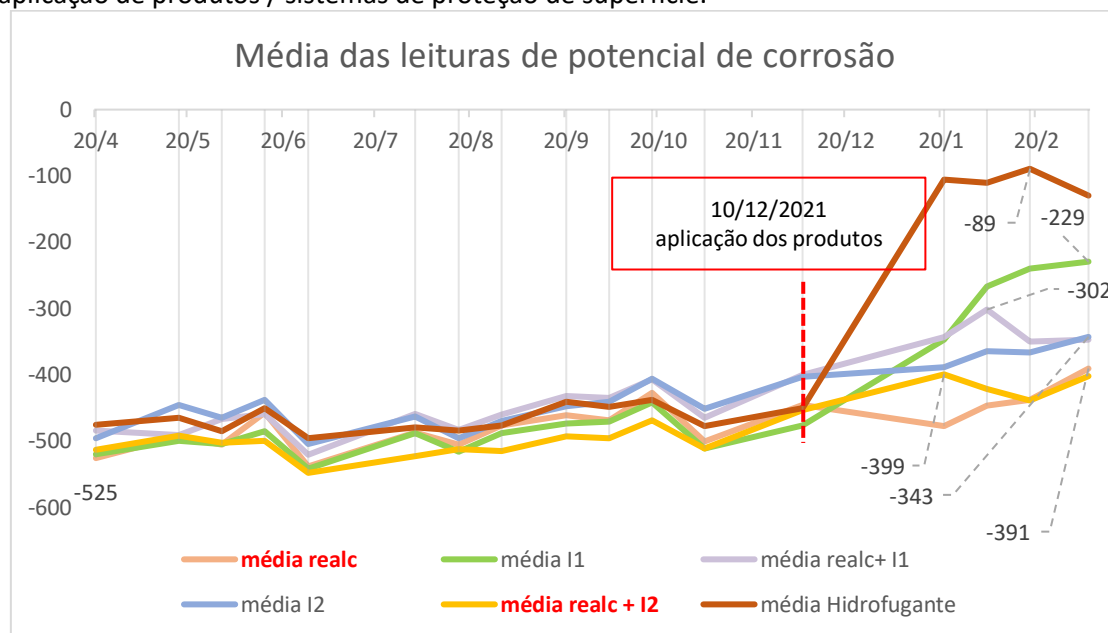
7.1.1. Potencial de Corrosão

As medidas de potencial de corrosão foram realizadas durante 3 meses em CPs carbonatados e previamente submetidos a ciclos de molhagem/secagem para acelerar o processo de corrosão. Os resultados são apresentados na figura 84 e na tabela 32.

Na análise dos dados das leituras realizadas nestes corpos de prova e comparando-se a última leitura do potencial de corrosão realizado antes da aplicação dos produtos/sistemas no dia 06/12/2021, pode-se observar que todos os valores médios foram deslocados para potenciais menos negativos, sendo os mais significativos o potencial correspondente ao efeito do hidrofugante à base de silano e amina (HA) que chegou a reduzir 361 mV (de -450 para -89 mV) e o potencial correspondente ao inibidor de corrosão 1 (I1) que apresentou redução de 248 mV (de -477 para -229 mV).

Os corpos de prova com realcalinizante (R) e realcalinizante com inibidor de corrosão 2 (R + I2) tiveram as reduções menos expressivas, ou seja, de 55 (de -446 para -391 mV) e 54 mV (de -453 para -399 mV), respectivamente.

Figura 84: Gráficos de média de potencial de corrosão dos corpos de prova sem e com aplicação de produtos / sistemas de proteção de superfície.



Fotos: Elaborado pela autora.

A alteração dos potenciais leva à reclassificação da probabilidade de corrosão como disposto na Tabela 32 e de acordo com Araujo et al. (2017).

Tabela 32: Valores médios das leituras de potencial de corrosão (E_{corr}) antes e após aplicação dos produtos/sistemas e reclassificação da probabilidade de corrosão.

CP	Antes da aplicação dos produtos/sistemas		Após a aplicação dos produtos/sistemas	
	Última leitura E_{corr} (mV)	Probabilidade de corrosão	Leitura ⁽¹⁾ E_{corr} (mV)	Probabilidade de corrosão
Realcalinizante (R)	-446	> 90% ⁽²⁾	-391	> 90%
Inibidor 1 (I1)	-477		-229	Incerta ⁽³⁾
R + I1	-400		-302	
Inibidor 2 (I2)	-403		-343	> 90%
R + I2	-453		-399	
Hidrofugante (HA)	-450		-89	< 10% ⁽⁴⁾

Notas

(1) Médias das leituras menos negativas feitas em período de, aproximadamente, 40 e 80 dias após a aplicação dos produtos/sistemas, período em que os CPs que foram mantidos nos ciclos de molhagem e secagem.

(2) E_{corr} mais negativo do que -242mV.

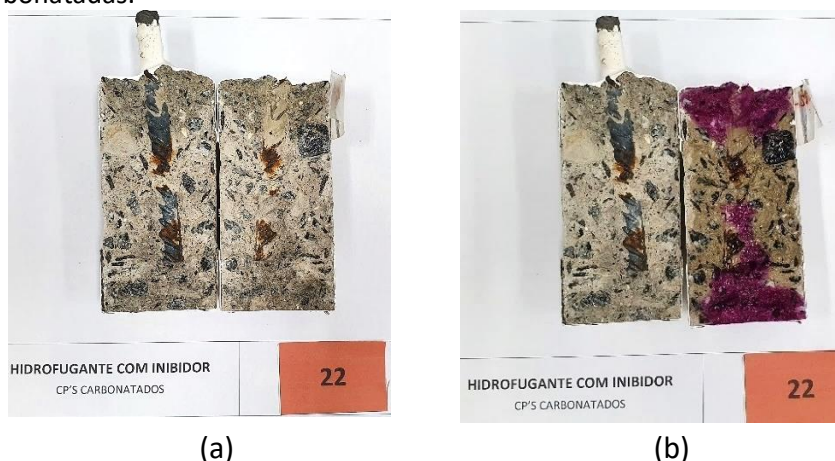
(3) E_{corr} entre -92 e -242mV

(4) E_{corr} mais positivo do que -92mV

Fonte: Elaborado pela autora.

Após a conclusão das medidas de potencial de corrosão os CPs foram rompidos a compressão diametral e feita a inspeção visual do aço e da interface aço/concreto. Posteriormente a armadura foi retirada do concreto e realizada uma avaliação detalhada da condição da barra como pode ser observado nas figuras 85 e figura 86.

Figura 85: Imagens de (a) corpo de prova com concreto rompido a compressão diametral para observação da barra e do concreto e (b) aspersão de solução de fenolftaleína para confirmação de áreas carbonatadas.



Fotos: Tatiana Simão, 2022.

Pode-se observar ainda na figura 85 (b) que a região onde foi realizada a pintura epóxi do CP a carbonatação foi menor. Na figura 86 é apresentado um exemplo da barra extraída do concreto para a análise das condições. Um resumo das condições finais das barras é apresentado no quadro 14. O levantamento completo dos ensaios de potencial de corrosão é parte integrante deste trabalho e apresentado no apêndice 2.

Figura 86: Inspeção visual da barra de aço dos dois lados após extração do concreto com aplicação de hidrofugante a base de silano com inibidor de corrosão (HA).



Fotos: Tatiana Simão, 2022.

É importante ressaltar que a carbonatação não ocorre de forma uniforme, portanto nem todos os CPs encontravam-se nas mesmas condições de carbonatação, isto pode ter resultados na condição de corrosão diferenciado das barras analisadas, apresentado no quadro 14. Outro fato importante de se observar é que mesmo com áreas menores de produto de corrosão estes podem se apresentar com acúmulo de produtos mais intensos do que em outras barras que apresentam áreas maiores de corrosão.

Quadro 14: Síntese das avaliações visuais das barras de aço após retirada do concreto.

Barra	Produto/sistema	Avaliação visual (% de área corroída e acúmulo de produto de corrosão)	Barra	Produto/sistema	Avaliação visual (% de área corroída e acúmulo de produto de corrosão)
1	R	35% - Significativo	17	R + I1	15% - Moderado
2	R	15% - Moderado	18	R + I2	15% - Moderado
3	R	20% - Moderado	19	R + I2	30% - Moderado
4	R	20% - Moderado	20	R + I2	15% - Pouco acúmulo
5	I1	10% - Moderado	21	R + I2	20% - Significativo
6	I1	30% - Moderado	22	H	25% - Moderado
7	I1	15% - Significativo	23	H	25% - Moderado
8	I1	10% - Moderado	24	H	35% - Significativo
10	I2	10% - Pouco acúmulo	25	H	35% - Significativo
11	I2	5% - Pouco acúmulo	Ref 26		10% - Pouco acúmulo
12	I2	15% - Pouco acúmulo	Ref C1		15% - Pouco acúmulo
13	I2	10% - Pouco acúmulo	Ref C3		5% - Pouco acúmulo
14	R + I1	15% - Pouco acúmulo	Ref C4		15% - Pouco acúmulo
15	R + I1	15% - Significativo	Ref C5		30% - Moderado
16	R + I1	15% - Significativo	Ref C7		10% - Pouco acúmulo

Fonte: Elaborado pela autora.

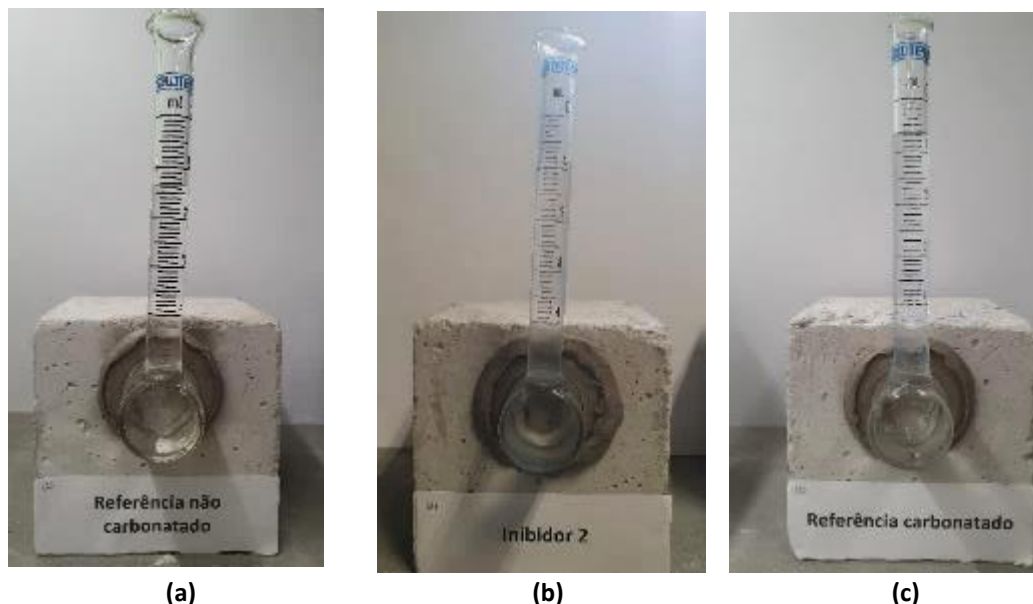
Foram selecionadas duas barras para o estudo exploratório na microscopia eletrônica de varredura (MEV). A barra 7, inserida em CP tratado com o inibidor de corrosão 1 (I1), que apresentou corrosão significativa dos produtos de corrosão em cerca de 15% da área da barra. A segunda barra selecionada, REF C5, estava inserida em CP de referência, sem tratamento, com 30 % de área corroída, mas com intensidade moderada de acúmulo de produtos de corrosão.

7.1.2. Absorção de água pelo método do cachimbo

Ensaio executado conforme a norma EN 16302 (2013) com 3 repetições para cada tratamento em CPs 10x10x10cm, além das leituras em CPs de referência

carbonatado e não carbonatado. Complementarmente foi realizada a avaliação do hidrofugante à base de silano/siloxano (HS), visando à análise comparativa com ensaios de campo no pilar P3. Foram realizados 42 ensaios, em 14 condições de avaliação. Exemplos do arranjo do ensaio são apresentados na Figura 87.

Figura 87: Arranjo experimental do ensaio de absorção de água pelo ensaio com o cachimbo.



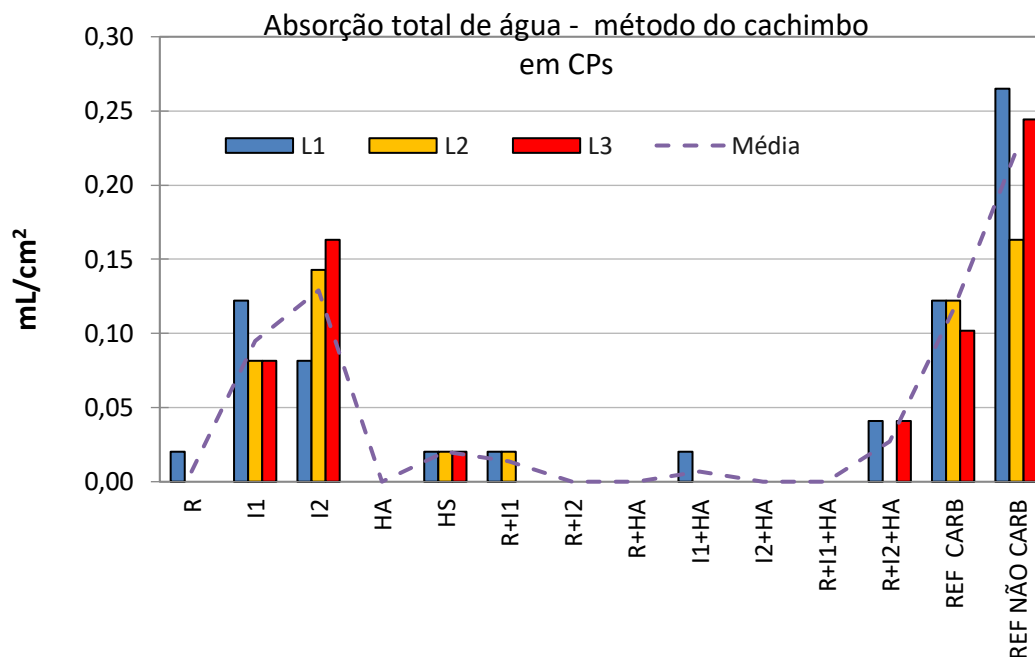
Fotos: Tatiana Simão, 2021.

A figura 88 ilustra as leituras individuais da absorção total de água (mL/cm^2), indicando, em ordem decrescente do valor médio, os seguintes tratamentos: (a) referência não carbonatado; (b) inibidor 2; (c) referência carbonatado.

Como esperado, o hidrofugante à base de silano e amina (HA) resultou absorção nula, bem como algumas associações do HA com realcalinizante e inibidores (I1 e I2). Já a aplicação do hidrofugante à base de silano/siloxano resultou em absorção mensurável por meio da técnica, embora em pequeno volume se comparado com a absorção das superfícies tratadas apenas com inibidores de corrosão. Os demais tratamentos resultaram valores nulos, em uma ou mais leituras, com maior dispersão dos resultados.

À semelhança dos ensaios com o cachimbo realizados em campo, os gráficos da Figura 89 mostram os tratamentos cujas medidas viabilizaram a estimativa dos coeficientes de absorção superficial de água.

Figura 88: Leituras individuais e média da absorção total de água pelo método do cachimbo dos corpos de prova sem e com produtos/sistemas.



Fonte: Elaborado pela autora.

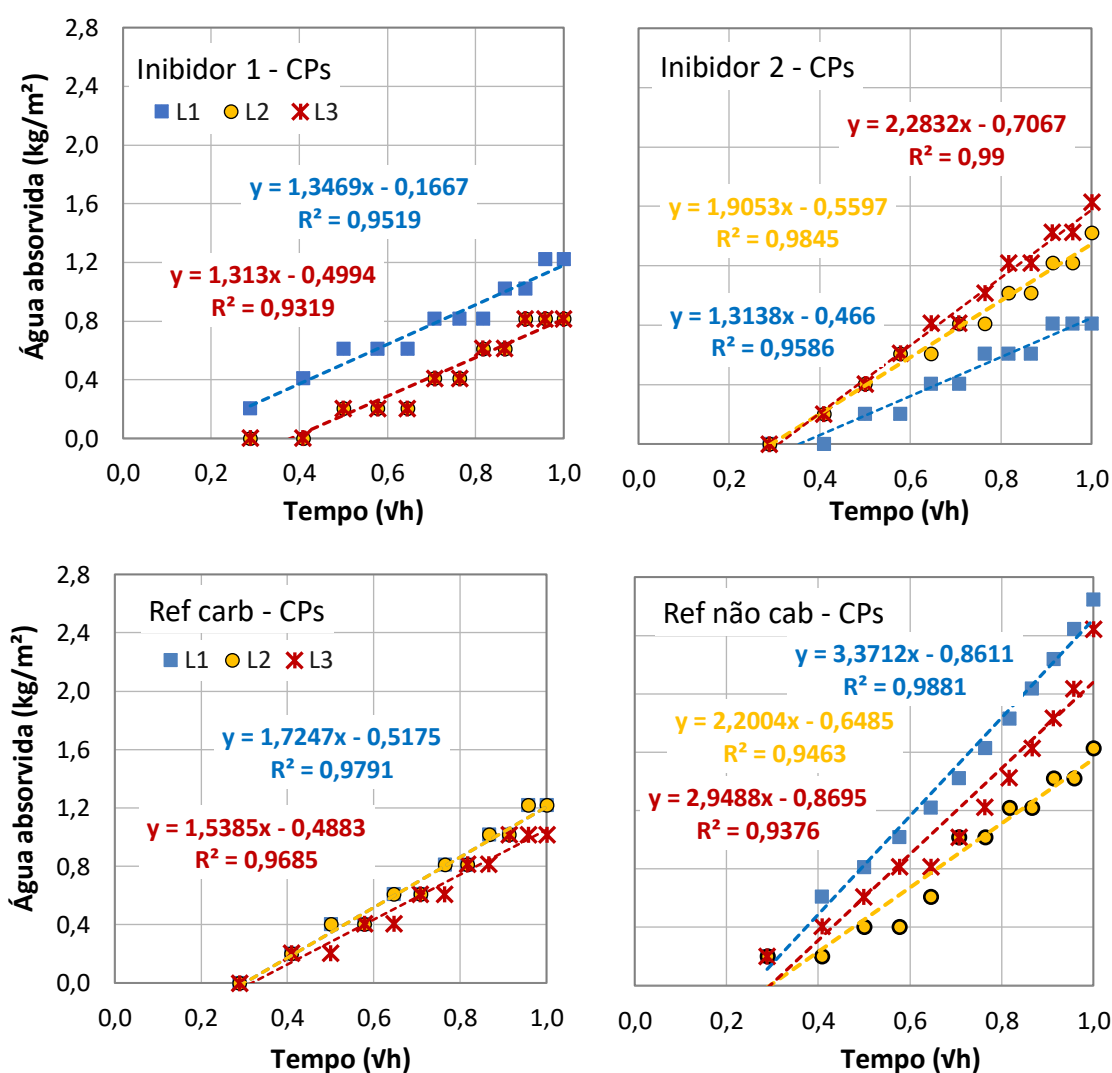
Apesar da variabilidade dos resultados, há coerência entre os ensaios em campo e em laboratório que possibilitam medida da absorção nas superfícies ou CPs tratados com os inibidores e com os concretos de referência (carbonatado e não carbonatado). De forma geral em campo os volumes absorvidos foram menores do que em laboratório o que pode ser influência das características da superfície do concreto após 50 anos de serviço, características não produzidas em laboratório. A dispersão dos resultados individuais, para cada tratamento, parece ser maior nos ensaios em campo, provavelmente pela maior heterogeneidade das superfícies, bem como da presença de anomalias de superfície (cavidades e fissuras). Pelos resultados apresentados, o método mostrou-se viável para ser aplicável em campo, nas condições das superfícies analisadas (pilar P3), e em laboratório para o controle da aplicação de hidrofugantes à base de silanos, bem como dos outros produtos/sistemas.

Vale ressaltar que nos ensaios realizados, tanto em laboratório como em campo, os inibidores testados (I1 e I2) parecem não afetar significativamente a absorção de água da superfície do concreto⁵⁸. Aparentemente não há precipitação de produtos

⁵⁸ Referência de comparação com o concreto carbonatado pelo fato dos produtos/sistemas terem sido aplicados na superfície do concreto carbonatado em campo e nos corpos de prova carbonatados.

insolúveis em água no concreto impregnado com os inibidores I1 e I2 e que interferem na absorção de água da superfície, diferindo de resultados de outros pesquisadores que apontam a redução dos coeficientes de absorção de água em corpos de prova tratados com inibidores contendo à base de amina com sais de fósforo (TRITTHART 2003).

Figura 89: Resultados do ensaio com o cachimbo em CPs tratados com inibidores de corrosão (I1 e I2) e CPs de referência de concreto carbonatado (Ref carb) e não carbonatado (Ref não carb), com indicação dos coeficientes de absorção (coeficientes angulares das retas).



Fonte: Elaborado pela autora.

Diversos pesquisadores têm revisitado o método do cachimbo com o objetivo de conhecer melhor as características do método e as principais variáveis que afetam os resultados. Para argamassas o método tem sido aplicado de forma mais criteriosa (APPS, 2013; DUARTE *et al*, 2020; SILVEIRA *et al*, 2021) viabilizando resultados mais confiáveis;

para a investigação de pedras Hendrickx (2013) propõe um modelo analítico que viabiliza a inferência do coeficiente de absorção de água com menor incerteza. Apesar das vantagens do método do cachimbo, especialmente por viabilizar ensaios não invasivos em campo, são necessários estudos sistemáticos e com diferentes configurações de tubo (maior área de contato com a superfície, maior altura de coluna de água) para adequação do método aplicado em superfícies envelhecidas de concreto aparente.

7.2. PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DOS PRODUTOS

Com o objetivo de avaliar a profundidade de penetração dos produtos/sistemas optou-se por trabalhar com uma técnica qualitativa principalmente para detectar os principais compostos e as profundidades de penetração dos inibidores de corrosão (I1 e I2) e do hidrofugante com amina (HA) e técnicas denominadas como e expeditas, pela relativa facilidade e rapidez de execução.

7.2.1. Avaliação qualitativa com cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas

Com esta técnica foi possível identificar a intensidade relativa da presença dos compostos dos inibidores (I1 e I2) e do hidrofugante à base de silano e amina (HA) nas 3 profundidades de análise, de 0 a 5, de 5 a 10 e de 10 a 15 mm, em amostras extraídas dos CPs, como apresentado nas tabelas 33 a 36.

Na tabela 33 observa-se que não há lógica nas intensidades relativas de penetração dos compostos do inibidor 1. As células pintadas com cinza mais escuro identificam a 1ª maior intensidade de cada composto e a cor cinza claro a 2ª maior intensidade de cada composto. Foram detectadas reduções graduais sequenciais apenas do composto Dietanolamina com o aumento da profundidade de extração do concreto carbonatado.

Tabela 33: Intensidades dos compostos do I1 por profundidades de extração do concreto.

Composto	profundidades (mm)		
	0 a 5	5 a 10	10 a 15
Monoetanolamina	41%	23%	36%
Dietanolamina	56%	26%	18%
Ac benzoico	5%	89%	6%

Fonte: Elaborado pela autora.

Na análise realizada com o inibidor 2 (tabela 34) a concentração dos compostos diminuiu com a profundidade, mas 2 compostos não foram identificados na camada de 10 a 15 mm.

Tabela 34: Intensidades dos compostos do I2 por profundidades de extração do concreto.

Composto	profundidades (mm)		
	0 a 5	5 a 10	10 a 15
2-metil-2-aminopropanol	90%	9%	1%
Ciclohexanamina	80%	20%	-
Ac Benzoico	70%	30%	-

Fonte: Elaborado pela autora.

Na análise do concreto com o sistema realcalinizante, inibidor I e hidrofugante (tabela 35) se observa que a concentração dos compostos do inibidor e do hidrofugante é maior na camada superficial (de 0 a 5 mm) diminuindo com a profundidade. Apenas 2 compostos do hidrofugante foram identificados, um deles só na camada superficial. Por outro lado, 3 compostos do inibidor de corrosão I1 foram identificados, sendo dois deles somente na camada superficial.

Tabela 35: Intensidades dos compostos do I1 + HA por profundidades de extração do concreto.

Produtos	Composto	profundidades (mm)		
		0 a 5	5 a 10	10 a 15
Hidrofugante	Dimetilaminoetanol	100%	-	-
	Pentil-trietoxisilano	55%	45%	-
	Trietoxisilano 1	-	-	-
	Trietoxisilano 2	-	-	-
	Amina NI-1	-	-	-
	Amina NI-2	-	-	-
Inibidor I	Monoetanolamina	100%	-	-
	Dietanolamina	100%	-	-
	Ac benzoico	69%	22%	9%

Fonte: elaborado pela autora.

A tabela 36 traz a análise do concreto com o sistema de realcalinizante, inibidor 2 e hidrofugante, com resultados diferentes da análise anterior (realcalinizante, inibidor 1 e hidrofugante - tabela 35). Apenas um composto do hidrofugante foi identificado e a sequência de intensidade dos compostos foi a superficial com maior intensidade e a de 10 a 15 mm a segunda maior intensidade. Na análise dos compostos do inibidor 2 os três compostos são detectados, no entanto, a profundidade e intensidade destes compostos não foram detectados na ordem decrescente com a profundidade; um dos compostos foi detectado com maior intensidade na camada mais profunda da amostra extraída (de 10 a 15mm).

Tabela 36: Intensidades dos compostos do I2 + HA por profundidades de extração do concreto.

Produtos	Composto	Profundidade (mm)		
		0 a 5	5 a 10	10 a 15
Hidrofugante	Dimetilaminoetanol	-	-	-
	Pentil-trietoxisilano	81%	7%	12%
	Trietoxisilano 1	-	-	-
	Trietoxisilano 2	-	-	-
	Amina NI-1	-	-	-
	Amina NI-2	-	-	-
Inibidor II	2-metil-2-aminopropanol	71%	6%	22%
	Ciclohexanamina	74%	8%	18%
	Ac Benzoico	38%	22%	40%

Fonte: Elaborado pela autora.

Diante dos resultados obtidos nestas análises, foram realizadas mais duas tentativas⁵⁹ usando o material de amostragem. Os resultados das novas análises apresentaram maiores inconsistências, portanto decidiu-se focar a análise dos resultados dos primeiros ensaios realizados.

A cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas mostrou ser uma técnica eficiente para identificar compostos dos inibidores de corrosão e do hidrofugante investigados, mas não eficiente para detectar concentrações dos compostos nas profundidades esperadas de penetração dos produtos no concreto.

⁵⁹ Mais uma análise no mesmo equipamento e a terceira análise em um outro equipamento de cromatografia gasosa.

A natureza experimental desses ensaios, aliada à escassa bibliografia sobre o tema Castro e Paiva, (2010), ainda não permite afirmar que a técnica, associada ao método de amostragem utilizado, é suficiente para avaliar a profundidade de penetração dos produtos investigados.

7.2.2. Técnicas expeditas para avaliação da profundidade de penetração dos produtos

Foram realizados, conforme detalhamento do item 5.1.2, testes com CPs carbonatados tratados com os produtos/sistemas, além dos CPs de referência carbonatado (ref carb) e não carbonatado (ref não carb).

Para a avaliação da profundidade de penetração dos inibidores, foram testadas três técnicas usando amostras pulverizadas extraídas dos CPs de concreto em três profundidades (0 a 5 mm; 5 a 10 mm e 10 a 15 mm), sendo:

(a) aspersão de solução de ninidrina diretamente sobre as amostras pulverizadas (ou em pó); (b) suspensão das amostras em pó em solução de ninidrina; (c) utilizando-se o filtrado de amostras em pó em contato com papel cromatográfico em presença da solução de ninidrina.

Um outro conjunto de testes foi feito por meio da aspersão de reagentes colorimétricos diretamente nos CPs de concreto (de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura) e cortados ao meio transversalmente, de forma a permitir a observação qualitativa da profundidade de penetração do realcalinizante, dos inibidores e dos hidrofugantes

7.2.2.1. Teste colorimétricos com aspersão de soluções de ninidrina sobre pó extraído do concreto

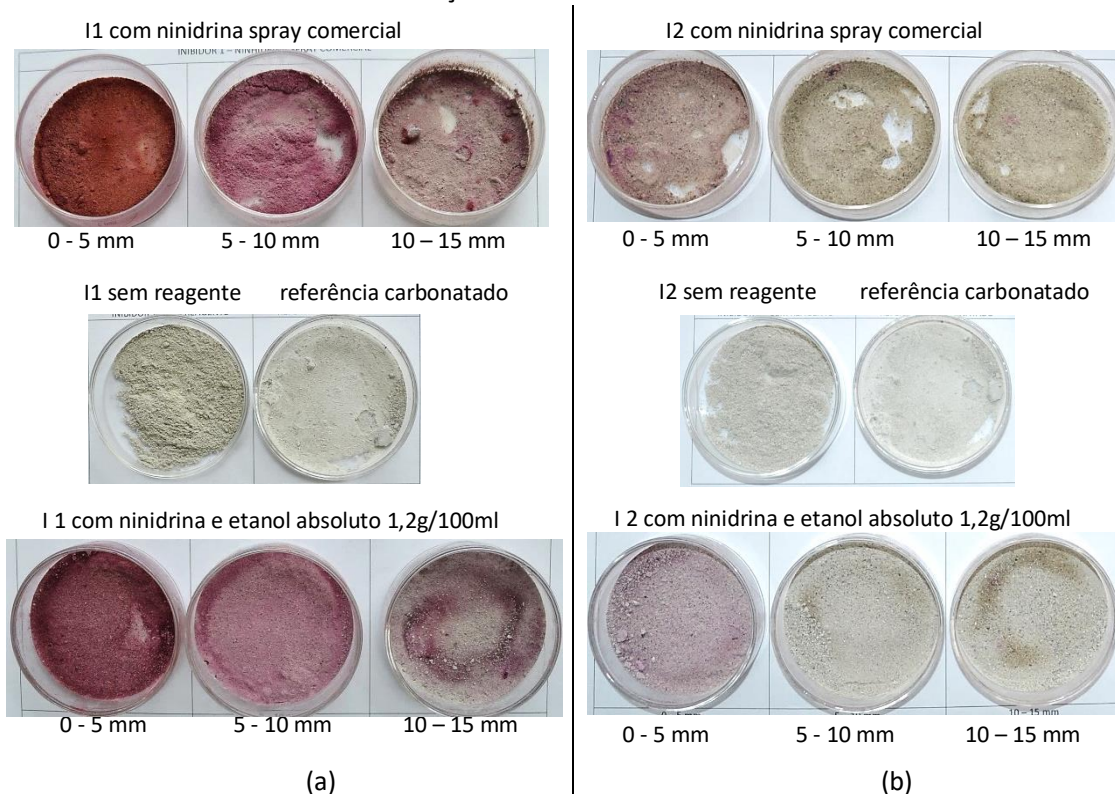
Para estas avaliações buscou-se uma adaptação da norma DIN EN 14630 (2007), um procedimento realizado com a fenolftaleína para a ninidrina. No entanto, o resultado não foi como o esperado conforme apresentado no capítulo 5, conseguindo identificar apenas a presença do inibidor na face externa do CP e não a profundidade

de penetração do produto. A opção foi utilizar o pó do concreto nas 3 profundidades (0 a 5, 5 a 10 e de 10 a 15 mm), buscando identificar a presença da amina (componente presente na composição química dos inibidores de corrosão de migração para concreto utilizados neste estudo).

Para a avaliação utilizou-se os 2 inibidores de corrosão e duas formulações da ninidrina, que reage com a amina primária, (uma em spray comercial e outra a solução de laboratório com a proporção de 1,2 g de ninidrina para 100 ml de etanol absoluto).

Para obter melhores resultados, após a aspersão dos sprays de ninidrina as amostras foram aquecidas com ar quente de secador de cabelo em velocidade baixa e então realizada uma segunda aplicação com os sprays e novamente aquecido. Este procedimento, além de acelerar as reações da ninidrina com a amina, apresentaram cores mais intensas. Os resultados podem ser observados na figura 90 (a) e (b) e 91 (a) e (b).

Figura 90: Teste expedito colorimétrico com 2 soluções de ninidrina, acima solução de spray comercial, abaixo solução elaborada em laboratório com 1,2 g de ninidrina e 100 ml de etanol absoluto e ao centro pó de concreto com inibidor sem reagente e concreto referência carbonatado sem inibidor com reagente de ninidrina comercial. Em (a) reação colorimétrica do pó de concreto com inibidor 1 com as soluções de ninidrina e (b) Reação colorimétrica do concreto com inibidor 2 com as soluções de ninidrina.

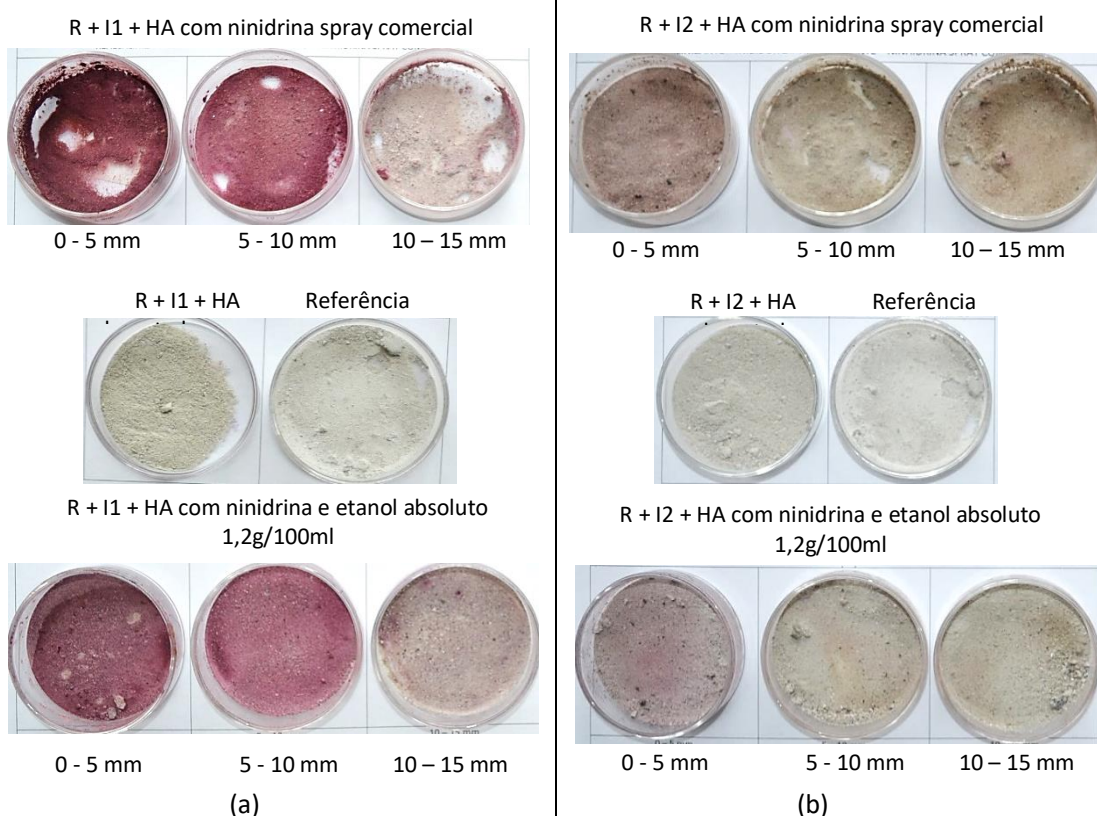


Fotos: Tatiana Simão, 2021.

Na figura 90 é possível observar que a amina primária é detectável nas amostras em pó dos dois inibidores, embora a reação com o inibidor 1 (I1) produza tonalidades mais intensas do que a reação com o inibidor 2 (I2). Outro ponto importante a ser observado é que a coloração fica menos intensa nos dois inibidores com o aumento da profundidade de extração do pó do concreto, evidenciando que a concentração da amina decresce com o aumento da profundidade das camadas.

A técnica foi eficiente também na detecção dos inibidores usados em associação ao realcalinizante e hidrofugante (realcalinizante + inibidor 1 ou 2 + hidrofugante a base de silano e amina). Os resultados são consistentes com os anteriores. Na figura 91 observa-se que o sistema com inibidor 1 (I1) resulta tonalidades mais intensas do que o sistema com inibidor 2 (I2). Analogamente a intensidade da reação reduz com a profundidade de extração da amostra de concreto.

Figura 91: teste expedito colorimétrico com 2 soluções de ninidrina, acima solução de spray comercial, abaixo solução elaborada em laboratório com 1,2 g de ninidrina e 100 ml de etanol absoluto e ao centro pó de concreto com inibidor sem reagente e concreto referência carbonatado sem inibidor com reagente de ninidrina comercial. Em (a) reação colorimétrica do pó de concreto com realcalinizante + inibidor 1 + hidrofugante a base de silano e amina com a solução de ninidrina e (b) reação colorimétrica do pó de concreto com realcalinizante + inibidor 2 + hidrofugante a base de silano e amina com a solução de ninidrina.



Fotos: Tatiana Simão, 2021.

A solução comercial de ninidrina apresentou coloração mais intensa (amostras na parte superior) do que a solução preparada em laboratório com etanol absoluto.

Heiyantuduwa, Alexander e Mackechnie (2006) apresentam um padrão de cores, coerente ao observado nas Figuras 90 e 91, correlacionado a concentração de nitrogênio no concreto impregnado com inibidor de corrosão à base de aminoálcool. Os autores apresentam quatro níveis correlacionados às seguintes faixas de concentração de nitrogênio (mg N/kg de concreto): avermelhado|brick red (0,55 a 2,20); rosa|pink (0,28 a 0,55); rosa pálido|pale pink (0,06 a 0,28) e traço|trace (< 0,06). Nos ensaios desta tese a coloração para o nível mais intenso variou entre o avermelhado e o violeta-púrpura.

Apesar da simplicidade da técnica os resultados obtidos apresentaram-se de acordo com o esperado, no entanto não foi possível confirmar o resultado com a técnica analítica da cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas. Como apresentado no item 7.2.1, os resultados da cromatografia gasosa não mostraram de forma consistente a redução da concentração dos compostos dos inibidores com o aumento da profundidade da amostra extraída dos CPs.

7.2.2.2. Teste colorimétrico com solução tampão de ácido acético e solução de ninidrina

Este teste foi baseado nas pesquisas apresentadas em Fiedlerová *et al.* (2015), utilizando também uma solução de ninidrina como apresentado no capítulo 5.

Foram usadas amostras de pó extraído dos CPs de concreto tratados com inibidores (I1 e I2) de forma isolada ou associada com realcalinizante (R) e hidrofugante à base de silano e amina (HA). Além disso, foram realizados testes com água destilada, com concreto de referência carbonatado e com os produtos (I1, I2, R, HA) (Quadro 15).

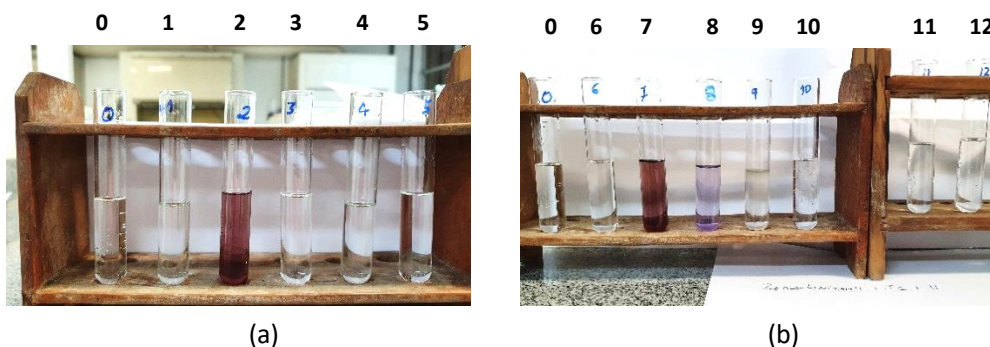
Quadro 15: Numeração dos tubos de ensaio com as soluções para realização de ensaio de reação colorimétrica da solução de pó de concreto em água destilada com os inibidores de corrosão e com os sistemas de proteção de superfície com a solução de ninidrina.

Inibidor 1 ou 2		Realcalinizante + Inibidor 1 ou 2 + hidrofugante a base de silano	
Nº	solução	Nº	solução
0	Referência carbonatado	0	Referência carbonatado
1	Água destilada	6	Água destilada
2	I1 ou I2 líquido	7	I1 ou I2 líquido
3	Solução concreto com produto de 0 – 5 mm	8	Realcalinizante
4	Solução concreto com produto de 5 – 10 mm	9	Hidrofugante a base de silano e amina
5	Solução concreto com produto de 10 – 15 mm	10	Solução concreto com sistema de 0 a 5 mm
		11	Solução concreto com sistema de 5 a 10 mm
		12	Solução concreto com sistema de 10 a 15 mm

Fotos: Tatiana Simão, 2021.

As figuras 92 e 93 trazem, respectivamente, os resultados do teste para o inibidor 1 (I1) e para o inibidor 2 (I2).

Figura 92: Imagens de: (a) reação colorimétrica do inibidor 1 com amina a solução de ninidrina com a solução tampão de ácido acético na solução de pó de concreto em água destilada (b) reação colorimétrica do sistema de proteção de superfície composta por realcalinizante + inibidor 1 + hidrofugante com amina a solução de ninidrina na solução de pó de concreto em água destilada.

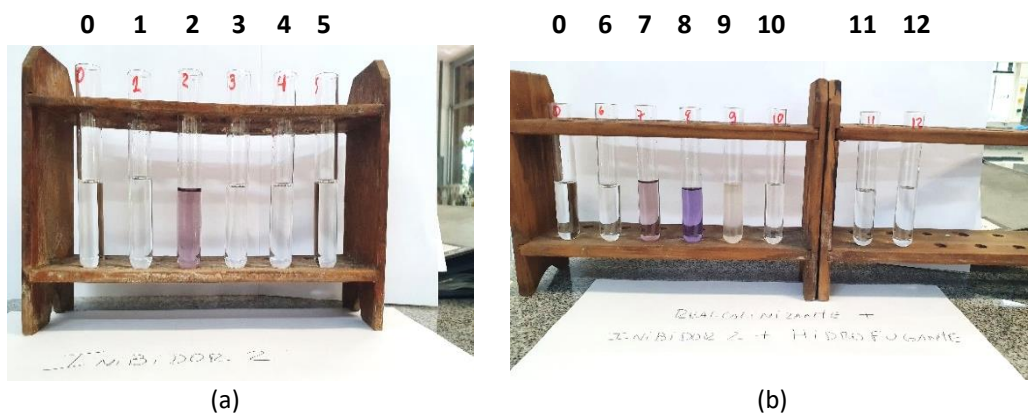


Fotos: Tatiana Simão, 2022.

Na figura 92 (a) o tubo de ensaio que apresentou reação colorimétrica foi o com o líquido de inibidor 1 (tubo nº 2). Por outro lado, na figura 93 (b) além do inibidor 1 (tubo nº 7) o realcalinizante também apresentou uma leve reação colorimétrica (tubo nº 8) e o hidrofugante apresentou separação de fases entre a solução de ninidrina e o

silano (tubo nº 9), mas em nenhuma das duas figuras foi possível observar a presença da amina nas amostras extraídas dos CPs de concreto.

Figura 93: Imagens de: (a) reação colorimétrica do inibidor 2 com amina e a solução de ninidrina na solução de pó de concreto em água destilada (b) reação colorimétrica do sistema de proteção de superfície composta por realcalinizante + inibidor 2 + hidrofugante com amina e a solução de ninidrina na solução de pó de concreto em água destilada.



Fotos: Tatiana Simão, 2022.

Para o inibidor 2 (I1), Figura 93, foi observado o mesmo padrão dos testes com o inibidor 1 (I1), ou seja, e, (a) a alteração de cor foi detectada somente com o líquido do inibidor 2 (tubo nº 2) e em (b) o tom mais intenso sinaliza o inibidor 2 (tubo nº7) e realcalinizante, mais roxeado (tubo nº 8) e a separação das fases no tubo de ensaio do hidrofugante (tubo nº 9).

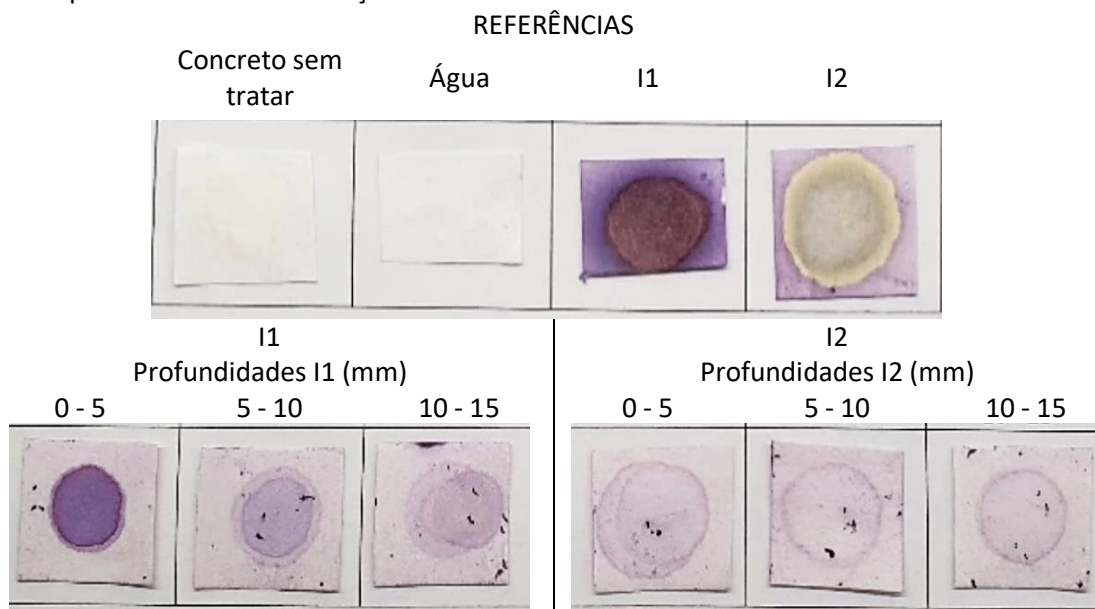
Este ensaio confirmou a reação da ninidrina com os compostos de amina, assim como a reação mais intensa do inibidor 1, consistentes com resultados dos testes anteriores apresentadas no item 7.2.2.1. No entanto a não alteração da cor nas soluções contendo o pó extraído dos CPs de concreto deve ser resultado da diluição das amostras em água destilada, o que reduziu a concentração dos compostos dificultando a reação da amina com a ninidrina.

7.2.2.3. Teste colorimétrico em papel de cromatografia com solução de ninidrina

Esse teste foi adaptado do procedimento desenvolvido por um fabricante de inibidor de corrosão (anexo 2). Os resultados são apresentados na figura 94 dos

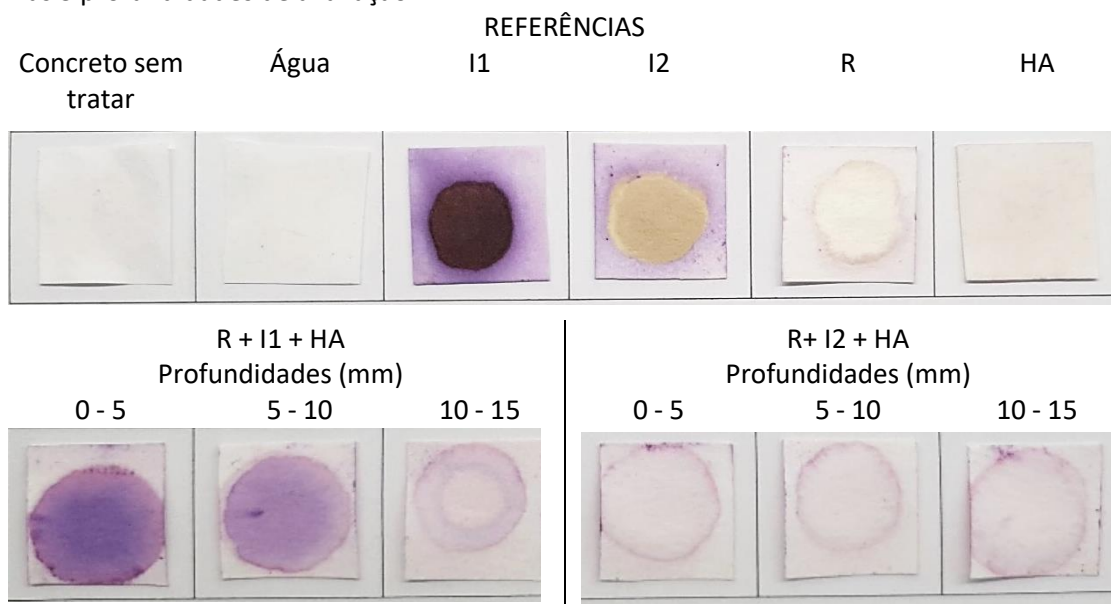
inibidores e figura 95 do sistema de realcalinizante (R), inibidor 1 ou 2 (I1 ou I2) e hidrofugante com amina (HA).

Figura 94: Teste colorimétrico da solução de ninidrina aspergidas sobre solução de concreto com produtos aplicado sobre papel cromatográfico. Na parte superior da figura são apresentadas as referências com as reações do concreto sem tratamento, água e dos Inibidores (I1 e I2) na parte inferiores são as soluções de concreto com inibidor 1 e inibidor 2 nas 3 profundidades de avaliação.



Fotos: Tatiana Simão, 2021.

Figura 95: Teste colorimétrico da solução de ninidrina aspergidas sobre solução de concreto com sistemas aplicado sobre papel cromatográfico. Na parte superior da figura são apresentadas as referências com as reações do concreto sem tratamento, água, os Inibidores (I1 e I2), o realcalinizante (R) e o hidrofugante com amina (HÁ) na parte inferiores são: as soluções de concreto com os sistemas com R + I1 + HA a esquerda e com R + I2 + HA a direita nas 3 profundidades de avaliação.



Fotos: Tatiana Simão, 2021.

Assim como no teste de aspersão do reagente sobre o pó de concreto, neste teste com o papel cromatográfico a reação com o inibidor 1 (I1) também apresentou resultados visuais mais expressivos, com tonalidades mais intensas tanto do próprio inibidor, quanto no pó extraído dos CPs tratados com o produto, nas três profundidades analisadas. No teste com o inibidor 2 (I2), tanto o produto analisado isoladamente quanto no concreto, apresentou coloração roxeada apenas nas bordas da gota aplicada no papel de cromatografia, fato que não ocorreu com o inibidor 1 (I1).

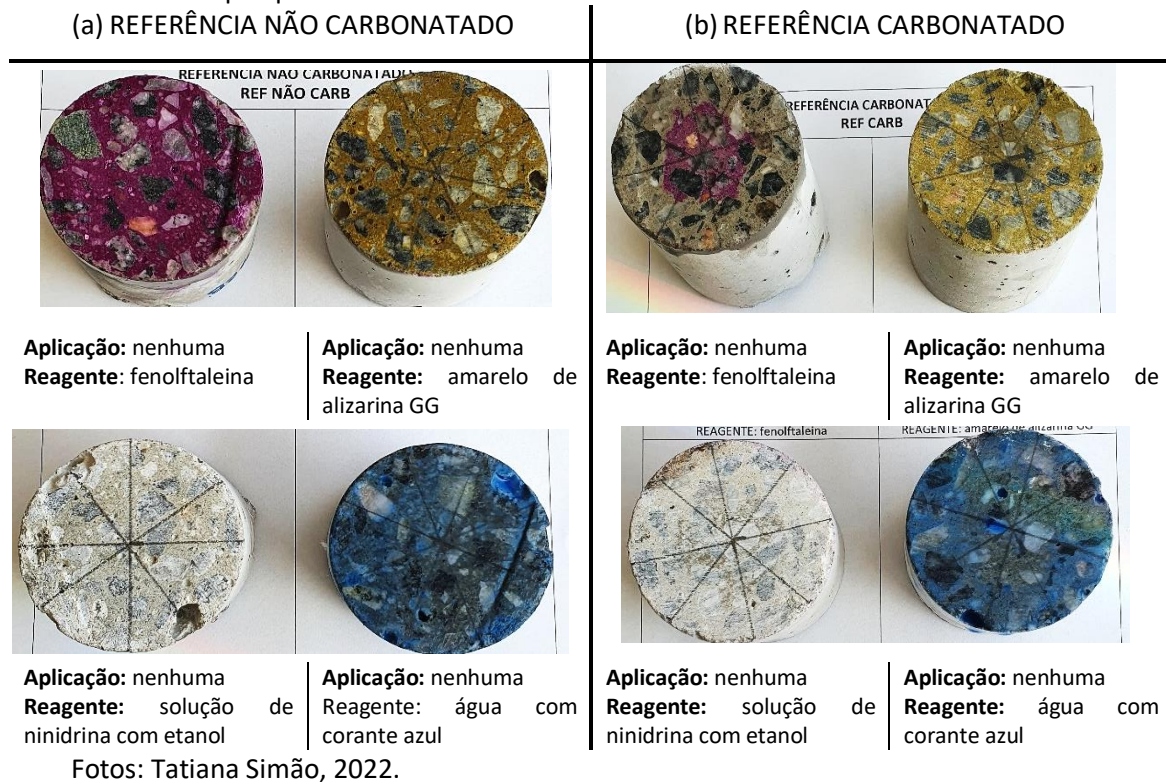
É importante salientar que devido ao fato da ninidrina ser um reagente muito utilizado e sensível para a identificação de impressões digitais a execução do ensaio se mostrou de difícil execução, principalmente para evitar contaminação das áreas de aspersão do reagente. Nas primeiras tentativas de realização do teste, mesmo com o uso de luvas de silicone foi possível identificar contaminação da área analisada, portanto nas demais tentativas a manipulação dos papéis cromatográficos se realizou com o uso de duas luvas e de pinça para evitar o contato da pele diretamente com a área de aspersão do reagente.

Com este teste se pode constatar que realmente há reação mais intensa da ninidrina com o inibidor 1, mas que a avaliação desta técnica nas profundidades de análise não foi muito favorecida principalmente nas avaliações com o inibidor 2, possivelmente pois a diluição das amostras em água destilada reduziu a concentração dos compostos dificultando a visualização da reação da amina com a ninidrina.

7.2.2.4. Aspersão de reagentes

Para a detecção da penetração do realcalinizante foram usados dois reagentes: (a) solução de fenolftaleína (incolor/vermelho carmim – intervalo de mudança de cor de pH 8,3 – 10) e (b) solução de amarelo de alizarina GG (amarelo claro/amarelo escuro - intervalo de mudança de cor de pH 10,1 – 12). Para os inibidores de corrosão a solução de ninidrina (proporção de 1,2 g de ninidrina para 100 ml de etanol absoluto) e para o hidrofugante água com corante azul. A Figura 96 ilustra a aparência das superfícies nas quais foram aspergidos os reagentes em superfícies de concreto não carbonatado - Figura 96 (a) e de concreto carbonatado - Figura 96 (b)

Figura 96: Aspersão dos reagentes colorimétricos (a) CPs referência não carbonatados e (b) CPs referências carbonatados. Nesses CPs não foram aplicados quaisquer produtos/sistemas estudados nesta pesquisa.



Na figura 96 (a), concreto não carbonatado, observa-se a reação à fenolftaleína com o vermelho carmim bem intenso, assim como o amarelo de alizarina GG (testes para identificar alteração do pH) e o azul intenso do corante em toda a seção em concreto não impregnado com hidrofugante. A aspersão de solução de ninidrina não provoca qualquer alteração de cor porque os CP não foram tratados com os inibidores de corrosão ou com realcalinizante.

Na figura 96 (b) para o concreto referência carbonatado percebeu-se o vermelho carmim da reação à fenolftaleína apenas na região central que apresenta pH superior a 8,3; o amarelo menos intenso na reação com o amarelo de alizarina GG, indicando a redução do pH do concreto. A reação do inibidor com a ninidrina e do hidrofugante com a água com corante continuaram nas mesmas condições dos CP's não carbonatados.

Na figura 97 e tabela 37 observa-se a reação do realcalinizante com os reagentes em duas técnicas de aplicação (pincel e manta), explicadas no capítulo 5 desta tese.

Com o resultado pode-se observar na figura 97 (a) que nas aplicações com pincel (CPs na parte superior da figura) não está visível a realcalinização do concreto após a aspersão dos reagentes, somente um leve rosado na parte inferior esquerda do CP; nas demais áreas não se identifica nenhuma reação, portanto para essa condição considerou-se penetração nula (0 mm) do realcalinizante. Estas reações ficam facilmente visíveis nos CPs, na parte inferior da mesma imagem, nos quais a aplicação do realcalinizante foi realizada com manta. Nesta última condição, a reação à fenolftaleína indicou profundidade média de ~ 7 mm de penetração do realcalinizante.

A reação ao amarelo de alizarina é mais difusa o que dificulta a identificação da frente de carbonatação. Em vista da grande variação de tonalidade, para a aplicação com pincel a profundidade de penetração foi considerada nula (0 mm) e para a aplicação com manta não foi possível mensurar a profundidade de penetração do realcalinizante.

Tabela 37: Leituras de profundidade de penetração de R e R+HA por técnica de aplicação (mm).

Reagentes / Produtos / sistemas	R		R+HA
	Pincel	Manta	Pincel
Fenolftaleína	1,0 / 0,5 / 0 / 0,5 Média = 0,5 mm	12,3 / 6,0 / 9,8 / 0 Média = 7,0 mm	1,8 / 0 / 2,1 / 0 Média = 1,0 mm
Amarelo de alizarina GG	0	Todo amarelo com grande variação de tom	8,0 / 7,5 / 8,4 / 7,7 Média = 7,9 mm
Água com corante azul			10,2 / 7,6 / 8,6 / 10,6 Média = 9,3 mm

Fonte: elaborado pela autora.

Na figura 97 (b) a técnica de aplicação do realcalinizante foi apenas com pincel (método recomendado pelo fabricante), além disso foi realizada a aplicação do hidrofugante à base de silano e amina. Observou-se uma reação muito discreta de realcalinização com a fenolftaleína, apenas uma leve coloração na borda (< 1 mm). Com o reagente amarelo de alizarina GG foi observada uma zona de amarelo mais escuro na região central do CP, na região externa amarelo mais claro que parece coincidir com a área de penetração do hidrofugante (média de 7,9 mm). No CP onde foi aspergida água com corante azul foi medida penetração média de 9,3 mm do hidrofugante.

Figura 97: Em (a) 2 formas de aplicação, com pincel e com CP envolto em manta acrílica e filme plástico de PVC e aspersão dos reagentes de fenolftaleína e amarelo de alizarina GG em (b) manteve-se a aplicação com pincel, mas acrescentou-se o hidrofugante a base de silano e amina e os reagentes foram a fenolftaleína, amarelo de alizarina e água com corante líquido azul.

(a) REALCALINIZANTE		(b) REALCALINIZANTE COM HIDROFUGANTE	
			
Aplicação: pincel Reagente: fenolftaleína	Aplicação: pincel Reagente: amarelo de alizarina GG	Aplicação: pincel Reagente: fenolftaleína	Aplicação: pincel Reagente: amarelo de alizarina GG
			
Aplicação: manta Reagente: fenolftaleína	Aplicação: manta Reagente: amarelo de alizarina GG	Aplicação: pincel Reagente: água com corante azul	

Fotos: Tatiana Simão, 2022.

Na avaliação das reações colorimétricas dos inibidores também foram testadas duas formas de aplicação, pincel e manta (Tabela 38). A aplicação com pincel resulta profundidades médias de penetração de 8,4 e 13,5 mm para inibidor 1 (I1) e 2 (I2), respectivamente. Para a aplicação com manta a profundidade se duplica para o inibidor 1 (I1) e atinge toda a seção do CP para o inibidor 2 (I2) (cerca de 25 mm de penetração).

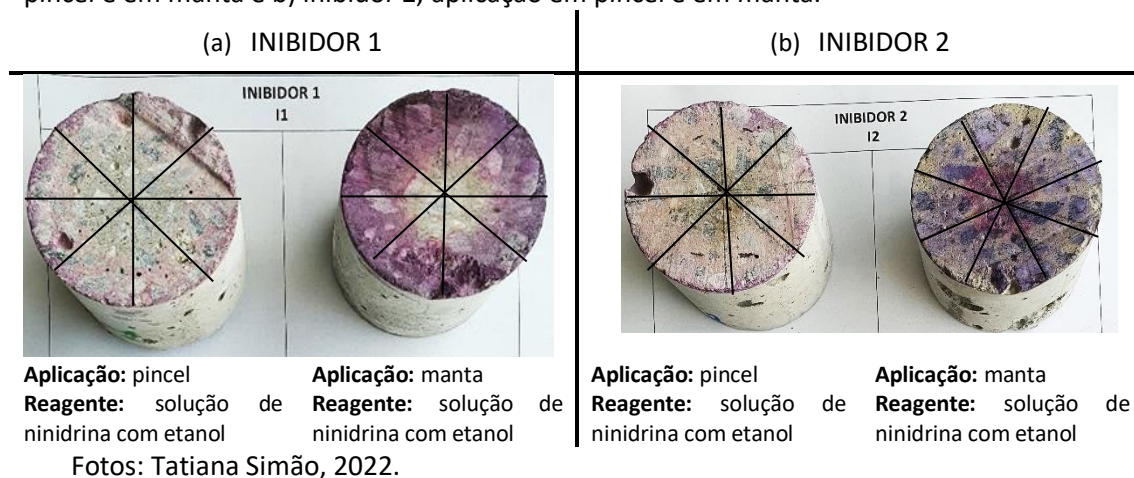
Tabela 38: Leituras de profundidade de penetração de I1 e I2 por técnica de aplicação (mm).

Reagentes / Produtos / sistemas	I1		I2	
	Pincel	Manta	Pincel	Manta
ninidrina	9,3 / 8,0 / 6,9 / 9,2 Média = 8,4	16,0 / 18,8 / 14,7 / 19,4 Média = 17,2	15,3 / 12,1 / 13,4 / 13,2 Média = 13,5	Reação colorimétrica em toda a área com variação de tom

Fonte: Elaborado pela autora.

Na figura 98, reação colorimétrica dos inibidores de corrosão com a ninidrina, identifica-se tanto em (a) quanto em (b) que a profundidade e a intensidade da reação são maiores nas aplicações com manta, sendo que nos dois inibidores, as regiões mais externas dos CP's apresentam tom mais azulado e na região mais próxima ao centro o tom da reação fica mais rosada. Por outro lado, nas aplicações com pincel a intensidade da coloração e profundidade de visualização das reações colorimétricas são menores como pode ser constatado na tabela 38.

Figura 98: Reação colorimétrica com Inibidores de corrosão em a) inibidor 1, aplicação em pincel e em manta e b) inibidor 2, aplicação em pincel e em manta.



Na avaliação da reação colorimétrica dos inibidores de corrosão (I1 e I2) com hidrofugante a base de silano (HA) a aplicação foi apenas com pincel e observou-se a reação com a ninidrina um pouco mais forte nas bordas dos CP, mas uma tonalidade mais clara espalhada em todo CP. Na avaliação da profundidade de penetração do hidrofugante com a molhagem em água com corante, a área mais escura ao centro do CPs indica a região molhada, portanto a profundidade de penetração do hidrofugante apresentou valores superiores a 10 mm (classe II EN 1504-2) como pode ser observado na tabela 39 e figura 99.

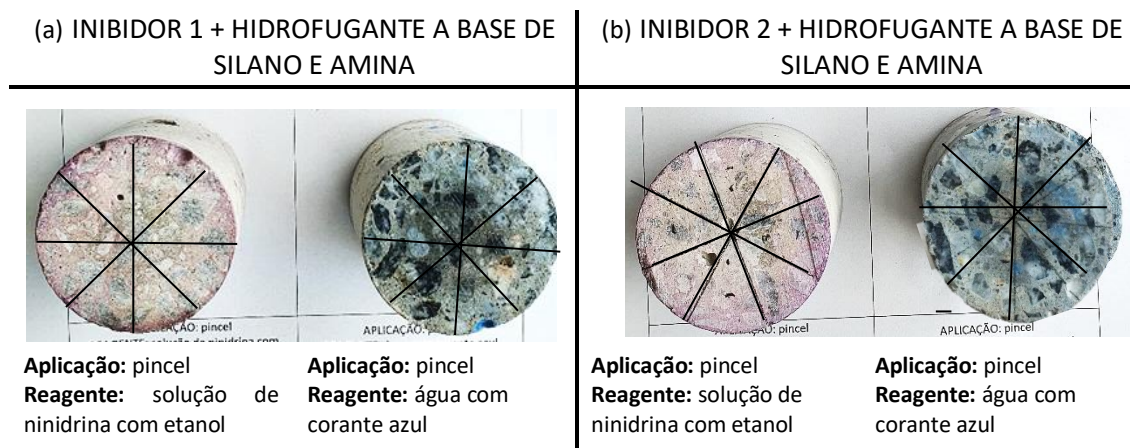
Tabela 39: Leituras de profundidade de penetração de I1 + HA e I2 + HA.

Reagente / Produtos / sistemas	I1 + HA	I2 + HA
	Pincel	Pincel
Ninidrina	14,9 / 25 / 15,8 / 25 Média = 20,2	10,7 / 25 / 10,0 / 25 Média = 17,7 mm
Água com corante azul	13,6 / 11,0 / 12,2 / 13,17 Média = 13,6	14,7 / 12,7 / 13,1 / 11,2 Média = 12,9 mm

Fotos: Tatiana Simão, 2022.

Em síntese, os inibidores I1 e I2 tiveram penetração no concreto carbonatado de 20,2 e 17,7 mm respectivamente, (com uma reação em tom roxeadado bem claro) o hidrofugante penetrou mais do que 10 mm quando aplicado associado aos inibidores.

Figura 99: Reação colorimétrica com Inibidores de corrosão + hidrofugante (HA), ambos com aplicação com pincel a) inibidor 1 + hidrofugante HA, e b) inibidor 2 + hidrofugante HA.



Fotos: Tatiana Simão, 2022.

Foram realizadas avaliações da profundidade de penetração de dois tipos de hidrofugantes um com alto teor de silano e amina, denominado HA e outro composto com silano e siloxano denominado HS. Os resultados desta avaliação expedita estão apresentados na tabela 40 e figura 100.

Tabela 40: Leituras de profundidade de penetração de hidrofugante a base de silano e amina (HA) e hidrofugante a base de silano e siloxano (HS).

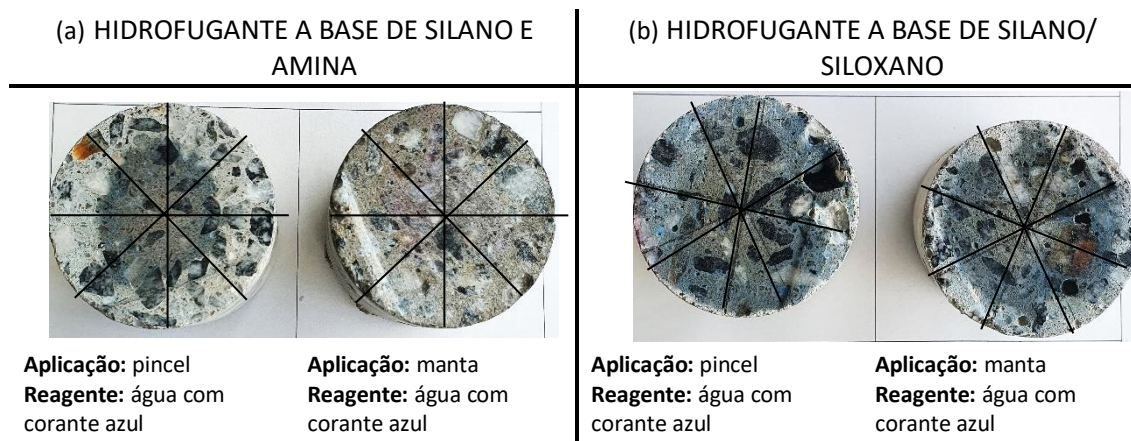
Reagentes / Produtos / sistemas	HA		HS	
	Pincel	Manta	Pincel	Manta
Água com corante azul	11,3 / 13,2 / 10,8 / 9,3 Média = 11,2	Sem molhagem, penetração total	2,3 / 2,5 / 1,5 / 1,8 Média = 2,0	7,1 / 6,9 / 6,6 / 7,3 Média = 7,0

Fonte: elaborado pela autora

Como pode ser observado o HA, com aplicação em pincel atende as especificações da EN 1504-2, classe II e apresenta penetração no concreto ≥ 10 mm na aplicação recomendada pelo fabricante. Quando a aplicação foi realizada com manta o hidrofugante penetrou no diâmetro todo do CP, ou seja 50 mm. Para o HS os resultados foram bem diferentes, ou seja, quando aplicado com pincel a profundidade de penetração do hidrofugante ficou em média com 2 mm e com a manta de 7 mm, ou

seja, nenhuma das duas técnicas atingem a classe II de desempenho para a profundidade de penetração do hidrofugante HS.

Figura 100: Aspersão de água com corante nos CPs com (a) hidrofugante HA (silano e amina) e (b) hidrofugante HS (silano/siloxano), ambos com aplicação com pincel e manta.



Fotos: Tatiana Simão, 2022.

Na figura 101 e tabela 41 observamos a penetração dos sistemas de proteção de superfície, sendo em (a) do realcalinizante com o inibidor 1 e em (b) realcalinizante com o inibidor 1 e hidrofugante a base de silano e amina (HA).

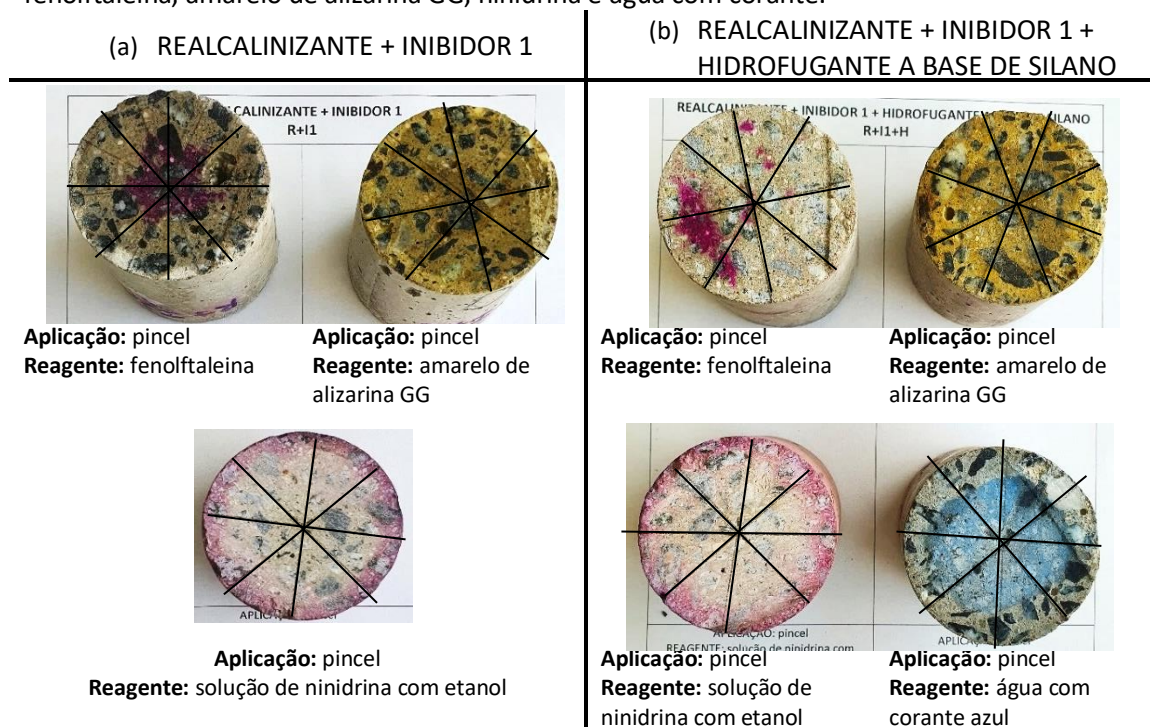
Tabela 41: Leituras de profundidade de penetração de R + I1 e R + I1 + HA.

Reagente	Produtos / sistemas	R + I1	R + I1 + HA
		Pincel	Pincel
fenolftaleína		Reação de realcalinização 0 mm de penetração, o vermelho carmim é referente a carbonatação incompleta	Manchas vermelho carmim espalhadas, podem ser resultado da carbonatação incompleta do CP
Amarelo de alizarina GG		Reação amarelo claro em toda a superfície	Reação amarelo claro em toda a superfície
Ninidrina		6,1/ 5,3 / 8,7 / 6,0 Média = 6,5 mm	7,8 / 6,4 / 8,1 / 10,6 Média = 8,2 mm
Água com corante azul			9,5 / 10,1 / 12,7 / 9,3 Média = 10,5 mm

Fonte: Elaborado pela autora.

Pelas reações colorimétricas da fenolftaleína no sistema realcalinizante + inibidor 1 e realcalinizante + inibidor 1 + hidrofugante a base de silano e amina (HA) não foi detectado aumento do pH após aplicação dos sistemas, apenas a carbonatação incompleta do CP. Com o reagente amarelo de alizarina GG foi possível observar uma reação amarelo claro, muito parecido com a coloração apresentada no CP referência carbonatado (ver figura 101 b).

Figura 101: CPs com realcalinizante, inibidor 1 e realcalinizante com inibidor 1 e hidrofugante (HA). Em (a) aspersão de fenolftaleína, amarelo de alizarina GG e ninidrina e em (b) aspersão de fenolftaleína, amarelo de alizarina GG, ninidrina e água com corante.



Fotos: Tatiana Simão, 2022.

A reação do inibidor com a ninidrina ficou visível nos dois sistemas (6,5 e 8,2mm) e a profundidade de penetração do hidrofugante (HA) ficou em média de 10,5 mm visível na aspersão da água com corante, ou seja, classificado como classe II de penetração pela EN 1504-2.

As observações das reações colorimétricas dos sistemas realcalinizante + inibidor 2 e realcalinizante com inibidor 2 e hidrofugante são apresentados na figura 109 e tabela 42. Na figura (a) o sistema realcalinizante + inibidor 2 e em (b) sistema de realcalinizante + inibidor 2 + hidrofugante a base de silano e amina (HA).

Tabela 42: Leituras de profundidade de penetração de R + I2 e R + I2 + HA.

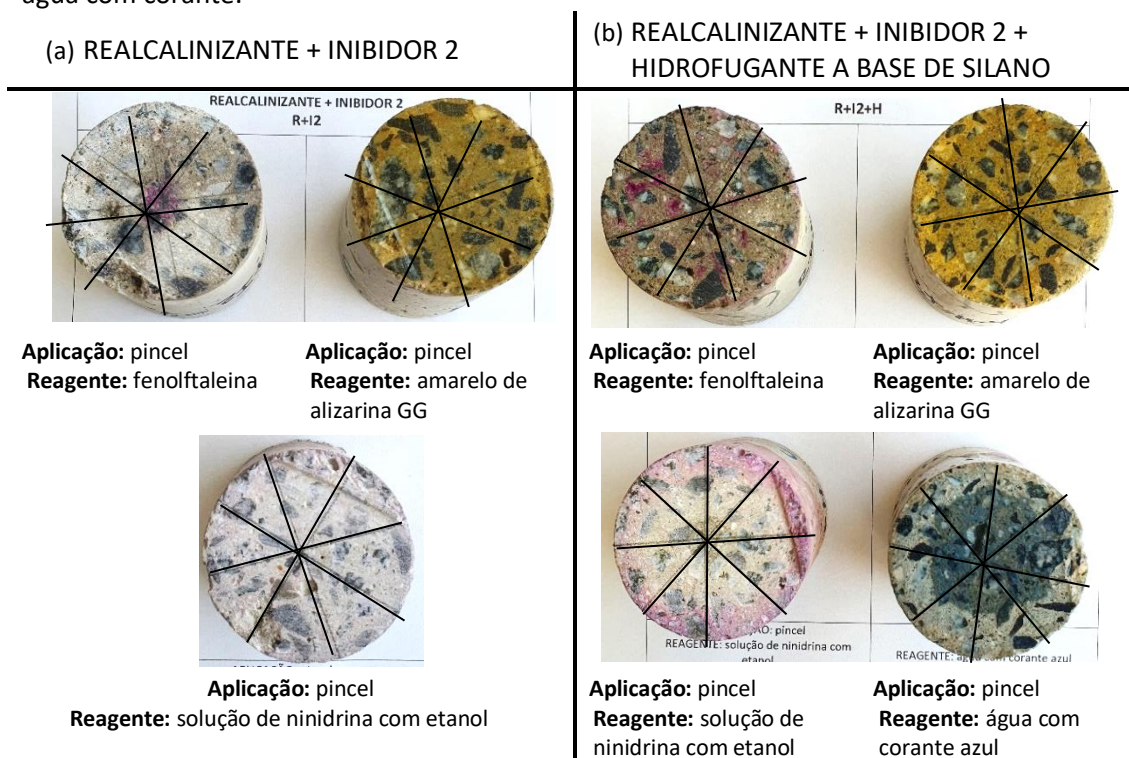
Reagente	Produtos / sistemas	R + I2	R + I2 + HA
		Pincel	Pincel
fenolftaleína		Reação de realcalinização 0 mm de penetração, o vermelho carmim é referente a carbonatação incompleta	Manchas vermelho carmim espalhadas, podem ser resultado da carbonatação incompleta do CP
Amarelo de alizarina GG		Reação amarelo claro em toda a superfície	Reação amarelo claro em toda a superfície
Ninidrina		1,5/ 2,4 / 1,4 / 2,5 Média = 2,0 mm	10,1 / 8,8 / 5,2 / 6,4 Média = 7,6 mm
Água com corante azul			7,8 / 12,4 / 11,2 / 9,6 Média = 10,3 mm

Fonte: Elaborado pela autora.

A figura 102 ilustra que na reação com a fenolftaleína não houve realcalinização, apresentando em (a) um leve rosado ao centro e em (b) manchas rosadas espalhadas na superfície, resultado da carbonatação incompleta do CP. A reação do amarelo de alizarina novamente apresentou uma reação em amarelo claro como ocorreu no sistema acima. A reação da ninidrina com o inibidor 2 ficou mais perceptível e com profundidade maior no sistema com hidrofugante. Por fim a profundidade de penetração do hidrofugante (10,3mm) medida após na aspersão de água com corante também pode ser considerada na classe II da norma EN1405 tabela 42.

Os resultados dos sistemas com I1 e I2 foram semelhantes, no entanto as profundidades de penetração do sistema com o I2 foram ligeiramente menores.

Figura 102: CPs com realcalinizante, inibidor 2 e realcalinizante com inibidor 2 e hidrofugante a base de silano e Amina (HA). Em (a) aspersão de fenolftaleína, amarelo de alizarina GG e ninidrina e em (b) aspersão de fenolftaleína, amarelo de alizarina GG, ninidrina e água com corante.



Fotos: Tatiana Simão, 2022.

A avaliação expedita de aspersão de reagentes colorimétricos mostrou-se uma técnica simples que apresenta resultados razoavelmente confiáveis. No entanto o uso do amarelo de alizarina GG, por ser muito sutil a mudança de tonalidade da cor na elevação do pH resultou em observações mais difíceis de serem avaliadas; o uso da

fenolftaleína se reafirma como método eficiente. Além disso também se constatou que o hidrofugante à base de silano e amina (HA) apresentou penetração bem superior ao hidrofugante a base de silano/siloxano, isso devido a moléculas menores dos silanos, como discutido no capítulo 4.

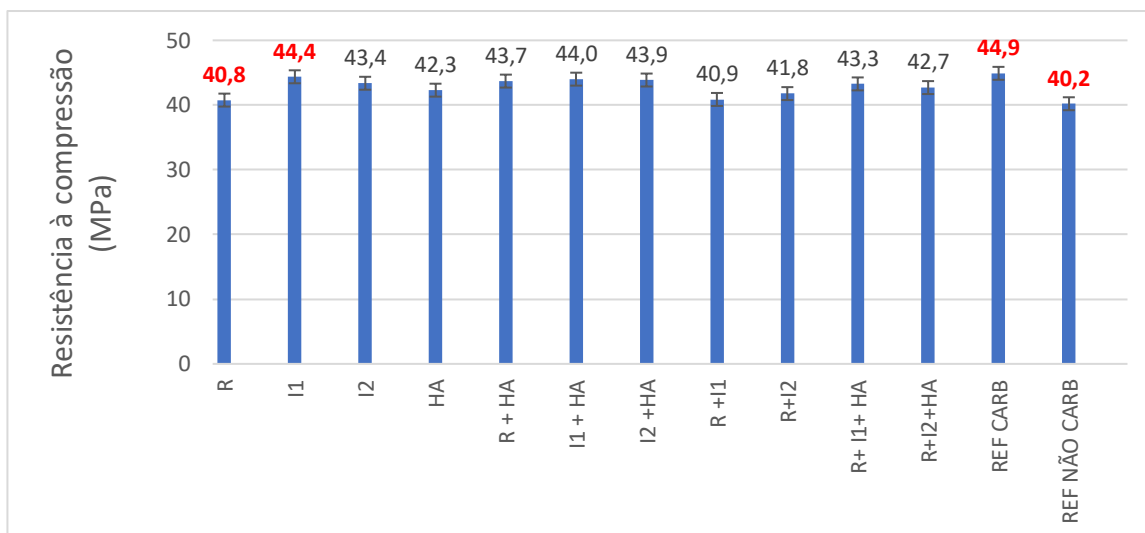
7.3. ALTERAÇÃO DAS PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA DO CONCRETO

Os ensaios buscaram trazer evidências de possíveis impactos dos produtos/sistemas aplicados nas propriedades dos materiais (concreto e aço). Foram realizados ensaios de resistência a compressão, absorção de água por capilaridade, MAV, PIM, MEV e EDS (aço com inibidor de corrosão).

7.3.1. Resistência a compressão

O ensaio de resistência a compressão foi realizado em CPs carbonatados com os produtos/sistemas aplicados, e sem qualquer aplicação em CPs sem carbonatar e carbonatado. Os menores e maiores valores de resistência a compressão observados são justamente dos CPs sem aplicação de produtos e sistemas, sendo o não carbonatado com 40,2 MPa e o carbonatado com 44,9 MPa, figura 103 e tabela 43. Dentre os CPs com os produtos e sistemas aplicados o que apresentou menor resistência a compressão foi o com realcalinizante (40,8 MPa) e o que apresentou maior resistência foi com inibidor 1 (44,4 MPa).

Figura 103: Resistência a compressão dos corpos de prova sem e com produtos / sistemas de proteção de superfície.



Fonte: Elaborado pela autora.

Com a avaliação do desvio padrão, do coeficiente de variação e avaliação do coeficiente de variação⁶⁰ baseados nas orientações da NBR 5739 (2018), Anexo B, pode-se perceber que a variação da resistência dentro de cada grupo de cada produto/sistema não foi significativa, apresentando classificações de variação excelente em 10 dos grupos avaliados, avaliação muito boa em 2 grupos (I1 + HA e R + I1) e 1 avaliado como variação da resistência boa no grupo a com aplicação do hidrofugante a base se silano e amina (HA).

A análise de variância (ANOVA) (Tabela 43) mostra que na análise entre os grupos ensaiados, não há diferença estatisticamente significativa entre as resistências medidas⁶¹, portanto a resistência mecânica à compressão dos CPs não é influenciada pelos produtos/sistemas aplicados, tampouco pela carbonatação.

⁶⁰ Resultados completo dos cálculos no apêndice 3.

⁶¹ Constatado pelos resultados de: $F(\text{calculado}) < F_{\text{crítico}}$ e Valor-P > 5% (0,05) conclui-se que as variâncias não apresentam diferenças estatisticamente significativa.

Tabela 43: Resumo com dados de análise de variância dos CPs ensaiados à compressão com e sem aplicação de produtos/sistemas de proteção de superfície.

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
R	3	122,3	40,8	0,3
R+HA	3	131,1	43,7	7,9
I1	3	133,1	44,4	3,6
I1 + HA	3	132	44,0	15,4
I2	3	130,1	43,4	1,3
I2 +HA	3	131,6	43,9	3,5
R +I1	3	122,6	40,9	11,9
R+ I1+ HA	3	129,8	43,3	6,6
R+I2	3	125,3	41,8	2,7
HA	3	126,9	42,3	22,6
R+I2+HA	3	128,1	42,7	0,1
REF CARB	3	134,7	44,9	1,6
REF NÃO CARB	3	120,6	40,2	6,4

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	80,2276923	12	6,68564	1,0351344	0,448192313	2,147926
Dentro dos grupos	167,926667	26	6,45872			
Total	248,154359	38				

Fonte: Elaborado pela autora.

7.3.2. Absorção de água por capilaridade

Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram executados de acordo com a norma ABNT NBR 9779, (2012) – 3 CPs para cada interação dos produtos de forma isolada e associada, além dos CPs de referências carbonatado e não carbonatado (Figura 104). No total foram realizados os ensaios em 39 CPs (3 CPs para 13 condições de avaliação – com ou sem produtos/sistema).

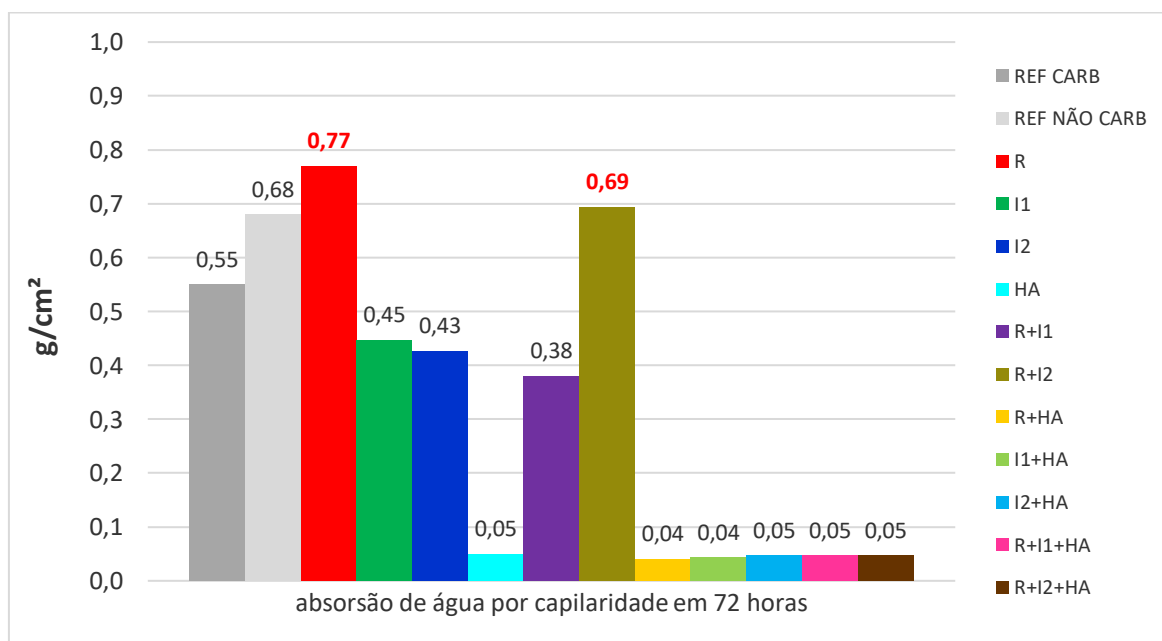
Figura 104: Ensaio de absorção por capilaridade segundo a NBR 9779:2012.



Foto: Tatiana Simão, 2021.

Na figura 105 observa-se que, como esperado, os CPs tratados com hidrofugante à base de silano (HA) apresentaram menor absorção de água. Por outro lado, CPs com realcalinizante (R) e realcalinizante com inibidor 2 (R+I2), absorveram mais água do que os CPs de referência carbonatado (REF CARB) e não carbonatado (REF NÃO CARB).

Figura 105: Absorção de água por capilaridade dos corpos de prova sem e com produtos / sistemas de proteção de superfície.



Fonte: Elaborado pela autora.

A análise de variância evidencia que os produtos/sistemas aplicados aos CPs influencia a absorção de água por capilaridade do concreto, como pode ser constatado pelos dados da análise na Figura 105, tabela 44.

Tabela 44: Resumo com dados de análise de variância dos CPs ensaiados à compressão com e sem aplicação de produtos/sistemas de proteção de superfície.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
R	3	2,31	0,77	0,0037
I1	3	1,34	0,446666667	0,001433
I2	3	1,28	0,426666667	0,000433
HA	3	0,15	0,05	1E-04
REF CARB	3	1,65	0,55	0,0021
REF NÃO CARB	3	2,04	0,68	0,0853
R+I1	3	1,14	0,38	0,0453
R+I2	3	2,08	0,693333333	0,005433
R+HA	3	0,12	0,04	0,0001
I1+HA	3	0,13	0,043333333	3,33E-05
I2+HA	3	0,14	0,046666667	0,000133
R+I1+HA	3	0,14	0,046666667	0,000133
R+I2+HA	3	0,19	0,063333333	3,33E-05

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre tratamentos	2,994277	12	0,249523	22,48995	1,04325E-10	2,147926
Dentro dos tratamentos	0,288467	26	0,011095			
Total	3,282744	38				

Fonte: elaborado pela autora.

O teste de Tukey⁶² (Tabela 45) evidencia os agrupamentos de médias estatisticamente iguais da absorção de água por capilaridade dos CPs e a representação das médias no diagrama de caixas (boxsplot), Figura 106, no qual estão apresentados os valores mínimos, máximos, medianas, primeiro e terceiro quartis, evidenciando a dispersão, a assimetria e os valores extremos do conjunto de dados analisado.

⁶² Como o resultado do cálculo da ANOVA apresentou variação significativa foi necessário realizar uma análise complementar pelo teste de TUKEY, para descobrir qual (is) amostra (s) é (são) diferente (s).

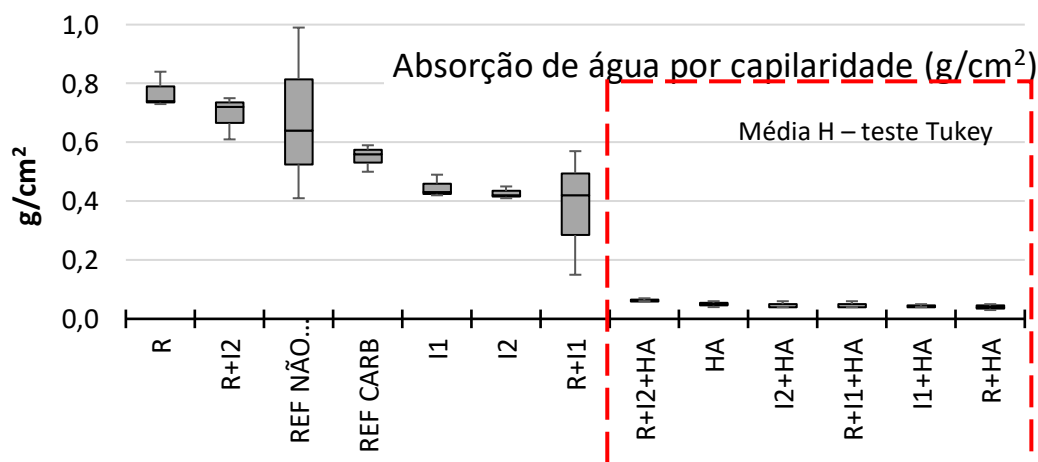
Tabela 45: Resultados do teste de Tukey para os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade, segundo ABNT NBR 7997:2012.

Tratamento	Média da absorção de água por capilaridade (g/cm ²)	Teste de Tukey
R	0,77	A
R+I2	0,69	A B
REF NÃO CARB	0,68	A B C
REF CARB	0,55	A B C D
I1	0,45	B C D E
I2	0,43	B C D E F
R+I1	0,38	C D E F G
R+I2+HA	0,06	H
HA	0,05	H
I2+HA	0,05	H
R+I1+HA	0,05	H
I1+HA	0,04	H
R+HA	0,04	H

Fonte: Elaborado pela autora.

O conjunto de médias estatisticamente iguais, segundo o teste de Tukey mostram que os CPs tratados com realcalinizante (R) e com realcalinizante + inibidor 2 (I2) têm a mesma absorção média (média A na Tabela 45) dos CPs de referência (REF CARB e REF NÃO CARB). Além disso, vale destacar que o conjunto formado pelos CPs tratados com realcalinizante + I2, os de referência (REF CARB e REF NÃO CARB) e pelos CPs tratados com inibidor I1 e inibidor I2 têm a mesma absorção média de água (média B na Tabela 45).

Figura 106: Representação das médias no diagrama de caixas (boxsplot) das análises estatísticas dos resultados do ensaio de absorção por capilaridade, segundo a ABNT NBR 7997:2012.



Fonte: Elaborado pela autora.

Disso resulta que, os inibidores e o realcalinizante, usados isoladamente, analisados nesta pesquisa não influenciam a absorção de água do concreto carbonatado. Como esperado, os CPs tratados com hidrofugante à base de silano e amina, isoladamente ou em associação com outros produtos, têm a mesma absorção (média H na Tabela 45 e figura 106) e reduzem significativamente a absorção de água do concreto carbonatado.

7.3.3. Massa específica, absorção de água e índice de vazios - MAV

Os ensaios do MAV (Massa específica, absorção de água e índice de vazios) foram realizados nos CPs com os produtos/sistemas aplicados no concreto carbonatado e nos CPs de referência (carbonatado e não carbonatado) de acordo com NBR 9778. Nesse ensaio foi incluído mais um tratamento, o hidrofugante à base de silano/siloxano (HS), também aplicado no concreto carbonatado. Este hidrofugante é um produto com características semelhantes ao que foi aplicado nas empenas do edifício Vilanova Artigas na obra de 2012-2015, e obtido com o mesmo fornecedor da obra.

1) Massa específica seca (ρ_s)

A análise de variância mostra que há diferença entre as massas específicas secas (ρ_s) dos CPs ensaiados, como pode ser constatado pelos dados da análise na Tabela 46.

Tabela 46: Resumo com dados de análise de variância da massa específica seca (ρ_s) (g/cm^3) dos CPs com e sem aplicação de produtos/sistemas de proteção de superfície.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
R	2	4,57	2,29	0,00045
R + HA	2	4,50	2,25	0,0002
I1	2	4,57	2,29	5E-05
I1 + HA	2	4,53	2,27	0,00045
I2	2	4,55	2,28	5E-05
I2 + HA	2	4,49	2,25	5E-05
HA	2	4,55	2,28	5E-05
HS	2	4,52	2,26	0,0002
R + I1	2	4,53	2,27	5E-05
R + I1 + HA	2	4,56	2,28	0,0002
R + I2	2	4,54	2,27	0,0002
R + I2 + HA	2	4,57	2,29	5E-05
REF CARB	2	4,46	2,23	0,0002
REF NÃO CARB	2	4,43	2,22	5E-05

continua

Continuação da tabela 46						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,01196071	13	0,00092	5,72479	0,0013	2,50726
Dentro dos grupos	0,00225	14	0,000161			
Total	0,01421071	27				

Fonte: Elaborado pela autora.

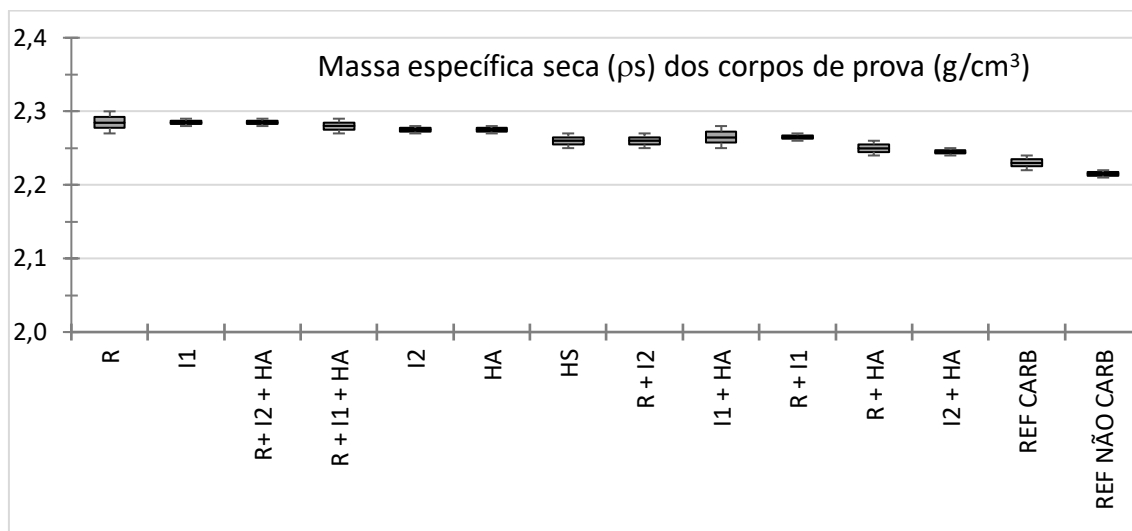
O teste de Tukey (Tabela 47) mostra os agrupamentos de médias estatisticamente iguais da massa específica seca dos CPs e a representação das médias no diagrama de caixas (boxsplot - Figura 107) no qual estão apresentados os valores mínimos, máximos, medianas, primeiro e terceiro quartis, evidenciando a dispersão, a assimetria e os valores extremos do conjunto de dados analisado.

Tabela 47: Resultados do teste de Tukey para os resultados de massa específica seca (ρ_s) (g/cm^3).

Tratamento	Massa específica seca (ρ_s) (g/cm^3)	Tipo de média após teste de Tukey	
R	2,29	A	
I1	2,29	A	
R+ I2 + HA	2,29	A	
R + I1 + HA	2,28	A	B
I2	2,28	A	B
HA	2,28	A	B
HS	2,28	A	B
R + I2	2,27	A	B
I1 + HA	2,27	A	B
R + I1	2,27		B
R + HA	2,25		B C
I2 + HA	2,25		B C
REF CARB	2,23		B C
REF NÃO CARB	2,22		C

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 107: Massa específica seca (ρ_s) dos corpos de prova sem e com produtos/sistemas de proteção de superfície.



Fonte: Elaborado pela autora.

A massa específica seca tem uma variação mais discreta e para quase todos os tratamentos os valores médios são maiores aos do concreto de referência carbonatado (REF CARB) e não carbonatado (REF NÃO CARB). Segundo o teste de Tukey os tratamentos com realcalinizante e hidrofugante à base de silano e amina (R+HA) e com inibidor 2 e hidrofugante à base de amina (I2+HA) têm médias iguais às médias dos CPs de referência (média C, Tabela 47). Os resultados das análises não evidenciam uma tendência de influência dos produtos/sistemas aplicados na massa específica seca do concreto carbonatado.

2) Absorção de água e índice de vazios

Os resultados de absorção de água e índice de vazios têm correspondência quando ao ordenamento dos valores médios, portanto são apresentados em conjunto.

A análise de variância também apontou diferença entre médias para as duas determinações, absorção de água por imersão e índice de vazios, cujos dados são apresentados nas tabelas 48 e 49, respectivamente.

Tabela 48: Resumo com dados de análise de variância da absorção de água por imersão (%) dos CPs com e sem aplicação de produtos/sistemas de proteção de superfície.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
R	2	25,1	12,6	1,125
R + HA	2	19,1	9,6	5,445
I1	2	24,5	12,3	0,245
I1 + HA	2	6,5	3,3	0,845
I2	2	11,5	5,8	0,005
I2 + HA	2	8,4	4,2	0,02
HA	2	3,6	1,8	0
HS	2	12,7	6,4	0,005
R + I1	2	11,8	5,9	0,02
R + I1 + HA	2	9,4	4,7	0,02
R + I2	2	11,3	5,7	0,125
R+ I2 + HA	2	9	4,5	0,02
REF CARB	2	11,8	5,9	0,02
REF NÃO CARB	2	12,2	6,1	0,02

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	251,7460714	13	19,3651	34,2528	2,5E-08	2,50726
Dentro dos grupos	7,915	14	0,56536			
Total	259,6610714	27				

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 49: Resumo com dados de análise de variância do índice de vazios (%) dos CPs com e sem aplicação de produtos/sistemas de proteção de superfície

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
R	2	25,1	12,6	1,125
R + HA	2	19,1	9,6	5,445
I1	2	24,5	12,3	0,245
I1 + HA	2	14,7	7,4	4,805
I2	2	26,2	13,1	0,02
I2 + HA	2	18,8	9,4	0,08
HA	2	8,2	4,1	0,02
HS	2	28,5	14,3	0,005
R + I1	2	26,6	13,3	0,08
R + I1 + HA	2	21,4	10,7	0,02
R + I2	2	25,7	12,9	0,605
R+ I2 + HA	2	20,7	10,4	0,045
REF CARB	2	26,3	13,2	0,045
REF NÃO CARB	2	27,1	13,6	0,045

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	208,9075	13	16,069808	17,8766	1,7E-06	2,50726
Dentro dos grupos	12,585	14	0,8989286			
Total	221,4925	27				

Fonte: Elaborado pela autora.

Analogamente, o teste de Tukey mostra os agrupamentos de médias estatisticamente iguais da absorção de água por imersão (%) e do índice de vazios (%) dos CPs (Tabelas 50 e 51, respectivamente). A representação das médias no diagrama de caixas (boxsplot - Figuras 108 e 109, respectivamente) nos quais estão apresentados os valores mínimos, máximos, medianas, primeiro e terceiro quartis, evidenciando a dispersão, a assimetria e os valores extremos do conjunto de dados analisado.

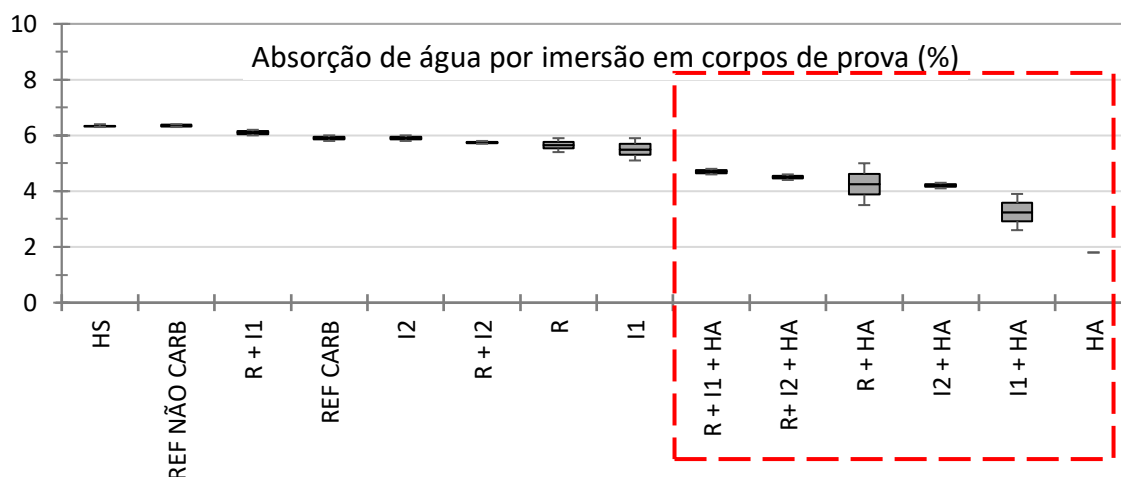
No ensaio de absorção de água por imersão, segundo a NBR 9778 (2005), a maior média do tratamento com hidrofugante à base de silano/siloxano (HS) se opõe à menor média de água absorvida pelos CPs tratados com hidrofugante à base de silano e amina (HA). As médias são estatisticamente distintas (Tabela 50), além de numericamente estarem muito distantes, respectivamente 6,4 e 1,8%, o que sinaliza o melhor desempenho do HA na proteção do concreto, embora as condições do ensaio difiram da condição de uso corrente do hidrofugante na engenharia, como proteção de superfícies de materiais porosos.

Tabela 50 Resultados do teste de Tukey para os resultados de absorção de água por imersão (%) dos CPs com e sem aplicação de produtos/sistemas de proteção de superfície

Tratamento	Absorção de água média MAV (%)	Tipo de média após teste de Tukey	
HS	6,40	A	
REF NÃO CARB	6,10	A	
R + I1	5,90	A	
REF CARB	5,90	A	
I2	5,75	A	
R + I2	5,65	A	
R	5,50	A	
I1	5,35	A	B
R + I1 + HA	4,70	A	B
R+ I2 + HA	4,50	A	B
R + HA	4,25	A	B
I2 + HA	4,20	A	B
I1 + HA	3,25		B C
HA	1,80		C

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 108: Absorção de água por imersão (%) dos corpos de prova sem e com produtos/sistemas de proteção de superfície.



Fonte: Elaborado pela autora.

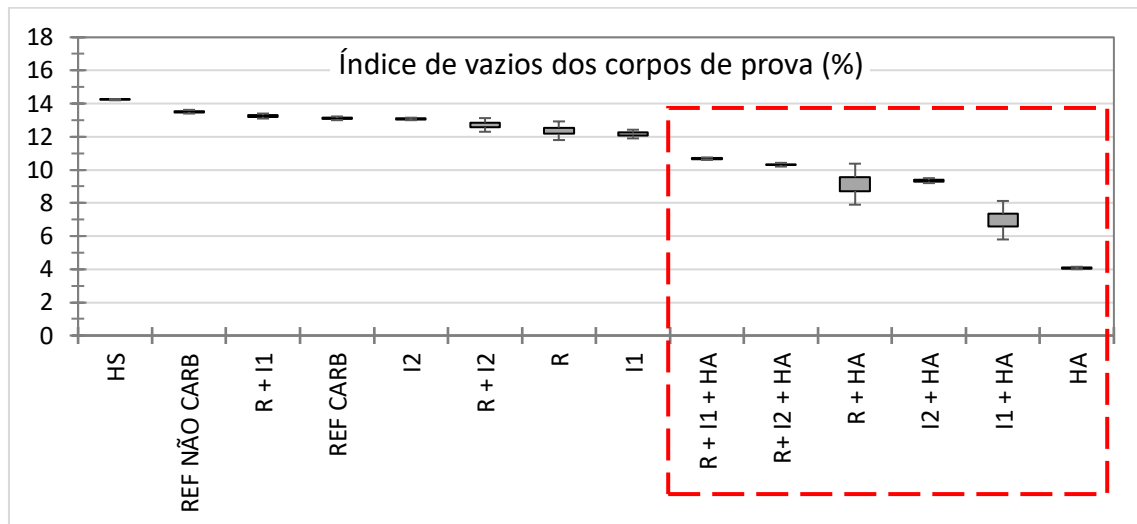
O teste de Tukey (Tabela 50) indica três médias para a absorção de água por imersão, sendo que os tratamentos classificados como média A apresentam valores médios de absorção de água entre 6,4 e 4,2%. Um segundo grupo de médias, B, incluem o inibidor 1 (I1) e todas os sistemas contendo HA. O terceiro grupo de médias, C, inclui a associação do inibidor 1 (I1) e HA e o HA aplicado isoladamente. O hidrofugante à base de silano e amina evidencia a redução da absorção de água do concreto carbonatado nas condições do ensaio, aplicado isoladamente ou em associação com outros produtos.

Tabela 51: Resultados do teste de Tukey para os resultados de índice de vazios (%) dos CPs com e sem aplicação de produtos/sistemas de proteção de superfície

Tratamento	Índice de vazios (%)	Tipo de média após teste de Tukey					
HS	14,3	A					
REF NÃO CARB	13,6	A	B				
R + I1	13,3	A	B	C			
REF CARB	13,2	A	B	C	D		
I2	13,1	A	B	C	D		
R + I2	12,9	A	B	C	D		
R	12,6	A	B	C	D		
I1	12,3	A	B	C	D		
R + I1 + HA	10,7		B	C	D	E	
R + I2 + HA	10,4		B	C	D	E	
R + HA	9,6			C	D	E	
I2 + HA	9,4				D	E	
I1 + HA	7,4					E	F
HA	4,1						F

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 109: Índice de vazios (%) dos corpos de prova sem e com produtos/sistemas de proteção de superfície.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os valores médios do índice de vazios, embora evidencie o mesmo ordenamento das médias da absorção de água por imersão, apresenta outros agrupamentos de médias, segundo o teste de Tukey (Tabela 51).

O hidrofugante à base de silano/siloxano (HS), os inibidores (I1 e I2) e o realcalinizante usados isoladamente ou em conjunto, têm índice de vazios médio igual ao dos concretos de referência (REF CARB e REF NÃO CARB).

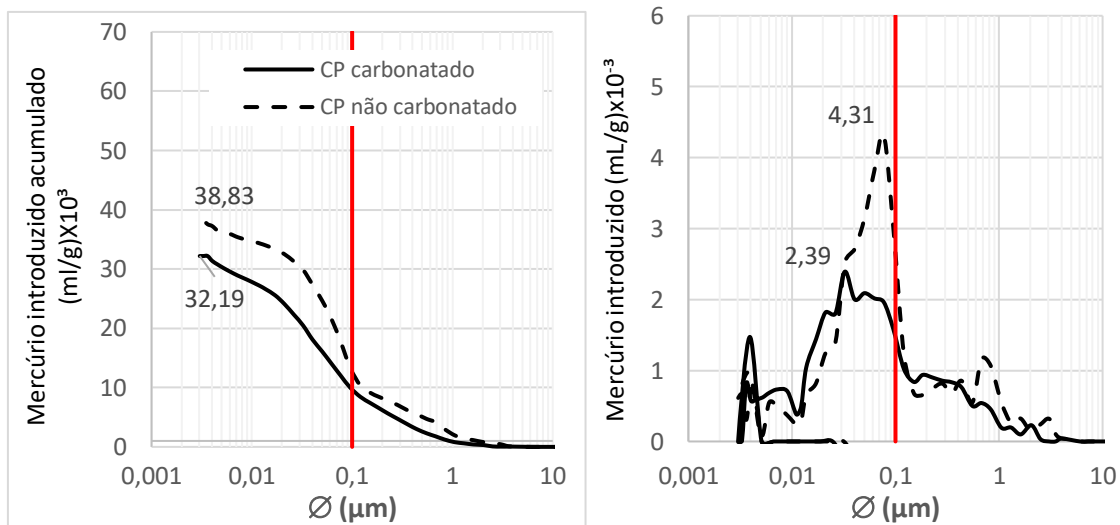
Em termos práticos observa-se que o hidrofugante à base de silano e amina (HA), isoladamente ou associado a outros produtos, reduz o índice de vazios se comparado ao concreto carbonatado. O HA isoladamente apresenta a menor média, mas que é estatisticamente igual ao índice de vazios dos CPs tratados com inibidor 1 (I1) e+ HA.

7.3.4. Porosimetria de intrusão de mercúrio - PIM;

Na figura 110, são apresentados os resultados da porosimetria de intrusão de mercúrio (PIM) das amostras carbonatada e não carbonatada dos CPs. Observa-se um padrão concordante com dados da literatura de redução da porosidade do concreto com a carbonatação. Além disso, também há evidência de redução de poros com diâmetro igual ou inferior a $0,1\mu\text{m}$ (100nm), indicado pela linha Vermelha, que representa o limite do tamanho dos poros ($\varnothing \geq 0,1\mu\text{m}$) que exercem maior influência

no transporte de massa do concreto por capilaridade, como disposto em Meng (1994) e discutido no capítulo 3. Esses resultados são consistentes com os resultados obtidos para as amostras carbonatadas extraídas no concreto das empenas do edifício Vilanova Artigas.

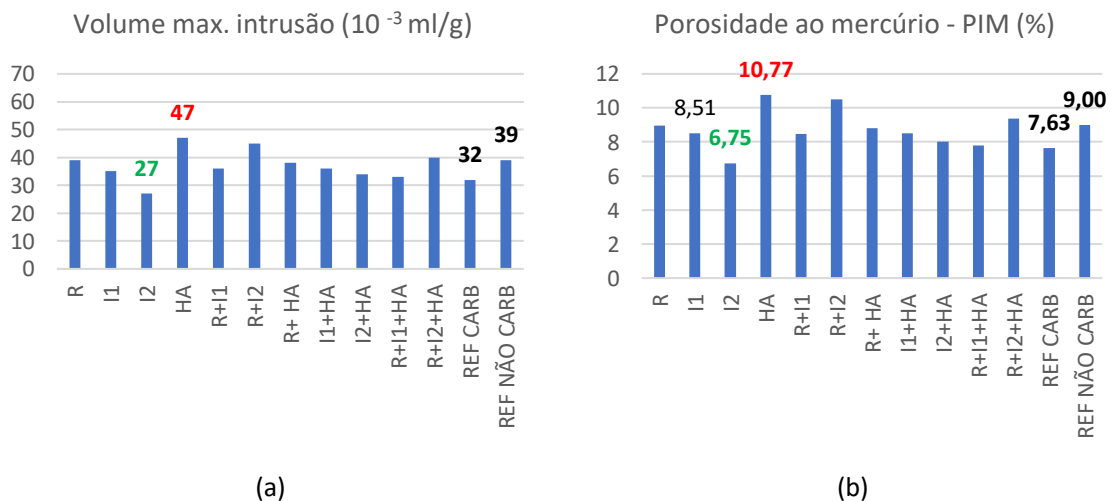
Figura 110: Amostras do concreto carbonatado e não carbonatado em ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio com volume de mercúrio introduzido acumulado e mercúrio introduzido em relação ao diâmetro dos poros contidos na amostra, retirado dos corpos de prova moldados em laboratório.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados do ensaio de PIM (máximo volume de intrusão de mercúrio e porosidade ao mercúrio), reunindo todos os CPs tratados com os produtos/sistemas, são apresentados na Figura 111.

Figura 111: Resultados de porosimetria de intrusão de mercúrio (a) volume máximo de intrusão de mercúrio e (b) porosidade ao mercúrio.



Fonte: Elaborado pela autora.

Inicialmente destaca-se que para os CPs de referência, carbonatado e não carbonatado, os resultados da porosidade ao mercúrio também são consistentes com os resultados do concreto extraído das empenas do edifício Vilanova Artigas. Na Figura 111 observa-se que a porosidade ao mercúrio da REF CARB e REF NÃO CARB é, respectivamente, 7,63 e 9,0%. Os resultados dos ensaios feitos das amostras carbonatadas das empenas correspondem a 7,5% e 9,1%, respectivamente para fachadas NE e NO. Os resultados das amostras não carbonatadas das empenas correspondem a 11,9% e 11,6%, respectivamente, para as fachadas NE e NO.

Os demais dados da Figura 111 revelam que, nos ensaios realizados, o inibidor 2 (I2) levou ao menor volume introduzido e à menor porosidade ao mercúrio, enquanto o hidrofugante à base de silano e amina (HA) teve o efeito inverso, levando ao maior aumento do volume introduzido e da porosidade ao mercúrio.

Karthick *et al.* (2016) utilizaram a porosimetria de intrusão de mercúrio para avaliar a alteração da porosidade no concreto com o uso de inibidores de corrosão. Os resultados dos pesquisadores indicam redução de quase 50% na porosidade após aplicação de inibidor de corrosão. No caso dos resultados das avaliações realizadas nesta pesquisa nas amostras extraídas dos corpos de prova de concreto carbonatado com os inibidores de corrosão 1 e 2 os dois produtos apresentaram resultados diferentes. O inibidor 1 (I1) apresentou porosidade cerca de 11,5% superior que o concreto de referência carbonatado enquanto o inibidor de corrosão 2 (I2) apresentou uma redução também de cerca de 11,5% comparado com o concreto referência carbonatado.

Os resultados da porosidade ao mercúrio são válidos para análises comparativas entre amostras ensaiadas segundo a mesma técnica, portanto não podem ser cotejados aos resultados de absorção de água, no entanto com esse ensaio pode-se observar que a aproximação da distribuição de poros e porosidade entre as amostras das empenas do edifício e os CPs adotados como referência para os ensaios exploratórios realizados nesta pesquisa.

7.3.5. Microscopia óptica e Microscopia eletrônica de varredura

Foram realizadas investigações exploratórias para observar a possível alteração da microestrutura da barra de aço na presença de inibidor de corrosão. A análise ao microscópio eletrônico foi precedida por microscopia óptica para detectar a melhor região da barra para investigação. Portanto, nos itens a seguir serão apresentados os resultados obtidos nestas duas análises.

7.3.5.1. Microscopia óptica

Inicialmente foi realizada uma avaliação visual e selecionadas as seguintes barras de aço extraídas do concreto (item 7.1.1): barra do CP do concreto referência carbonatado, barra Ref C5, que apresentou cerca de 30% de área corroída com aspecto visual com acúmulo moderado de produtos de corrosão (Figura 112) e barra do CP de concreto tratado com o inibidor 1, barra C7, que apresentou cerca de 15% de área corroída com aspecto visual com acúmulo significativo de produtos de corrosão (Figura 113). As regiões destacadas com o retângulo amarelo foram as áreas analisadas na Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV.

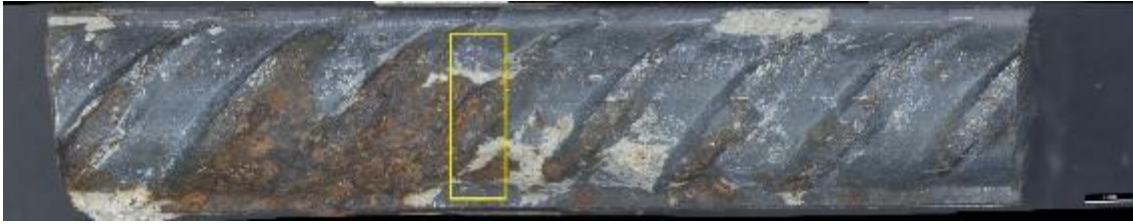
Figura 112: Microscopia óptica da barra de aço do CP do concreto de referência carbonatado com definição da área de análise na MEV.



Fotos: LCT, 2022.

As áreas escolhidas na avaliação visual apresentaram indícios de corrosão de moderada a significativa com coloração amarronzada, além de resíduos do concreto.

Figura 113: Microscopia óptica da barra de aço do corpo de prova carbonatado no qual foi aplicado o inibidor 1 com definição da área de análise na MEV.



Fotos: LCT, 2022.

7.3.5.2. Microscopia eletrônica de varredura - MEV

São ainda escassos resultados de pesquisas publicadas sobre inibidores de corrosão usando a MEV. Alguns trabalhos como o de Bavarian (2004); Shi e Sun (2012); Karthick, et al (2016) e Zhang, Zhu, Qu (2019) utilizaram análises de MEV, no entanto o foco das três primeiras pesquisas é o concreto ou barra de aço expostos à ação de cloreto em laboratório; a terceira utilizou realcalinizante e inibidor de corrosão aplicados em CPs por meio de técnicas eletroquímicas e de submersão como forma de potencializar a impregnação das espécies ativas no concreto.

O preparo e condicionamento das amostras das pesquisas citadas diferem dos ensaios programados nesta tese que buscou estabelecer correlação com as condições encontradas em campo.

A Figura 114 apresenta detalhe da área na barra extraída do concreto referência analisada na MEV.

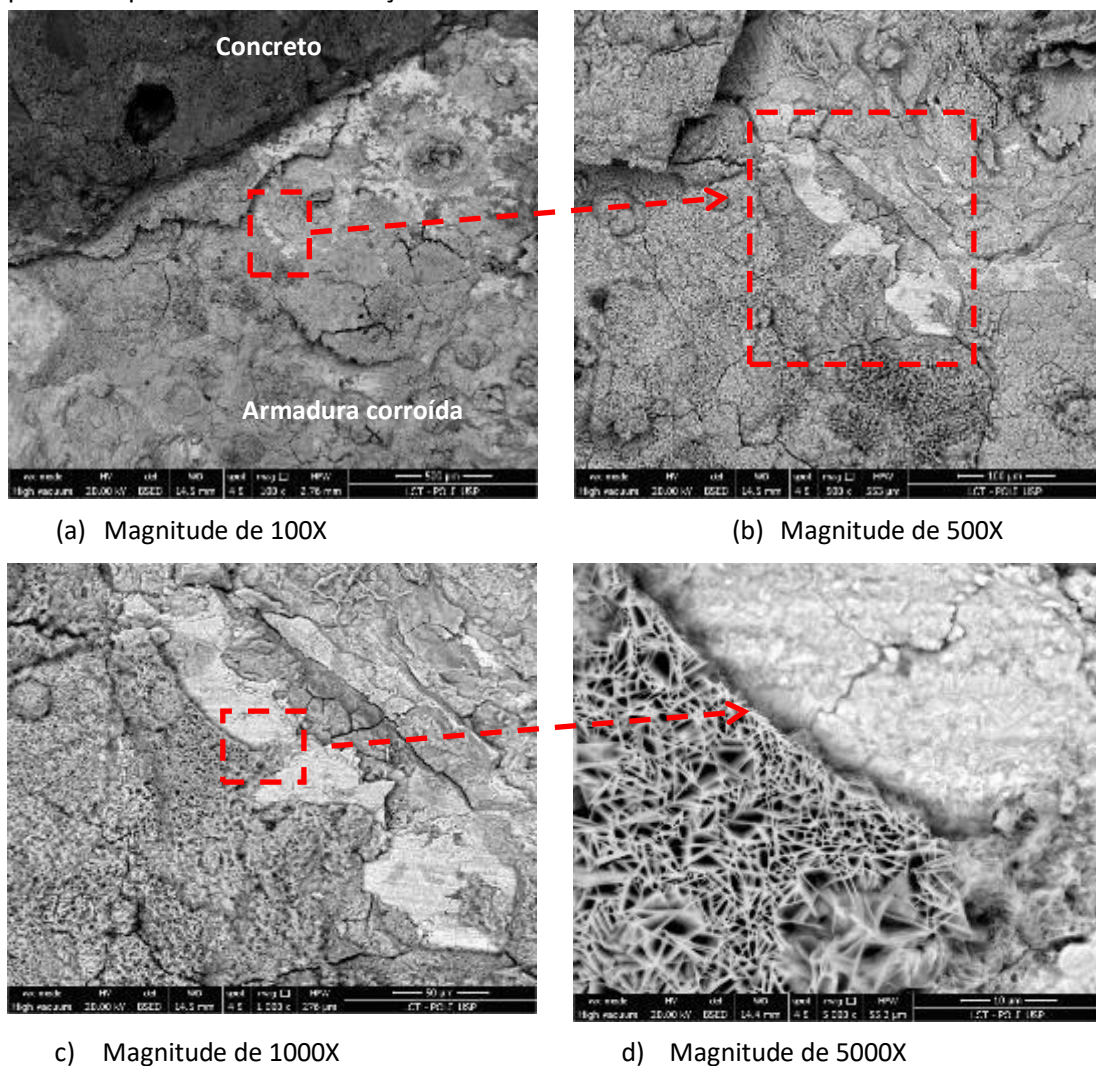
Figura 114: Imagem de microscopia óptica da barra de aço extraída do concreto referência, Ref C5, que apresentou cerca de 30% de área corroída, com acúmulo moderado de produtos de corrosão. O detalhe delimita a área analisada na MEV.



Fotos: LCT, 2022.

Na Figura 115 as imagens de (a) a (d) da MEV têm ampliação de 100, 500, 1000 e 5000 vezes, respectivamente. Nestas imagens pode-se perceber um aspecto semelhante a placa de descamação da superfície da barra e no detalhe da imagem observou-se uma estrutura lisa que indica a superfície do aço sem acúmulo de produtos de corrosão e outra porção da barra com padrão típico de produto de corrosão, estrutura laminar aberta (*bird's nest shape*) (ALCÁNTARA et al, 2016).

Figura 115: Barra de referência. Imagens da MEV com aumento de 100, 500, 1000 e 5000 vezes. Em (d), na parte superior, superfície do aço sem produtos de corrosão; na parte inferior produto típico de corrosão do aço.

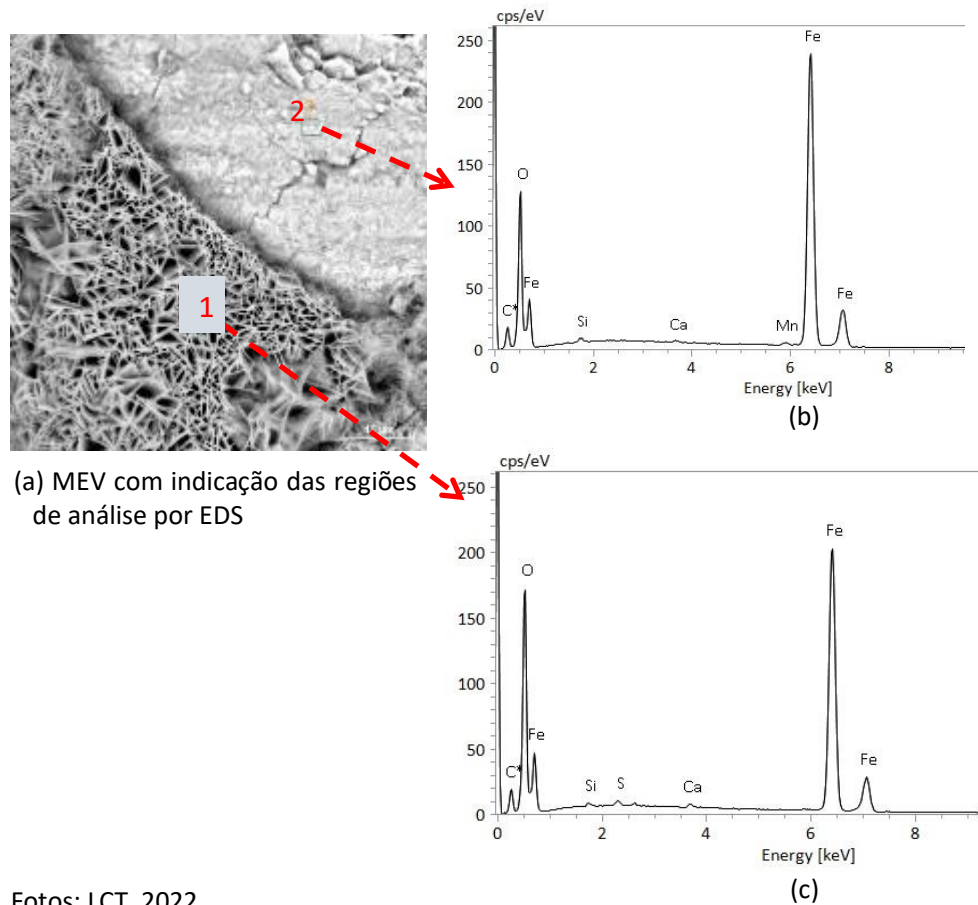


Fotos: LCT, 2022.

A Figura 116 mostra a micrografia da barra e a contagem de elementos por Espectroscopia de raios X de energia dispersiva - EDS. A região 2 (b) com textura mais

lisa tem menor contagem de oxigênio (130 cps/eV) se comparada à região 1 (c) (170 cps/eV) onde há acúmulo de produtos típicos da corrosão.

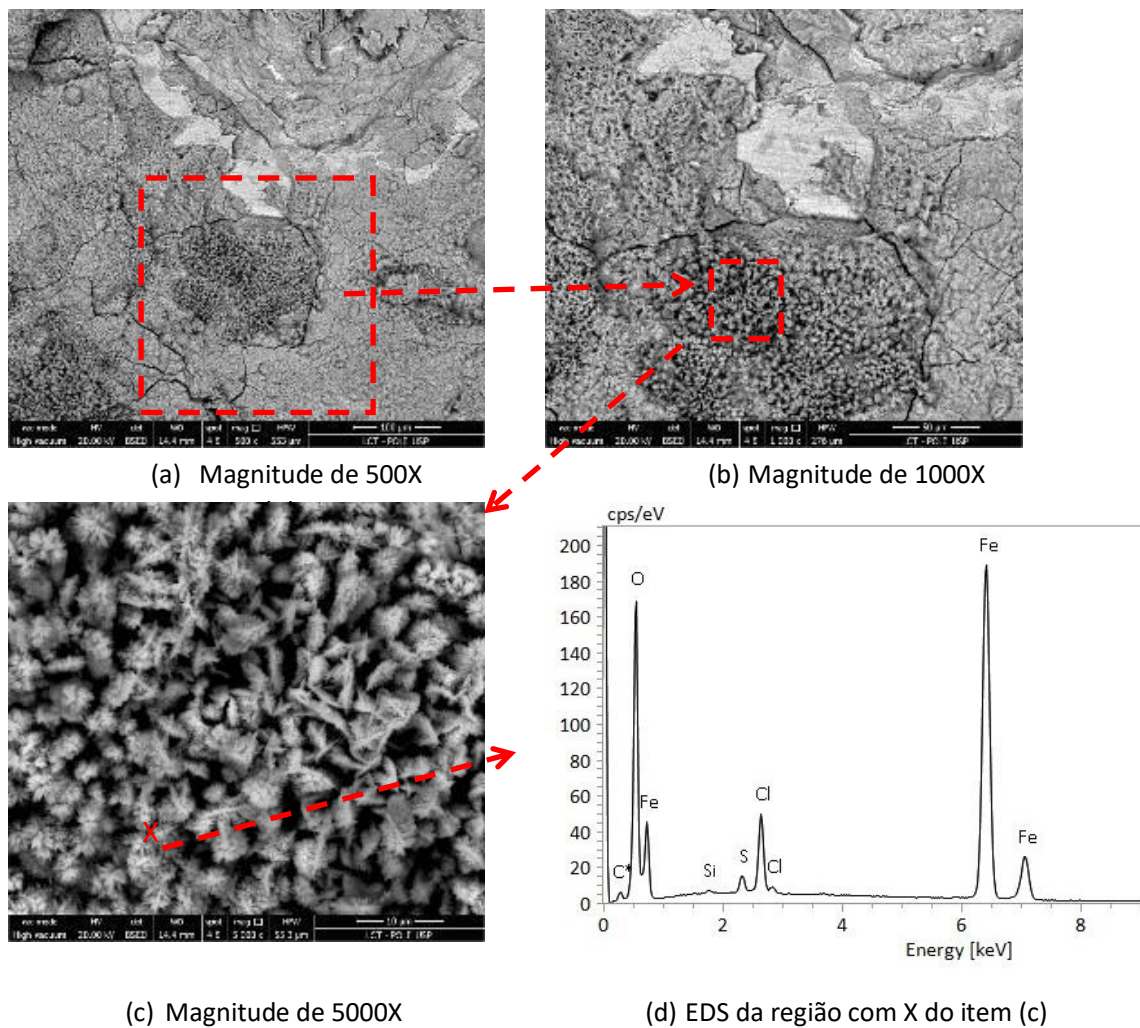
Figura 116: Barra de referência. Análise da superfície da barra de referência em MEV e EDS.



Fotos: LCT, 2022.

Na Figura 117, a análise foi realizada numa área mais abaixo do que a anterior e pode-se observar uma estrutura com textura fibrosa (c) também característica de produtos de corrosão do aço (FONNA et al, 2021; DUFFÓ et al, 2004). A análise por EDS mostra uma contagem da relação O/Fe próxima à da Figura 116 (c).

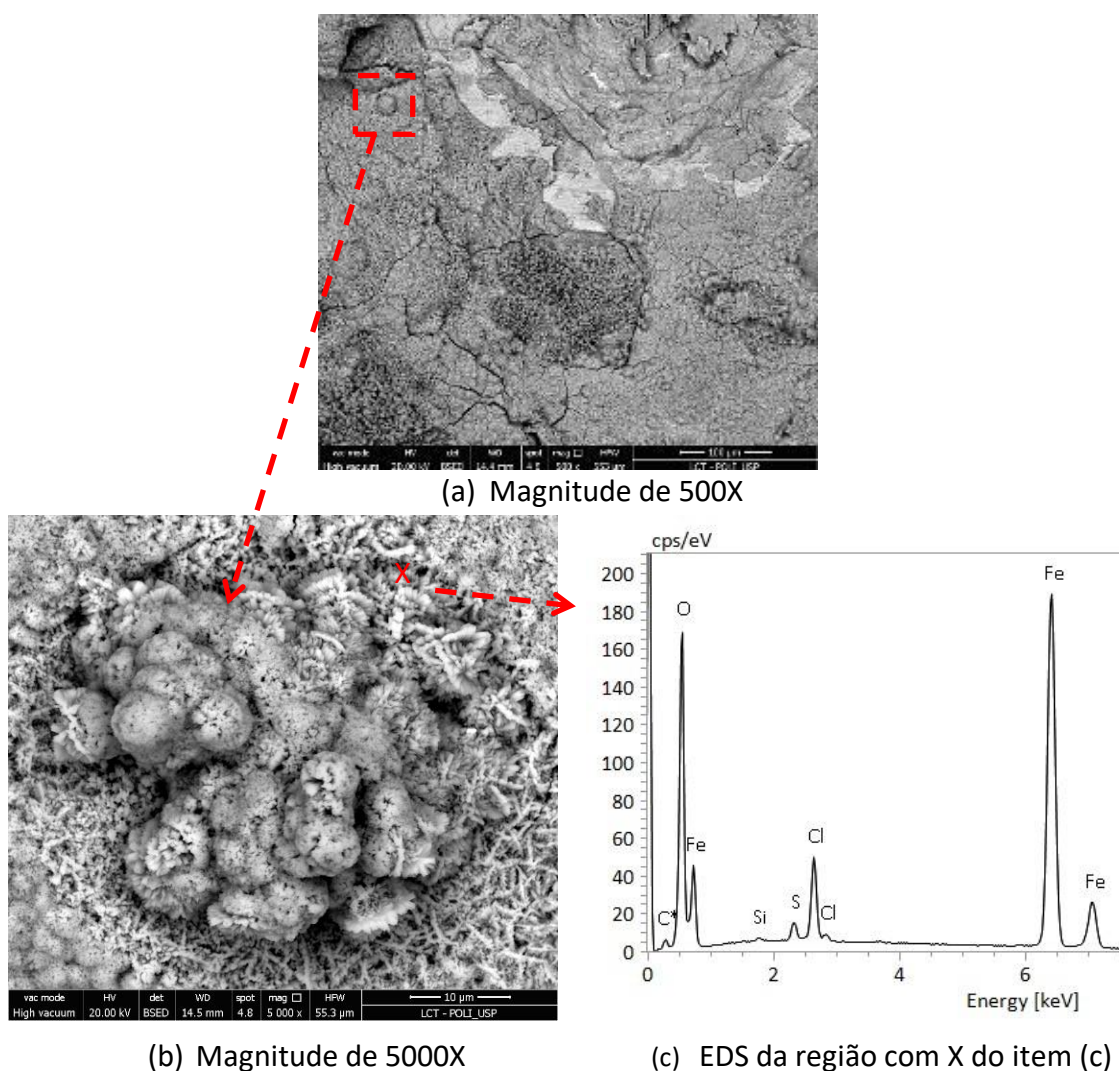
Figura 117: Barra de referência. Análise da superfície da barra de referência em MEV e EDS.



Fotos: LCT, 2022.

Ainda na barra do concreto de referência foi analisada uma terceira estrutura (Figura 118), localizada numa área um pouco acima e a direita das regiões anteriormente analisadas onde se observou uma estrutura globular também característica de produto de corrosão (*cotton ball*) (FONNA et al, 2021). Na Figura 117 item (d) é ilustrada a análise com EDS num ponto específico com identificação de elevada contagem de oxigênio (170 cps/eV), com valores próximos e relações de contagem O/Fe próximas às análises ilustradas em outras regiões (Figura 116 e Figura 117) nas quais foram detectados produtos de corrosão.

Figura 118: Barra de referência. Análise da superfície da barra de referência em MEV e EDS.



Fotos: LCT, 2022.

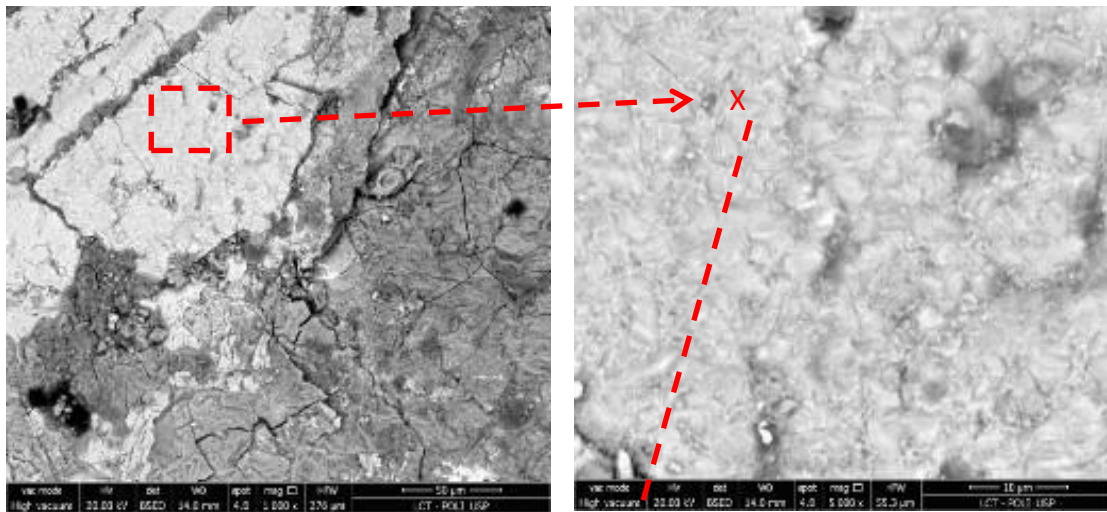
As Figuras 119, 120 e 121 apresentam estes estudos em MEV e EDS na barra extraída do corpo de prova de concreto tratado com inibidor de corrosão 1. Mesmo tendo a corrosão em cerca de 15% de área corroída acúmulo significativo de produtos de corrosão, os resultados da contagem dos elementos (O e Fe) foram distintos (Figura 119).

Nesta análise de EDS, Figura 119 item (d), pode-se observar que a concentração de oxigênio na região analisada ficou inferior (contagem 110 cps/eV) aos valores apresentados nas regiões com produtos de corrosão na barra do CP de referência.

Figura 119: Barra inserida em concreto tratado com inibidor de corrosão 1 (I1). Imagem em microscopia óptica (a) e análise em MEV de (b) a (c) (ampliações de 1000X e 5000X). Em (d) análise de EDS.

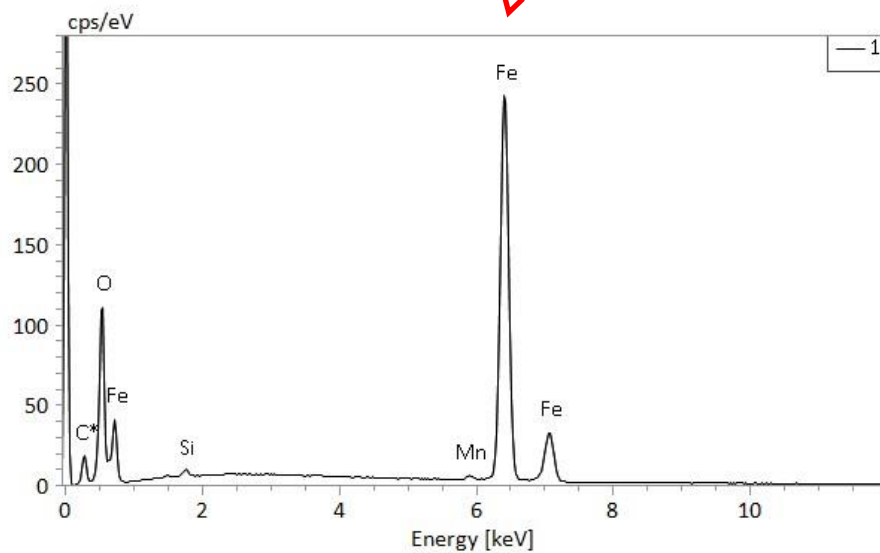


(a) Detalhe da microscopia optica da delimitação da área de análise no MEV



(b) Magnitude de 1000X

(c) Magnitude de 5000X



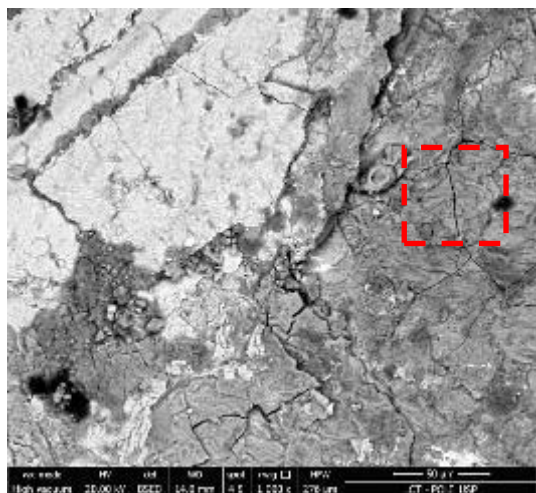
(d) EDS da região indicada do item (c)

Fotos: LCT, 2022

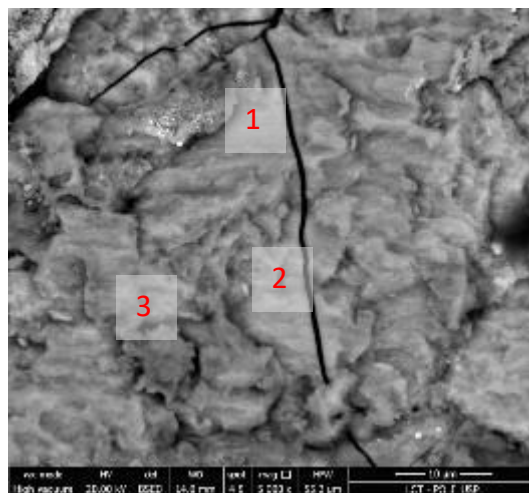
A figura 120 analisa uma outra região da barra, um pouco a direita do primeiro ponto, onde são visíveis fissuras nas imagens ampliadas (1000 e 5000 vezes). Análise com EDS em 3 pontos indicam menor contagem de oxigênio em relação ao ferro,

levando a uma menor relação O/Fe. Na Figura 120 (e) pode-se observar um aumento na intensidade de cálcio, quando comparado com as análises (c) e (d), provavelmente resultante de fragmentos do concreto.

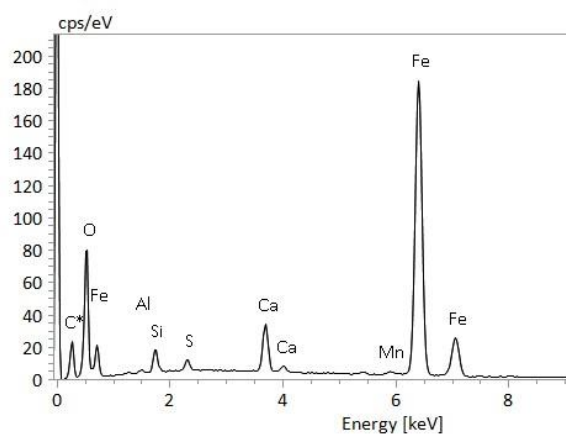
Figura 120: análise em MEV e EDS da barra com aplicação do inibidor de corrosão 1 na superfície do concreto.



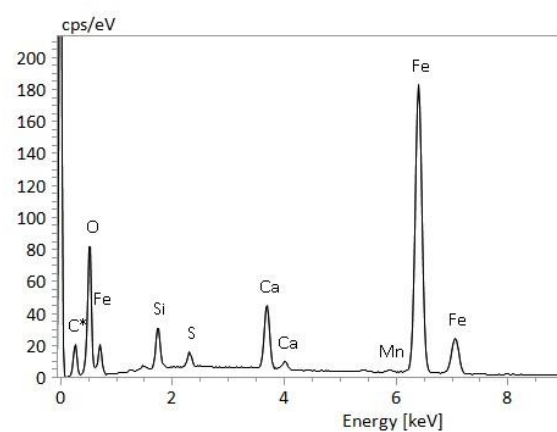
(a) Magnitude de 1000X



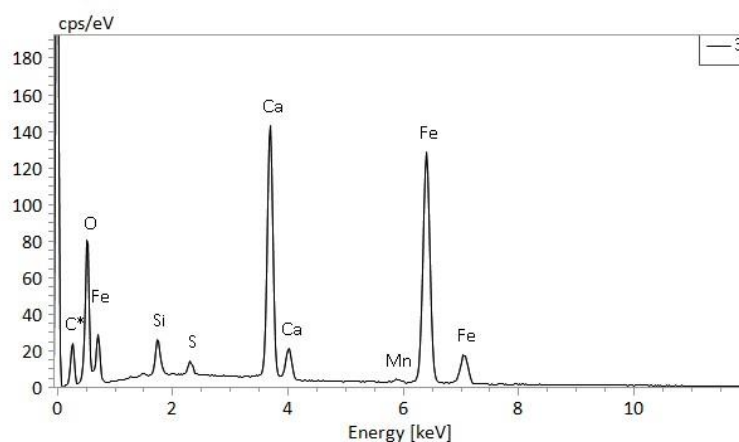
(b) Magnitude de 5000X



(c) EDS da região 1 do item (b)



(d) EDS da região 2 do item (b)

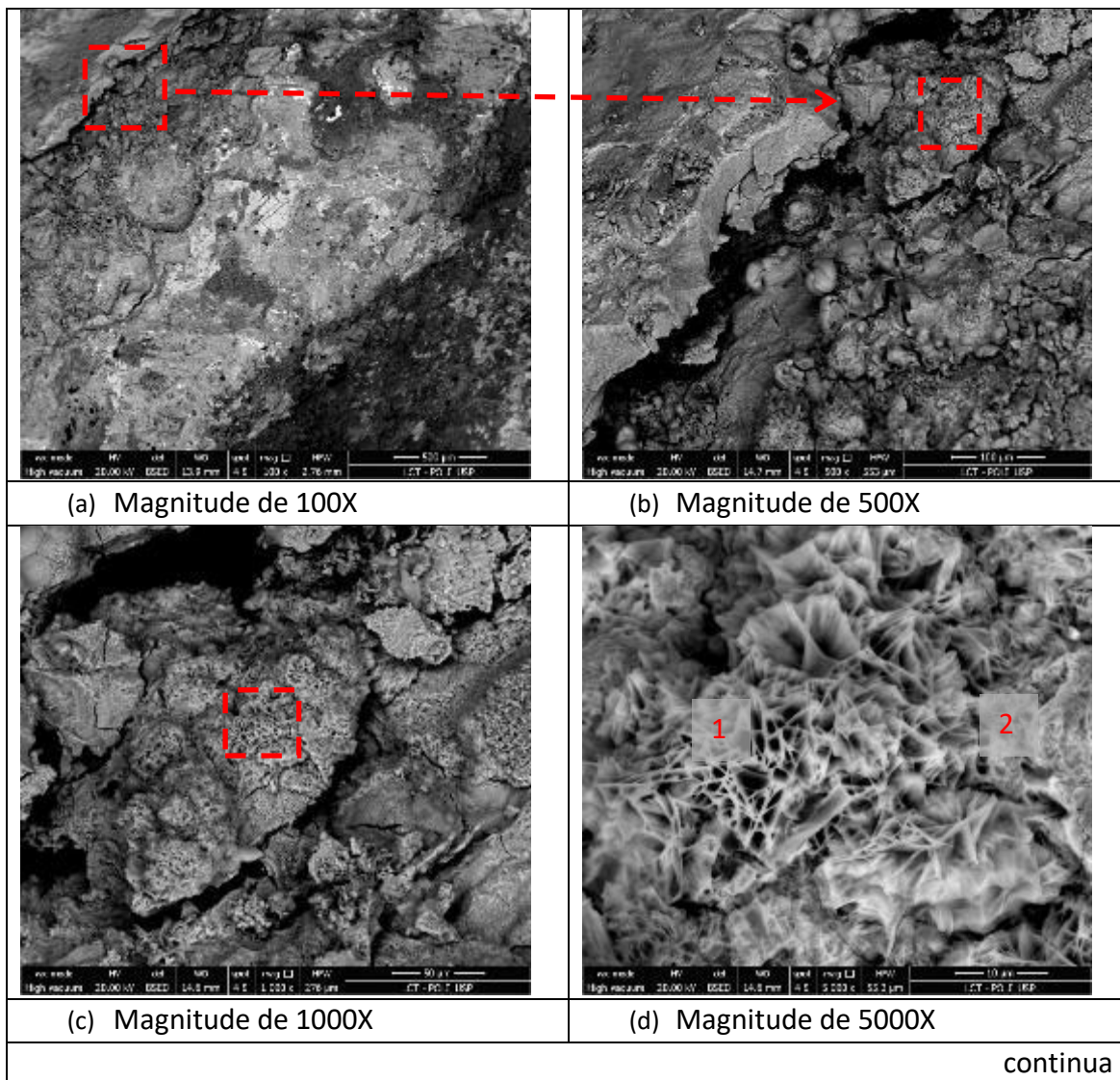


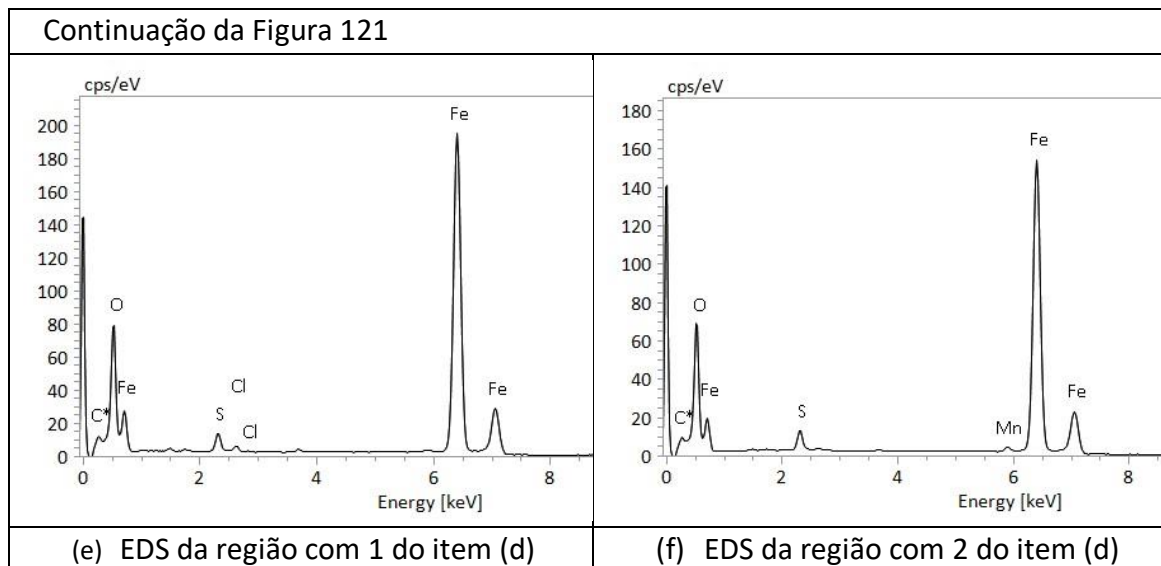
(e) EDS região 3 do item (b)

Nos pontos analisados na Figura 120 a contagem de oxigênio ficou abaixo de 100 (aproximadamente 80 cps/eV), inferior aos valores obtidos na análise da barra do CP do concreto de referência.

Por fim, a figura 121 analisa uma terceira área da barra extraída do concreto tratado com inibidor 1, próxima às áreas analisadas anteriormente. Nessa área a textura superficial se mostra mais rugosa, semelhante às estruturas já apresentadas na barra do CP extraído do concreto referência representado na Figura 115 (d). Com ampliação similar, de 5000 vezes, são visíveis estruturas em forma de flor, típicas dos produtos de corrosão, no entanto na análise de EDS, nos pontos 1 e 2, a contagem de oxigênio se mantém na faixa de 80 cps/eV, e a relação O/Fe inferior às relações vistas nas imagens da barra do concreto de referência, Figura 116 (c).

Figura 121: análise em MEV e EDS da barra do CP tratado com inibidor de corrosão 1.





Fotos: LCT, 2022

As relações O/Fe observadas entre as análises feitas na barra do CP de referência e na barra do CP tratado com inibidor 1 parecem ser consistentes com os resultados dos trabalhos de Shi e Sun (2012). Os pesquisadores (SHI; SUN, 2012) identificaram que a redução da relação atômica O/Fe, nas medidas feitas por EDS, corresponde ao efeito de proteção dos inibidores de corrosão investigados. Shi e Sun (2012) descrevem que entre os inibidores estudados o que ofereceu o melhor nível de proteção foi o inibidor BTA de fórmula ($C_6H_5N_3$), um produto identificado pelos pesquisadores como sendo, provavelmente, um inibidor misto. Shi e Sun (2012) apontam que a variação entre a relação de oxigênio e ferro nas análises realizadas sugere a capacidade de proteção dos inibidores investigados.

Quanto à morfologia das estruturas foram observados oxi-hidróxidos de ferro comumente detectados no aço corroído em atmosfera que não contém cloretos, relacionados às fases lepidocrocita (γ -FeOOH) e goethita (α -FeOOH), citados por vários autores na literatura especializada na área de corrosão do aço. Estruturas laminares em forma de pétalas ou flores (flower-like pattern), na Figura 115 (d) e na Figura 121 (d), podem ser atribuídas à lepidocrocita (MATOS et al, 2019; ALCÁNTARA et al, 2019; KOLEVA et al, 2006; DUFFÓ et al, 2004; RAMAN; NASRAZADANI; SHARMA, 1989). Estruturas aciculares são típicas da goethita ALCÁNTARA et al, 2019) que pode se configurar como uma fase amorfa ou semicristalina com a aparência de globular (cotton ball), Figura 118 (b) (RAMAN; NASRAZADANI; SHARMA, 1989). Estruturas

granulares (sandy grains) podem ser atribuídas à lepidocrocita (RAMAN; NASRAZADANI; SHARMA, 1989), Figura 117 (c). Fonna et al (2021) e Duffó et al (2004) indicam que estruturas com diferentes tamanhos e características morfológicas são encontradas entre os produtos de corrosão; a identificação das fases presentes em cada uma delas depende de técnicas auxiliares que não foram adotadas nesta pesquisa.

Cabe explicitar que no EDS não foi detectado nitrogênio (N), que seria um indício da presença do inibidor junto à barra. Esse resultado, provavelmente, se deve à baixa concentração dos inibidores junto à barra de aço e que pode ter sido agravado pela baixa sensibilidade da técnica, apontada por Vieira et al (2021), na detecção de elementos mais leves que o sódio (Na) e pelo conhecido fenômeno da perda de elementos voláteis durante a excitação na análise.

Portanto o que se pode observar nesta avaliação exploratória em MEV e EDS das barras extraídas do concreto referência e do concreto com a aplicação de inibidor a base de amina foi que mesmo em regiões onde houve a presença no aço dos produtos de corrosão intensa, na barra com o inibidor de corrosão, as análises em EDS indicaram que os níveis de oxigênio apresentaram-se inferiores aos corpos de prova do concreto referência, podendo sugerindo a formação da camada protetiva na barra de aço resultante da aplicação do inibidor de corrosão de superfície.

Apesar de ainda carecer de maior aprofundamento de estudos para confirmar os resultados apresentados por Castro e Paiva, (2010), Meyer, (2017) e Lipošćak, Meyer e Mikšić (2019), parece haver indícios de que presença do produto aplicado (inibidor 1) no concreto provoca alterações no meio.

7.4. SÍNTESE DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO

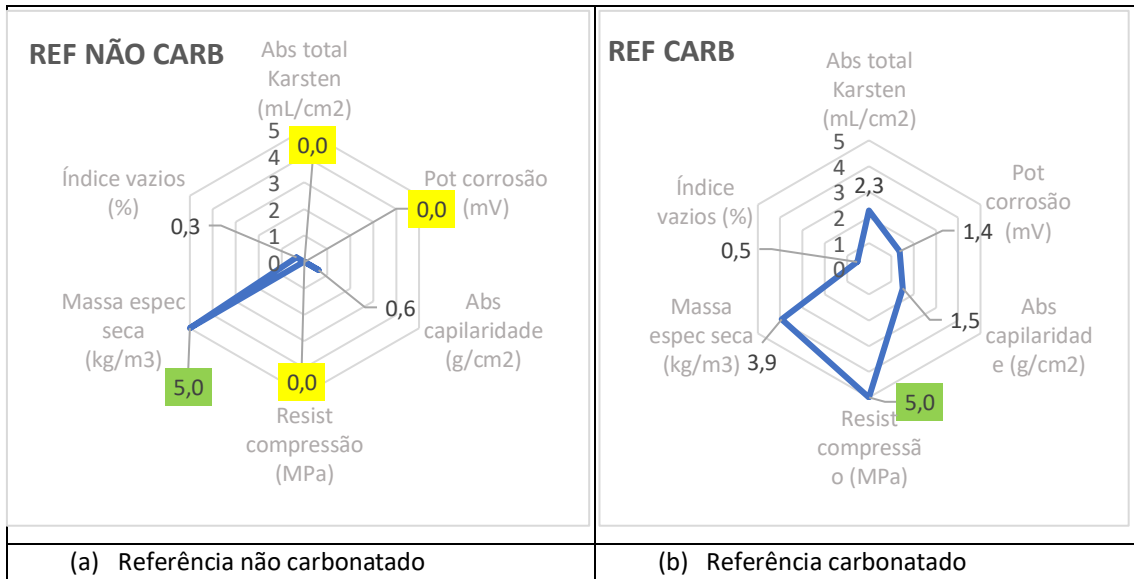
Assim como realizados no item 6.7, com o propósito de avaliar o comportamento geral de cada produto/sistema aplicado a partir dos resultados obtidos com as leituras realizadas nas análises de campo, nos corpos de prova considerou-se também apropriado traduzir todos os resultados em uma escala paramétrica e apresentar estes resultados conjuntamente num gráfico de radar. Os resultados em forma paramétrica

foram calculados elaborando-se uma escala com os resultados de cada característica avaliada (redução no potencial de corrosão, resistência a compressão, massa específica, absorção de água/índice de vazios, absorção de água por capilaridade e absorção de água pelo método do cachimbo ou tubo de Karsten – EN 16302 (2013)) por produto/sistema atribuindo-se nota 0 aos piores resultados e nota 5 aos melhores resultados em cada critério. Os gráficos obtidos através desta parametrização são apresentados nas figuras 122 a 125.

A análise foi dividida em 4 etapas, sendo a primeira os corpos de prova sem aplicação de produtos (figura 122, referência carbonatado e não carbonatado), a segunda etapa os produtos aplicados de forma isolada nos corpos de prova (figura 123, realcalinizante - R, inibidor 1 – I1, inibidor 2- I2 e hidrofugante a base de silano com amina - HA), a terceira etapa as avaliações dos CPs com 2 os produtos aplicados de forma associada (figura 124, realcalinizante com inibidor 1- R + I1, realcalinizante com inibidor 2 – R + I2, realcalinizante com hidrofugante a base de silano com amina – R + HA, inibidor 1 com hidrofugante a base de silano com amina – I1 + HA e inibidor 2 com hidrofugante a base de silano com amina – I2 + HA) e na quarta etapa os CPs com 3 produtos aplicados de forma associada (figura 130, realcalinizante com inibidor 1 e hidrofugante a base de silano com amina – R + I1 + HA e realcalinizante com inibidor 2 e hidrofugante a base de silano com amina – R + I2 + HA).

Na figura 122 podemos observar que as avaliações nos CPs sem aplicação de produtos, não carbonatados apresentaram piores desempenhos, com relação a absorção de água por capilaridade, absorção de água no método do cachimbo e na resistência a compressão. Por outro lado, os corpos de prova referência carbonatado foram os que apresentaram maior resistência a compressão, figura 122 (b).

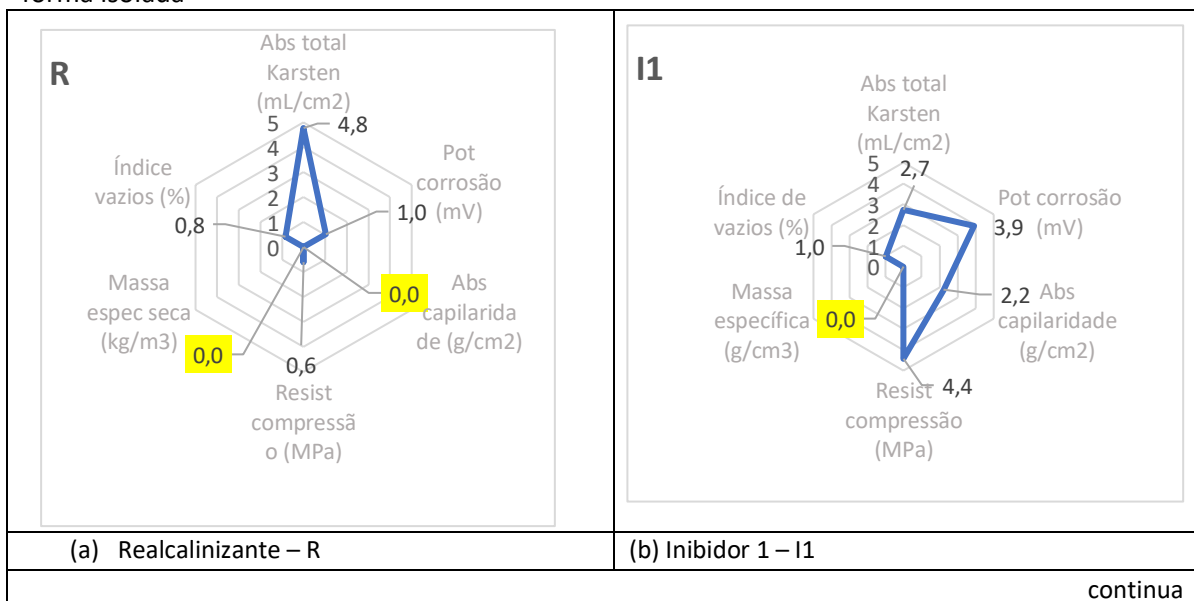
Figura 122: Gráficos de radar dos corpos de prova sem tratamentos de proteção de superfície não carbonatado e carbonatado.



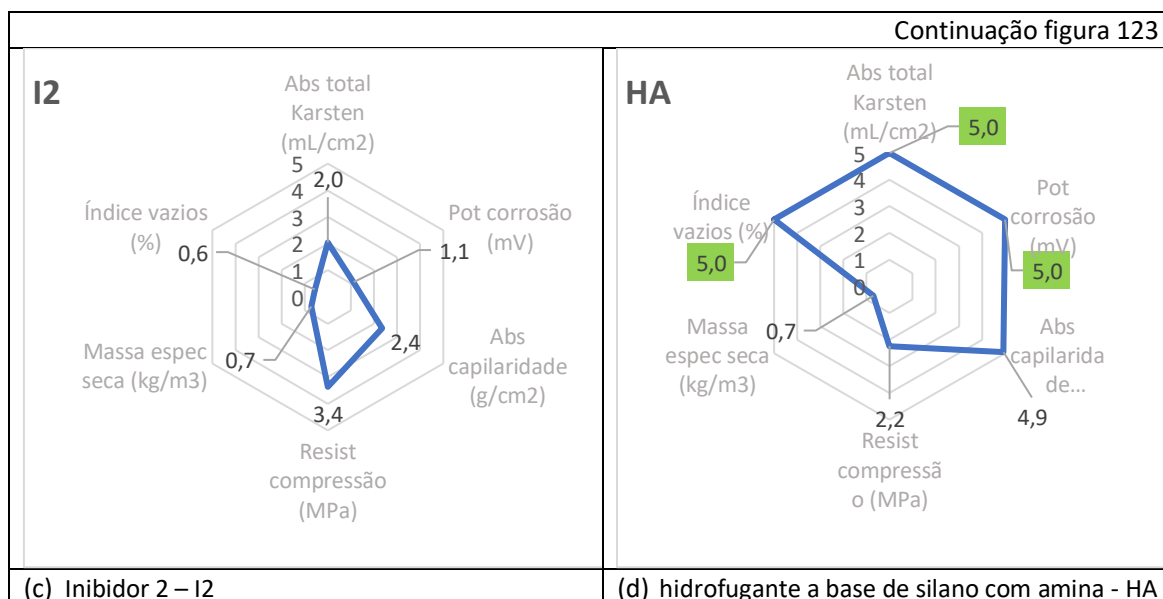
Fonte: Elaborado pela autora.

Quando analisamos os produtos aplicados de forma isolada o hidrofugante a base de silano com amina – HA, figura 123 item (d) apresentou o melhor desempenho entre todos, principalmente por ter a maior redução do potencial de corrosão e da absorção de água no cachimbo, além do bom desempenho também na absorção por capilaridade. O realcalinizante apresentou na avaliação geral um desempenho inferior do que os demais produtos, figura 123 item (a).

Figura 123: Gráficos de radar dos corpos de prova com tratamentos de superfície utilizados de forma isolada



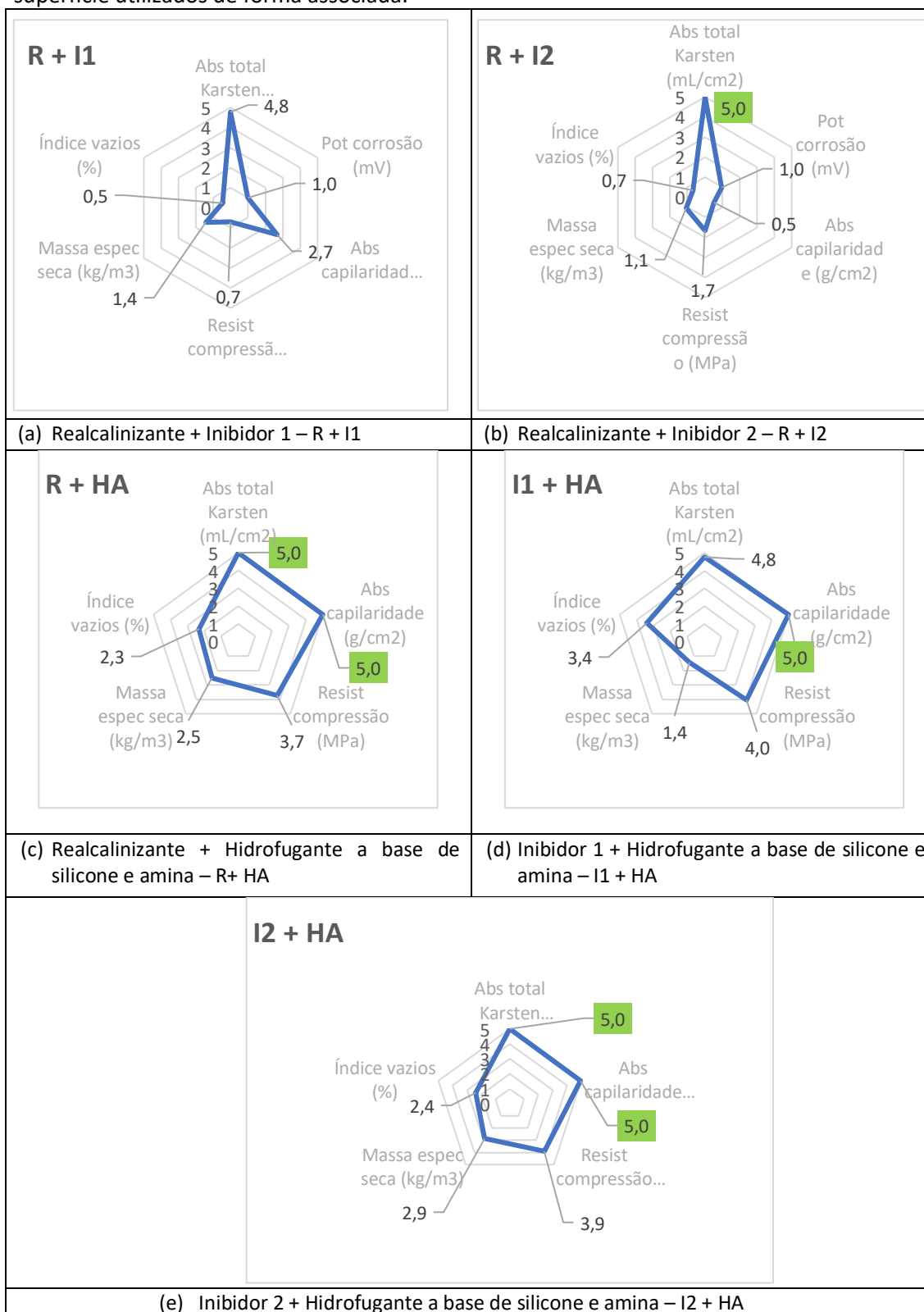
continua



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados do hidrofugante a base de silano/siloxano (HS) não foram apresentados na análise parametrizada pois não teve todos os ensaios realizados (foram feitos apenas os ensaios de absorção de água pelo método do cachimbo, avaliação expedita de profundidade de penetração do hidrofugante pelo método de aspersão de água com corante e MAV – massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios). Este fato ocorreu pois o uso deste produto não tinha sido definido inicialmente no programa experimental, a opção pelo seu uso foi decidida apenas para esclarecer algumas dúvidas que surgiram durante os ensaios de campo, portanto não foram previstos corpos de prova suficiente para a realização de todos os ensaios, desta forma a apresentação dos resultados nos gráficos de radar não se apresentava viável como parâmetro de análise.

Figura 124: Gráficos de radar dos corpos de prova com aplicação de 2 produtos de proteção de superfície utilizados de forma associada.

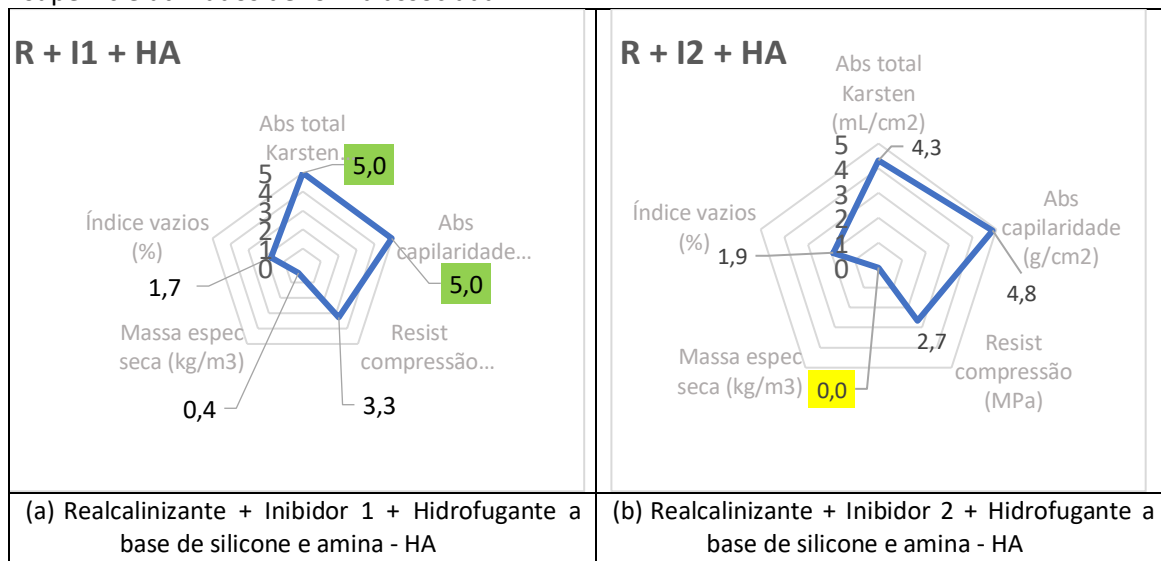


Fonte: Elaborado pela autora.

Salientamos que os corpos de prova que tiveram seus produtos aplicados de forma associada com 2 e 3 produtos com a aplicação do hidrofugante HA não foram avaliados

ao potencial de corrosão, sendo desta forma avaliado 5 parâmetros. No uso associado de 2 produtos apresentado na figura 124 podemos observar que os CPs que tiveram a aplicação associada de realcalinizante e hidrofugante R + HA (c) e inibidor 2 com hidrofugante I2 + HA (e), apresentaram um ótimo desempenho nas avaliações dos ensaios de absorção pelo cachimbo e absorção por capilaridade (5,0 em ambos).

Figura 125: Gráficos de radar dos corpos de prova com aplicação de 3 produtos de proteção de superfície utilizados de forma associada.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na avaliação dos CPs com o uso de 3 produtos associados com o uso do inibidor 1, figura 125, item (b) apresentou-se com o desempenho ligeiramente superior, com dois parâmetros obtendo avaliação 5, no entanto, como não teve o potencial de corrosão avaliado, não sendo possível afirmar que seu desempenho foi inferior ao desempenho apresentado pelo uso isolado do hidrofugante HA, figura 123 item (d).

8. CONCLUSÕES

A conservação do concreto armado aparente no patrimônio arquitetônico, como discutido ao longo desta tese, apresenta muitos desafios. Entre estes desafios estão: limitações legais impostas à intervenção de bens tombados para realização de ensaios nos edifícios; dificuldades de se reproduzir materiais com características físicas, químicas, cores e texturas compatíveis aos tecidos originais; dificuldades operacionais da conservação devido à complexidade projetual destas obras. Diante disso, o estudo sistêmico de técnicas disponíveis para investigação e manutenção dessas obras deve ser estimulado, com o intuito de conhecer melhor as limitações dessas técnicas e seu potencial para proteção do patrimônio.

Disso decorreu o aprofundamento de estudo de técnicas consideradas pouco invasivas de proteção do concreto aparente do patrimônio arquitetônico moderno nesta tese. A associação de ensaios em campo e em laboratório colaborou para a compreensão das dificuldades operacionais dos ensaios e das atividades futuras de aplicação dos produtos/sistemas, viabilizando a identificação dos principais fatores que influenciam na aplicação e no efeito dos produtos e sistemas investigados.

A seguir são apresentadas conclusões dos ensaios de campo e de laboratório, além das considerações finais sobre a pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

8.1. CONCLUSÕES SOBRE OS ENSAIOS DE CAMPO

- Com os levantamentos das espessuras de cobrimento do pilar 3 pode-se identificar um possível deslocamento das armaduras na etapa de execução da obra resultando em menores cobrimentos na face Leste e maiores cobrimentos na face Oeste e 47% das medidas realizadas com cobrimentos menores ou igual a 20mm que não atendem ao cobrimento da armadura designado em norma na época da construção do edifício;
- Na avaliação da umidade superficial do pilar, alguns resultados apresentaram aumento nos valores após aplicação dos produtos/sistemas com a molhagem da

superfície (áreas com realcalinizante sem hidrofugantes) quando comparado com a condição sem da aplicação dos produtos/sistemas;

- A análise das medidas de potencial de corrosão trouxe algumas conclusões importantes:
 - As leituras realizadas próximas à base do pilar 3 (até alturas de, aproximadamente, 65 cm do solo) sofreram influência da umidade ascendente, apresentando resultados muito diferenciados quando comparado a áreas localizadas em regiões mais altas;
 - As leituras com o inibidor de corrosão 1 (I1 - à base de aminoálcool e sais de amino alcoois) apresentaram maior variação dos potenciais de corrosão, deslocando-se para valores menos negativos, apresentando indícios de proteção das armaduras à corrosão;
 - Nas leituras das áreas com realcalinizante (R) os resultados não apresentaram valores consistentes, com tendência a valores mais negativos, no entanto, esta alteração dos resultados foi pouco expressiva, não sendo conclusiva a avaliação da ação do produto com relação ao potencial de corrosão. Vale reforçar, como exposto anteriormente, que nas áreas com aplicação do realcalinizante houve um aumento da umidade superficial, o que pode ter influenciado nas leituras mais negativas do potencial de corrosão;
 - Os hidrofugantes foram aplicados em áreas do P3 com os maiores cobrimentos médios de armadura (6 cm para a Área 8; 4 cm para a Área 9). A variação dos potenciais para valores menos negativos foi mais significativa para o hidrofugante a base de silano e amina – HA (Área 9), quando comparado ao hidrogugante a base de silano/siloxano - HS;
 - A área 10, concreto referência, mesmo sem a aplicação de produtos/sistemas, apresentou a menor média negativa na avaliação do potencial de corrosão, isso pode ser explicado pelas condições apresentadas na face Oeste do pilar, como maiores cobrimentos de armadura, uma superfície menos porosa (formas lisas na execução dos pilares) menor exposição a chuva dirigida, que são fatores fundamentais para a preservação do concreto aparente;
- Na avaliação da variação colorimétrica das áreas onde foram aplicados produtos/sistemas, os resultados mostraram menor variação quando comparado

com a variação cromática do próprio concreto sem qualquer produto, indicando desta forma que a aplicação dos produtos/sistemas testados não alterou significativamente a percepção visual do tecido original do edifício;

- Nos resultados de absorção de água pelo cachimbo alguns resultados trouxeram contribuições importantes:
 - O hidrofugante a base de silano com amina (HA) apresentou melhor desempenho do que o hidrofugante a base de silano/siloxano (HS), quando avaliado com o padrão de absorção de água do concreto referência;
 - Para os demais produtos/sistemas aplicados os resultados dos ensaios com o cachimbo não foram conclusivos, provavelmente influenciadas pelas condições da superfície do concreto (fissuras, lacunas e porosidade superficiais);
 - Nas avaliações da absorção de água pelo cachimbo, é importante se evitar o posicionamento do cachimbo em regiões com fissuras ou porosidade superficial para reduzir a variação nos resultados;
- Na avaliação parametrizada dos resultados de campo da umidade superficial, potencial de corrosão, variação colorimétrica e absorção de água pelo cachimbo obteve-se como melhores resultados a área A9, com aplicação de hidrofugante com silano e amina (HA) e os piores resultados na área A7, tanto no concreto quanto no reparo, com aplicação de realcalinizante + inibidor de corrosão 2 (R+I2);

8.2. CONCLUSÕES SOBRE OS ENSAIOS DE LABORATÓRIO

A realização dos ensaios de laboratório, auxiliaram no esclarecimento de algumas dúvidas com relação aos resultados de campo, devido as condições controladas de execução que garantem os mesmos parâmetros para análise dos resultados. Os resultados dos ensaios em laboratório levaram as seguintes conclusões:

- Na análise dos resultados das medidas de potencial de corrosão obteve-se as seguintes constatações:
 - Os corpos de prova (CPs) com hidrofugante à base de silano e amina (HA) apresentaram valores menos negativos na avaliação do potencial de corrosão, seguido do inibidor de corrosão 1 (I1) com variação de 361 mV e 248 mV

respectivamente. Estas variações resultaram numa reclassificação da probabilidade de corrosão de > 90% para < 10% do potencial de corrosão dos CPs com hidrofugante de silano e amina (HA). Para os CPs com o inibidor de corrosão 1 – I1, a reclassificação levou da faixa de elevada probabilidade de corrosão (>90%) para a faixa de incerteza de corrosão. Os resultados trouxeram indícios de que os dois produtos propiciam proteção ao concreto carbonatado nas condições avaliadas;

- Os corpos de prova com o realcalinizante (R) e realcalinizante + inibidor de corrosão 2 (R + I2) apresentaram as menores reduções dos valores negativos das leituras de potencial de corrosão de 55 mV e 54 mV respectivamente, não sendo conclusivas a efetiva proteção destes produtos/sistemas, sendo necessário o aprofundamento dos estudos, talvez usando ensaios de taxa de corrosão;
- Nos resultados de absorção de água pelo método do cachimbo nos corpos de prova obteve-se as seguintes conclusões:
 - As leituras do concreto de referência não carbonatado (CP ref não carb) obteve a maior absorção de água;
 - O corpo de prova de referência carbonatado (CP ref carb), bem como os CPs com inibidores de corrosão (I1 e I2) apresentaram absorção inferior à do CP referência não carbonatado;
 - Esse resultado indica que os inibidores usados (I1 e I2) não interferem na absorção de água superficial do concreto. Entre os demais produtos/sistemas, as leituras foram inconsistentes, não evidenciando influência mensurável dos produtos na absorção de água. Exceção é feita ao hidrofugante à base de silano e amina (HA) que apresentou absorção nula de água em todas as leituras;
- Na cromatografia gasosa foi possível detectar os principais compostos dos inibidores I1 e I2 e do hidrofugante com silano e amina (HA), no entanto não se mostrou uma técnica adequada para identificar a profundidade de penetração dos compostos;
- A técnica de aspersão da solução de ninidrina (1,2 g de ninidrina para 100 ml de etanol absoluto) sobre o pó de concreto mostrou-se de fácil realização e trouxe resultados qualitativos consistentes com o esperado, como apontado:

- A técnica indicou teores decrescentes dos inibidores, nas três profundidades de penetração no concreto analisadas (5, 10 e 15 mm).
- Os resultados também foram consistentes nas amostras com inibidores usados isoladamente ou em associação com outros produtos (realcalinizante e hidrofugante).
- A técnica ainda necessita aprimoramentos para compreender a baixa reatividade colorimétrica da amina primária presente no inibidor 2, quando comparado com o inibidor 1 que apresentou amina primária e secundária e a dosagem ideal para a preparação da solução;
- As demais técnicas de reação colorimétrica dos inibidores de corrosão com a solução de ninidrina (solução nos tubos de ensaio e solução aplicada no papel cromatográfico) apontaram resultados da reação com a presença da amina nos inibidores, sendo a reação mais intensa para o inibidor 1 (I1) do que para o inibidor 2 (I2) nas duas técnicas. No entanto os resultados não identificaram a presença de amina nas profundidades analisadas, não se mostrando técnicas eficazes, talvez por diminuir muito a concentração dos compostos químicos na diluição com a água destilada;
- A investigação de outro procedimento para impregnação do concreto com produtos de proteção de superfície (como o envolvimento dos CPs com manta embebida com os produtos) apresentou alguns resultados importantes:
 - Na impregnação com manta com os produtos ficam maior tempo de contato com concreto e aumentam significativamente a profundidade de penetração dos produtos;
 - Os resultados das leituras da aspersão dos reagentes colorimétricos sobre os CPs envoltos em manta com os produtos e posteriormente cortados diametralmente, indicaram o aumento da profundidade de penetração de 7% para o realcalinizante (R), 49% para o inibidor 1 (I1), 54% para o inibidor 2 (I2), 45% para o hidrofugante a base de silano e amina (HA) e 29% para o hidrofugante a base de silano/siloxano (HS);
- Os produtos/sistemas aplicados aos CPs não influenciaram a resistência do concreto;

- Os resultados de absorção por capilaridade reforçaram os resultados de redução de potencial de corrosão, ou seja, melhor desempenho nos resultados nos corpos de prova com hidrofugante a base de silano e amina (HA), utilizado de forma isolada ou associada aos outros produtos; o realcalinizante aplicado de forma isolada ou associada ao inibidor de corrosão 2 apresentou o pior desempenho;
- Nos resultados do MAV, na análise dos resultados da massa específica seca foi possível observar:
 - Os resultados não evidenciam uma tendência dos produtos/sistemas influenciar nas propriedades do concreto carbonatado.
 - Foi possível confirmar resultados amplamente divulgados em pesquisas científicas da redução do índice de vazios e absorção de água do concreto carbonatado quando comparados com o concreto não carbonatado, provavelmente pela colmatação dos poros.
 - Houve uma menor absorção de água nos CPs com hidrofugante a base de silano e amina (HA) quando comparado com os CPs com o hidrofugantes a base de silano/siloxano (HS);
- Nos resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio houve um aumento da porosidade na análise de inibidor 1 – I1 e uma redução da porosidade com a aplicação do inibidor 2 – I2. Também se confirmou a redução da porosidade quando analisada as amostras dos concretos carbonatados e não carbonatados;
- O resultado dos ensaios exploratórios de MEV e EDS apresentou indícios de alterações da camada de produtos de corrosão depositada na superfície da barra de aço retirada do concreto tratado com inibidor de corrosão 1 (I1) com a redução da relação oxigênio/ferro (O/Fe) na superfície analisada. Isso pode estar associada à possível formação de camada protetiva formada pela migração do inibidor;

8.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da hipótese apresentada de que *há práticas aderentes aos princípios teóricos do restauro, configuradas por meio de produtos e sistemas aplicáveis às superfícies do concreto aparente do patrimônio arquitetônico, capazes de oferecer proteção contra o processo de degradação prevalente da corrosão da armadura por*

carbonatação e considerando os resultados dos ensaios de campo e de laboratório é possível afirmar que:

- A utilização do hidrofugante com silano e amina (HA) utilizado de forma isolada apresentou o melhor desempenho, seguido do sistema realcalinizante + inibidor 1 e hidrofugante com silano e amina (R + I1 + HA).
- A aplicação dos produtos usados, na impregnação da superfície do pilar P3 e dos corpos de prova, foi realizada de acordo com orientações dos fabricantes, quanto à técnica de aplicação (com pincel) e quanto ao consumo dos produtos (g/m^2). No entanto, o uso de técnica de aplicação que viabilize maior tempo de contato do produto com a superfície a ser impregnada pode levar ao maior nível de proteção do concreto.

As discussões realizadas ao longo desta tese buscaram elucidar algumas questões importantes na conservação do patrimônio arquitetônico:

- Necessidade de estudos prévios no edifício para caracterização do material e real condição de conservação do edifício;
- Importância da conservação do tecido original remanescente, por isso a necessidade da proteção da superfície com produtos/sistemas que impactem minimamente a obra a ser preservada;
- A importância da contribuição de estudos associados de ensaios de laboratório e de campo buscando resultados aplicados, indicando os fatores que influenciam os resultados obtidos em condições reais de aplicação dos produtos/sistemas;
- Importância das medidas de potencial de corrosão nas avaliações de campo por ser uma técnica pouco invasiva e que apresentou resultados relativamente rápidos nas condições de análise, no entanto a avaliação da taxa de corrosão poderia trazer resultados mais consistentes;
- A importância do desenvolvimento de técnicas de análise expeditas para o controle de aplicação dos produtos/sistemas, à semelhança da técnica de aspersão de solução ninidrina sobre o pó de concreto apresentada nesta tese, que viabilizou resultados confiáveis com baixa complexidade de execução sendo facilmente aplicáveis ao estudo em campo.

8.4. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Necessidade de avaliação da taxa de corrosão em ensaios de campo e em ensaios de laboratório, permitindo a correlação das informações com as avaliações de potencial de corrosão obtendo dados mais conclusivos nas análises eletroquímicas;
- Definição de técnicas mais adequadas para avaliação analítica da presença dos produtos/sistemas de proteção de superfície nas diversas profundidades do concreto do que a cromatografia gasosa;
- Avaliação da eficiência dos produtos/sistemas de proteção de superfície em função do grau de corrosão da armadura em médio e longo prazos;
- Estudo mais detalhado em MEV para averiguação da alteração da superfície da barra após aplicação do inibidor de corrosão e avaliação dos compostos formados;
- Aprimoramento da técnica de solução de ninidrina aspergida sobre o pó de concreto, correlacionando o teor de nitrogênio à coloração/tonalidade e estudo da dosagem da solução reagente.

9. REFERÊNCIAS

- ALCÁNTARA, J.; CHICO, B.; SIMANCAS, J.; DÍAZ, I.; FUENTE, D. de la; MORCILLO, M. An attempt to classify the morphologies presented by 284 different rust phases formed during the exposure of carbon steel to marine atmospheres. **Materials Characterization**. V 118, p. 65-78, 2016.
- ALMEIDA, Jacinto Manuel Antunes de; SILVA, Bruno do Vale; DÉSIR, Jean Marie. Resistência à Compressão Simples de Concretos Através da Extração de Testemunhos com Pequenas Dimensões. **Congresso Brasileiro de Concreto**, Natal, v. 1, n. 56, p.1-11, out. 2014. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/profile/Bruno_Silva57/publication/281348241_RESISTENCIA_A_COMPRESSAO_SIMPLES_DE_CONCRETOS_ATRAVES_DA_EXTRACAO_DE_TESTEMUNHOS_COM_PEQUENAS_DIMENSOES/links/55e3812908aede0b5733c472/RESISTENCIA-A-COMPRESSAO-SIMPRES-DE-CONCRETOS-ATRAVES-DA-EXTRACAO-DE-TESTEMUNHOS-COM-PEQUENAS-DIMENSOES.pdf>. Acesso em: 25 set. 2018.
- ALVES, Manoel Geralcino. **Biotecnologia aplicada à segurança Pública: estudo e adequação do método da ninidrina para revelação de impressões digitais em superfícies porosas**. 2013. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Biotecnologia, Universidade Federal de São Carlos -UFSCAR, São Carlos, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-876**: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. Philadelphia, 2015.
- ANDRADE *et al.* RILEM TC 154-EMC: electrochemical techniques for measuring metallic corrosion: test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. **Materials and Structures**, v. 37, p. 623-643, 2004.
- ANDRADE, C., Alonso, C. & MOLINA, F.J. Cover cracking as a function of bar corrosion: Part I-Experimental test. **Materials and Structures**, **26**, 453–464 (1993). <https://doi.org.ez67.periodicos.capes.gov.br/10.1007/BF02472805>
- ANGST, Ueli M.; GEIKER, Mette R.; MICHEL, Alexander; GEHLEN, Christoph; WONG, Hong; ISGOR, O. Burkan; ELSENER, Bernhard; HANSSON, Carolyn M.; FRANÇOIS, Raoul; HORNBOSTEL, Karla. The steel–concrete interface. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 50, n. 2, p. 1-24, 27 fev. 2017. Springer Science and Business Media LLC.
<http://dx.doi.org/10.1617/s11527-017-1010-1>.
- ANGST, Ueli M. Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete. **Mater. Struct.** **51**, 4, 2018 <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1131-6>.
- ANGST, U. et al. Corrosion of steel in carbonated concrete: mechanisms, practical experience, and research priorities – a critical review by RILEM TC 281-CCC. **RILEM Technical Letters**, 50, 2020, p.85-100. doi: 10.21809/rilemtechlett.2020.127.

- ARAUJO, Adriana; FERREIRA NETO, João Batista; ALMEIDA, Neusvaldo Lira de. **Avaliação do estado de conservação e recomendações para preservação das empenas de concreto armado do edifício da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo**. São Paulo: IPT, mar. 2018. 133 p.
- ARAUJO, Adriana de; OLIVEIRA, Claudia de Andrade; SIMÃO, Tatiana Regina da Silva. Current condition of the exposed concrete façades reinforcement of the Vilanova Artigas building: modern architectural heritage. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 1-14, 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952021000100013>.
- ARAUJO, A.; PANOSSIAN, Z. Comportamento eletroquímico do aço-carbono em concreto: potencial de eletrodo e densidade de corrente elétrica. **Téchne**, v.24, n.247, p.47-52, out., 2017.
- ARAUJO, Fernanda Wanderley Corrêa de. **Estudo da repassivação da armadura em concreto carbonatados através da técnica de realcalinização química**. 2009. 217 p. Tese (doutorado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- ARAUJO, Fernanda Wanderley Corrêa de; MELO NETO, Antonio Acacio de; HELENE, Paulo Roberto do Lago. Estudo da Repassivação das Armaduras em Concretos Carbonatados através da Realcalinização Química com Solução de Hidróxido de Potássio. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, [S.l.], v. 2, n. 3, ago. 2017. ISSN 2525-4251. Disponível em: <http://revistas.poli.br/index.php/rep/article/view/699>>. Acesso em: 18 jul. 2018. doi:<http://dx.doi.org/10.25286/rep.v2i3.699>.
- ARMANI, G.; FUNARI, F. L.; SALUM, S. T. Ocorrência do orvalho na cidade de São Paulo. **Revista do Instituto Geológico**, Sao Paulo, 29 (1/2), 41-48, 2008.
- ASHRAF, Warda *et al.* Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 120, p.558-570, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.080>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NB - 1**: cálculo e execução de obras de concreto armado. ABNT, 1960.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimentos. ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7389-1**: agregados — Análise petrográfica de agregado para concreto. Parte 1: Agregado miúdo. ABNT. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7389-2**: agregados — Análise petrográfica de agregado para concreto. Parte 2: Agregado graúdo. ABNT. 2009.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680-1**: concreto – extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, grupo de resistência e consistência. ABNT, 2015 7p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: argamassa e concreto endurecidos – Determinação de absorção por capilaridade, ABNT, 2012
- AUROY, Martin *et al.* Impact of carbonation on unsaturated water transport properties of cement-based materials. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 74, p.44-58, ago. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.002>.
- BALZANI, M.; MAIETTI, F.; KÜHL, B. Mugayar. POINT CLOUD ANALYSIS FOR CONSERVATION AND ENHANCEMENT OF MODERNIST ARCHITECTURE. **Isprs - International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, [s.l.], v. -2/3, p.71-77, 23 fev. 2017. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-2-w3-71-2017>.
- BARDI, Lina Bo. **Dados Técnicos**. São Paulo, [19--].
- BAROSSO, A. C.; OLIVEIRA, C. T. de A.; VERGILI, R.; PALMEIRA, E. Task 2: 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. The Getty Foundation. 2018. p. 123 - 200. Available from: https://www.getty.edu/foundation/initiatives/current/keeping_it_modern/report_library/vilanova_artigas.html?q=
- BASHEER, Lulu; CLELAND, David James. Durability and water absorption properties of surface treated concretes. **Materials and Structures**, RILEM, v. 44, 2011, p. 957–967.
- BAVARIAN, Behzad, REINER Lisa. **Improving Durability of Reinforced Concrete Structures Using Migrating Corrosion Inhibitors**. Paper presented at the CORROSION 2004, New Orleans, Louisiana, March 2004.
- BAVARIAN, Behzad; REINER, Lisa. **The Efficacy of using Migrating Corrosion Inhibitors (MCI 2020 & MCI 2020M) for Reinforced Concrete**. The Cortec Corporation, [s. /], p. 1-17, Mar. 2004. Disponível em: <https://www.cortecvci.com//Publications/Reports/Cortec%202020-2.pdf> acesso em 12 de set 2018
- BAVARIAN, Behzad; REINER, Lisa. IMPROVING DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES USING MIGRATING CORROSION INHIBITORS. **Corrosion**, [S.l.], p. 1-11, 2004a

- BERTOLINI, Luca. **Materiais de Construção: patologia, realitação, preservação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 414 p.
- BISSIG, Cristoforo. **Experiences with impregnated concrete surfaces: Parco Maraini in Lugano**. In Hydrophobe I: International Conference on Water Repellent Treatment and Protective Surface Technology for Building. Materials, Delft, 1995. Chairmen: Folker H. Wittmann, T. A. J. M. Siemes and L. G. W. Verhoef. 1995, p. 23-1 – 23-8.
- BJEGOVIĆ, D. STEHLY, R.D, MIKSIC, B.A. Effect of migration corrosion inhibitor on corrosion of reinforcing steel. In: DHIR, R. K.; NEWLANDS, M. D. (eds.) Proceedings of the International Seminar Controlling concrete degradation. Dundee: University of Dundee, Scotland, Sep 1999. p. 81-92
- BJEGOVIĆ, D.; MIKSIC, B.a.; STEHLY, R.d. Test protocols for migrating corrosion inhibitors (MCI) in reinforced concrete. **Materials And Corrosion**, [s. L.], v. 1, n. 51, p.444-452, jan. 2000. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/1521-4176%28200006%2951%3A6%3C444%3A%3AAID-MACO444%3E3.0.CO%3B2-O>>. Acesso em: 10 jan. 2019.
- BOLINA, Cecília de Castro; CASCUDO, Oswaldo. Inibidores de corrosão: análise da eficiência frente a corrosão do aço induzida por cloretos e carbonatação em meio aquoso. **Engvista**, Niterói, v. 15, n. 1, p. 81-94, abr.2013.
- BOLZONI, F. *et al.* Experiences on corrosion inhibitors for reinforced concrete. **International Journal of Corrosion and Scale Inhibition**, [s.l.], v. 3, n. 4, p.254-278, dez. 2014. IFHAN. <http://dx.doi.org/10.17675/2305-6894-2014-3-4-254-278>.
- BOLZONI, F. *et al.* Corrosion inhibitors in reinforced concrete structures Part 2 – Repair system. **Corrosion Engineering, Science and Technology**, [S.L.], v. 41, n. 3, p. 212-220, set. 2006. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1179/174327806x111234>.
- BOUICHOU, M.; MARIE VICTOIRE, E. **Le nettoyage des bétons anciens Guide des techniques et aide à la décision**. Les cahiers techniques du Cercle des Partenaires du Patrimoine, no. 4. Edité par Champs-sUr-Marne: Cercle des partenaires du patrimoine, 2009
- BOUICHOU, Myriam; MARIE-VICTOIRE, Elisabeth. **Cleaning Historic Concrete: a guide to techniques and decision-making: guidelines**. Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2021. 52 p.
- BROOMFIELD, John P. **Corrosion of Steel in Concrete: understanding, investigation and repair**. 2. ed. New York: Taylor & Francis, 2007. 294 p.
- BROOMFIELD, John; MACDONALD, Susan. **The identification and assessment of defects, damage and decay**. In: MACDONALD, Susan (Ed.). Concrete: building pathology. Oxford: Blackwell Science Ltd, 2003, Chapter 4, p. 140-160.

- BRUAND, Yves. **Arquitetura contemporânea no Brasil**. 5ª edição, São Paulo, Perspectiva, 2010.
- BRYCKI, Bogumił Eugeniusz; KOWALCZYK, Iwona H.; SZULC, Adrianna; KACZEREWSKA, Olga; PAKIET, Marta. Organic Corrosion Inhibitors. **Corrosion Inhibitors, Principles and Recent Applications**, [S.L.], 4 abr. 2018. InTech.
<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.72943>.
- BUCHNER, Laura N.; PEPI, Raymond M. Restoration of the cast-in-place concrete at the New York Hall of Science. APT Bulletin: **The Journal of Preservation Technology**, Vol. 46, No. 2/3 (2015), pp. 54-63. Association for Preservation Technology International (APT). Disponível em <<https://www.jstor.org/stable/43556453>>. Acesso em 29/07/2018.
- BÜTTNER, T.; RAUPACH, M. **Durability of hydrophobic treatments on concrete: results from laboratory tests**, *In Hydrophobe V*: 5th International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials, Bruxelles, Belgium, 15-16 April 2008, Aedificatio Publishers. 2008, p. 329-340.
- CAILLEUX, Emmanuel. **Comparison of transparent coatings and water-repellents for the protection of historic buildings made of concrete**. [2017]. Disponível em: <<https://www.wtcb.be/homepage/>>. Acesso em: 26 set. 2018.
- CALLISTER Jr. W.D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. São Paulo: LTC p.41, 1990
- CAMARGO, Mônica Junqueira de. O setor das Humanas como Patrimônio Arquitetônico e a História da Arquitetura Paulista. In: LIMA, José Tavares Correia de (Org.). **Patrimônio Construído da USP: preservação, gestão e memória**. São Paulo: Edusp, 2014, v.1, p. 200-219.
- CAMPOS, João Vitor *et al.* Análise comparativa entre diferentes ensaios porosimétricos em alumina macroporosa. **Matéria** (Rio J.), Rio de Janeiro, v. 22, supl. 1, e11929, 2017 Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170005.0265>. Acesso em: 29 jun. 2018.
- CÁRDENAS, Alexandre Silva. **Masp: estrutura, proporção e forma**. São Paulo: da Cidade, 2015. 140 p.
- CASTRO, C. S. S. M. *et al.* Edifício Vilanova Artigas: Obra de Intervenção em Patrimônio Moderno. **Anais do Congresso Ibero-americano: Patrimônio, suas matérias e imatérias**. Lisboa, 2016.
- CASTRO, C. S. S. M. **Para Além das Aparências: Contribuição ao Estudo da Conservação de Superfícies Arquitetônicas de Concreto Aparente**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura. São Paulo, 2018.

- CASTRO, Maria Luiza Almeida Cunha de; PAIVA, José Eustáquio. Controle de corrosão de armaduras de concreto através de impregnação de produtos migratórios. **Revista Tecnológica**, Maringá, v. 19, n. 1, p.43-55, 2010. Semestral. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/RevTecnol/article/view/10618>>. Acesso em: 5 out. 2018.
- CHAVES, Milton José Ribeiro. **Procedimentos de Produção, Proteção e Manutenção de Estruturas de Concreto Aparente**. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT área de concentração Habitação: Planejamento e Tecnologia, São Paulo, 2016
- CHEMELLO, E. Ciência Forense: impressões digitais. **Química Virtual**, [S. L.], p. 1-11, dez. 2006.
- CHIARADIA, Mariza C.; COLLINS, Carol H.; JARDIM, Isabel C. S. F. O estado da arte da cromatografia associada à espectrometria de massas acoplada à espectrometria de massas na análise de compostos tóxicos em alimentos. **Química Nova**, [s. l.], v. 31, n. 3, p. 623-636, 26 fev. 2008.
- CHRISTODOULOU, C. *et al.* Long-term performance of surface impregnation of reinforced concrete structures with silane. **Construction and Building Materials**, 48, pp.708-716, ago 2013.
- COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE CEI. **CEI 15:2004 Technical Report: Colorimetry**. 3rd Edition, 2004
- COMMISSION 25-PEM. **Protection et érosion des monuments. Matériaux et Constructions**. v. 13, 1980, p. 175 - 253.
- CONDEPHAAT. **LISTA DE BENS TOMBADOS EM ORDEM ALFABÉTICA POR MUNICÍPIO Atualizada até dezembro /2015**. 2015. Disponível em: <http://www.cultura.sp.gov.br/StaticFiles/SEC/Condephaat/Bens Tombados/até dez.14_ALFABÉTICA.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2016.
- CONPESP - CONSELHO MUNICIPAL DE PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO, CULTURAL E AMBIENTAL DA CIDADE DE SÃO PAULO (Município). Resolução nº 5, de 05 de abril de 1991. **Resolução**. São Paulo, Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/upload/d833c_05_TEO_89_itens.pdf>. Acesso em: 08 jul. 2016.
- CONSTANTINIDES, Georgios; ULM, Franz-Josef. The Effect of two types of C-S-H on the elasticity of cement-based materials: Results from nanoindentation and micromechanical modeling. **Cement and Concrete Research**. V. 34, 2004, p. 67-80.
- CONTIER, Felipe de Araujo. **O edifício da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Cidade Universitária: projeto e construção da escola de Vilanova Artigas**. São Carlos: IAB- USP, 2015, 441 p.
- CORALINA, Cora. **Vintém de cobre**. Meias Confissões de Aninha. São Paulo: Global, 2012. 1ª edição digital.

- COURARD, L.; et al. **Evaluation of the durability of hydrophobic treatments on concrete architectural heritage.** In *Hydrophobe VII: 7th International Conference on Water Repellent Treatment and Protective Surface Technology for Building*. Materials, Lisbon, Portugal, September 2014. A. Elena Charola and J. Delgado Rodrigues, Editors LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil), 2014, p. 29-38.
- COUSSY, Olivier. Surface Energy and Capillarity. In: _____. **Mechanics and Physics of Porous Solids.** John Wiley & Sons, Ltd., 2010, Chapter 6, p. 107-147. Online ISBN:9780470710388 | DOI:10.1002/9780470710388.
- CRIVELARO, Marcos. **Avaliação do comportamento frente à corrosão pelo ataque de cloreto de argamassa armada após vários tratamentos protetores.** 2002. 212 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, São Paulo, 2002.
- CUSTANCE-BAKER, Alice; MACDONALD, Susan. **Conserving Concrete Heritage Experts Meeting.** Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 2014.
- DE ANDRADE OLIVEIRA, C. Plan de conservación preventiva para el edificio Vilanova Artigas. Investigación sobre el hormigón visto de las fachadas del edificio. **Textos de Tecnología**, (02), 2021, 97-112. Recuperado a partir de <https://revistas.udelar.edu.uy/OJS/index.php/RTdT/article/view/572>.
- DE SCHUTTER, G de; LUO, L. Effect of corrosion inhibiting admixtures on concrete properties. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 18, n. 7, p.483-489, set. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.001>.
- DE VRIES, J. **Hydrophobic treatment of concrete.** In *Hydrophobe I: International Conference on Water Repellent Treatment and Protective Surface Technology for Building*. Materials, Delft, 1995. Chairmen: Folker H. Wittmann, T. A. J. M. Siemes and L. G. W. Verhoef. 1995, p. 30-1 – 30-15.
- DE VRIES, J.; POLDER, R. B. Hydrophobic treatment of concrete. **Construction and Building Materials.** Elsevier Science Ltd. Vol. 11, No. 4, 1997, p. 259-265.
- DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmem Isse; MACHADO, Giovanna. **MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA: Aplicações e preparação de amostras: Materiais Poliméricos, metálicos e semicondutores.** Porto Alegre: Edipucrs, 2007. 60 p.
- DI MUNDO, Rosa.; LABIANCA, Claudia; CARBONE, Giuseppe; NOTARNICOLA, Michele. Recent Advances in Hydrophobic and Icephobic Surface Treatments of Concrete. **Coatings.** 2020, 10, 449; doi:10.3390/coatings10050449.
- DIN - Deutsche Institut für Normung; DIN 6174. Farbmetrische Bestimmung Von Farbabständen bei Körperfarben nach der CIELAB- Formel, Beuth Verlag, Berlim und Köln, 1997.
- DOMÉNECH-CARBÓ, Antonio. Porous materials and electrochemistry. In **Electrochemistry of porous materials.** CRC Press, 2009. Chapter 1, p. 1-25. Disponível em

<http://www.crcnetbase.com/doi/pdfplus/10.1201/9781439806340-c1>. Acesso em 01 jun 2017.

- DONADIO, M. Method statement: Qualitative Analysis of Sika® FerroGard®-903 Plus. Qualitative Analysis of Sika® FerroGard®-903 Plus. **Building Trust - Sika**, [S. L.], p. 1-8, set. 2015.
- DOUGLAS, S.A concrete performance: conservation at the National Theatre. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – **Engineering History and Heritage**, 2016, Volume 169, Issue 1, February 2016, p. 36-41. <https://doi.org/10.1680/jenhh.15.00009>.
- DREW, Matthew S.; MEYER, Jessi Jackson; HICKS, Joshua. Evaluation of Migrating Corrosion Inhibitors used in the restoration and repair of reinforced concrete structures. **Materials Performance**, Minesota, p. 8-15, jun. 2012.
- DUARTE, R., FLORES-COLEN, I., DE BRITO, J.; HAWREEN, A. Variability of in-situ testing in wall coating systems - Karsten tube and moisture meter techniques. **Journal of Building Engineering**, 27, 2020. doi: 10.1016/j.jobee.2019.100998
- DUFFÓ, G. S; MORRIS, W.; RAPINI, I; SARAGOVI, C. A study of steel rebars embedded in concrete during 65 years. **Corrosion Science**. V. 46, 2004, p. 2143–2157.
- EDELSON, Rick. The Pentagon lightwell walls: repair, rehabilitation and protection for the next 50 years. **Structure Magazine**. January 2007, p. 34-36.
- ELSENER, B. Half-cell potential mapping to assess repair work on RC structures. **Construction and Building Materials**. 15, 2001. P. 133 - 139
- ELSENER, B.; ANDRADE, C.; GULIKERS, J; POLDER, J.; RAUPACH, M. Half-cell potential measurements – Potential mapping on reinforced concrete structures. **Materials and Structures / Matériaux et Constructions**, Vol. 36, August-September 2003, p. 461-471.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDZATION (CEN). **EN 1062 – 1: Paints and varnishes – Coating materials and coating systems for exterior masonry and concrete, Part 1: Classification.**, 2004.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDZATION (CEN). **EN 1504-1: Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity – Part 1: Definitions**, 2005.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDZATION (CEN). **EN 1504-2: Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions of conformity – Part 2: surface protection systems.**, 2006.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDZATION (CEN). **EN 1504-9: Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 9: General principles for the use of products and systems.**, 2008.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 13057**: products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of resistance of capillary absorption, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **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, 2007.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 16302**: Conservation of cultural heritage - Test methods - Measurement of water absorption by pipe method, 2013.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **BS EN 16853**: Conservation of cultural heritage – Conservation process – Decision making, planning and implementation., 2017.

FERRAZ, MARCELO CARVALHO (Org.). **Lina Bo Bardi**: Sesc Fabrica Pompéia. 2. ed. São Paulo: Sesc, 2015.

FERREIRA, Pablo Ramon Rodrigues *et al.* Influência do Grau de Corrosão das Armaduras na Eficiência do Método de Realcalinização para Tratamento de Estruturas de Concreto Carbonatadas. **Holos**, [s.l.], v. 7, p.69-80, 21 dez. 2017. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN).
<http://dx.doi.org/10.15628/holos.2017.5735>.

FERREIRA, Vânia Ribeiro. **Hidróxido de potássio**. [20--]. Disponível em:
<https://www.infoescola.com/compostos-quimicos/hidroxido-de-potassio/>. Acesso em: 20 de maio 2022.

FIEDLEROVÁ, Michaela, *et al.* Determining the Presence of the Corrosion Inhibitors Based on Amines in Hardened Mortars. **Advanced Materials Research**, [S. L.], v. 1122, p. 93-97, ago. 2015. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.1122.93.

FONNA, S.; IBRAHIM, I. B. M.; GUNAWARMAN, G.; HUZNI, S.; IKHSAN, M.; THALIB, S. Investigation of corrosion products formed on the surface of carbon Steel exposed in Banda Aceh's atmosphere. **Heliyon**. v. 7, 2021, e06608.

GAUDETTE, P., e SLATON, D. **Preservation briefs 15**: Preservation of historic concrete. National Park Service, 2007. Acesso em: 8 de mar 2017.
<https://www.nps.gov/tps/how-to-preserve/briefs/15-concrete.htm>.

GEHLEN, C.; VON GREVE-DIERFELD, S; OSTERMINSK, K. 4 - Modelling of ageing and corrosion processes in reinforced concrete structures, Editor(s): Christiane Maierhofer, Hans-Wolf Reinhardt, Gerd Dobmann, In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures, Woodhead Publishing, Volume 1, 2010, Pages 57-81, ISBN 9781845695606,
<https://doi.org/10.1533/9781845699536.1.57>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845695606500040>)

- GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1996.
- GIANNECCHINI, Ana Clara. **Técnica e estética no concreto armado**: Um estudo sobre os edifícios do MASP e da FAUSP. 2009. 321 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, História e Fundamento da Arquitetura e do Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- GONZÁLEZ, F. et al. Electrochemical Realkalisation of Carbonated Concrete: an Alternative Approach to Prevention of Reinforcing Steel Corrosion. *International Journal Of Electrochemical Science*, v. 6, n. 1, p.6332-6349, dez. 2011. Disponível em: <<http://www.electrochemsci.org/papers/vol6/6126332.pdf>>. Acesso em 10 jun. 2018.
- GROSS, Gilda. **Concrete heritage conservation and the viability of migrating corrosion inhibitors**. 2018. 117 f. Tese (Doutorado) - Science in Historic Preservation, Columbia University, New York, 2018. Disponível em: <https://academiccommons.columbia.edu/doi/10.7916/D8DV32P9>. Acesso em: 20 jan. 2023.
- HANSSON, C.M. M&S highlight—Andrade *et al.* (1993), Cover cracking as a function of bar corrosion: Part I—experimental test. **Materials and Structures**, 55, 33 (2022). <https://doi-org.ez67.periodicos.capes.gov.br/10.1617/s11527-021-01867-8>.
- HARBOE, Gunny; LOS MONTEROS, Fernando Espinosa de; LANDI, Stefania; NORMANDIN, Kyle. **The Cádiz Document**: InnovaConcrete Guidelines for Conservation of Concrete Heritage, ICOMOS International, (2021). Disponível em <https://openarchive.icomos.org/id/eprint/2578/>. Acesso em: 17 nov. 2022.
- HEINEMANN, Herdis Andrea. **Historic concrete**: from concrete repair to concrete conservation. 2012, 560 p. Thesis (PhD) - Technische Universiteit Delft, Delft. Disponível em: <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3A987fafd0-cd76-4230-be0e-be8843cae08e/>. Acesso em 19 abr. 2016.
- HEIYANTUDUWA, R.; ALEXANDER, M. G.; MACKEHNIE, J. R. Performance of a Penetrating Corrosion Inhibitor in Concrete Affected by Carbonation-Induced Corrosion. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.l.], v. 6, n. 18, p. 842-850, nov. 2006. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:6(842).
- HELENE, P. Análise da resistência à compressão do concreto em estruturas acabadas com vistas à revisão da segurança estrutural. **Alconpat**, [s. L.], v. 1, n. 1, p.64-89, abr. 2011.
- HELENE, P.; BRITEZ, Carlos A., ANTUNES, Juliana da S. **Faculdade de Arquitetura e Urbanismo FAUUSP – Edifício Vilanova Artigas. Projeto e especificação técnica dos serviços de reabilitação da estrutura de concreto armado do Edifício Vilanova Artigas da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, situado na Rua do Lago 876, Butantã, Cidade Universitária, São Paulo, SP. Cobertura, teto e fachada**. São Paulo: PhDesign, Ago 2010, 110 p. (Relatório Técnico n.136/2010).
- HELENE, Paulo R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Pini: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986.

- 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**. V. 46, 2013. p. 1309–1320. DOI 10.1617/s11527-012-9975-2
- HOPPE FILHO, Juarez. **Sistemas cimento, cinzas volantes e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. 2008. 247 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Construção Civil, Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- HUNTERLAB. Measuring color using Hunter L, a, b versus CIE 1976 L*a*b*. Disponível em: 2012. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/https://www.hunterlab.com/media/documents/duplicate-of-an-1005-hunterlab-vs-cie-lab.pdf. Acesso em: 30 nov. 2
- INNOVACONCRETE. **Sampling and characterization of the Warsaw Railway Station**. [S. L.]: Innovaconcrete, [202-]. 46 p. Disponível em: https://dmt.innovaconcrete.eu/case-study/warsaw. Acesso em: 10 nov. 2022.
- INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN EDUARDO TORROJA. IETcc Informe Técnico 20.489 – II. Efecto del inhibidor de corrosión MasterProtect 8000CI en la Fundación Joan Miró. 2015. Disponível em [https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/Spanish%20\(Spain\)/basf-masterprotect-8000-ci-informe-dit-plus.pdf](https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/Spanish%20(Spain)/basf-masterprotect-8000-ci-informe-dit-plus.pdf). Acesso em 31 ago. 2018.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Caracterização de amostras de concreto aparente extraídas da fachada e da cobertura do edifício Vilanova Artigas da FAU-USP**. Relatório Técnico N°151 683-205. Laboratório de Materiais de Construção Civil LMCC - Centro de Tecnologia de Obras de Infraestrutura CT-Obras, 2018.
- INTERNATIONAL COUNCIL OF MONUMENTS AND SITES (ICOMOS). **International charter for the conservation and restoration of monuments and sites**. The Venice Charter. Veneza: International Council on Monuments and Sites, 1964.
- INTERNATIONAL COUNCIL OF MONUMENTS AND SITES (ICOMOS). **The Burra Charter: The Australia ICOMOS Charter for Places of Cultural Significance**. 2013 Acessado em 19 abr. 2016. Disponível em: http://australia.icomos.org.
- INTERNATIONAL COUNCIL OF MONUMENTS AND SITES (ICOMOS). **Madrid - New Delhi Document**. [S.l.]: Icomos, 2017. 19 p. Disponível em: https://isc20c.icomos.org/resources/mndd/mndd-full-document-translations/. Acesso em: 30 out. 2021.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8044: corrosion of metals and alloys – basic terms and definitions**, Switzerland, 2015, 24p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15901-1:2005 Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption – Part 1: Mercury porosimetry**, Switzerland, 2005, 18p.

- JANA, Dipayan. Concrete deterioration from pyrite staining, sewer gases, and chimney flue gases: case studies showing microstructural similarities. CONFERENCE ON CEMENT MICROSCOPY, 30th, Reno, Nevada. **Proceedings**. 2008 p. 1-23.
- JENNINGS, Hamlin M.; BULLARD, Jeffrey W. From electrons to infrastructure: engineering concrete from the bottom up. **Cement and Concrete Research**. V. 41, 2011, p. 727-735
- JEYALAKSHMI, R. *et al.* Studies on the Effect of Migratory Corrosion Inhibitor Addition on the Onset of Corrosion in the Slag Cement Concrete. **International Journal of Earth Sciences and Engineering**, [s. L.], v. 07, n. 04, p.1492-1505, ago. 2014. Vol. 07, No. 04, Aug., 2014, pp. 1492-1505. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/324702810_Studies_on_the_Effect_of_Migratory_Corrosion_Inhibitor_Addition_on_the_Onset_of_Corrosion_in_the_Slag_Cement_Concrete>. Acesso em: 05 jul. 2018.
- JOHNSON, Arne P.; LEE, Seung Kyoung. Soldier Field Stadium: Corrosion Mitigation for Historic Concrete. **The Journal of Preservation Technology**, [s. L.], v. 35, n. 2, p.67-75, 2004. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/4126407>>. Acesso em: 29 jul. 2018.
- KARTHICK, S.P.; MADHAVAMAYANDI, A.; MURALIDHARAN, S.; SARASWATHY, V. Electrochemical process to improve the durability of concrete structures. **Journal of Building Engineering**, [S.L.], v. 7, p. 273-280, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobee.2016.07.005>.
- KAZMIERCZAK, Claudio de Souza. Proteção Superficial do Concreto. In: ISAIAS, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto, pesquisa e reabilitação V.2**. São Paulo: Ibracon, 2005. p. 879-899.
- KOLEVA, D. A.; HU, J.; FRAAIJ, A. L. A.; STROEVEN, P.; BOSHKOV, N.; de WIT, J. H. W. Quantitative characterisation of steel/cement paste interface microstructure and corrosion phenomena in mortars suffering from chloride attack. **Corrosion Science**. V. 48, 2006. p. 4001–4019.
- KÜHL, Beatriz *et al.* **EDIFÍCIOS DA FAU COMO BENS CULTURAIS: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA PARA INTERVENÇÕES, 2011**. Disponível em: <http://www.fau.usp.br/fau/administracao/congregacao/planodiretor/site_antigo/material/leitura_patrimonial/fau_bem_cultural.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2016.
- KÜHL, B. M.; OKSMAN, S.; CAMPIOTTO, R.; NADALUTTI, L.; BAROSSO, A. C. Task 1: Vilanova Artigas Building: transformations, values and guidelines. 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. The Getty Foundation, 2018. p. 25 – 120. Available from: https://www.getty.edu/foundation/initiatives/current/keeping_it_modern/report_library/vilanova_artigas.html?q=
- LAMBERT, P.; FOSTER, A. R. Modern solutions to historic problems: advanced materials and techniques in heritage applications. **Structural Studies, Repairs and Maintenance**

of Heritage Architecture Xi, [s.l.], p.175-184, 3 jul. 2009. WIT Press.
<http://dx.doi.org/10.2495/str090161>.

LEE, Han-seung *et al.* Corrosion Inhibitors for Reinforced Concrete: A Review. **Corrosion Inhibitors, Principles and Recent Applications**, [s.l.], p.95-120, 4 abr. 2018. InTech.
<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.72572>. Disponível em:
 <<https://www.intechopen.com/books/corrosion-inhibitors-principles-and-recent-applications/corrosion-inhibitors-for-reinforced-concrete-a-review>>. Acesso em: 10 set. 2018.

LIMA, Helder. Museu embrulhado. **A Construção**, São Paulo, edição 2156, p.12-15, 5 jun. 1989. Semanal.

MAINIER, Fernando Benedicto; SILVA, Rosenir Rita de Cassia Moreira da. AS FORMULAÇÕES INIBIDORAS DE CORROSÃO E O MEIO AMBIENTE. **Engevista**, [S.L.], v. 6, n. 3, p. 106-112, 2004. Pro Reitoria de Pesquisa, Pós Graduação e Inovação - UFF.
<http://dx.doi.org/10.22409/engevista.v6i3.149>.

MALAGA, Oskar. **Performance of impregnation of concrete structures**: Results from a 5-year field study at RV40 Borås. 2015. 41 f. Tese (Doutorado) - Curso de Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Building Technology, Chalmers University Of Technology, Suécia, 2015.

MARANHÃO, F.L.; LOH, K. O Uso de Hidrofugantes em Materiais de Construção Porosos. **Revista Técnica**. Edição 155. Jan/2010. Acesso em: 17/07/2018. Disponível em:
 <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/155/artigo287730-2.aspx> >.

MARIE-VICTOIRE, E.; BOUTEILLER, V.; GARCIAZ, J-L.; CHERRIER, J-F.; DAUTHUILLE, J.; MARZIN, F.; SCHNEIDER, J. On-site instantaneous corrosion rate measurements on a historical building, **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 16:3-4, 2012, p.505-523. DOI: 10.1080/19648189.2012.668013.

MARIE-VICTOIRE, E.; BOUICHOU, M.; JOURDAN, H. **Water-repellents as alternative carbonation-induced corrosion treatments for reinforced concrete cultural heritage**. In: International Conference on Durability of Building Materials and Components, 14th – XIV DBMC. Proceedings. 29 -31 May 2017, Ghent University, Belgium, 2017.

MARIE-VICTOIRE, Elisabeth; BOUICHOU, Myriam. **Corrosion at low moisture content in both carbonated and chloride polluted concrete – Villa E-1027, a case study**. MATEC Web of Conferences, 289, 10007. Concrete Solutions 2019, 7th International Conference on Concrete Repair, 2019, p. 1-7.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201928910007>

MATOS, Tiago Scheffer de et al. **Aço carbono 1040 como indicador de agressividade do solo e da pasta de cimento em sistemas de ancoragem de linhas de transmissão**. *Matéria* (Rio J.) [online]. 2019, vol.24, n.3 [cited 2023-02-23], e12473. Available from:
 <http://old.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-

70762019000300385&Ing=en&nrm=iso>. Epub Sep 16, 2019. ISSN 1517-7076. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620190003.0789>.

- MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. Estudo da carbonatação em concretos e argamassas. *Revista engenharia. Ciência Tecnologia*, v. 4, n. 4, p. 3–12, 2001.
- MEDEIROS, Marcelo de; HELENE Paulo. Concreto Armado x Ambiente Marítimo: por que proteger e o que considerar para especificar? **Revista Concreto**, São Paulo, ano 35, nº49, p. 23-28 abr. 2008. Disponível em:<
http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_49.pdf> Acesso em 18 de julho de 2016.
- MEDEIROS, Marcelo H. F.; PEREIRA, E.; HELENE, P. Tratamento de superfície com silicato de sódio para concreto: penetração de cloretos e absorção de água. **Revista Alconpat**, [s.l.], v. 2, n. 3, p.155-169, 30 set. 2012. *Revista ALCONPAT*.
<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v2i3.34>.
- MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de *et al.* Avaliação da eficiência de sistemas de proteção de superfície para concreto: absorção de água, migração de cloretos e ângulo de contato. **Matéria (rio J.)**, [s.l.], v. 20, n. 1, p.145-159, mar. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620150001.0015>.
- MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de; ANDRADE, Jairo José de Oliveira; HELENE, Paulo. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. Cap. 22, p. 37. Disponível em: <<https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc55.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2018.
- MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de; GOMES, Thais S.; HELENE, Paulo. **Hidrofugantes de superfície**: Estudo da capacidade de barrar o ingresso de água no concreto. Teoria e Prática na Engenharia Civil, nº 8 p. 21-28, abr. 2006 <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/06/Art3_N82.pdf> Acesso em: 25 de junho de 2016.
- MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008. 674 p.
- MENG, B. Calculation of moisture transport coefficients on the basis of relevant pore structure parameters. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 27, 1994, p. 125-134.
- MENNUCCI, Marina Martins. **Avaliação da potencialidade de aditivos como inibidores de corrosão do aço carbono CA-50 usado como armadura de estruturas de concreto**. 2006. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências de Tecnologia Nuclear, Materiais, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2006.
- MEYER, Jessi. Testing and Utilization of Next-Generation Migrating Corrosion Inhibitors. **Materials Performance**, p. 1-4, 2011.

- MEYER, J. ORGANIC CORROSION INHIBITORS – NEW BUILD AND EXISTING STRUCTURES PERFORMANCE. **Brian Cherry International Concrete Symposium**, [s. L.], v. 12, n. 1, p.1-12, jul. 2017. Disponível em: <<https://www.cortecmci.com/wp-content/uploads/2017/08/ORGANIC-CORROSION-INHIBITORS-NEW-BUILD-AND-EXISTING-STRUCTURES-PERFORMANCE-J.-Meyer.-Brian-Cherry-International-Concrete-Symposium-Paper-12-July-2017.pdf>>. Acesso em: 11 fev. 2019.
- MIKSIC, Boris A. *et al.* Use of UV Spectroscopy for Detecting Migrating Corrosion Inhibitor Depth in Concrete. **Materials Performance**, [s. L.], v. 52, n. 11, p.48-51, nov. 2013. Disponível em: <https://www.cortecvci.com/whats_new/announcements/Nov.MP.2013.pdf>. Acesso em: 07 fev. 2019.
- MORAIS, Letícia Santos de; RUEDA JÚNIOR, Mário; SCHUENKE, Tuane de Souza. **ANÁLISE DA PENETRABILIDADE DE INIBIDOR DE CORROSÃO EM CONCRETOS COM DIFERENTES PERMEABILIDADES**. 2021. 99 f. Monografia (Especialização) - Curso de Patologia nas Obras Civis, Instituto IDD, São Paulo, 2021.
- MORANDEAU, A.; THIÉRY, M.; DANGLA, P. Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 56, p.153-170, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.015>.
- MOREIRA, Christian. **Realcalinização de Estruturas de Concreto Carbonatado com Utilização de Gel Saturado de Solução Alcalina**. 2006. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2006.
- MOREIRA, Fernando Diniz. Os desafios postos pela conservação da arquitetura moderna. **Revista CPC**, São Paulo, v. 1, n. 11, p.152-187, abr. 2011.
- MYRDAL, Roar. **Corrosion Inhibitors: state of the art**. [S.l.]: Coin Project Report (Sintef Byggforsk), 2010. 37 p.
- OLIVEIRA, C. A. *et al.* Conservação das estruturas de concreto aparente do patrimônio da arquitetura moderna brasileira: desafios e oportunidades. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 13. ISSN 2183-8488, jul. 2020, pg 63-72.
- OLIVEIRA, Claudia Terezinha de Andrade. **Contribuição ao estudo do concreto aparente da arquitetura moderna: o caso do edifício Vilanova Artigas**. 2017. 148 f. Tese (Livre Docente) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Departamento de Tecnologia da Arquitetura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- 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.; KUHL, 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. The Getty Foundation. 2018. p. 203 - 345. Available

from: https://www.getty.edu/foundation/initiatives/current/keeping_it_modern/report_library/vilanova_artigas.html?q=

- OLIVEIRA, Pedro Henrique R. de; REIS, Raísa da R. Benzoic Acid (CAS 65-85-0). **Revista Virtual de Química**, [S.L.], v. 9, n. 6, p. 2673-2687, 2017. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20160156>.
- ORMELLESE, M *et al.* Corrosion inhibitors in reinforced concrete structures Part 3 – migration of inhibitors into concrete. **Corrosion Engineering, Science and Technology**, [s.l.], v. 46, n. 4, p.334-339, jun. 2011. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1179/174327809x419230>.
- ORTEGA, Eduardo. **FOTO DA VISTA EXTERNA DO MASP**. 2015. Disponível em: https://avidanocentro.com.br/o_que_fazer/paulista-cultural-grande-evento-une-todos-os-centros-culturais-da-avenida-paulista/attachment/04-masp_credito_-eduardo-ortega/. Acesso em: 10 maio 2022.
- OSSAKA, Luiz. **FOTO DA VISTA EXTERNA DO MASP NA AVENIDA PAULISTA, DÉCADA DE 1980...** Arquivo da Biblioteca e Centro de Documentação do MASP. [198-]. Disponível em: <https://avidanocentro.com.br/imagens/mas-faz-70-anos-veja-fotos-historicas-da-construcao-e-inauguracao/attachment/vista-externa-do-masp-na-avenida-paulista-decada-de-1980/>. Acesso em: 20 abr. 2022.
- PAN, Xiaoying; SHI, Zhenguog; SHI, Caijun; LING, Tung-Chai; LI, Ning Li. A review on concrete surface treatment Part I: Types and mechanisms. **Construction and Building Materials**. Elsevier Science Ltd. v.132, 2017a, p. 578-590.
- PAN, Xiaoying; SHI, Zhenguog; SHI, Caijun; LING, Tung-Chai; LI, Ning Li. A review on surface treatment for concrete – Part 2: Performance. **Construction and Building Materials**. Elsevier Science Ltd. v.133, 2017b, p. 81-90.
- PASHLEY, Richard M.; KARAMAN, Marilyn E. **Applied Colloid and Surface Chemistry**. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2004, 188p. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/0470014709>. Acesso em 26 jun 2017.
- PEREIRA, Eduardo; PORTELLA, Kleber F.; BRAGANÇA, Mariana d’Orey G. P.; OCHILISKI, Lucas M.; OLIVEIRA, Isabela C. Oxidação da pirlita e seus efeitos em argamassas de cimento Portland sujeitas ao ataque por sulfatos de origem interna. **Revista Matéria**, v. 21, n. 2, p. 342-54, 2016.
- PERTICARRARI, Amanda Liz Pacífico Manfrim. **Teste de comparação de médias: teste de tukey**. teste de tukey. Slides de aula. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.fcav.unesp.br/Home/departamentos/cienciasexatas/AMANDALIZPACIFICOMANFRIM/aula-7.pdf>. Acesso em: 20 nov. 22.
- 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. The Getty Foundation.

2017. 390 p. Available
from: https://www.getty.edu/foundation/initiatives/current/keeping_it_modern/report_library/vilanova_artigas.html?q=

- PINTO, Fernanda Herbster; MOREIRA, Fernando Diniz. **A conservação do concreto e os valores da arquitetura moderna: os casos da FAUSP e da CELPE**. Curitiba: 10^o Seminário DOCOMOMO, 2013, disponível em <http://www.docomomo.org.br/seminario10>. Acesso em: 11 jul. 2016.
- PINTO, Fernanda Lúcia Herbster; MOREIRA, Fernando Diniz. Intervenções em superfícies de concreto aparente e os valores da arquitetura moderna: o caso do edifício sede da CELPE – Companhia Energética de Pernambuco. **Rev. CPC**, São Paulo, n. 21, p. 119-139, jan./jul. 2016.
- POUR-GHAZ, Mohammad.; ISGOR, O. Burkan; GHODS, Pouria. Quantitative Interpretation of Half-Cell Potential Measurements in Concrete Structures. **Journal Of Materials in Civil Engineering** (ASCE). September 2009. DOI 10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:9(467).
- QUARCIONI, Valdecir Angelo. **Reconstituição de Traço de Argamassas**: atualização do método ipt. 1998. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- RABELLO, Sonia. **O Estado na preservação dos bens culturais: o tombamento**. Rio de Janeiro: IPHAN, 2009. 160 p.
- RABELLO, Sonia. **O tombamento**. In: REZENDE, Maria Beatriz; GRIECO, Bettina; TEIXEIRA, Luciano; THOMPSON, Analucia (Orgs.). **Dicionário IPHAN de Patrimônio Cultural**. 1. ed. Rio de Janeiro, Brasília: IPHAN/DAF/Copedoc, 2015. (termo chave Tombamento). ISBN 978-85-7334-279-6 Disponível em: <
[http://portal.iphan.gov.br/uploads/ckfinder/arquivos/Tombamento%20pdf\(1\).pdf](http://portal.iphan.gov.br/uploads/ckfinder/arquivos/Tombamento%20pdf(1).pdf)>. Acesso em: 29 jun. 2016.
- RAISDORFER, J. W. *et al.* Carbonatação – Previsão da Vida útil das Obras de Artes Especiais. **44^a Reunião Anual de Pavimentação**, Foz de Iguaçu, p.14, ago. 2015.
- RAMAN, A.; NASRAZADANI, S.; SHARMA, L. Morphology of Rust Phases Formed on Weathering Steels in Various Laboratory Corrosion Tests. **Metallography**. V. 22, p. 79-96, 1989.
- RAUPACH, M., & BÜTTNER, T. **Concrete repair to EN 1504: diagnosis, design, principles and practice**. Boca Raton, FL: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2014.
- REDONDO, G. P.; FRANCO, G.; GEORGIU, A.; IOANNOU, I.; LUBELLI, B.; MUSSO, S.F.; NALDINI, S.; NUNES, C.; VECCHIATTINI, R. State of Conservation of Concrete Heritage Buildings: A European Screening. **Infrastructures** 2021, 6, 109.
<https://doi.org/10.3390/infrastructures6080109>.

REUS, Giovana Costa. **Realcalinização química como meio de recuperação de estruturas de concreto armado carbonatadas**. 2017. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Construção Civil, Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

REUS, Giovana Costa; JESUS, Ariel Ribeiro de; MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de. **Aplicação de solução comercial alcalina para realcalinização química de concretos carbonatados**. 2º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções, [s.l.], p.117-128, 2017. Medeiros Junior, Ronaldo Alves; Medeiros, Marcelo Henrique Farias de; Faro, Vitor Pereira. <http://dx.doi.org/10.4322/2sppc.2017.011>.

RILEM COMMISSION 25-PEM. Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. **Journal of Materials and Structures**, 13 (75), 1980, p.175-254.

RIVETTI, Marianna Luna Sousa ANDRADE NETO, José da Silva; AMORIM JÚNIOR, Nilson Santana de; RIBEIRO, Daniel Vêras. **Corrosion Inhibitors for Reinforced Concrete**. Corrosion inhibitors, Principles and Recent Applications, [S.l.], p. 35-58, 4 abr. 2018. InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.72772>

SÁ, Rodrigo Resende de. **INFLUÊNCIA DA REALCALINIZAÇÃO POR MEIO DA ABSORÇÃO/DIFUSÃO DE SOLUÇÕES ALCALINAS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO, NA ADERÊNCIA DE TINTAS E VERNIZES E NA REPASSIVAÇÃO DA ARMADURA**. 2006. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2006.

SAHAL, M.; TONG, Y. Y.; SANZ, B.; BOUTEILLER, V.; MARIE-VICTOIRE, E.; JOIRET, S. **Durability of impressed current realkalisation treatment applied on reinforced concrete slabs after 5 years**. In International Conference on Durability of Building and Components, XII DBMC. Proceedings. 12-15 April 2011, Porto, 2011, 8p.

SALMOND REED ARCHITECTS. **Historic Concrete Structures: A Maintenance and Management Handbook for New Zealand**. Auckland: Department of Conservation, 2003. Disponível em: <<https://www.ipenz.org.nz/heritage/Conference2004/Presentations/Salmon%20Reed%20-%20Concrete%20Stabilisation.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2018.

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

SANT'ANA, Rodrigo. **Análise de Variância (ANOVA)**. Disponível em: <http://lite.acad.univali.br/rcurso/anova/>. Acesso em: 17 out. 2022.

SANTOS, Alex. **O que é Análise de Variância (ANOVA): e como calcular?** 2022. Disponível em: <https://profalexsantos.com.br/anova.html>. Acesso em: 18 out. 2022.

- SANTOS, Michael Torres dos et al. **Cromatografia gasosa acoplada a espectrômetro de massas (cg-em) e suas diversas aplicações**. Anais I CONBRACIS... Campina Grande: Realize Editora, 2016. Disponível em: <<https://www.editorarealize.com.br/index.php/artigo/visualizar/19078>>. Acesso em: 20/12/2021.
- SATO, Neide M. Nakata. **Análise da porosidade e das propriedades de transporte de massa de concretos com vistas à avaliação de suas durabilidades**. 1998. 172f. Tese (Doutorado) Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- SELANDER, Anders. **Hydrophobic Impregnation of Concrete Structures: Effects on Concrete Properties**. 2010. 59 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura, Department of Civil and Architectural Engineering, School of Architecture and the Built Environment, Estocolmo, 2010.
- SHEN, L.; JIANGB, H.; WANGB, T.; CHENB, K.; ZHANGA, H. Performance of silane -based surface treatments for protecting degraded historic concrete. **Progress in Organic Coatings**. Volume 129, April 2019, Pages 209-216.
- SHEN, Ming; HICKS, Josh. Detecting MCI in Concrete Using UV-Spectroscopy -Migration Depth and Dosage Detections. **Intercorr**, Fortaleza, v. 1, n. 1, p. 1-7, maio 2014.
- SHI, Jin-jie Shi; SUN, Wei. Electrochemical and analytical characterization of three corrosion inhibitors of steel in simulated concrete pore solutions. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**. V. 19, n. 1, Jan 2012, p. 38 DOI: 10.1007/s12613-012-0512-7.
- SILVA, Djalma Ribeiro da. **Estudo de Inibidores de Corrosão em Concreto Armado, Visando a melhoria na sua Durabilidade**. 2006. 195 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.
- SILVA, Illana Muniz Canto Brum da. Sodium Hydroxide (CAS No. 62-53-3). **Revista Virtual de Química**, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 73-82, 2012. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20120005>. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://s3.sa-east-1.amazonaws.com/static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/v4n1a05.pdf. Acesso em: 16 jul.2022.
- SILVA, M. da R.; MEYER, J.J. Restauração do Pentágono Americano. **Concreto & Construções**. IBRACON: São Paulo, ed. 94, abr./jun. 2019, p. 85-89
- SILVA, R. M; MONTEIRO, E. C. B. Avaliação do Desempenho de Impregnante Inibidor de Corrosão Aplicado em Estruturas de Concreto Armado sob a Ação de Íons Cloreto. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, [S.I.], v. 2, n. 1, p. 47-54, 2016.

- SILVEIRA, D.; GONÇALVES, A.; FLORES-COLEN, I.; ROSÁRIO VEIGA, M; TORRES, I.; TRAVINCAS, R. Evaluation of in-service performance factors of renders based on in-situ testing techniques. **Journal of Building Engineering**, v. 34, 2021, 101806.
- SIMÕES, João Roberto Leme. **Patologias – origens e reflexos no desempenho técnico-construtivo de edifícios**. Análise das origens das patologias e seus reflexos no desempenho técnico-construtivo de edifícios universitários da CUASO-USP/SP utilizando-se de edifícios da ISO-6241 e procedimentos da APU – Avaliação Pós-Uso. Tese (Livre docência) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, 2004. 621p.
- SLATON, D.; GAUDETTE, P.; PATTERSON, D. Morse and Ezra Stiles Colleges Yale University, New Haven, Connecticut. In: Prudon, T.; Normandin, K. (Ed.). International Specialist Committee/Technology Dossier 14 - **Concrete and Modernism: Technology and Conservation**. New York: Docomomo US, 2018, p. 32-37.
- SÖYLEV, T. A.; McNALLY, C.; RICHARDSON, M.G. The effect of a new generation surface-applied organic inhibitor on concrete properties. **Cement & Concrete Composites** 29, 2007, p. 357–364.
- SÖYLEV, T. A.; RICHARDSON, M.G. Corrosion inhibitors for steel in concrete: State-of-the-art report. **Construction and Building Materials**, v. 22, 2008, p. 609–622.
- STEFANONI, M.; ANGST, U.; ELSENER, B. Corrosion rate of carbon steel in carbonated concrete – A critical review. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 103, p. 35-48, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.007>.
- STUDTE, Christopher. **Protectosil**: produtos for renovation. [s. L.]: Evonik Industries, [20--]. Disponível em:
<<https://www.protectosil.com/sites/lists/re/documentssl/protectosil-building-protection-en.pdf>>. Acesso em: 31 jan. 2019.
- TAFFESEA, Woubishet Zewdu; SISTONEN, Esko. Service Life Prediction of Repaired Structures Using Concrete Recasting Method: State-of-the-Art. **Procedia Engineering**, Volume 57, 2013, Pages 1138-1144, ISSN 1877-7058,
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.143>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581300876X>)
- TANGO, C. E. S. Um **Estudo do desenvolvimento da resistência à compressão do cimento portland até 50 anos de idade**. Tese (Doutorado). Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo - USP, Escola Politécnica, São Paulo, 1990.
- TAYLOR, L. **Sydney Opera House Concrete Conservation Project**. Final Report Summary, 2018.
- THOMAZ E. C. S. **Notas de aula: concreto: traços – fabricação – 1967 – eng. Abílio A. Caldas Branco. 1967**
http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/pad_cimento_s.htm acessado em 5 nov. 2018.

- TOMPKINS, Haworth. **Conservation Management Plan for the National Theatre**. Final Draft. 2008. Disponível em https://www.nationaltheatre.org.uk/sites/default/files/nt_conservation_plans_dec_08.pdf.
- TRITTHART, J. Transport of a surface-applied corrosion inhibitor in cement paste and concrete. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 33, n. 6, p. 829-834, jun. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(02\)01067-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(02)01067-0).
- TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. [Doctoral Thesis (monograph), Division of Building Materials]. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982, 468 p. <https://lucris.lub.lu.se/ws/portalfiles/portal/4709458/3173290.pdf>
- UNITED STATES OF AMERICA. NATIONAL LIBRARY OF MEDICINE NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION. . **Explore Chemistry**. [20--]. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>. Acesso em: 30 jan. 2023.
- UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI URBINO CARLO BO. The Conservation Plan of the Collegi Universitari di Urbino: framework, achievements and new challenges, 2018. Disponível em: http://www.getty.edu/foundation/pdfs/kim/urbino_conservation_plan.pdf. Acesso em: 18 nov. 2019.
- VAINER, André; FERRAZ, Marcelo (Org.). **Cidadela da Liberdade: Lina Bo Bardi e o Sesc Pompeia**. São Paulo: Sesc SP, 2013. 168 p.
- VEDALAKSHMI, R.; RAJAGOPAL, K.; PALANISWAMY, N. Determination of migration efficiency of amino alcohol based migrating corrosion inhibitor through concrete. **Corrosion Engineering, Science and Technology**, [S.l.], v. 44, n. 1, p.20-31, fev. 2009. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1179/174327808x272405>.
- VERGILI, Rodrigo. FAU em números. In: BAROSSO, Antonio Carlos (Org.). **O edifício da FAU-USP de Vilanova Artigas**. São Paulo: da Cidade, 2016, p. 139-141.
- VIEIRA, Daniel Venancio *et al.* Estudo de inibidores de corrosão em concreto armado. **Matéria**, [s. L.], v. 15, n. 3, p.431-444, 2010.
- VIEIRA, M. E. M.; SILVA, M. L. S. e; OLIVEIRA, L. F. C. de; PERRONE, Ítalo T.; STEPHANI, R. Espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) acoplada ao microscópio eletrônico de varredura (MEV): fundamentos e aplicações em produtos lácteos. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 10, p. e262101018622, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i10.18622. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/18622>. Acesso em: 19 fev. 2023.
- WOMBACHER, F.; MAEDER, U.; MARAZZANI, B. Aminoalcohol based mixed corrosion inhibitors. **Cement & Concrete Composites**. V. 26, 2004, p. 209–216.
- YONGMO, Xu; HAILONG, She; MIKSIC, Boris A. Comparison of inhibitors MCI and NaNO₂ in carbonation induced corrosion. **Materials Performance**, jan. 2004, p. 42-46.

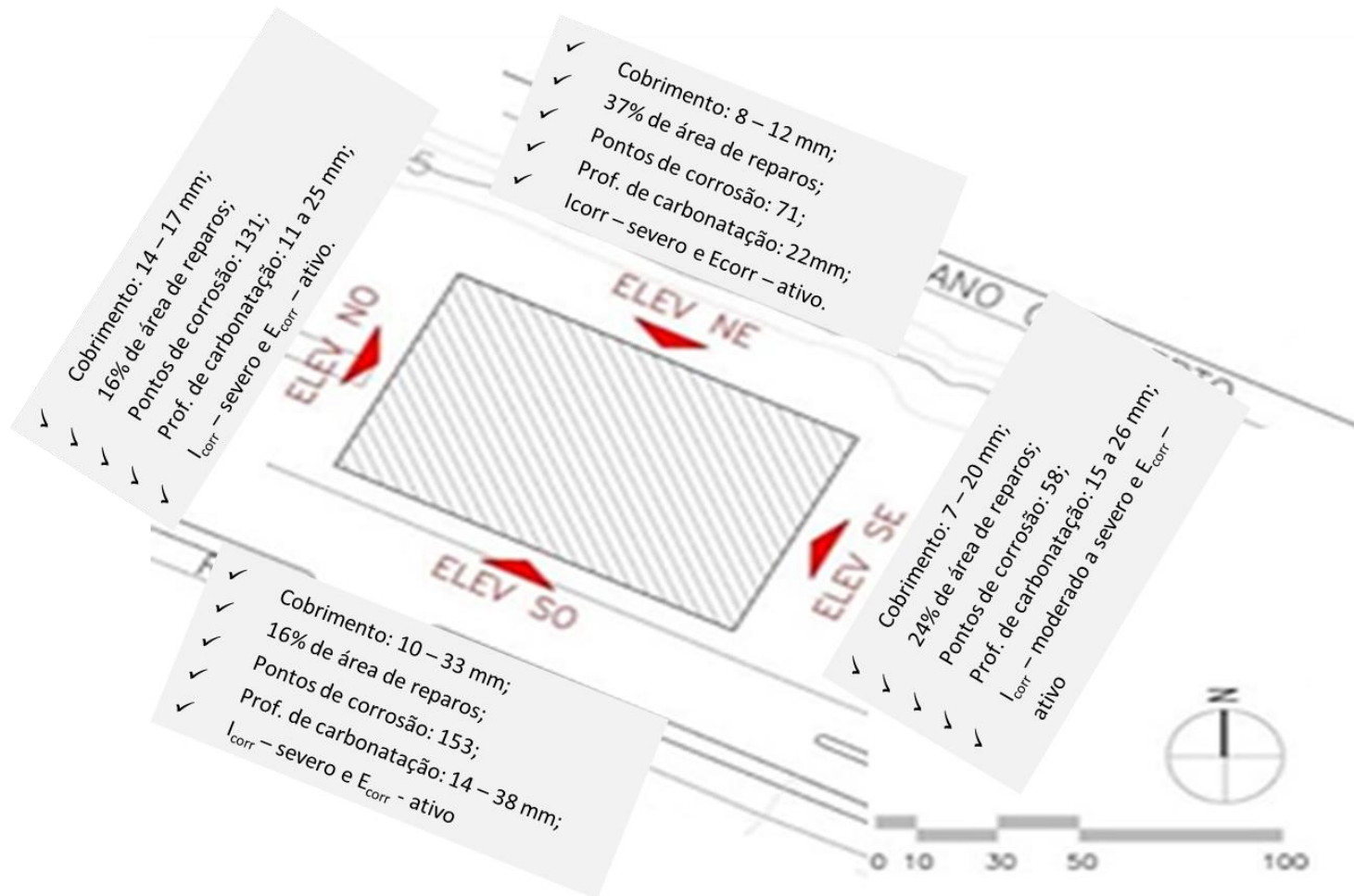
ZHANG, Ji; ZHU, Peng; QU, Wenjun. Corrosion of steel bar in carbonated concrete treated with realkalisation and inhibitor. **Magazine Of Concrete Research**, [S.L.], v. 73, n. 10, p. 512-526, maio 2019. Thomas Telford Ltd. <http://dx.doi.org/10.1680/jmacr.19.00292>.

ZHANG, J-x *et al.* Electrochemical realkalisation and combined corrosion inhibition of deeply carbonated historic reinforced concrete. **Corrosion Engineering, Science and Technology: Corrosion Engineering, Science and Technology**, [S.l.], v. 48, n. 1, p.28-35, fev. 2013. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1179/1743278212y.0000000039>.

ZHENG, Haibing *et al.* The effect of a surface-applied corrosion inhibitor on the durability of concrete. **Construction And Building Materials**, [S.l.], v. 37, p.36-40, dez. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.007>.

APÊNDICES

Apêndice 1 - Figura resumo dos resultados dos ensaios realizados nas empenas do edifício Vilanova Artigas.



Fonte: Adaptado pela autora com dados e desenho de Pinheiro *et al.* (2017).

Apêndice 2 – Recomendações de recuperação das empenas com vistas na preservação do patrimônio

Este texto é apresentado para reforçar e amparar a hipótese desta tese, bem como elucidar as informações que serão apresentadas no capítulo 4 e foram baseados na publicação de Araujo; Ferreira Neto; Almeida, (2018), onde após a realização da avaliação do estado de conservação das empenas, no final do documento são apresentadas algumas recomendações para preservação do edifício (quadro 4).

Quadro 16: Métodos de recuperação e de proteção das empenas

Método	Finalidade	Observação	Condição determinante do método recomendado
Princípio 11: Controle da área anódica - CA (EN 1504-9, 2008)			
Recuperação: impregnação do concreto de cobrimento com inibidor de corrosão	Proteção preventiva da corrosão ou de mitigação da corrosão	Toda a superfície das empenas deve ser impregnada com solução aquosa rica em inibidor de corrosão. A eficiência da proteção por impregnação depende da concentração final obtida no entorno da armadura, deste modo, requer avaliações para verificar a necessidade de mais de uma aspersão para conferir proteção.	Superfície irregular e porosa do concreto aparente, com variação de gradiente de umidade. Reparos com falha executiva e avanço significativo da frente de carbonatado. Histórico de corrosão da armadura, sendo confirmada a sua evolução (pontos de corrosão, armadura ativa em reparos e variação significativa de potencial).
Princípio 1: Proteção contra o ingresso – PI; Princípio 2: Controle de umidade - CU Princípio 8: Aumento da resistividade - AR (EN 1504-9, 2008)			
Proteção superficial: impregnação hidrofóbica da superfície do concreto (EN 1504-2, 2006)	Proteção preventiva da corrosão e ou de mitigação da corrosão pela redução da taxa de corrosão.	Atua contra o manchamento superficial e ataque químico resultante da lixiviação de compostos e da proliferação de microrganismo pela água pluvial. Não atua como proteção contra o ingresso de gases e da água na forma de vapor. A diminuição da umidade interna pode acelerar o avanço da carbonatação. Há limitação da proteção em regiões de vazios, fissuração e outras reentrâncias da superfície do concreto. Recomendam-se duas aspersões, ambas em sentido cruzado.	Superfície irregular e porosa do concreto aparente, com variação de gradiente de umidade. Reparos com falha executiva e avanço significativo da frente de carbonatado. Histórico de corrosão da armadura, sendo confirmada a sua evolução (pontos de corrosão, armadura ativa em reparos e variação significativa de potencial).

Fonte: Adaptado de Araujo; Ferreira Neto; Almeida, (2018)

As recomendações baseiam-se em métodos e princípios da norma EN 1504-9 (2008) onde foram apresentados 2 métodos para a recuperação do concreto e um terceiro método que se refere a proteção superficial do concreto. No presente trabalho, por se

tratar de um edifício tombado e que a descaracterização da superfície do material original deve ser evitada, será focado no segundo e terceiro método que consiste na proteção superficial das empenas com impregnação com inibidor de corrosão de migração (que deve diminuir a taxa de corrosão das armaduras e retardar o aparecimento de novas áreas de corrosão), com a realcalinização química, que segundo Araujo; Ferreira Neto; Almeida, (2018), há opção de realcalinização sem imposição de corrente, somente com aplicação de solução alcalina, que se difunde naturalmente no meio e cria condições para a passivação da armadura e a impregnação hidrofóbicas, (de nova geração, com alto teor de sólidos), que confirmam proteção preventiva contra a corrosão ou a mitigação através do controle de umidade que penetra no concreto.

Salienta-se que segundo a EN 1504-9 (2008) atualmente não existe um padrão para inibidores, portanto, evidências da eficácia de qualquer produto devem ser obtidas antes de especificar seu uso. No caso do uso de realcalinização química a mesma norma alerta que a experiência com esse método é limitada, mas que em uma das abordagens utilizando este método envolveu a aplicação de um concreto ou argamassa de cimento altamente alcalino na superfície do concreto carbonatado, permitindo que o concreto fosse realcalinizado por difusão a partir da superfície. A abordagem baseia-se na manutenção do concreto em uma condição úmida que permita a difusão efetiva até a profundidade das barras de reforço durante o tratamento, que leva muitos meses.

Apêndice 3 – Dados das medidas de potencial de corrosão das medidas realizadas em campo dividida por área antes e após aplicação dos produtos/sistemas

Resultados das medidas de potencial de corrosão da área 1

Face Norte - potencial de corrosão E_{corr} (mV)											eixo Y	
A1 - INIBIDOR 1	sem produto	-18	-74	-46	-47		com produto	-30	-41	-40	-31	1
	sem produto	-34	-56	-57	-51		com produto	-45	-47	-39	-35	2
	sem produto	-39	-59	-61	-76		com produto	-46	-49	-43	-46	3
	sem produto	-33	-59	-70	-61		com produto	-42	-51	-44	-38	4
	sem produto	-64	-76	-67	-86		com produto	-52	-46	-40	-39	5
	sem produto	-125	-77	-111	-100		com produto	-45	-54	-63	-58	6
	sem produto	-136	-234	-272	-222		com produto	-43	-65	-125	-104	7
	eixo X	-4	-3	-2	-1	0	eixo X	-4	-3	-2	-1	
	mínimo	-272					Mínimo	-125				
	máximo	-18					Máximo	-30				
média	-86					Média	-50					
desvio padrão	60,5					desvio padrão	19,8					

Resultados das medidas de potencial de corrosão da área 2

Face Norte - potencial de corrosão E_{corr} (mV)										eixo Y
A2 - INIBIDOR 2	sem produto	-26	13	60		com produto	-22	-8	16	1
	sem produto	-44	6	42		com produto	-29	-17	1	2
	sem produto	-101	-4	-24		com produto	-48	-15	-1	3
	sem produto	-57	-21	0		com produto	-30	-11	-5	4
	sem produto	-62	-52	-21		com produto	-36	-24	-15	5
	sem produto	-125	-100	-89		com produto	-74	-56	-65	6
	sem produto	-175	-212	-105		com produto	-106	-109	-86	7
	eixo X	1	2	3		eixo X	1	2	3	
	mínimo	-212				Mínimo	-109			
	máximo	60				Máximo	16			
média	-52				Média	-35				
desvio padrão	66,4				desvio padrão	34,4				

Continua...

Continuação apêndice 3

Resultados das medidas de potencial de corrosão da área 3

Face Leste - potencial de corrosão E_{corr} (mV)									eixo
A3 - Realcalinizante + INIBIDOR 1 + hidrofugante	sem produto				com produto				1
	sem produto		41	20	com produto		13	-6	2
	sem produto	5	20	-15	com produto	-5	-3	-21	3
	sem produto	-51	-53	-81	com produto	-49	-56	-80	4
	sem produto	-54	-42	-53	com produto	-58	-61	-59	5
	sem produto	-60	-64	-41	com produto	-63	-72	-55	6
	eixo X	-3	-2	-1	eixo X	-3	-2	-1	
	mínimo	-81			Mínimo	-80			
	máximo	41			Máximo	13			
	média	-31			Média	-41			
	desvio padrão	36,3			desvio padrão	29,0			

Resultados das medidas de potencial de corrosão da área 4

Face Leste - potencial de corrosão E_{corr} (mV)									eixo Y
A4 - Realcalinizante + INIBIDOR 2 + hidrofugante	sem produto	-80	-74	-111	com produto	-43	-57	-98	7
	sem produto	-111	-94	-108	com produto	-66	-63	-91	8
	sem produto	-220	-153	-100	com produto	-145	-123	-127	9
	sem produto	-171	-209	-239	com produto	-126	-179	-180	10
	eixo X	-2	-1	0	eixo X	-2	-1	0	
	mínimo	-239			Mínimo	-180			
	máximo	-74			Máximo	-43			
	média	-139			Média	-108			
desvio padrão	55,1			desvio padrão	44,3				

Resultados das medidas de potencial de corrosão da área 5

Face Leste - potencial de corrosão E_{corr} (mV)									eixo Y	
A5 - Realcalinizante	sem produto				com produto				1	
	sem produto		0	-13	com produto		-45	-14	2	
	sem produto	-30	-49	-55	com produto	-52	-66	-57	3	
	sem produto	-57		-65	com produto	-66	-74	-67	4	
	eixo X	0	1	2	3	eixo X	0	1	2	3
	mínimo	-65			Mínimo	-74				
	máximo	0			Máximo	-14				
	média	-38			Média	-55				
desvio padrão	22,8			desvio padrão	17,8					

Continua...

Continuação apêndice 3

Resultados das medidas de potencial de corrosão da área 6

Face Leste - potencial de corrosão E_{corr} (mV)										eixo	
A6 - Realcalinizante +inibidor 1	sem produto		-50	-68	-60	com produto		-54	-70	-52	5
	sem produto		-82	-79	-61	com produto		-75	-88	-40	6
	sem produto		-126	-98	-76	com produto		-89	-71	-59	7
	eixo X	0	1	2	3	eixo X	0	1	2	3	
	mínimo	-126				Mínimo	-89				
	máximo	-50				Máximo	-40				
	média	-78				Média	-66				
	desvio padrão	21,7				desvio padrão	15,6				

Resultados das medidas de potencial de corrosão da área 7

Face Leste - potencial de corrosão E_{corr} (mV)										eixo	
A7 - Realcalinizante +inibidor 2	sem produto		-78		-181	com produto		-86	-106	-120	8
	sem produto		-151	-107	-89	com produto		-143	-102	-114	9
	sem produto		-232		-207	com produto		-132	-167	-107	10
	eixo X	0	1	2	3	eixo X	0	1	2	3	
	mínimo	-232				mínimo	-167				
	máximo	-78				máximo	-86				
	média	-149				média	-120				
	desvio padrão	55,7				desvio padrão	23,0				

Resultados das medidas de potencial de corrosão da área 68

Face Oeste - potencial de corrosão E_{corr} (mV)							eixo Y
A8 - Hidrofugante silano / siloxano	sem produto	19	12	com produto	-87	-14	1
	sem produto	7	-8	com produto	-98	-25	2
	sem produto	-7	-11	com produto	-99	-22	3
	sem produto	-20	-30	com produto	-89	-30	4
	sem produto	-47	-47	com produto	-109	-54	5
	sem produto	-120	-144	com produto	-52	-49	6
	sem produto	-133	-183	com produto	-70	-90	7
	eixo X	-4	-3		-4	-3	
	mínimo	-183		mínimo	-109		
	máximo	19		máximo	-14		
média	-51		média	-63			
desvio padrão	63,6		desvio padrão	31,3			

Continua...

Continuação apêndice 3

Resultados das medidas de potencial de corrosão da área 9

Face Oeste - potencial de corrosão E_{corr} (mV)									eixo Y
A9 - Hidrofugante silano	sem produto	19	20		com produto	-12	-12		1
	sem produto	1	6		com produto	-19	-17		2
	sem produto	-6	1		com produto	-20	-17		3
	sem produto	-23	-16		com produto	-24	-20		4
	sem produto	-41	-45		com produto	-22	-21		5
	sem produto	-86	-103		com produto	-22	-23		6
	sem produto	-154	-185		com produto	-54	-49		7
	eixo X	-2	-1	0		-2	-1	0	
	mínimo	-185			mínimo	-54			
	máximo	20			máximo	-12			
média	-44			média	-24				
desvio padrão	62,4			desvio padrão	11,9				

Resultados das medidas de potencial de corrosão da área 10

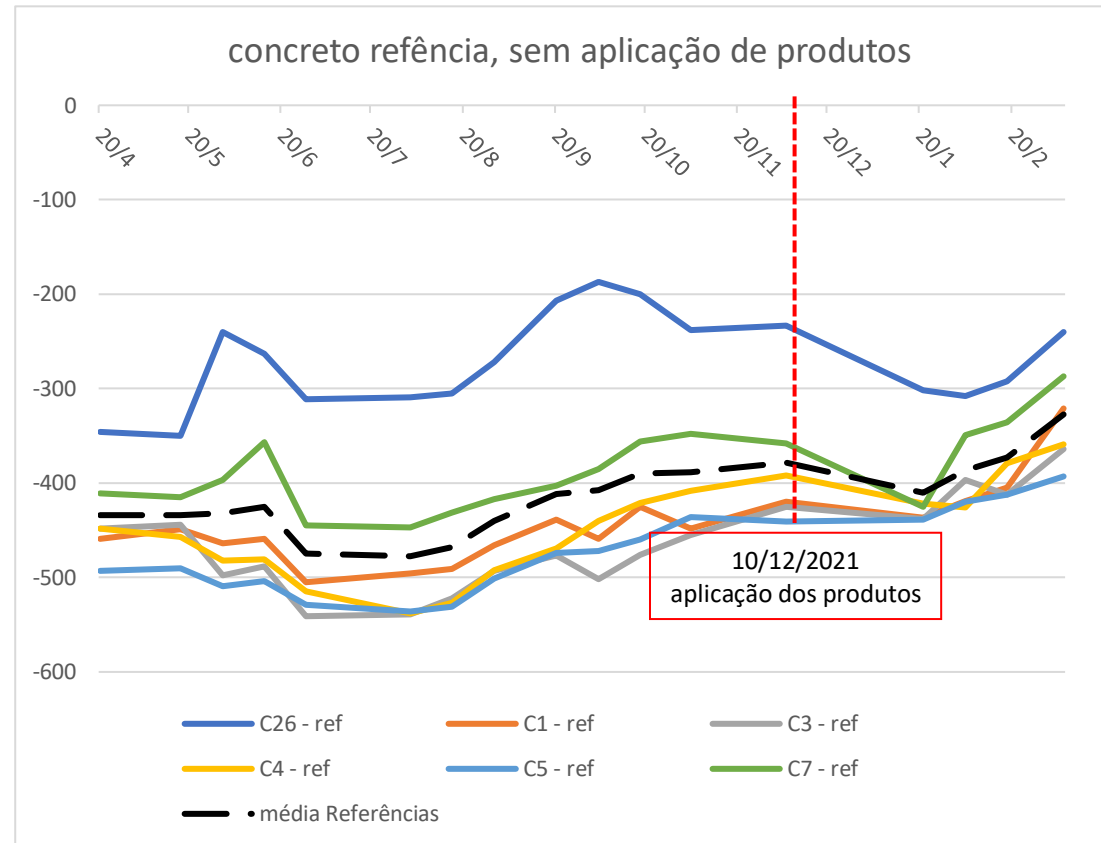
Face Oeste - potencial de corrosão (mV)					
A10 - referência	sem produto	-18	-16	11	13
	sem produto	-2	1	0	4
	sem produto	-8	0	-2	0
	sem produto	-10	-6	-8	0
	sem produto	-25	-22	-20	-8
	sem produto	-5	-28	-26	-10
	sem produto	-120	-117	-31	-20
	eixo X	1	2	3	4
	mínimo	-120			
	máximo	13			
média	-17				
desvio padrão	30,3				

Apêndice 4 – Dados das medidas de potencial de corrosão e inspeção visual nos corpos de prova rompidos e barras corroídas






Dados de potencial de corrosão dos corpos de prova referência sem produtos







CP	20/4	17/5	31/5	14/6	28/6	2/8	16/8	30/8	20/9	4/10	18/10	4/11	6/12	21/1	4/2	18/2	9/3	referências	
C26 - ref	-346	-350	-240	-263	-311	-309	-305	-272	-207	-187	-200	-238	-233	-302	-308	-292	-240		
C1 - ref	-459	-449	-464	-459	-505	-496	-491	-466	-439	-459	-425	-448	-420	-437	-419	-405	-321		
C3 - ref	-448	-444	-498	-488	-541	-539	-522	-493	-477	-502	-476	-455	-425	-438	-397	-412	-364		
C4 - ref	-448	-457	-482	-481	-515	-538	-527	-492	-469	-440	-421	-408	-392	-422	-426	-379	-359		
C5 - ref	-493	-490	-509	-504	-529	-536	-531	-501	-474	-472	-460	-436	-441	-439	-420	-412	-393		
C7 - ref	-411	-415	-397	-357	-445	-447	-431	-417	-403	-385	-356	-348	-358	-425	-349	-336	-287		
média Referências	-434	-434	-432	-425	-474	-478	-468	-440	-412	-408	-390	-389	-378	-411	-387	-373	-327		

Gráfico dos corpos de prova de referência



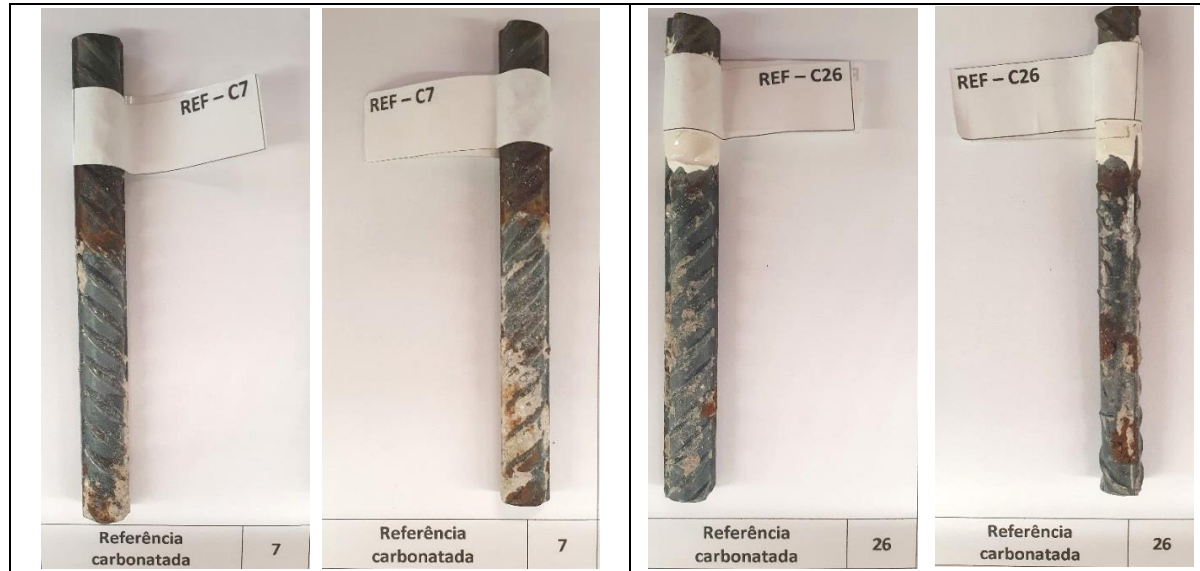
Corpos de prova rompidos ao final das medições dos potenciais de corrosão

 <p>REFERÊNCIA CP'S CARBONATADOS</p> <p>1</p>	 <p>REFERÊNCIA CP'S CARBONATADOS</p> <p>3</p>	 <p>REFERÊNCIA CP'S CARBONATADOS</p> <p>4</p>
<p>105 % de corrosão nas extremidades, cor marrom alaranjado</p>	<p>15 % de corrosão superficial ao longo das nervuras, cor marrom alaranjado</p>	<p>10% de corrosão, superficial nas nervuras, cor marrom alaranjado</p>
 <p>REFERÊNCIA CP'S CARBONATADOS</p> <p>5</p>	 <p>REFERÊNCIA CP'S CARBONATADOS</p> <p>7</p>	 <p>REFERÊNCIA CP'S CARBONATADOS</p> <p>26</p>
<p>15 % de corrosão, cor marrom alaranjado</p>	<p>10 % de corrosão, cor marrom alaranjado</p>	<p>15 % de corrosão, cor marrom alaranjado</p>

											
Referência carbonatada	1	Referência carbonatada	3	Referência carbonatada	4	Referência carbonatada	5	Referência carbonatada	7	Referência carbonatada	26
OBS: Área corroída (%): 15 Cor: marrom alaranjado Intensidade da corrosão: pouco acúmulo de produtos de corrosão		OBS: Área corroída (%): 5 Cor: marrom alaranjado Intensidade da corrosão: pouco acúmulo de produtos de corrosão		OBS: Área corroída (%): 15 Cor: marrom alaranjado Intensidade da corrosão: pouco acúmulo de produtos de corrosão		OBS: Área corroída (%): 30 Cor: marrom alaranjado, com alguns pontos mais escuros Intensidade da corrosão: pouco acúmulo de produtos de corrosão		OBS: Área corroída (%): 10 Cor: marrom alaranjado Intensidade da corrosão: pouco acúmulo de produtos de corrosão		OBS: Área corroída (%): 10 Cor: marrom alaranjado Intensidade da corrosão: pouco acúmulo de produtos de corrosão	

Barras extraídas dos CPs de concreto referência

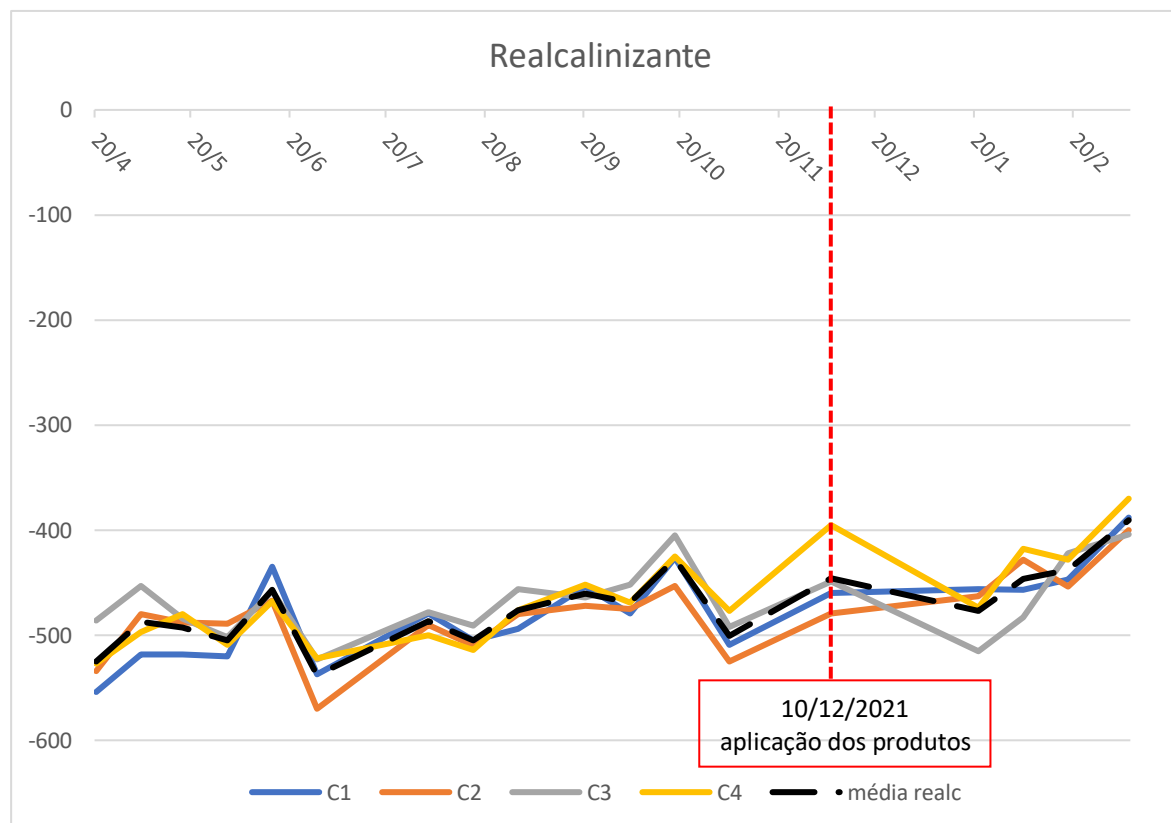




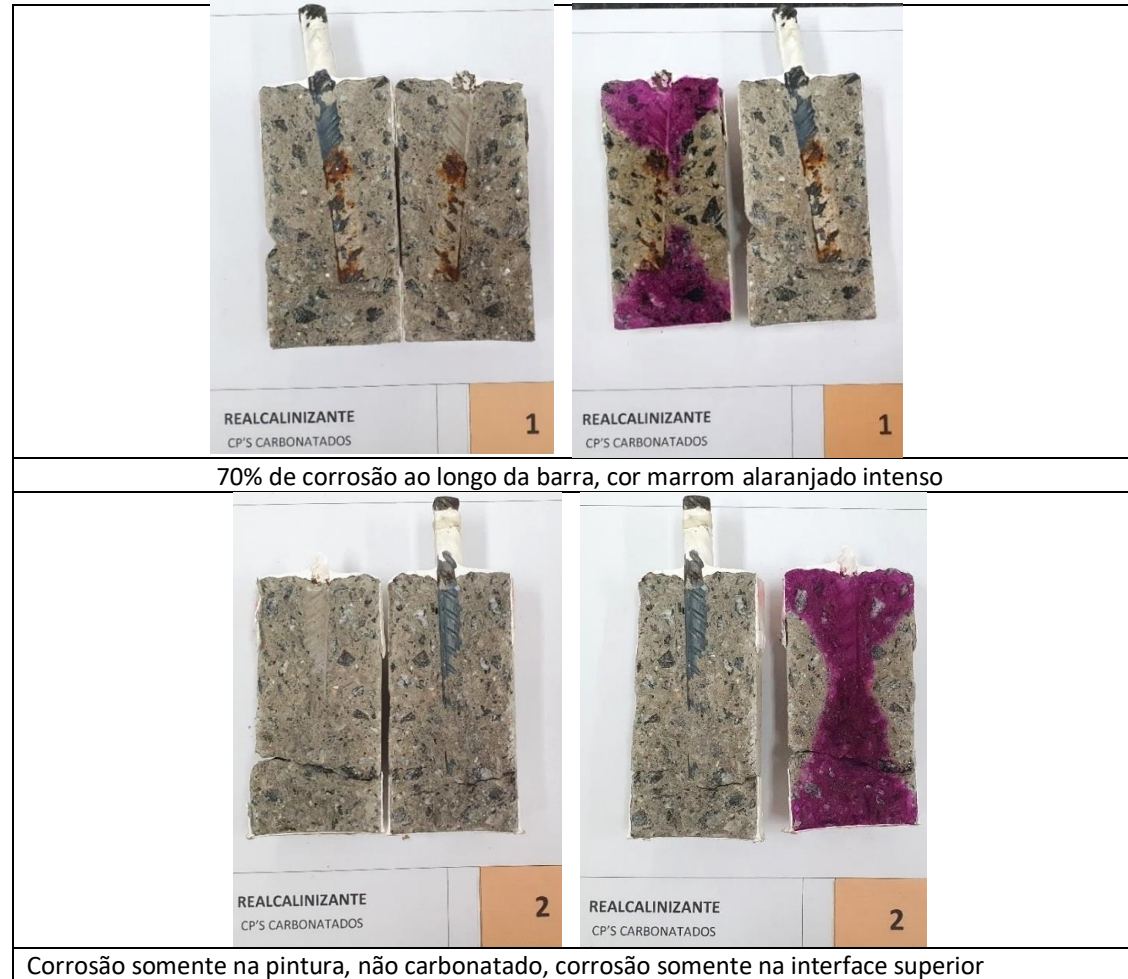
Dados de potencial de corrosão dos corpos de prova com realcalinizante

CP	20/4	4/5	17/5	31/5	14/6	28/6	2/8	16/8	30/8	20/9	4/10	18/10	4/11	6/12	21/1	4/2	18/2	9/3	REALCALINIZANTE
C1	-554	-518	-518	-520	-435	-537	-479	-505	-494	-454	-479	-426	-509	-460	-456	-457	-447	-388	
C2	-534	-480	-488	-489	-467	-570	-490	-510	-480	-472	-475	-453	-525	-479	-463	-428	-454	-400	
C3	-486	-453	-484	-502	-458	-523	-478	-491	-456	-464	-452	-405	-492	-449	-515	-483	-422	-404	
C4	-527	-497	-480	-509	-468	-522	-500	-514	-476	-452	-469	-425	-477	-395	-474	-418	-428	-370	
média realc	-525	-487	-493	-505	-457	-538	-487	-505	-477	-461	-469	-427	-501	-446	-477	-447	-438	-391	

Gráfico dos corpos de prova de com realcalinizante



Corpos de prova rompidos ao final das medições dos potenciais de corrosão





Barras extraídas dos CPs de concreto com realcalinizante

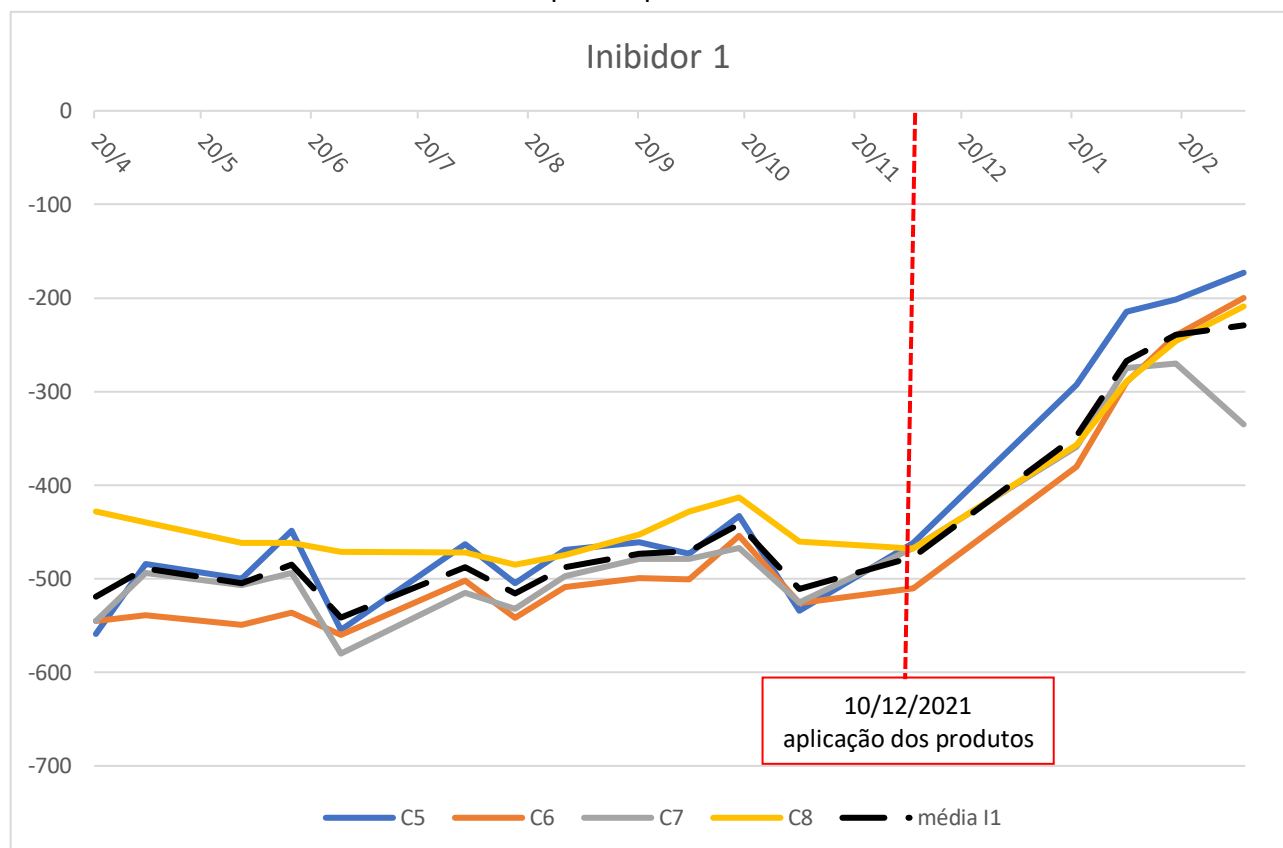
							
Realcalinizante	1	Realcalinizante	2	Realcalinizante	3	Realcalinizante	4
<p>OBS:</p> <p>Área corroída (%): 35</p> <p>Cor: marrom alaranjado, com algumas áreas pretas</p> <p>Intensidade da corrosão: acúmulo significativo de produtos de corrosão</p>		<p>OBS:</p> <p>Área corroída (%): 15</p> <p>Cor: marrom alaranjado</p> <p>Intensidade da corrosão: acúmulo moderado de produtos de corrosão</p>		<p>OBS:</p> <p>Área corroída (%): 20</p> <p>Cor: marrom alaranjado</p> <p>Intensidade da corrosão: acúmulo moderado de produtos de corrosão</p>		<p>OBS:</p> <p>Área corroída (%): 20</p> <p>Cor: marrom alaranjado, com algumas áreas pretas</p> <p>Intensidade da corrosão: acúmulo moderado de produtos de corrosão,</p>	



Dados de potencial de corrosão dos corpos de prova com inibidor 1

CP	20/4	4/5	31/5	14/6	28/6	2/8	16/8	30/8	20/9	4/10	18/10	4/11	6/12	21/1	4/2	18/2	9/3	INIBIDOR DE CORROSÃO (I1)	
C5	-559	-484	-500	-449	-555	-463	-505	-469	-461	-473	-433	-534	-462	-293	-215	-202	-173		
C6	-545	-539	-549	-536	-560	-502	-542	-509	-499	-501	-454	-526	-510	-380	-290	-240	-200		
C7	-545	-494	-507	-494	-580	-515	-532	-497	-479	-479	-467	-525	-467	-359	-275	-270	-335		
C8	-428	-440	-462	-462	-471	-472	-485	-475	-453	-428	-413	-460	-468	-357	-289	-246	-209		
média I1	-519	-489	-505	-485	-542	-488	-516	-488	-473	-470	-442	-511	-477	-347	-267	-240	-229		

Gráfico dos corpos de prova de com inibidor 1



Corpos de prova rompidos ao final das medições dos potenciais de corrosão

 <p>INIBIDOR 1 CP'S CARBONATADOS</p> <p>5</p>	 <p>INIBIDOR 1 CP'S CARBONATADOS</p> <p>5</p>	 <p>INIBIDOR 1 CP'S CARBONATADOS</p> <p>6</p>
<p>20% de área corroída somente na área carbonatada apresentou acúmulo de produtos, corrosão em partes do perímetro</p>		<p>40% de área corroída, com acúmulo de produtos.</p>
 <p>INIBIDOR 1 CP'S CARBONATADOS</p> <p>7</p>	 <p>INIBIDOR 1 CP'S CARBONATADOS</p> <p>7</p>	 <p>INIBIDOR 1 CP'S CARBONATADOS</p> <p>8</p>
<p>5% carbonatação na parte dos perímetros</p>		<p>30% da área corroída, com acúmulo de produtos na cor marrom alaranjada e preta</p>

Barras extraídas dos CPs de concreto com inibidor 1

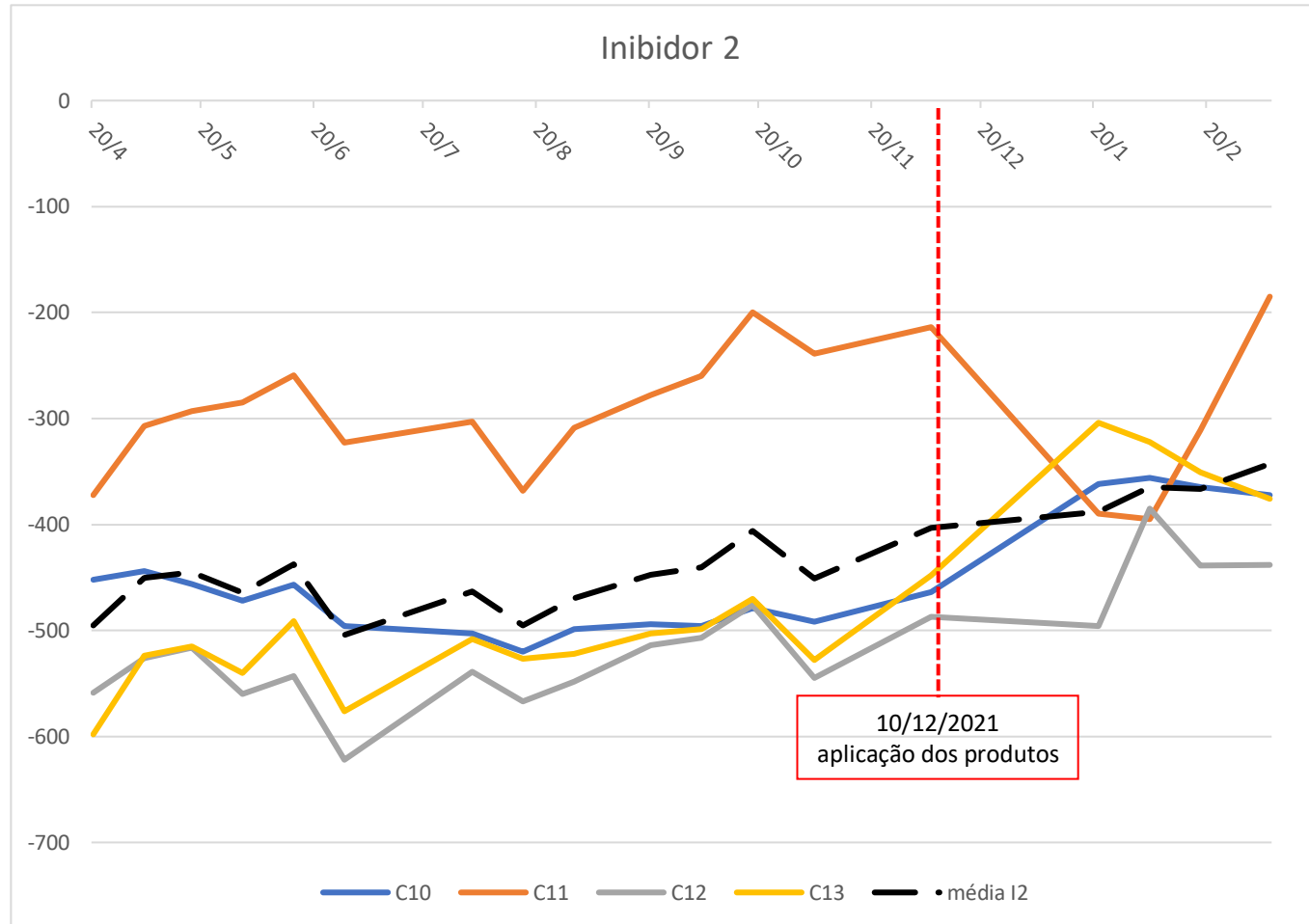
							
Inibidor 1	5	Inibidor 1	6	Inibidor 1	7	Inibidor 1	8
<p>OBS:</p> <p>Área corroída (%): 10</p> <p>Cor: marrom alaranjado</p> <p>Intensidade da corrosão: acúmulo moderado de produtos de corrosão</p>		<p>OBS:</p> <p>Área corroída (%): 30</p> <p>Cor: marrom alaranjado</p> <p>Intensidade da corrosão: acúmulo moderado de produtos de corrosão</p>		<p>OBS:</p> <p>Área corroída (%): 10</p> <p>Cor: marrom alaranjado</p> <p>Intensidade da corrosão: acúmulo significativo de produtos de corrosão</p>		<p>OBS:</p> <p>Área corroída (%): 10</p> <p>Cor: marrom alaranjado</p> <p>Intensidade da corrosão: acúmulo moderado de produtos de corrosão</p>	



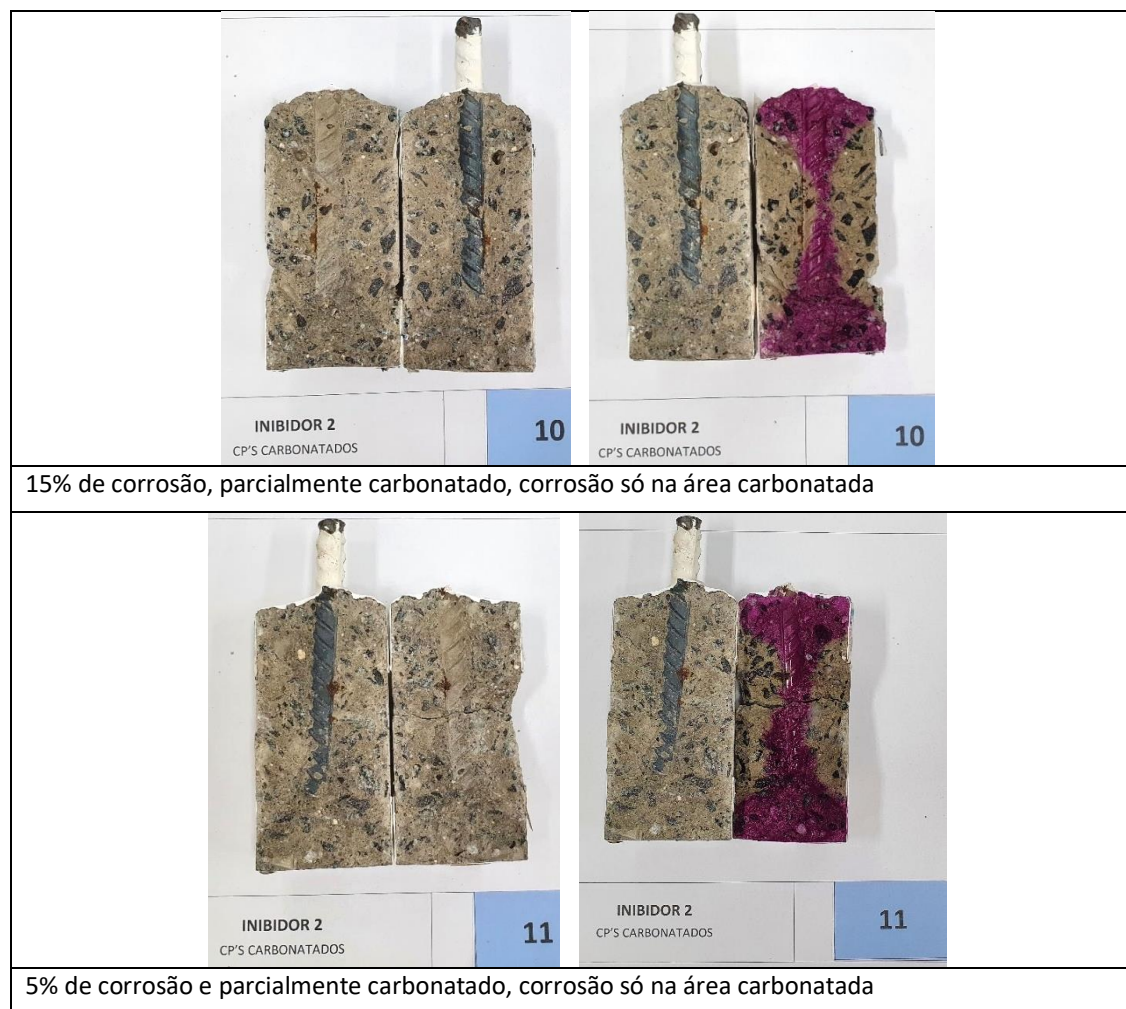
Dados de potencial de corrosão dos corpos de prova com inibidor 2

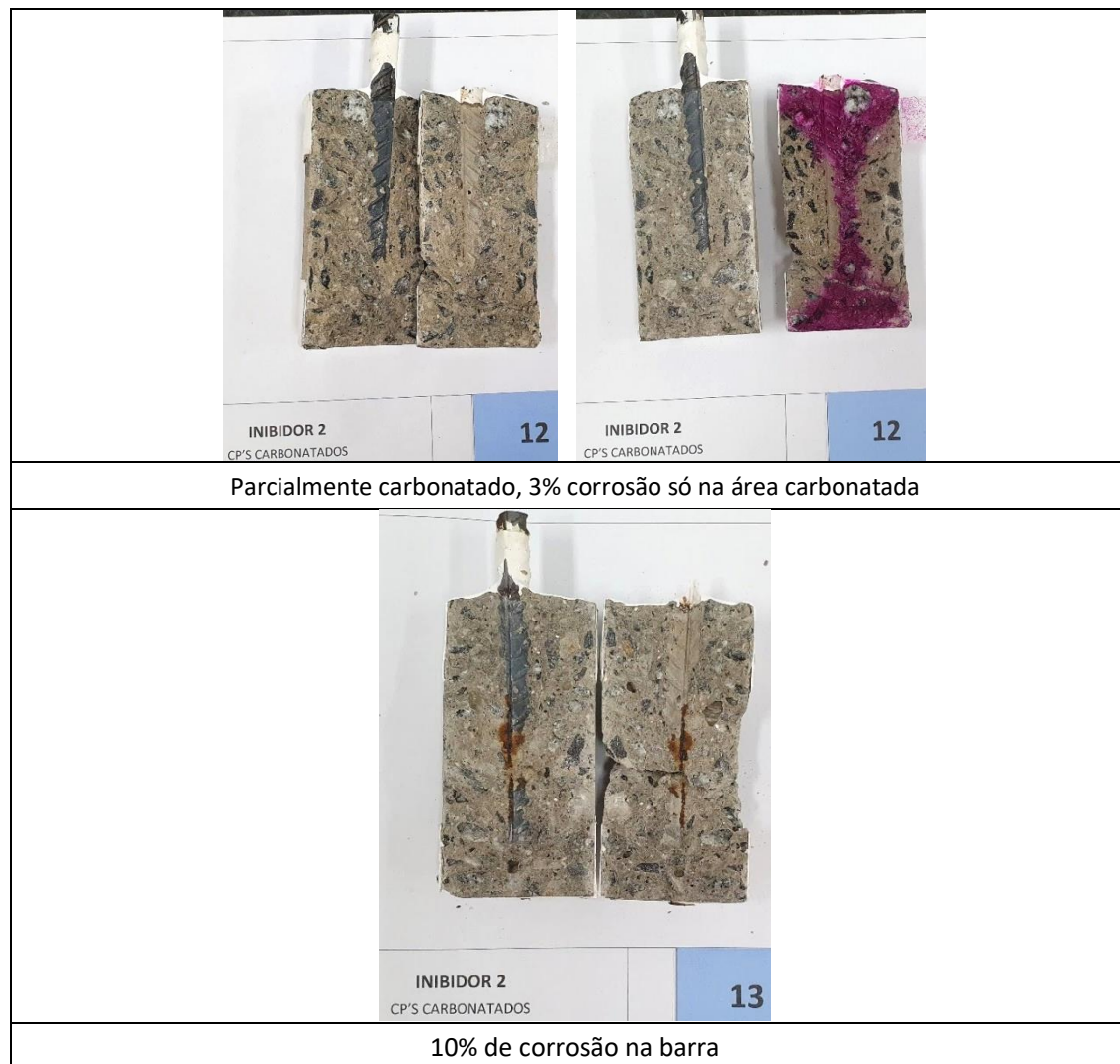
CP	20/4	4/5	17/5	31/5	14/6	28/6	2/8	16/8	30/8	20/9	4/10	18/10	4/11	6/12	21/1	4/2	18/2	9/3	INIBIDOR DE CORROSÃO (I2)	
C10	-452	-444	-456	-472	-457	-496	-503	-520	-499	-494	-496	-479	-492	-464	-362	-356	-365	-372		
C11	-372	-307	-293	-285	-259	-323	-303	-368	-309	-278	-260	-200	-239	-214	-390	-395	-311	-185		
C12	-559	-526	-516	-560	-543	-622	-539	-567	-548	-514	-507	-476	-545	-487	-496	-385	-439	-438		
C13	-598	-524	-515	-540	-491	-576	-508	-527	-522	-503	-499	-470	-528	-448	-304	-322	-351	-376		
média I2	-495	-450	-445	-464	-438	-504	-463	-496	-470	-447	-441	-406	-451	-403	-388	-365	-367	-343		

Gráfico dos corpos de prova de com inibidor 2







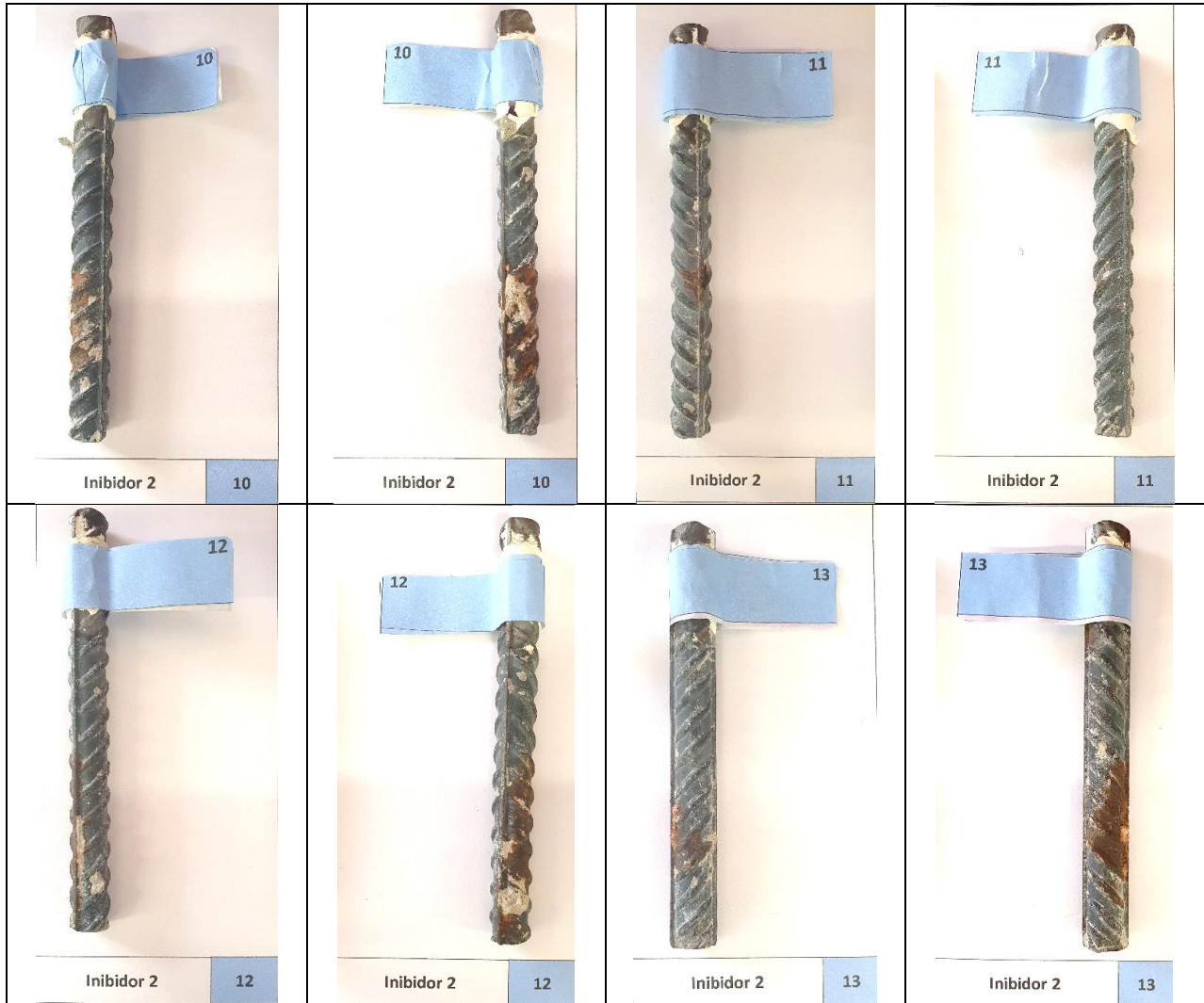
Corpos de prova rompidos ao final das medições dos potenciais de corrosão





Barras extraídas dos CPs de concreto com inibidor 2

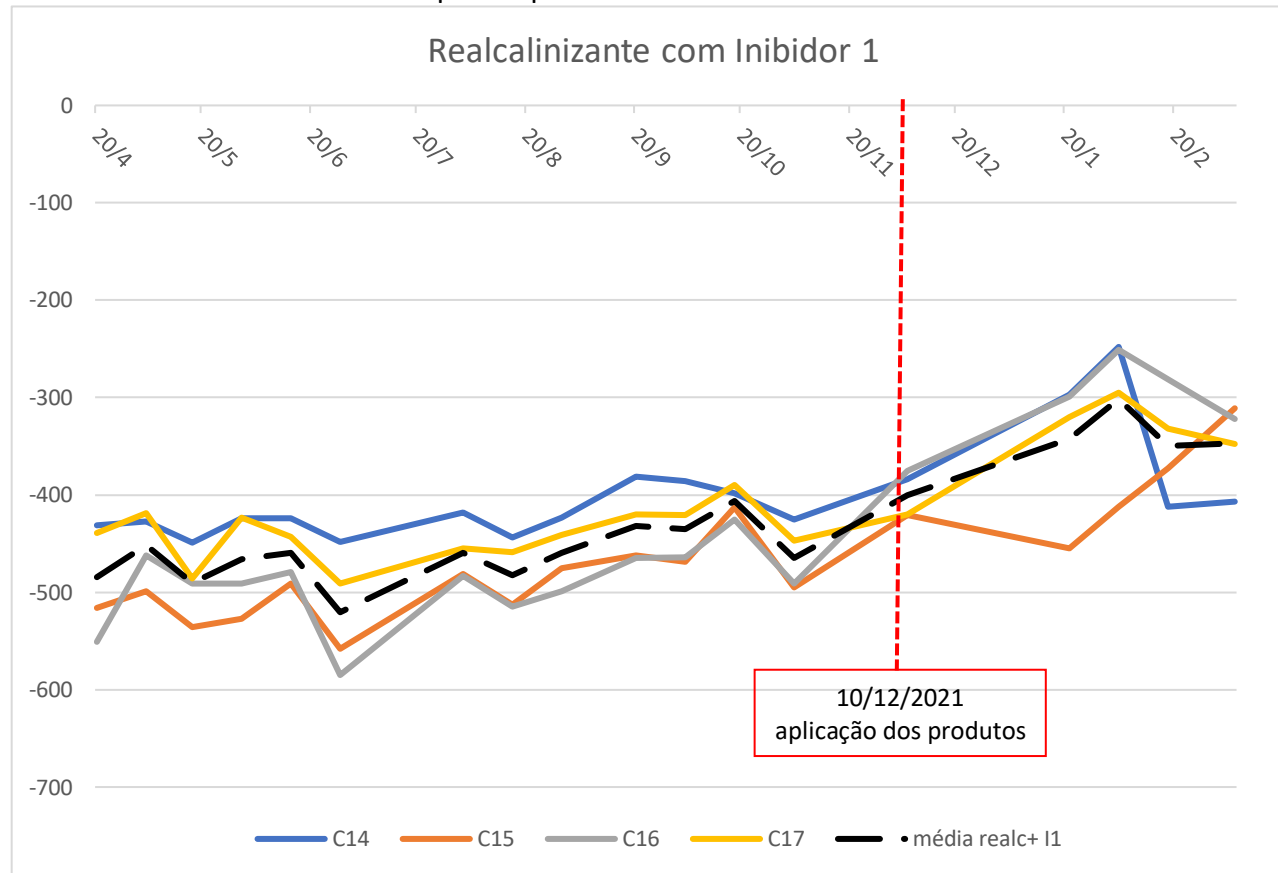
							
Inibidor 2	10	Inibidor 2	11	Inibidor 2	12	Inibidor 2	13
<p>OBS:</p> <p>Área corroída (%): 10</p> <p>Cor: marrom alaranjado</p> <p>Intensidade da corrosão: pouco acúmulo de produtos de corrosão</p>		<p>OBS:</p> <p>Área corroída (%): 5</p> <p>Cor: marrom alaranjado, com um pouco de preto</p> <p>Intensidade da corrosão: pouco acúmulo de produtos de corrosão</p>		<p>OBS:</p> <p>Área corroída (%): 15</p> <p>Cor: marrom alaranjado</p> <p>Intensidade da corrosão: pouco acúmulo de produtos de corrosão</p>		<p>OBS:</p> <p>Área corroída (%): 15</p> <p>Cor: marrom alaranjado</p> <p>Intensidade da corrosão: pouco acúmulo de produtos de corrosão</p>	



Dados de potencial de corrosão dos corpos de prova com realcalinizante e inibidor 1

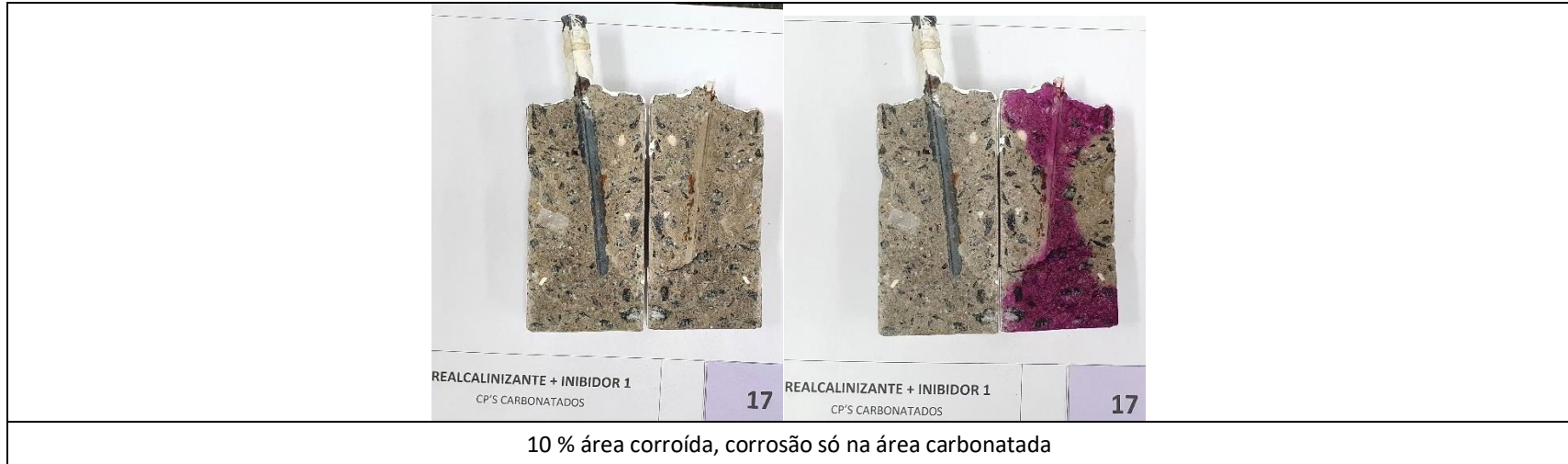
CP	20/4	4/5	17/5	31/5	14/6	28/6	2/8	16/8	30/8	20/9	4/10	18/10	4/11	6/12	21/1	4/2	18/2	9/3	R + I1	
C14	-431	-427	-449	-424	-424	-448	-418	-444	-423	-381	-386	-398	-425	-384	-297	-248	-412	-407		
C15	-516	-499	-536	-527	-491	-558	-481	-513	-475	-462	-469	-413	-495	-421	-455	-412	-373	-311		
C16	-551	-462	-491	-491	-479	-585	-483	-515	-499	-465	-464	-425	-491	-375	-299	-251	-281	-322		
C17	-439	-419	-486	-423	-443	-491	-455	-459	-441	-420	-421	-390	-447	-420	-320	-295	-332	-348		
média realc+ I1	-484	-452	-491	-466	-459	-521	-459	-483	-460	-432	-435	-407	-465	-400	-343	-302	-350	-347		

Gráfico dos corpos de prova com realcalinizante e inibidor1







Corpos de prova rompidos ao final das medições dos potenciais de corrosão





Barras extraídas dos CPs de concreto com realcalinizante e inibidor 1

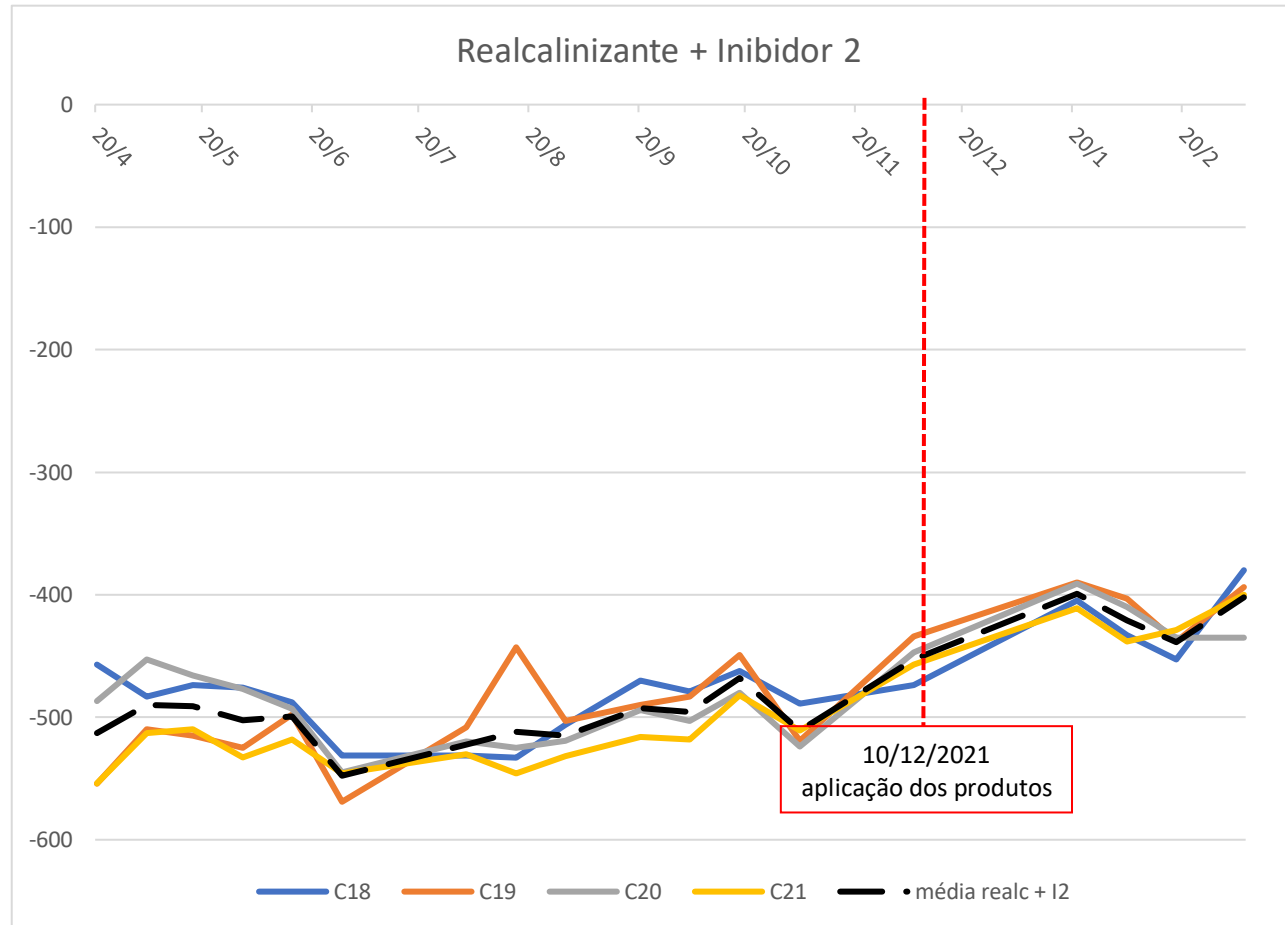
							
Realcalinizante + Inibidor 1	14	Realcalinizante + Inibidor 1	15	Realcalinizante + Inibidor 1	16	Realcalinizante + Inibidor 1	17
OBS: Área corroída (%): 15 Cor: marrom alaranjado Intensidade da corrosão: pouco acúmulo de produtos de corrosão		OBS: Área corroída (%): 15 Cor: marrom alaranjado Intensidade da corrosão: acúmulo significativo de produtos de corrosão		OBS: Área corroída (%): 15 Cor: marrom alaranjado Intensidade da corrosão: acúmulo significativo de produtos de corrosão		OBS: Área corroída (%): 15 Cor: marrom alaranjado Intensidade da corrosão: acúmulo moderado de produtos de corrosão	



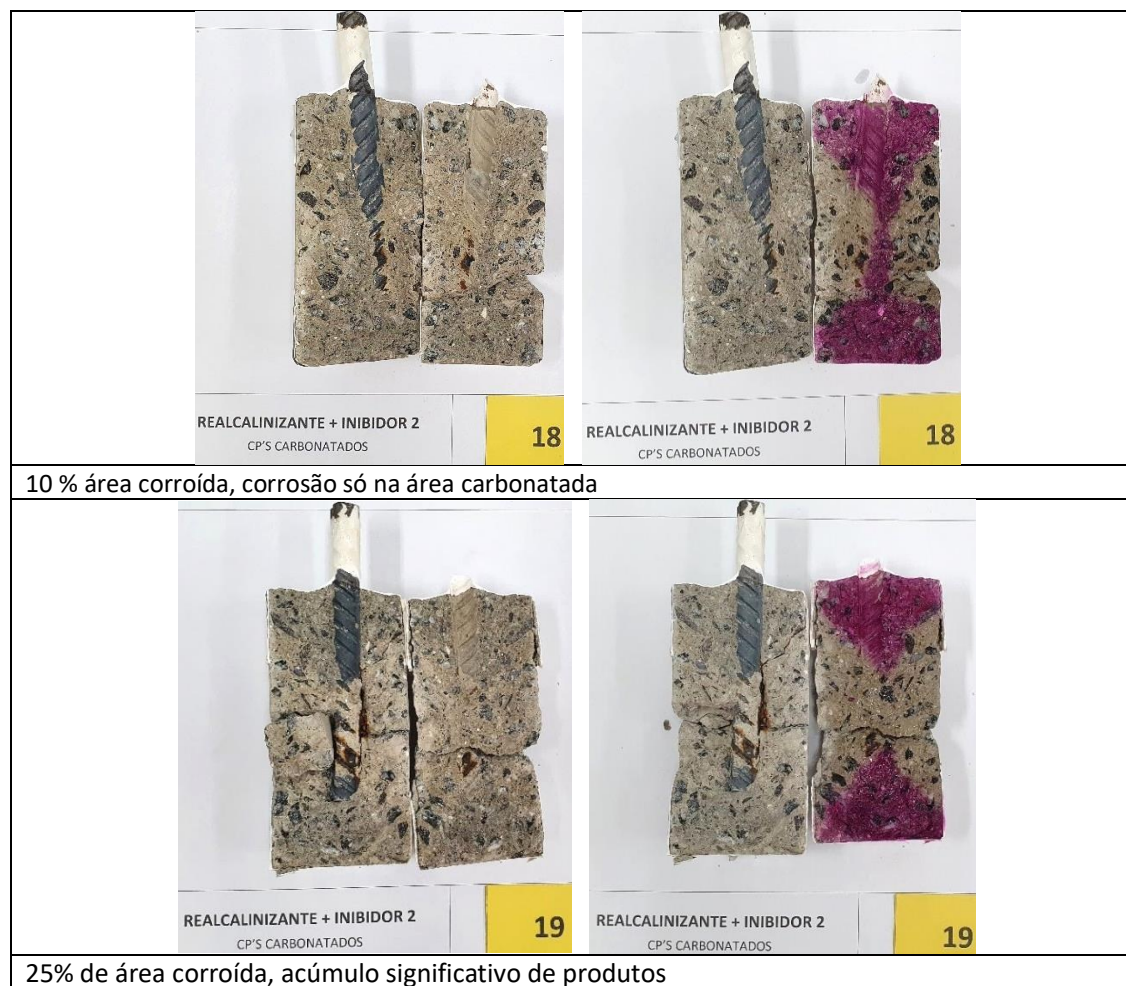
Dados de potencial de corrosão dos corpos de prova com realcalinizante e inibidor 2

CP	20/4	4/5	17/5	31/5	14/6	28/6	2/8	16/8	30/8	20/9	4/10	18/10	4/11	6/12	21/1	4/2	18/2	9/3	R + I2	
C18	-457	-483	-474	-476	-488	-531	-531	-533	-506	-470	-479	-462	-489	-474	-405	-433	-453	-380		
C19	-554	-510	-515	-525	-498	-569	-508	-443	-503	-490	-483	-449	-519	-434	-390	-403	-438	-394		
C20	-487	-453	-466	-477	-493	-545	-520	-525	-519	-494	-503	-480	-524	-447	-391	-410	-435	-435		
C21	-554	-513	-510	-533	-518	-546	-530	-546	-532	-516	-518	-482	-511	-457	-411	-438	-429	-400		
média realc + I2	-513	-490	-491	-503	-499	-548	-522	-512	-515	-493	-496	-468	-511	-453	-399	-421	-439	-402		

Gráfico dos corpos de prova com realcalinizante e inibidor 2



Corpos de prova rompidos ao final das medições dos potenciais de corrosão









35% de área corroída, acúmulo significativo de productos, carbonatado parcialmente



35% de área corroída, acúmulo significativo de productos

Barras extraídas dos CPs de concreto com realcalinizante e inibidor 2

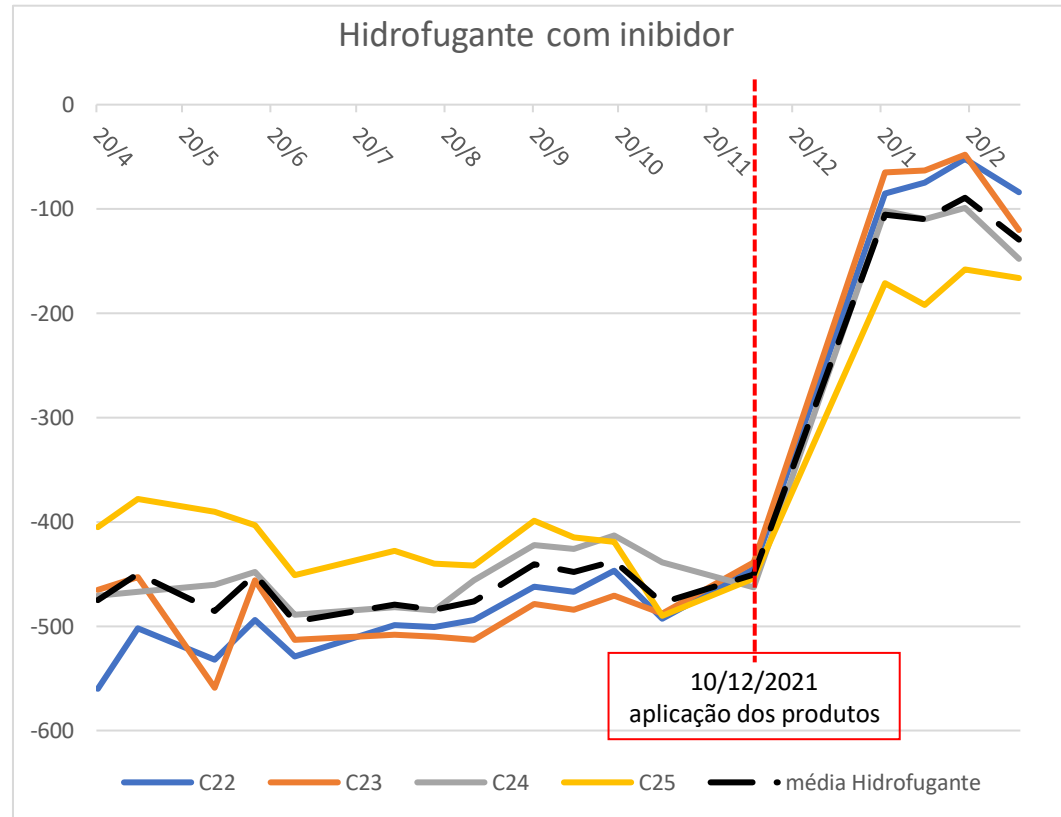
							
Realcalinizante + Inibidor 2	18	Realcalinizante + Inibidor 2	19	Realcalinizante + Inibidor 2	20	Realcalinizante + Inibidor 2	21
OBS: Área corroída (%): 15 Cor: marrom alaranjado Intensidade da corrosão: acúmulo moderado de produtos de corrosão		OBS: Área corroída (%): 30 Cor: marrom alaranjado Intensidade da corrosão: acúmulo moderado de produtos de corrosão		OBS: Área corroída (%): 15 Cor: marrom alaranjado Intensidade da corrosão: pouco acúmulo de produtos de corrosão		OBS: Área corroída (%): 20 Cor: marrom alaranjado Intensidade da corrosão: acúmulo significativo de produtos de corrosão	



Dados de potencial de corrosão dos corpos de prova com hidrofugante com silano e amina

CP	20/4	4/5	31/5	14/6	28/6	2/8	16/8	30/8	20/9	4/10	18/10	4/11	6/12	21/1	4/2	18/2	9/3	H/A	
C22	-560	-502	-532	-494	-529	-499	-501	-494	-462	-467	-447	-493	445	-85	-75	-52	-84		
C23	-465	-453	-559	-456	-513	-508	-510	-513	-479	-484	-471	-488	439	-65	-63	-48	120		
C24	-471	-467	-460	-448	-489	-482	-485	-456	-422	-426	-413	-439	463	102	110	-99	148		
C25	-405	-378	-390	-403	-451	-428	-440	-442	-399	-415	-419	-490	454	171	192	158	166		
média																			
Hidrofugante	-475	-450	-485	-450	-496	-479	-484	-476	-441	-448	-438	-478	450	106	110	-89	130		

Gráfico dos corpos de prova com realcalinizante e inibidor







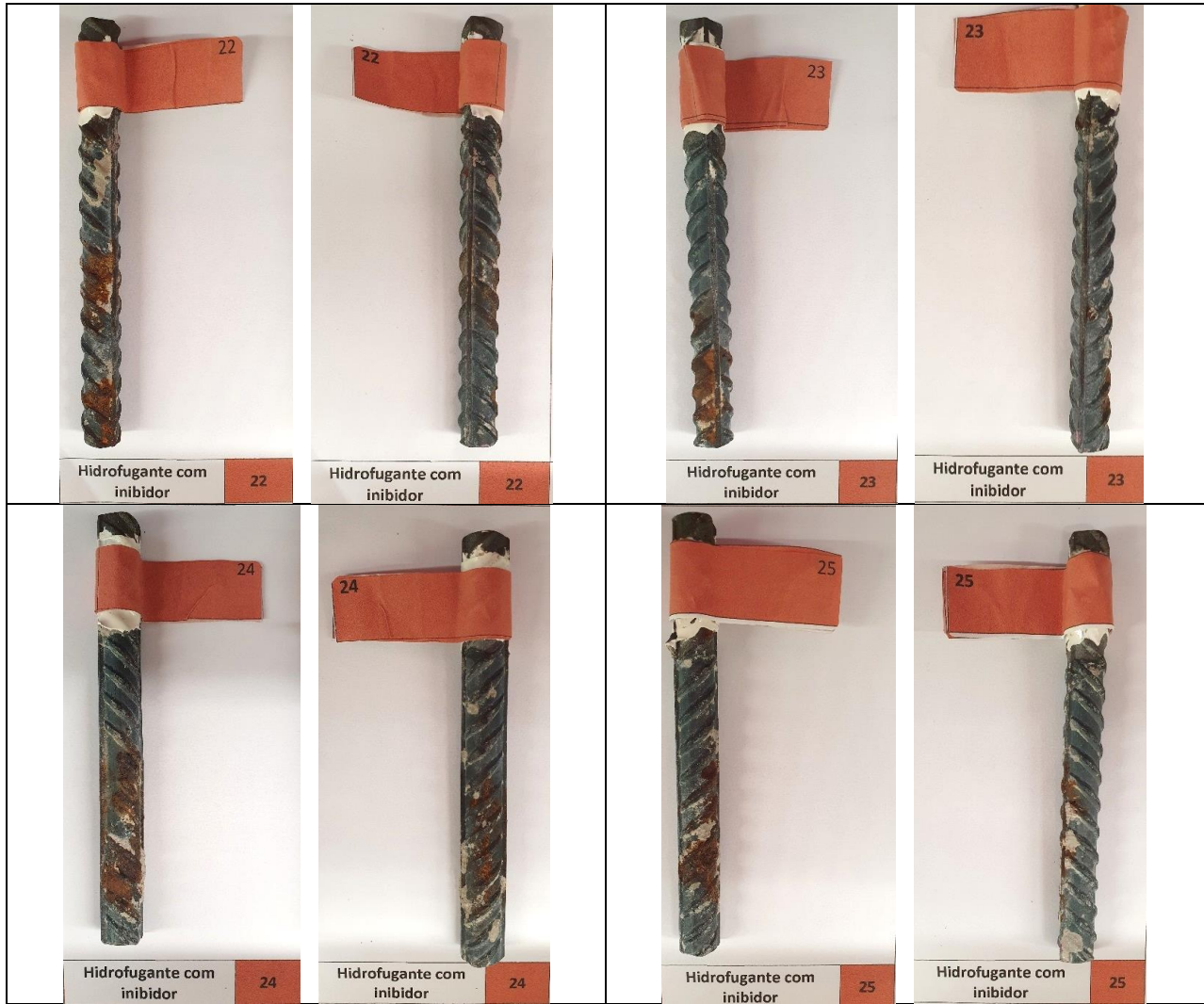
Corpos de prova rompidos ao final das medições dos potenciais de corrosão





Barras extraídas dos CPs de concreto com realcalinizante e inibidor 2

			
Hidrofugante com inibidor 22	Hidrofugante com inibidor 23	Hidrofugante com inibidor 24	Hidrofugante com inibidor 25
<p>OBS:</p> <p>Área corroída (%): 25</p> <p>Cor: marrom alaranjado</p> <p>Intensidade da corrosão: acúmulo moderado de produtos de corrosão</p>	<p>OBS:</p> <p>Área corroída (%): 25</p> <p>Cor: marrom alaranjado</p> <p>Intensidade da corrosão: acúmulo moderado de produtos de corrosão</p>	<p>OBS:</p> <p>Área corroída (%): 35</p> <p>Cor: marrom alaranjado com alguns pontos pretos</p> <p>Intensidade da corrosão: acúmulo significativo de produtos de corrosão</p>	<p>OBS:</p> <p>Área corroída (%): 35</p> <p>Cor: marrom alaranjado</p> <p>Intensidade da corrosão: acúmulo significativo de produtos de corrosão</p>



Apêndice 5 - Resultados da avaliação da resistência a compressão

Resultados da avaliação da resistência a compressão, com análises estatísticas dentro de cada grupo, dos CPs com produtos/sistemas, sem carbonatação, com carbonatação, baseados nos parâmetros do anexo B da NBR 5739 (2018).

Produto / sistema	C. P.	Tensão (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão*	Coefficiente de variação*	Avaliação do coeficiente de variação*
R	1	40,8	40,8	0,22	0,5%	Nível 1 - Excelente
	2	40,2				
	3	41,3				
I1	7	46,2	44,4	0,75	1,7%	Nível 1 - Excelente
	8	44,5				
	9	42,4				
I2	13	42,6	43,4	0,41	1,0%	Nível 1 - Excelente
	14	44,7				
	15	42,8				
HA	19	46,2	42,3	1,81	4,3%	Nível 3 - bom
	20	43,7				
	21	37,0				
R + HA	4	46,4	43,7	1,10	2,5%	Nível 1 - Excelente
	5	40,8				
	6	43,9				
I1 + HA	10	48,3	44,0	1,52	3,4%	Nível 2 - muito bom
	11	43,1				
	12	40,6				
I2 + HA	16	44,1	43,9	0,73	1,7%	Nível 1 - Excelente
	17	41,9				
	18	45,6				
R + I1	22	44,3	40,9	1,36	3,3%	Nível 2 - muito bom
	23	37,4				
	24	40,9				
R+I2	28	40,2	41,8	0,65	1,6%	Nível 1 - Excelente
	29	41,6				
	30	43,5				
R+ I1+ HA	25	44,6	43,3	0,91	2,1%	Nível 1 - Excelente
	26	40,3				
	27	44,9				
R+I2+HA	31	43,0	42,7	0,12	0,3%	Nível 1 - Excelente
	32	42,7				
	33	42,4				
REF CARB	34	44,8	44,9	0,49	1,1%	Nível 1 - Excelente
	35	46,2				
	36	43,7				
REF NÃO CARB	37	41,4	40,2	0,91	2,3%	Nível 1 - Excelente
	38	37,3				
	39	41,9				

ANEXOS

Anexo 1 – Carta Eng. José Carlos Figueiredo Ferraz

Carta do Eng. José Carlos de Figueiredo Ferraz ao Fundo para a Construção da Cidade Universitária, datada de 25 de maio de 1966, com recomendações técnicas para o controle dos materiais e processos a serem adotados na produção da estrutura do edifício Vilanova Artigas. Documento extraído de Contier (2015, p. 293).

BRIGADEIRO TOBIAS, 356 - 7.º AND. - SALA 73 - SÃO PAULO

São Paulo, 25 de maio de 1966

Exmo. Sr.
Dr. EDUARDO PESSOA
M.D. Acessor Técnico do Fundo para
Construção da Cidade Universitária
A.S.O.
C A P I T A L - S.P.

Prezado Senhor,

REF.: ESTRUTURA DA FACULDADE DE ARQUITETURA
E URBANISMO.

D I P A P R L 150514
D I E 27 15 66
D A T A 27 15 66
P R O C. 3988
65.1.3988.51.9
Fls. N.º 3
Proc. N.º 3988
Rub.

Reportando-nos ao que havíamos prometido quando da nossa última reunião, vimos assinalar certos tópicos que julgamos importantes. Assim :

1. Todo o concreto de fundação, lajes de subsolo, cortinas e arrimos será de $\sigma_{c 28} = 250 \text{ kg/cm}^2$; tudo n'um volume cêrca de 900 m^3 .
2. Todo o concreto estrutural será de $\sigma_{c 28} = 320 \text{ kg/cm}^2$, n'um volume cêrca de 5.600 m^3 .
3. O contrôlê da qualidade do concreto será rigoroso, nos termos da NB-1.
4. As fôrmas serão preparadas de modo a permitir que o concreto aparente apresente-se com aspecto uniforme, sem defeitos.
5. As vigas paredes, da fachada, serão construídas por trechos horizontais, cujas alturas devem ser da ordem de 1,20 m a 1,50 m, com modulação previamente estabelecida.

BRIGADEIRO TOBIAS, 356 - 7.º AND. - SALA 73 - SÃO PAULO

folha 2 de n/carta de 25.5.1966

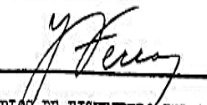
65.1.3988.51.9

Fls. N.º 55
Proc. N.º 3988
Rub.

6. Para a execução de concreto protendido deverá ser ouvida a firma J.C. DE FIGUEIREDO FERRAZ, cuja patente de protensão oferece ao "Fundo", sem qualquer onus, quer de Royalty, quer de fiscalização.
7. O aço de protensão será do tipo 140/160, ou seja $\sigma_{e 0,2\%} = 140 \text{ kg/mm}^2$ e $\sigma_{m} = 160 \text{ kg/mm}^2$.
8. As fôrmas das colunas externas, devido à sua fôrma especial, devem ser revestidas de chapa.
9. A concretagem do prédio se fará segundo três blocos no sentido longitudinal. O trecho central, entre coordenadas 4 e 6, será concretado posteriormente, e o monolitismo será recomposto depois de praticamente terminado o processo de retração / (45 dias).
10. Aconselha-se o uso de aditivo plastificador para facilitar a concretagem e minorar os efeitos nocivos de retração.

Sem mais, subscrevemo-nos

Atenciosamente


JOSE CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ

Anexo 2 – Testes de detecção de inibidores de corrosão no concreto

- 1) Kit com 2 reagentes não identificados fornecidos pelo fabricante (dificuldade de Importação pelo fabricante por conta da COVID-19) (DONADIO, 2015).



METHOD STATEMENT

Qualitative Analysis of Sika® FerroGard®-903 Plus

SEPTEMBER 2015 / VER.: 7 / SIKA SERVICES AG / M. DONADIO

REFURBISHMENT

BUILDING TRUST



TABLE OF CONTENTS

1	Scope	3
2	Equipment	3
3	Preliminary Works on Job Site	3
4	Qualitative Test Analysis	4
6	Interpretation of Results	7
7	Important Notes:	7
8	Legal Note	8

8



1 SCOPE

The purpose of this analysis kit is to determine if there is Sika® FerroGard®-903 Plus present in concrete. This qualitative test does not indicate the exact amount of Sika® FerroGard®-903 Plus in parts per million (ppm).

2 EQUIPMENT

Equipment and consumables contained in Sika® FerroGard®-903 Plus Test Kit:

- Hammer, chisel and steel plate
- Hot air dryer (hair-dryer type)
- Eye protection glasses
- Syringes, 1 ml (0.03 fl oz), Luer type (available at laboratory supply companies or chemist's shops)
- Small glass bottles of 5 ml (0.15 fl oz) (available at laboratory supply companies)
- Syringe filters with pore size of 0.45 µm and filter diameter of 13 mm (1/2 in), non-sterile, membrane types: Nylon or regenerated cellulose (different brands, available at laboratory supply companies)
- Micro-pipettes 10 µl (= disposable capillaries): Available at laboratory supply companies such as VWR International /Merck (intraend micro-pipettes, Brand Cat No 709109)
- Small plastic or glass bottle filled with distilled water
- Small plastic or glass bottle filled with Sika® FerroGard®-903 Plus standard solution
- Small spray bottle filled with test solution A
- Small spray bottle filled with test solution B

Required liquids are provided by your company's chemist.

- Chromatography foils Polygram SIL G/UV254 for thin layer chromatography, size: 4 by 8 cm, plastic foils precoated with silica gel. Suppliers:
 - Macherey-Nagel GmbH & Co. KG, D-52348 Düren / Germany, Cat No 805021
 - VWR International /Merck, Cat No 105750

3 PRELIMINARY WORKS ON JOB SITE



Take a test specimen of Sika® FerroGard®-903 Plus treated concrete by core drill (~45mm (2 inch) diameter by a depth greater than that of the reinforcement steel) or by chisel. When coring use the minimum amount as practical of water. This specimen is further referred to as **F** (= with Sika® FerroGard®-903 Plus).

Note: Do not use a bore drill to collect concrete samples!

To determine the presence of Sika® FerroGard®-903 Plus, a control specimen not treated with Sika® FerroGard®-903 Plus shall be taken in similar conditions. This specimen is further referred to as **C** (= control).

All operations described further are carried out on both specimens, **F** and **C**.

Method Statement
Qualitative Analysis – FerroGard-903 Plus
September-2015, Ver.: 7
BSO 33-4

Corporate – for template
REFURBISHMENT

4 QUALITATIVE TEST ANALYSIS



To test the depth of Sika® FerroGard®-903 Plus penetration, split core samples using a hammer and chisel at the required depth (e.g. on rebar level or in various depth profiles)



Alternatively, use a wet saw with minimal water to split the cores.



The required part of specimen are crushed on a steel plate by means of a hammer and ground to dust (particles shall be size less than 1 mm (1/24 inch) in diameter). Coarse aggregates (gravel) are discarded during the crushing operation.



Place the fine crushed concrete on a clean piece of paper



Clean the hammer and steel plate thoroughly after each use (wire brush and wet cloth) to avoid any further specimen contamination.



Take about 1 g (0.035 oz) of concrete dust onto a piece of folded paper and fill it into a 5 ml (0.15 fl. Oz) glass bottle (resulting filling height: 4 mm (1/6 in)). Label the bottles with **F** and **C** respectively as well as the depth at which the samples were extracted (when relevant)

Method Statement
Qualitative Analysis – FerroGard-903 Plus
September-2015, Ver.: 7
ISO 314

Corporate – for template
REFURBISHMENT



Transfer distilled water using the syringe into the glass bottle containing the concrete dust. The water level shall be approx. 5 mm (1/5 in) higher than the level of the concrete dust.



Screw the cap on the bottle. Shake the bottle for half a minute, leave it 5 minutes to rest. Re-shake the bottle for ½ minute and leave it to rest for at least an hour.



Remove the cloudy water above the sediment using syringe. Place a micro-filter over the end of the syringe.



Squeeze the water out the syringe into a new glass bottle. The filter shall remove the fine particles so that the liquid in the glass bottle is clear.

Label the specimen accordingly. Use a new, clean syringe for each specimen so not to contaminate specimens.

You have now clear liquids:

- Liquid F: From treated concrete at various depths (where relevant), containing Sika® FerroGard®-903 Plus
- Liquid C: Control specimen (from untreated concrete)

To make sure that the test is working properly, a standard solution (= S) containing diluted Sika® FerroGard®-903 Plus ("Sika® FerroGard®-903 Plus standard solution") and the distilled water (= W) used in the preparation of the specimen, have to be included into the testing procedure. This standard solution will be provided by your company's chemist.

All further steps are performed with all the liquid specimens

Method Statement
Qualitative Analysis – FerroGard-903 Plus
September-2015, Ver.: 7
850 33 4

Corporate – for template
REFURBISHMENT



Write with a pencil identification details on the upper margin of a white thin layer chromatography foil.



Insert a micro-pipette into the glass bottle containing the clear liquid specimen. The micro-pipette fills by itself.



Put the micro-pipette (glass capillary) filled with the clear solution to be tested on the white chromatography foil. Upon contact with the foil's absorbent layer, the liquid starts to flow out from the micro-pipette. Place dots of liquid on the foil. Take care that the dot size does not exceed approx. 5 mm (1/5 inch) in diameter. Thereafter heating intensively the chromatography foil by using the hair dryer. Repeat this process 5 times for each specimen by placing the new dot on top of the existing dot.



Apply the same procedure with all liquid specimens (**F** = treated concrete, **C** = untreated concrete, **S** = Sika FerroGard-903 Plus standard solution, **W** = Distilled water). Apply all liquid samples to the same chromatography foil.



Spray the provided solution **A** evenly and finely (low consumption) onto the chromatography foil (wear gloves and eye protection).



Dry gradually with air dryer (low setting) at a distance of ~30 cm (12 in) from the foil.



Spray test solution B evenly and finely (wear gloves and eye protection). Onto the chromatography foil.



Dry again and heat well with the hot air dryer (high setting) until the dot of the standard solution S changes colour to red or pink. While heating, keep the hot air dryer close to the chromatography foil and move back and forth for 1 to 2 minutes



The control specimens C and W (untreated concrete and water spot) shall remain white. However the untreated concrete spot may turn slightly brownish. This kind of discoloration could be due to a constituent in the concrete or may be caused by contamination occurred during the testing procedure.

5 INTERPRETATION OF RESULTS

The Sika® FerroGard®-903 Plus standard solution (spot marked S) shall show a light red-brownish dot. This light coloration represents the minimum Sika® FerroGard®-903 Plus content detectable by this method.

The specimen F shall turn reddish with a higher or lower intensity depending on concrete depth indicating the presence of Sika® FerroGard®-903 Plus. The lowest coloration intensity shall be similar to the reference solution spot (S). Should this be not the case, although the standard solution S is positive, this means at the time of testing the specimen either does not contain enough Sika® FerroGard®-903 Plus to be detected by this method or a more precise quantitative method of analysis is required.

6 IMPORTANT NOTES:

- All auxiliary materials such as glass bottles, syringes, micro-filters, micro-pipettes and chromatography foils have to be discarded after use and must not be re-used.
- Store test solutions A and B away from sunlight (if possible in cool, dark place). Their shelf life is limited to approximately 6 months. Check solutions A & B by performing a test on the standard solution at regular interval.
- Test solutions A and B, as well as the Sika® FerroGard®-903 Plus standard solution, are available from your company's chemist.

7 LEGAL NOTE

The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the products suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.

Sika Services AG
Tuffenwies 16
8048 Zürich
Switzerland
www.sika.com

Version given by
M. Donadio
Phone: +41 58 436 23 86
Fax: +41 58 436 23 77
Mail: donadio.michel@ch.sika.com

Method Statement
Qualitative Analysis – FermoGard-903 Plus
September-2015, Ver.: 7
BSO 33.4

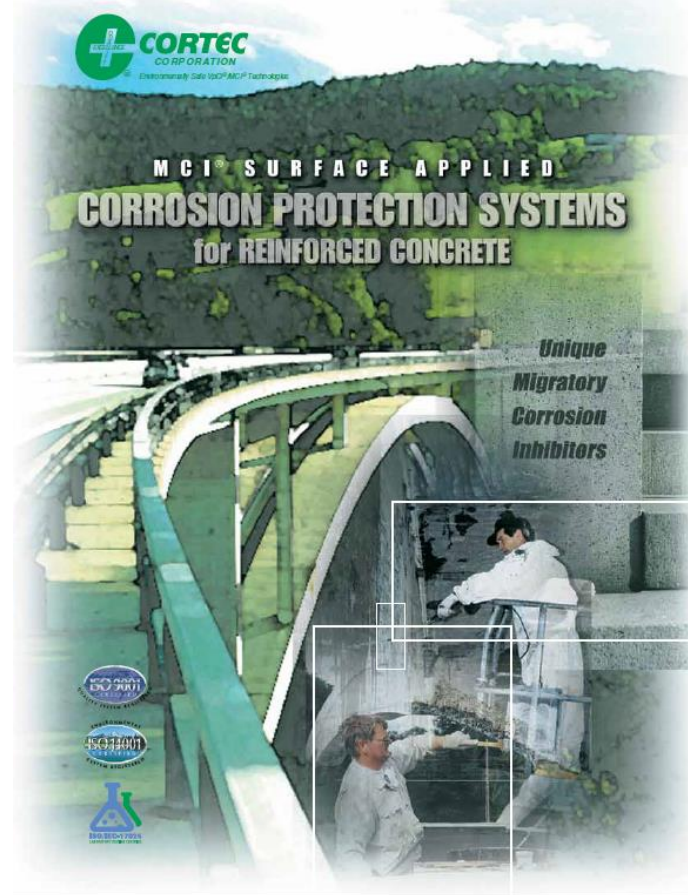
Corporate – for template
REFURBISHMENT

8/8

BUILDING TRUST



2) Com composto de amônia quartenária (indisponível para aquisição na época da pesquisa) (BAVARIAN, REINER, 2004).



DETECTING MCI[®]-2020 IN HARDENED CONCRETE



1 Sometime after the MCI[®]-2020 material has been applied (3 months, 6 months, 1 year, etc) and believed to have reached the desired depth of penetration, take core samples of the treated concrete. A control sample taken from untreated concrete can also be taken for comparison purposes. Core samples are preferred over drilling because there is a very high probability of contamination when drilling.



2 Measure the cores into 1 inch (~25 mm) sections. Cut the cores along these measurements and label the individual core pieces accordingly.



3 Grind or pound the individual core sections into small rubble (removing by hand any large chunks of aggregate or non-cementitious material). It is of the utmost importance that no cross contamination be allowed between samples.

4 Pulverize the samples into powder with a ceramic mortar and pestle. It is recommended that the powder is then passed through a coarse mesh funnel to remove any larger bodies which can hinder extraction.



5 Place each powdered sample into a separate, clean, dry beaker or jar (preferably of 50 mL size). Record the mass of the powder sample and add the same amount of deionized (or distilled) water to the sample. This will yield a 1:1 slurry dilution (by weight).

- MCI[®]-2020 can be detected in concrete using a QAC (Quaternary Ammonium Compounds) test kit, in conjunction with alkalinity testing.
- Cortec uses EM Quant QAC test sticks, catalog number: 17920-1.



6 Cover the containers and allow the slurry dilution to soak, stirring continuously, for at least 30 minutes. Note: Longer extraction with stirring will increase the chances of positive results. A magnetic stir plate and stir bar is recommended. Heat may aid the extraction but must not exceed 80 degrees F (~26 degrees C).



7 Use the manufacturer's instructions for the EM Quant QAC test sticks to analyze each slurry solution/extraction.

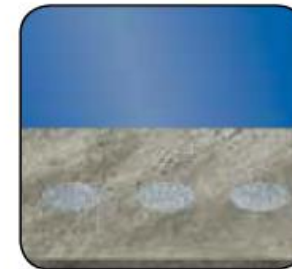
8 When testing the slurry for QAC, maintain stirring and immerse the test stick for 2 seconds.



9 Allow the test stick to develop for 60 seconds, and compare the reaction zone on the test stick with the color range on the EM Quant QAC test stick container.

10 Record the data, including: depth of core section, QAC presence (Y/N), concentration and/or concentration range (according to color comparison chart). This information can then be used to show how far the MCI[®] inhibitors have migrated and how long the migration took.

11 NOTE: If there is no separation between the control (no MCI[®]) and the experimental core sections (with MCI[®]), then there is likely QAC interference. If this is the case, the 1:1 slurry extract mixture should be diluted serially until a proper separation is found, indicating MCI[®] presence. Consult a Cortec[®] representative for further details if necessary.



12 Dispose of materials and fill in core holes.