



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

WILDSON WELLINGTON SILVA

**AS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DOS SUPORTES PARA AR-
CONDICIONADO DE CONCRETO DOS EDIFÍCIOS NA CIDADE DO RECIFE-PE**

Recife, PE

2023



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

WILDSON WELLINGTON SILVA

**AS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DOS SUPORTES PARA AR-
CONDICIONADO DE CONCRETO DOS EDIFÍCIOS NA CIDADE DO RECIFE-PE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Escola Politécnica de Pernambuco - Universidade de Pernambuco - para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Profa. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro

Coorientador: Prof. Dr. Willames de Albuquerque Soares

Recife, PE

2023

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco – Recife

S586m Silva, Wildson Wellington
As manifestações patológicas dos suportes para ar-
condicionado de concreto dos edifícios na cidade do Recife-
PE / Wildson Wellington Silva. – Recife: UPE, Escola
Politécnica, 2023.

127 f.: il.

Orientadora: Profa. Dra. Eliana Cristina B. Monteiro
Coorientador: Prof. Dr. Willames de A. Soares

Dissertação (Mestrado - Construção Civil) Universidade
de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-graduação
em Engenharia Civil, 2023.

1. Corrosão de Armaduras. 2. Durabilidade dos Concretos.
3. Vida Útil. 4. Sustentabilidade. I. Engenharia Civil –
Dissertação. II. Monteiro, Eliana Cristina Barreto (orient.). III.
Soares, Willames de Albuquerque (coorient.). IV. Universidade
de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção
Civil. V. Título.

CDD: 690.028

WILDSON WELLINGTON SILVA

**AS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DOS SUPORTES PARA
AR-CONDICIONADO DE CONCRETO DOS EDIFÍCIOS NA
CIDADE DO RECIFE-PE**

BANCA EXAMINADORA:

Orientadora

Documento assinado digitalmente
 **ELIANA CRISTINA BARRETO MONTEIRO**
Data: 27/12/2023 11:38:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro
Universidade de Pernambuco

Coorientador

Documento assinado digitalmente
 **WILLAMES DE ALBUQUERQUE SOARES**
Data: 27/12/2023 11:43:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Willames de Albuquerque Soares
Universidade de Pernambuco

Examinadores

Documento assinado digitalmente
 **YEDA VIEIRA POVOAS**
Data: 27/12/2023 11:59:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Yêda Vieira Póvoas
Universidade de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 **ARNALDO MANOEL PEREIRA CARNEIRO**
Data: 27/12/2023 23:06:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro
Universidade Federal de Pernambuco

Recife-PE
2023

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado à minha família, que tanto fez e acreditou em minha conquista.

AGRADECIMENTOS

Apesar do período desafiador, marcado pelo auge da pandemia de COVID-19, que impediu o convívio presencial em sala de aula e a oportunidade de conhecer alguns colegas pessoalmente, a troca de ideias, angústias e conquistas não deixou de existir.

Assim sendo, não posso deixar de agradecer imensamente à minha família, sobretudo ao meu pai - José do Carmo - e minha mãe: Agripina, que tanto fizeram por mim e minhas irmãs, estando essas sempre ao meu lado. Além disso, sou grato também à minha querida esposa, Amanda, que me deu força e coragem, me presenteando com grandes ensinamentos primordiais para este trabalho. Estendo minha gratidão à minha querida filha Helô e o pequeno Pedro, que apesar dos “conflitos” me trouxeram alegrias inimagináveis. Esta etapa também não teria sido possível sem o auxílio dos pais de Amanda: Vitor e Josete, bem como sua irmã: Carol, que tanto apoiaram com a presença, quanto no cuidado com as crianças, sendo decisivos nesta vitória.

Difícilmente um trabalho acadêmico se configura de modo adequado sem profissionais que entendam sua importância e partilhem seus conhecimentos. Por isso, registro meus agradecimentos ao Professor Wayner da Fiocruz, pela humildade e presteza, me dando inclusive à luz inicial das análises estatísticas que posteriormente foram assessoradas pelo Professor Willames. Meu muito obrigado à minha orientadora - Professora Eliana – que aceitou o desafio de dar sequência a um trabalho da pós-graduação, acreditando nele até o final. Não poderia deixar de fora a Professora Yêda e o Professor Arnaldo, que foram precisos nos direcionamentos da banca de qualificação e na análise minuciosa antes da defesa.

E se porventura deixei passar alguém, expresso sinceros agradecimentos a todos que contribuíram direta ou indiretamente durante o processo.

“É mais fácil evitar problemas do que se livrar deles”

Warren Buffett

RESUMO

Com a chegada da era moderna e a industrialização, a população mundial passou por crescimentos elevados devido ao aumento da qualidade de vida, e com isso a necessidade por energia tornou-se cada vez maior. Paralelo a isso, o aumento das temperaturas globais exigiu sistemas de refrigeração individual e coletiva e essa demanda foi implementada nas edificações residenciais e comerciais, deixando os equipamentos de ar-condicionado e seus respectivos suportes expostos nas fachadas. O suporte de concreto quando submetido as intempéries deteriora-se, favorecendo a corrosão da armadura (processo associado ao seu desprendimento), o que pode vir a causar dano quando fragmentos desprendidos de alturas elevadas atingem pessoas ou objetos. Por isso, o objetivo deste estudo é avaliar a degradação dos suportes de concreto armado dos aparelhos de ar-condicionado, através do levantamento das manifestações patológicas, em um estudo de caso na cidade do Recife/PE. Foram realizados estudos estatísticos de amostragem a partir de um banco de dados com 97.920 registros de construções, além de um estudo de caso de uma edificação que utiliza suportes de concreto armado, para aparelhos de ar-condicionado do tipo janela. Além disso, realizou-se ensaios em alguns suportes visando detectar o avanço de carbonatação e a presença de cloretos que são a causa da corrosão. Verificou-se que 49,5% das edificações possuem suportes para aparelhos de ar-condicionado na área externa de suas fachadas e desses, 69% são de concreto armado. A partir das imagens aéreas por veículo não tripulado do estudo de caso, pôde-se constatar rachaduras em 90% dos suportes e 21% apresentaram colapso parcial da estrutura. Além disso, os ensaios realizados demonstraram que 100% do concreto estava carbonatado e com a presença de cloretos. Conclui-se que, apesar dos fatores ambientais como o vento predominante e as chuvas mais intensas, além do transporte de cloretos com ventos do tipo rajada - que conseguem superar o efeito barreira de outras construções - existe falha na concepção de projeto do suporte de concreto armado, uma vez que não se dá importância aos requisitos mínimos de cobertura, a relação a/c e a falta de controle de qualidade na fabricação do concreto, sendo esses fatores decisivos no aumento da porosidade e conseqüente aceleração na entrada de agentes agressivos. Por fim, aspectos de altura e orientação geográfica não são decisivos quanto a degradação desses suportes, mas as temperaturas e umidade relativa do ar, elevadas ao longo do ano e associadas a má qualidade do concreto são fatores determinantes no processo de corrosão da armadura. Logo, a escolha adequada de materiais que possam resistir a esses aspectos naturais é primordial para minimizar os riscos as pessoas e veículos no entorno das edificações.

Palavras-chave: Corrosão de armaduras. Durabilidade dos concretos. Vida útil. Sustentabilidade.

ABSTRACT

With the advent of the modern age and industrialisation, the world's population has grown rapidly as the quality of life has improved, and with it the demand for energy. At the same time, rising global temperatures required individual and collective cooling systems, and this demand was implemented in residential and commercial buildings, leaving air conditioning units and their supports exposed on facades. When exposed to the elements, concrete supports deteriorate, promoting corrosion of the reinforcement (a process associated with its delamination), which can cause damage when fragments ejected from great heights strike people or objects. For this reason, the aim of this study is to evaluate the degradation of reinforced concrete supports for air conditioning units by studying the pathological manifestations in a case study in the city of Recife/PE. Statistical sampling studies were carried out using a database of 97,920 building records and a case study of a building with reinforced concrete supports for window-type air-conditioning units. In addition, tests were carried out on some of the columns to determine the progress of carbonation and the presence of chlorides, which are the cause of corrosion. It was found that 49.5 per cent of the buildings have air conditioner supports on the outside of their facades, 69 per cent of which are made of reinforced concrete. Aerial photographs taken by unmanned vehicles of the case study showed cracks in 90% of the columns, and 21% showed partial collapse of the structure. Tests also showed that 100% of the concrete was carbonated and contained chlorides. The conclusion is that, despite environmental factors such as prevailing winds and heavy rainfall, as well as the transport of chlorides with gusty winds - which manage to overcome the barrier effect of other constructions - there is a flaw in the design of the reinforced concrete support, since the minimum requirements for coverage, the w/c ratio and the lack of quality control in the production of the concrete are not taken into account, and these factors are decisive in increasing porosity and consequently accelerating the ingress of aggressive agents. Finally, altitude and geographical orientation are not decisive factors in the deterioration of these supports, but high temperatures and relative humidity throughout the year, combined with poor concrete quality, are decisive factors in the process of reinforcement corrosion. Therefore, the correct choice of materials that can withstand these natural factors is essential to minimise the risks to people and vehicles around buildings.

Keywords: Corrosion of reinforcement. Concrete durability. Life cycle. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Primeiro aparelho de ar-condicionado	22
Figura 2 – Deterioração do concreto armado	27
Figura 3 – Suportes em concreto armado para aparelhos de ar-condicionado do tipo janela ..	27
Figura 4 - Mudanças na massa do concreto durante o período de secagem.....	29
Figura 5 - Distribuições de concentração de cloreto sob diferentes temperaturas	31
Figura 6 – Iteração do ambiente térmico associado a radiação solar	32
Figura 7 - Mudanças de UR-IN do concreto devido aos períodos de chuva em um concreto: (a) não protegido da chuva; (b) protegido da chuva	34
Figura 8 - Influência da intensidade da chuva na capacidade de ligação do íon cloreto.....	35
Figura 9 - Profundidade de corrosão de corpos de prova de concreto imersos em solução ácida	36
Figura 10 - Superfícies de concreto sob diferentes ciclos de pulverização de chuva ácida.	37
Figura 11 – Metodologia na coleta dos dados de cloreto no ar: a) ponto de geração dos cloretos; b) ponto de coleta intermediária; c) medição na estrutura de concreto armado	39
Figura 12 – Disposição das partículas na praia de areia e na região dos tetrápodes	40
Figura 13 – Taxa de deposição de cloreto	41
Figura 14 – Simulações para os dados do NCEP/NCAR para outubro em condições atmosféricas neutra (esquerda) e pouco estável (direita).....	43
Figura 15 – Velocidade de vento máximas para os dados de NCEP/NCAR a 10 m e extrapolado para 50 m e as velocidades máximas obtidas pela simulação para condições atmosféricas neutra e pouco estável.....	43
Figura 16 – Comportamento de cloretos ao longo do tempo para três tipos de concreto: (a) relação a/c = 0,65; (b) relação a/c = 0,57; (c) relação a/c = 0,50	44
Figura 17 – Efeito da construção de barreira na deposição de cloretos: (a) concretos expostos a diferentes condições de bloqueio; (b) comparação com as condições do Bloco A e Bloco B.	45
Figura 18 – Microestrutura do concreto, zona de transição da pasta e agregado	46
Figura 19 – Foto de uma seção de concreto com fluorescência e fotografada com luz ultravioleta	47
Figura 20 – Penetração de cloretos em solução totalmente saturada; (a) e (b): expostas em solução de NaCl a 3%; (c) e (d): expostas em solução de NaCl a 5%	49

Figura 21 - Penetração de cloretos em solução não saturada; (a) e (b): expostas em solução de NaCl a 3%, (c) e (d); expostas em solução de NaCl a 5%	50
Figura 22 – Microestrutura porosa de concreto mostrando a) trajetória tortuosa dos poros e b) diferentes condições de constrictividade	51
Figura 23 – Processo de corrosão eletroquímica no concreto armado	53
Figura 24 – Mecanismo do processo de carbonatação nos poros do concreto	54
Figura 25 – Micrografia estéreo-óptica em seção transversal de estrutura de concreto armado demonstrando corrosão e trincas induzidas nos vergalhões de aço.....	56
Figura 26 – Fluxograma da metodologia aplicada	63
Figura 27 – Tipo de revisão da literatura narrativa	64
Figura 28 – Tipo de revisão da literatura integrativa.....	64
Figura 29 – Fluxo de informações e fases da revisão bibliográfica	65
Figura 30 – Seleção dos registros para a pesquisa.....	67
Figura 31 - Entrada de dados do Tamanho da amostra.	68
Figura 32 - Tamanho da amostra para a frequência em uma população.	69
Figura 33 - Cálculo da Amostragem.....	70
Figura 34 - Mapa no detalhe com a demonstração da amostragem em vermelho.....	71
Figura 35 - Mapa no detalhe com a demonstração da amostragem em azul.....	71
Figura 36 - Imagem do Google Maps pelo Street View.....	72
Figura 37 – Localização da edificação com sistema de bússola.....	73
Figura 38 – Mapa topográfico com altitude	73
Figura 39 – Traçado do edifício até o ponto de rebentação das ondas.....	74
Figura 40 – Radiação solar com as temperaturas	75
Figura 41 – Salinidade global da superfície do mar	75
Figura 42 – Temperatura média da superfície do mar.....	76
Figura 43 – Umidade relativa do ar horária no ano de 2020	77
Figura 44 – Precipitação pluviométrica em Recife no ano de 2020.....	77
Figura 45 – Localização do Condomínio do edifício Barão de Vera Cruz na cidade do Recife	78
Figura 46 – Vista externa dos dois blocos de edifícios	79
Figura 47 - Classificação das caixas para ar-condicionado.....	79
Figura 48 – Imagem do VANT próximo a fachada do edifício.....	80
Figura 49 - Tela do VANT modelo DJI MAVIC 2 Pro.....	80

Figura 50 – Captação das imagens inferiores com a câmera digital Nikon COOLPIX P520..	81
Figura 51 - Captação das imagens dos suportes de concreto armado do tipo janela: (a) vista frontal; (b) vista lateral esquerda; (c) vista lateral direita; (d) vista inferior.	82
Figura 52 – Classificação das manifestações patológicas	83
Figura 53 – Corte do suporte de concreto com esmerilhadeira manual	84
Figura 54 – Peças do suporte de concreto coletadas do local e separadas pela unidade habitacional.....	84
Figura 55 – Utilização de pontalete e marreta para particionamento do concreto	85
Figura 56 – Limpeza com uso de (a) escova e (b) pincel	85
Figura 57 - Aspersão de solução de fenolftaleína: (a) completamente carbonatado; (b) uma pequena região, em rosa, que apresenta alto pH.....	86
Figura 58 - Aspersão de solução de nitrato de prata: (a) aspersão em local com armadura; (b) aspersão em local com apenas o concreto	86
Figura 59 - Edificações com suportes para ar-condicionado nas fachadas	87
Figura 60 – Tipos de edificações que possuem suportes para ar-condicionado nas fachadas..	88
Figura 61 - Tipo de suporte presente nos edifícios.....	89
Figura 62 – Quantidade de edificações de acordo com o período de construção.....	89
Figura 63 – Comparativo da umidade relativa do ar e temperatura no mês de janeiro de 2020	90
Figura 64 – Quantidade de edificações por bairro na cidade do Recife	91
Figura 65 – Altura das edificações por bairro na cidade do Recife.....	92
Figura 66 – As manifestações patológicas dos suportes de concreto armado	93
Figura 67 – Classificação das rachaduras por nível de deterioração no bloco A	94
Figura 68 – Suportes deteriorados no nível 2 e 3 por pavimento	94
Figura 69 - Suportes de concreto armado deterioradas no bloco A: a) 804; b) 903; c) 1403; d) 1404	95
Figura 70 – Classificação das rachaduras por nível de deterioração no bloco B	95
Figura 71 – Suportes deteriorados no nível 2 e 3 por pavimento	96
Figura 72 - Suportes de concreto armado deterioradas no bloco B: a) 101; b) 403; c) 602; d) 1203	96
Figura 73 – Direção e velocidade dos ventos (rosa dos ventos) no período de 2010 a 2022...	97
Figura 74 – Umidade relativa do ar com mínimas e máximas diárias no ano de 2020.....	98

Figura 75 – Níveis de deterioração das rachaduras nos suportes de acordo com a direção dos pontos cardeais do bloco A.....	98
Figura 76 - Níveis de deterioração das rachaduras nos suportes de acordo com a direção dos pontos cardeais do bloco B.....	99
Figura 77 - Suportes de concreto armado submetidos a ensaios de avanço de carbonatação e presença de cloretos.....	100
Figura 78 – Ensaio de avanço de carbonatação; (a) região carbonatada e não carbonatada; (b) (c) frente de carbonatação (mm); (d) localização da armadura em área carbonatada.	101
Figura 79 – Ensaio para presença de cloretos: (a) (b) e (c) região marrom sem cloretos e região branca com cloretos; (d) região com coloração branca (com cloretos); (e) região em detalhe da figura d.....	101
Figura 80 – Perfil de elevação da edificação até o ponto de rebentação das ondas	102
Figura 81 – Suporte de concreto armado com corrosão avançada: (a) partes soltas da armadura; (b) estágio avançado de corrosão da armadura com perda de seção elevada; (c) diâmetro da barra após perda de seção elevada.....	102
Figura 82 – Erros na execução dos suportes de concreto: (a) alta concentração de armaduras; (b) inexistência de cobrimento da armadura; (c) emenda de armaduras; (d) detalhe da emenda em formato de nó.....	103
Figura 83 – Diâmetro da barra de aço do suporte de concreto	104
Figura 84 – Aço com perfil ovalado. (a) dimensão maior. (b) dimensão menor.....	105
Figura 85 - Espessura dos elementos de concreto. (a) dimensão maior. (b) dimensão menor	106
Figura 86 – Cobrimento da armadura: (a) dimensão maior; (b) dimensão menor	107
Figura 87 – Corrosão elevada e generalizada do aço: (a) em corte; (b) seção longitudinal; (c) corrosão na massa de concreto; (d) corrosão generalizada do aço	109
Figura 88 – Presença de bolor no concreto: (a) área com bolor sem resistência ao risco; (b) área sem bolor com resistência ao risco.	109
Figura 89 - Força aplicada por um objeto em contato com o solo	110
Figura 90 – Parte de um suporte de concreto armado coletado no piso da edificação: (a) dimensões da peça; (b) peso da peça	110
Figura 91 – Corrosão da armadura na face interna do suporte de concreto armado para ar-condicionado: (a) deslocamento do concreto; (b) corrosão avançada da armadura	112

Figura 92 – Suportes de concreto armado para ar-condicionado no bairro de Boa Viagem: (a) corrosão avançada e vegetação; (b) colapso parcial; (c) deslocamento do concreto; (d) corrosão avançada 112

Figura 93 – Utilização inadequada dos suportes de concreto armado: (a) falha na execução, suscetível a infiltrações na fachada; (b) reparo executado sem eficiência; (c) quebra do suporte para colocação de modelos não compatíveis..... 113

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Strings de busca utilizadas na fase Integrativa.....	65
Quadro 2 – Classificação das manifestações patológicas.....	83
Quadro 3 – Classificação das rachaduras por nível de degradação.....	93
Quadro 4 - Referência dos padrões para aços no mercado siderúrgico.....	104
Quadro 5 - Classes de agressividade ambiental (CAA)	106
Quadro 6 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o revestimento nominal para $\Delta c = 10$ mm	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condição de estabilidade atmosférica mensal nos períodos diurno e noturno para o Recife.....	42
Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Amostra
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APP	Aplicativo
CA	Concreto armado
CAA	Classe de Agressividade Ambiental
CEP	Código de Endereçamento Postal
CP	Concreto protendido
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão para Normatização)
E	<i>Este</i> (Oeste)
EN ISO	<i>European Union / International Organization for Standardization</i> (União Européia / Organização Internacional de Normalização)
<i>et al.</i>	“e outros”
EUA	Estados Unidos da América
FTS	Frente ao mar
FTS&NB	Frente ao mar e não bloqueado
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema Global de Posicionamento)
ID	Identificação
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IOOS	<i>Integrated Ocean Observing System</i> (Sistema Integrado de Observação Oceânica)
IRAM	<i>Instituto Argentino de Normalización y Certificación</i> (Instituto Argentino de Normalização e Certificação)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)
L	Leste
N	Norte
NBR	Norma Brasileira
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i> (Centro Nacional de Pesquisa Atmosférica)

NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i> (Centros Nacionais de Previsão Ambiental)
NFTS	Não voltado para o mar
NFTSOB	Não voltado para o mar ou bloqueada
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> (Administração Nacional Oceânica e Atmosférica)
PE	Pernambuco
Pe.	Padre
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RILEM	Reunion Internationale de Laboratoires D'essais et Materiaux
Ryyan	<i>Intelligent Systematic Review</i> (Revisão Sistemática Inteligente)
S	Sul
s.d.	Sem data
SE	Sudeste
SMAP	<i>Soil Moisture Active Passive</i> (Umidade do Solo Ativo Passivo)
SMOS	<i>Soil Moisture and Ocean Salinity</i> (Umidade do Solo e Salinidade do Oceano)
STAR	<i>Center for Satellite Applications and Research</i> (Centro de Aplicações e Pesquisas de Satélites)
TBS	Termômetro de Bulbo Seco
T-IN	Temperatura interna
UR	Umidade relativa
UR-EXT	Umidade relativa externa
UR-IN	Umidade relativa interna
UTM	Universal Transversa de Mercator
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VC	Velocidade da chuva

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
ΔT	Variação de temperatura
%	Porcentagem
a/c	Relação água/cimento
pH	Potencial hidrogeniônico
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
HCl	Ácido clorídrico
HNO ₃	Ácido nítrico
mm	Milímetro
H ⁺	Hidrogênio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
m	Metro
m/s	Metros por segundo
km	Quilômetro
min	Minuto
<	Menor que
>	Maior que
Cl	Cloreto
mg/m ² /d	Miligrama por metro quadrado por dia
©	Copyright
Ca	Cálcio
H ₂ O	Água
O ₂	Oxigênio
SO ₄ ²⁻	Sulfato
CO ₂	Dióxido de carbono
i _{corr}	Velocidade de corrosão
C-S-H	Silicato hidratado de cálcio
C-H	Hidróxido de cálcio
NaCl	Cloreto de sódio
L	Comprimento
L _{eff}	Comprimento efetivo

Fe	Ferro
Fe ₂ O ₃	Óxido férrico
OH ⁻	Hidróxido
e ⁻	Elétron
H ₂ CO ₃	Ácido carbônico
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
C ₂₀ H ₁₄ O ₄	Fenolftaleína
C ₂ H ₆ O	Álcool etílico
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₄ AF	Ferro aluminato tetracálcico
3CaO.Al ₂ O ₃ .CaCl ₂ .10H ₂ O	Sal de Friedel
Cs	Cloreto de céσιο
AgNO ₃	Nitrato de prata
M	Mol
Ag ₂ CO ₃	Carbonato de prata
NaOH	Hidróxido de cálcio
km ²	Quilômetro quadrado
hab/km ²	Habitantes por quilômetro quadrado
g/kg	Gramas por kilograma
Ag ₂ O	Óxido de prata
kg	Quilograma
	Rosa dos ventos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	22
1.1	Objetivos.....	24
1.1.1	Objetivo Geral.....	24
1.1.2	Objetivos Específicos.....	24
1.2	Estrutura do trabalho.....	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1	Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado	26
2.1.1	Agressividade ambiental sobre o concreto armado.....	28
2.1.1.1	<i>Umidade Relativa</i>	28
2.1.1.2	<i>Temperatura</i>	30
2.1.1.3	<i>Radiação Solar</i>	32
2.1.1.4	<i>Precipitação Pluviométrica.....</i>	33
2.1.1.5	<i>Poluição Atmosférica.....</i>	35
2.1.1.6	<i>Vento.....</i>	37
2.1.2	Principais mecanismos de transporte no concreto	46
2.1.2.1	<i>Permeabilidade.....</i>	46
2.1.2.2	<i>Absorção capilar</i>	48
2.1.2.3	<i>Difusão.....</i>	48
2.1.2.4	<i>Migração iônica.....</i>	50
2.1.3	Principais manifestações patológicas em concreto armado	52
2.1.3.1	<i>Corrosão.....</i>	52
2.1.3.1.1	<i>Corrosão por carbonatação</i>	53
2.1.3.1.2	<i>Corrosão por cloretos.....</i>	55
2.1.3.2	<i>Fissuras.....</i>	58
2.1.3.3	<i>Mofo e Bolor.....</i>	60

3	METODOLOGIA.....	62
3.1	Método da pesquisa bibliográfica.....	63
3.2	Método da análise estatística	66
3.3	Caracterização do estudo de caso.....	72
3.4	Ensaio de carbonatação e presença de cloretos.....	83
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	87
4.1	Análise quantitativa.....	87
4.2	Análise qualitativa através das características estruturais.....	103
5	CONCLUSÃO.....	114
	REFERÊNCIAS.....	117

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de um desempenho energético cada vez maior devido aos avanços tecnológicos, o crescimento populacional e a demanda por sistemas menos poluentes impulsionam pesquisas de controle das temperaturas externas das edificações, visando o aumento do desempenho dos sistemas de refrigeração de ambientes (OSWALD, 2017; JIN *et al.*, 2019), além do papel da sustentabilidade ambiental (PERINI *et al.*, 2017).

Em 1902 o engenheiro Willis Carrier, formado pela Universidade de Cornell, nos EUA, inventou o primeiro aparelho de ar-condicionado; um processo mecânico para condicionar o ar ambiente, inicialmente com o propósito de retirar a umidade de uma fábrica de impressão na cidade de Nova York. Contudo, os primeiros aparelhos de ar-condicionado utilizavam-se de gases tóxicos ou inflamáveis como o clorometano, a amônia e o propano, condição que favorecia acidentes graves ou fatais provenientes de algum vazamento (NEVES, 2022). O primeiro aparelho pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Primeiro aparelho de ar-condicionado



Fonte: Neves (2022)

Os primeiros modelos do tipo janela surgiram na década de 1970 e houve a necessidade de adotar suporte para o apoio do equipamento. No Brasil, quando houve a expansão e uso para o ambiente residencial, adotou-se predominantemente suportes de concreto armado. Posteriormente surgiram os modelos do tipo *split* - que são divididos em duas partes: a

evaporadora e a condensadora. Esses modelos apareceram nos anos 2000 com mais tecnologia, proposta de menor consumo energético e, conseqüentemente, maior consciência ambiental (NEVES, 2022).

As edificações demandam equipamentos de arrefecimento, sendo comum a instalação de suportes para os aparelhos de ar-condicionado em suas fachadas; dentre os tipos de materiais utilizados pode-se destacar os de concreto armado, metálicos, plásticos e de fibra de vidro, estando sujeitos às inúmeras intempéries como sol, chuva, vento, poluição e animais. Esses suportes servem para aparelhos de ar-condicionado do tipo janela ou split e estão presentes em todas as regiões do planeta, devido ao seu baixo custo, fácil instalação e a necessidade de refrigeração das residências e escritórios, não sendo exclusividade de uma parcela da população ou classe social.

Durante as atividades de manutenção das edificações é comum a troca desses suportes, principalmente os de concreto armado, em grande parte pela condição avançada de deterioração ou até mesmo por incidentes ocorridos na área comum da edificação, provenientes da queda de partes danificadas, o que representa riscos elevados para pedestres e veículos, sendo esse um dos motivos pelo qual se faz necessário estudar o tema.

Alguns estudos indicam os riscos presentes em marquises e sacadas devido a ausência de manutenções ou a realização dessas de forma inadequada, expondo os pedestres aos mais diversos tipos de danos provenientes da queda dessas estruturas (LORENÇATO, 2019), inclusive com vítimas fatais (SANTANA, 2021; BARBOSA; FRAGA, 2022; FONSECA; AGUIAR; COUTINHO, 2022). Em um estudo recente sobre suportes de concreto armado para aparelhos de ar-condicionado, foi identificado a baixa qualidade dos suportes e o risco de queda parcial e/ou total desses componentes em alturas muito elevadas, chegando a impactar o solo com força equivalente à toneladas (SILVA; MONTEIRO, 2020).

Assim sendo, se faz necessário questionar: qual o risco para o condomínio, pedestres, veículos e estruturas em torno dessas edificações? No contexto de uma capital como o Recife/PE, qual seria a proporção de uso desses suportes de concreto armado nas edificações? Há interesse na divulgação desses incidentes pelo condomínio quando o dano é apenas material, ou é resolvido internamente sem maiores transtornos, não expondo o real perigo?

O concreto possui mecanismos de degradação que impedem uma vida útil mais longa, como a lixiviação, expansão por sulfatos, reação álcali-agregados, além de corrosão da armadura, provenientes da carbonatação e ação de íons cloretos, sendo agravados pela agressividade ambiental. De acordo com Bertolini (2010) e Almeida e Sales (2018), três

aspectos ligados à região e seus microclimas são decisivos nessa degradação, são eles: a umidade relativa do ar, a atmosfera marinha e os centros populacionais, influenciados pelas chuvas e ventos.

Por isso, esse estudo se propõe a levantar as manifestações patológicas dos suportes de concreto armado, através de um estudo de caso de uma edificação em uma região litorânea, que possui níveis de agressividade ambiental mais elevados.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a degradação dos suportes de concreto armado dos aparelhos de ar-condicionado, através do levantamento das manifestações patológicas, em um estudo de caso.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Apresentar o nível de degradação do concreto armado quanto aos aspectos ambientais;
- Indicar as manifestações patológicas dos suportes de concreto armado para aparelhos de ar-condicionado do estudo de caso;
- Apresentar a causa da corrosão da armadura dos suportes de concreto armado do estudo de caso.

1.2 Estrutura do trabalho

A presente pesquisa tem como estrutura básica: introdução, revisão bibliográfica, análise estatística, estudo de caso, resultados e discussões e conclusão, destrinchados da seguinte maneira:

O primeiro capítulo apresenta a introdução com a definição do tema, motivações e justificativas que levaram a realização da pesquisa, o objetivo geral e específicos, acrescidos da organização do trabalho.

O segundo capítulo, por sua vez, refere-se à revisão de literatura e apresentação dos principais conceitos sobre as manifestações patológicas, principalmente as causas naturais que

levam ao desgaste prematuro dos suportes de concreto armado para equipamentos de ar-condicionado.

No capítulo subsequente: 3, está explanada a metodologia que envolve a pesquisa, bem como o desenvolvimento do modelo estatístico, os procedimentos de coleta e análise de dados e a descrição dos equipamentos utilizados.

No capítulo 4 tem-se o estudo de caso com a análise das características ambientais e realização dos ensaios para determinar o avanço da carbonatação e presença de cloretos.

No capítulo 5, já se encaminhando para o final, são apresentados os resultados obtidos, seguidos da análise dos dados estatísticos e os ensaios realizados em campo.

O capítulo 6 enuncia o desfecho da conclusão geral e a indicação de pesquisas futuras sobre o tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O concreto armado possui uma estrutura interna microporosa e está suscetível a inúmeros processos que podem afetar a durabilidade e vida útil.

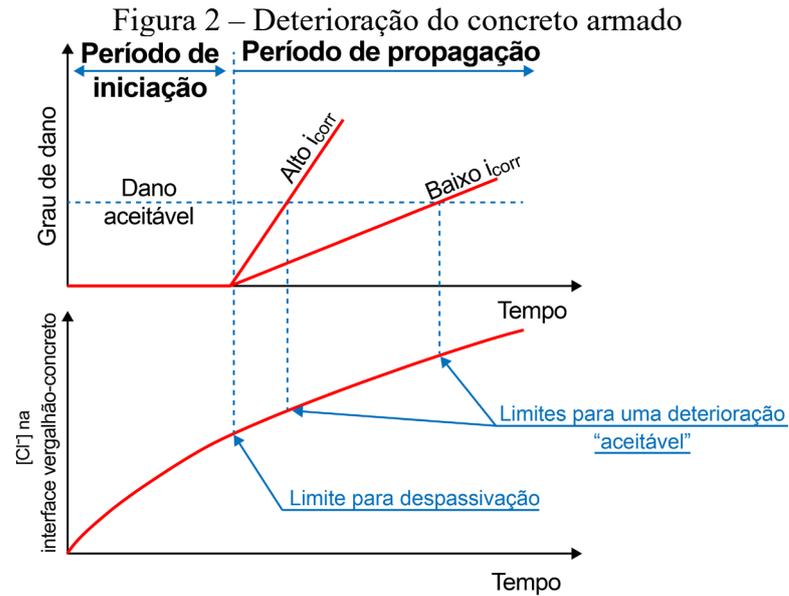
2.1 Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado

As estruturas de concreto armado foram uma transformação na construção de novas edificações e suas quase infindáveis possibilidades. Desde a concepção em 1849 por Joseph Monier (HSU, 2017), devido a facilidade no processo foram implementadas em larga escala em todos os lugares do planeta.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), o conceito de durabilidade está atrelado a capacidade da estrutura de concreto armado em suportar os esforços e as condições ambientais preconizadas em projeto entre o contratante e o projetista, desde que atendidas as manutenções preventivas e corretivas. Portanto, os suportes de concreto armado devem atender os requisitos explicitados na norma.

O atendimento aos procedimentos de manutenções devidas permite que a estrutura alcance a sua vida útil determinada em projeto. Entretanto, não é algo tão simples de atestar, pois fatores como detalhes arquitetônicos, modelos construtivos, cobrimento da armadura, além do microambiente onde a construção está inserida, dentre outros, podem influenciar incisivamente na vida útil. Logo, alguns cuidados são essenciais quando se pretende alcançar a vida útil dos suportes de concreto armado, como a composição adequada do traço do concreto, o correto adensamento do concreto, a cura realizada de forma sistemática e o cobrimento da armadura adequados (HELENE, 1993).

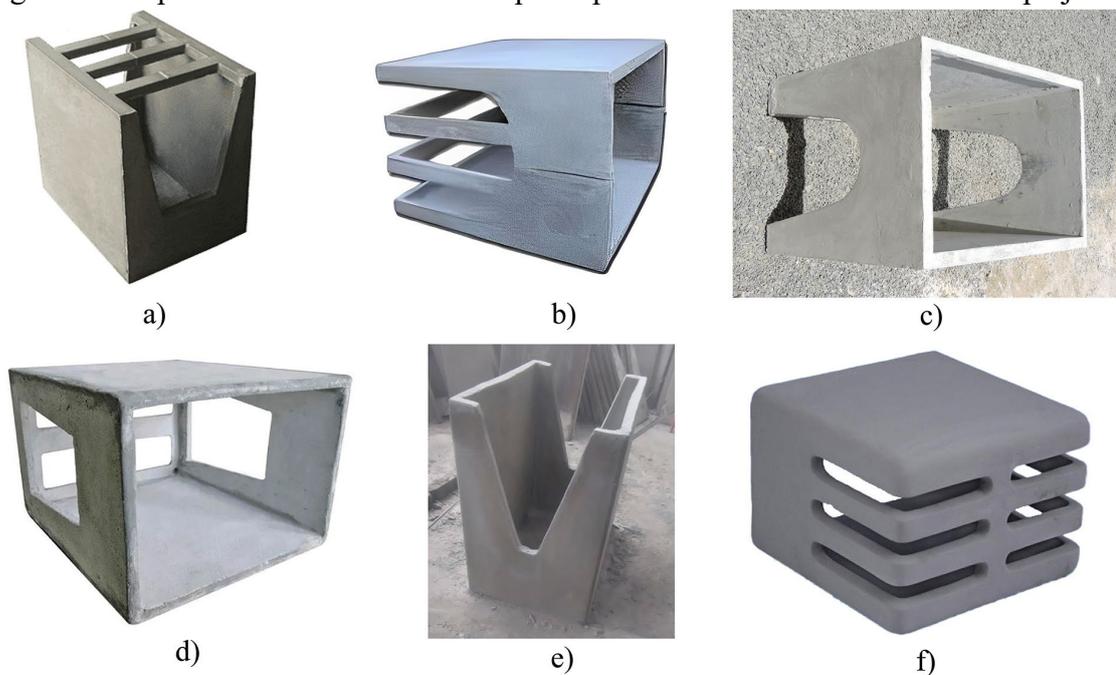
Com o passar do tempo, diversos modelos foram criados com o propósito de prever a vida útil das estruturas de concreto armado, sendo um dos mais conhecidos o de Tuutti (1982), que sofreu poucas adaptações ao longo dos anos, como a inserção da velocidade de corrosão (i_{corr}) proposta por Nóvoa (2016). O período de iniciação inclui o intervalo em que o dióxido de carbono e os cloretos penetram no concreto até alcançarem a armadura, provocando o rompimento da camada protetora e dando início a corrosão da armadura. Na fase do período de propagação ocorre a aceleração do processo e degeneração do concreto, conforme Figura 2.



Fonte: Nóvoa (2016), adaptado de Tuutti (1982)

Os suportes de concreto armado para aparelhos de ar-condicionado do tipo janela são estruturas simples, sendo elaborados de acordo com características de cada fabricante, por isso os modelos são diversos, mas com propriedades similares, para serem utilizados na área externa das construções, conforme Figura 3.

Figura 3 – Suportes em concreto armado para aparelhos de ar-condicionado do tipo janela



Fonte: (a) Pec Maq Pec Formas [2023]; (b) Rei Artefatos de Concreto (2021); (c) Concrearte, ([201-?]); (d) LP Home Center [201-?]; (e) Louzada Pré Moldados Campinas (2018); (f) AB Telhas [1998?].

Pelo fato de as estruturas ficarem muito expostas, o meio ambiente contribui no processo de degradação do concreto, por meio da umidade relativa do ar, temperatura, radiação solar, precipitação pluviométrica, poluição atmosférica e o vento. Diante disso, as manifestações patológicas provenientes da agressividade ambiental, são refletidas na forma de corrosão da armadura, fissuras, mofo e bolor.

2.1.1 Agressividade ambiental sobre o concreto armado

Os suportes de concreto armado são suscetíveis às condições ambientais locais devido a sua exposição. A umidade relativa do ar, intensificada pelas precipitações pluviométricas e o aumento da temperatura influenciada pela radiação solar, contribuem para a elevação dos níveis de umidade. Esse cenário favorece a penetração de agentes agressivos pelos microporos do concreto. Além disso, a poluição atmosférica pode impactar negativamente quanto a resistência à flexão, especialmente em concretos de qualidade inferior. É interessante notar que os ventos, por exemplo, desempenham um papel peculiar ao transportar íons cloretos a distâncias que pode chegar a vários quilômetros.

2.1.1.1 Umidade Relativa

Alguns processos físicos como a umidade e a temperatura estão associados à difusão de umidade no concreto, ou seja, a transferência de umidade para o interior do concreto. O processo de absorção ocorre quando o ambiente externo propicia o aumento da umidade relativa no interior do concreto. Na secagem o inverso acontece: o microambiente interno mais úmido tende a diminuir, equilibrando-se com o ambiente externo, com menos umidade relativa (JIANG; YUAN, 2012).

O teor de umidade está relacionado aos processos de deterioração do concreto, apesar de inúmeros estudos relatarem a umidade em estruturas de concreto em um ambiente controlado de laboratório. Andrade, Sarría e Alonso (1999) submeteram amostras a eventos naturais como: temperaturas extremas de congelamento e aquecimento (0 °C e 40 °C); chuva natural e artificial; secagem; e ambiente protegido das chuvas. Mesmo com elevadas oscilações de temperatura externa ($\Delta T = 18$ °C), a umidade interna manteve-se estável.

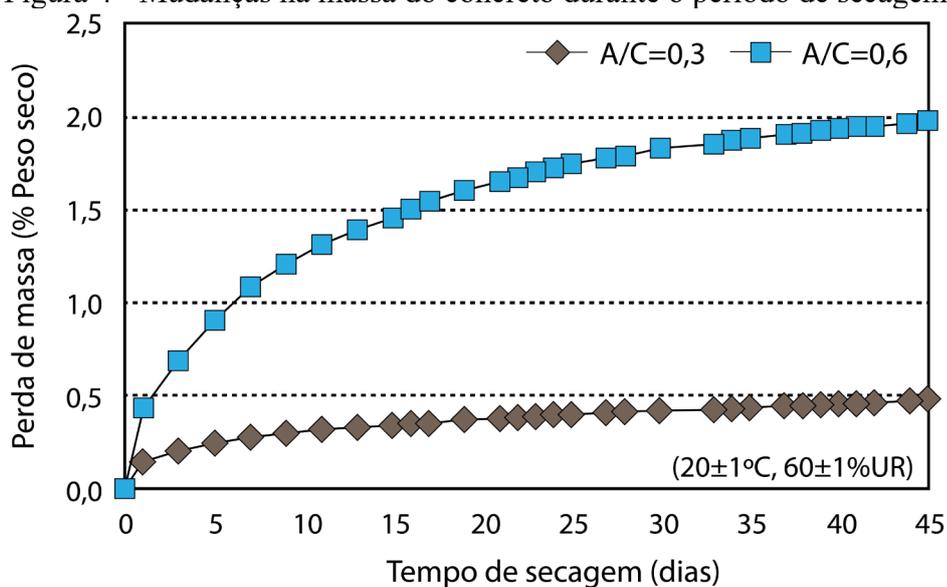
Na exposição a chuvas, a umidade relativa interna (UR-IN) eleva e cai rapidamente quando a chuva cessa, indicando a possibilidade de umedecimento superficial. Em ambiente

controlado a amostra foi submetida à saturação artificial para representar as chuvas e não apresentou elevações bruscas na UR-IN, apontando uma diminuição lenta e progressiva durante o processo de secagem (ANDRADE; SARRÍA; ALONSO, 1999). Resultado similar foi encontrado por Nakada, Matsuzawa e Kage (2021).

Corpos de prova com relação a/c de 0,3 e 0,6 intacto e induzido a fissuras de 0,1 mm a 0,3 mm, foram analisados superficialmente e internamente quanto às variações de umidade em processos de saturação de 25% a 100%. A secagem superficial foi maior do que a interna em todos os tipos de amostra, embora nos corpos trincados com relação a/c de 0,3, devido às fissuras mais largas, foi destacada uma maior redução da UR-IN. No caso dos corpos de prova com relação a/c de 0,6 houve redução pouco significativa (ANDRADE; SARRÍA; ALONSO, 1999), conforme Figura 4.

As amostras com fissuras mais largas demonstraram facilitar a entrada de água de maneira mais pronunciada, independentemente da relação a/c. A penetração da umidade em profundidades maiores foi mais rápida em amostras com a/c de 0,3, ao contrário daquelas com relação a/c de 0,6. Esse fenômeno pode ser atribuído ao processo de absorção capilar, que se intensifica em poros mais finos, conforme observado por Ryu, Ko e Noguchi (2011). Esses resultados são congruentes com as descobertas de Asamoto *et al.* (2011), as quais demonstraram que amostras com relação a/c de 0,3 apresentaram uma perda de umidade menor em comparação com o concreto de relação a/c de 0,55.

Figura 4 - Mudanças na massa do concreto durante o período de secagem



Fonte: Adaptado de Ryu, Ko e Noguchi (2011)

Os efeitos da umidade e temperatura estão relacionados, porém não são equivalentes, visto que, a variação de temperatura tem um efeito maior sobre o transporte de umidade, enquanto a variação da umidade tem menor interferência na transferência de calor. As microfissuras propagam-se no interior do concreto devido as cargas axiais, levando a ampliação no transporte de umidade, em decorrência do aumento dos gradientes de temperatura e umidade (MIN *et al.*, 2017).

O concreto possui propriedades que dificultam a determinação do mecanismo de transferência de umidade, devido as facilidades de absorção de umidade, tensão superficial, densidade e viscosidade, assim como a estrutura geométrica dos poros e do ângulo de contato, tornando esse mecanismo de transferência extremamente complexo (CHO *et al.*, 2017).

Elevada umidade relativa favorece a transmissão de cloretos no interior do concreto. Em uma análise com a variação de umidade de 20% a 100%, identificou-se que quanto maior a umidade relativa, maior seria a concentração de cloretos e a consequente profundidade de difusão de íons cloretos, com ampliação em até 4,3 vezes (JIN *et al.*, 2022). Umidades acima de 70% possibilitam que o cloreto esteja como solução salina e não em forma de cristais (CASTAÑEDA *et al.*, 2018).

2.1.1.2 Temperatura

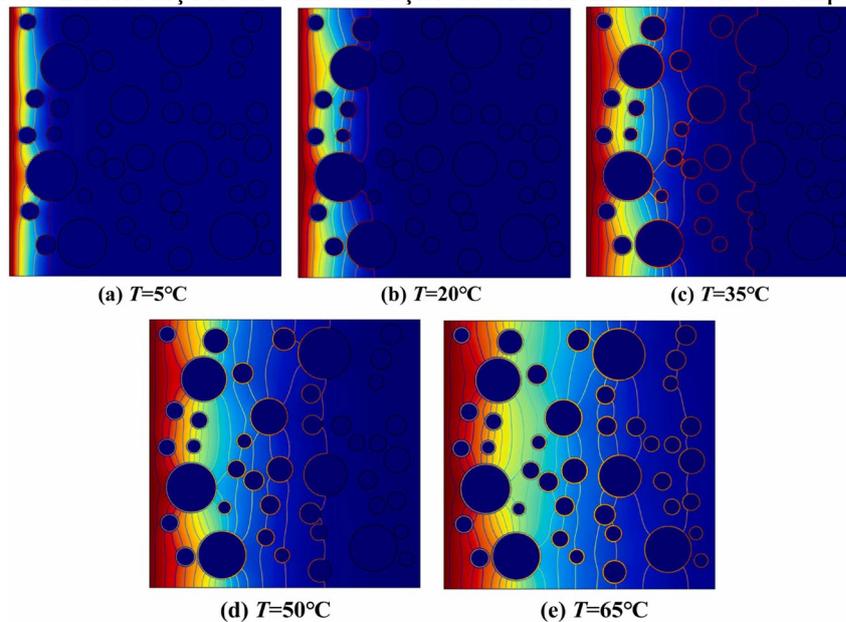
A temperatura desempenha um papel importante no acesso dos agentes agressivos no interior do concreto. Acima de 25°C favorece a evaporação da água no sistema poroso do concreto, aumentando a umidade relativa do ar. Embora a água em estado líquido não consiga evaporar com rapidez, situações em que a temperatura permanece alta por longos períodos viabilizam a diminuição gradual da umidade relativa, deixando em patamares que favorece o processo de difusão (ANDRADE; SARRÍA; ALONSO, 1999).

O acréscimo da temperatura é um dos fatores que mais influencia na transferência de umidade nos poros do concreto, pois com o aumento da temperatura, dá-se a redução da viscosidade da água líquida, da densidade e tensão superficial, ocorrendo o aumento da tensão do vapor. Como a tensão superficial das paredes dos poros diminui, ocorre a condensação do vapor e o consequente aumento da umidade relativa, fator inverso ocorre quando a temperatura diminui (CHO *et al.*, 2017).

Além disso, o aumento da temperatura exerce um impacto significativo na transmissão e profundidade da difusão de cloretos no interior do concreto. Notavelmente, ao elevar a

temperatura de 5 °C para 65 °C, indicada pela coloração amarelada, observa-se um aumento substancial na profundidade de difusão do cloreto, ampliando-se em 3,3 vezes. Esse fenômeno é evidenciado pelo gradativo aumento na tonalidade vermelha, conforme ilustrado na Figura 5. (JIN *et al.*, 2022).

Figura 5 - Distribuições de concentração de cloreto sob diferentes temperaturas



Fonte: Jin *et al.* (2022)

Em situações de temperaturas constantes em ambas as faces de uma estrutura de concreto, onde não ocorre a troca de calor, observa-se que não há impacto significativo na penetração de cloretos no concreto. O processo de difusão iônica demonstra maior atividade em temperaturas mais elevadas, contudo, ao considerarmos as condições em um ambiente natural, a variação térmica exerce uma influência mais pronunciada sobre o mecanismo de penetração de cloretos, especialmente em ambientes úmidos (ISTEITA; XI, 2017).

No que diz respeito ao impacto do vento na alteração da temperatura interna do concreto, observou-se que tanto os ventos que pressionam a estrutura (conhecidos como barlavento), quanto aqueles que promovem o efeito de sucção, chamados de sota-vento, não ocasionam alterações significativas nas temperaturas internas. Essa constatação é semelhante às variações nas direções do vento e na velocidade, que demonstraram ter praticamente nenhum efeito sobre a temperatura interna do concreto (ZHANG *et al.*, 2021).

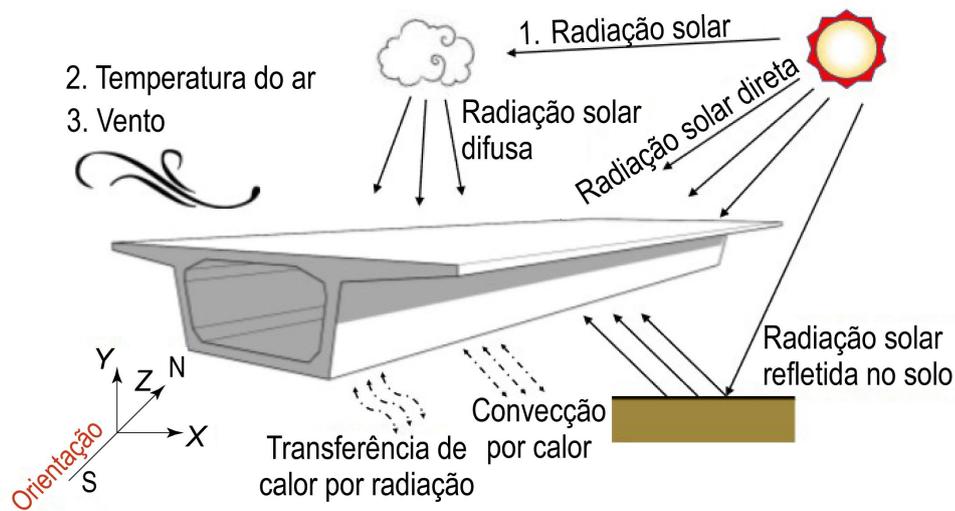
Relacionado a temperatura ambiente, Combrinck e Boshoff (2019) comprovaram que uma temperatura mais elevada, em torno de 40 °C, acelera o endurecimento do concreto

deixando-o mais rígido e mais resistente à tração, se comparado a temperatura de 23 °C. Entretanto, essa rigidez mais acelerada resulta em um concreto com uma significativa redução na capacidade de deformação.

2.1.1.3 Radiação Solar

A radiação solar é responsável por aumentar a temperatura do concreto. As estruturas de concreto trocam calor constantemente com o meio ambiente e podem ser divididas entre radiação solar, quando os raios solares incidem diretamente sobre a estrutura por meio de ondas eletromagnéticas, podendo ocorrer também por transferência de calor convectiva, através de vapor ou líquido quente e por transferência de calor por radiação, através de líquidos, sólidos e gases de outros corpos, Figura 6.

Figura 6 – Iteração do ambiente térmico associado a radiação solar



Fonte: Adaptado de Shi *et al.* (2022)

A radiação solar que incide na superfície do concreto é diretamente influenciada pelo movimento solar, que resulta em alterações no campo magnético, exercendo maior impacto quando a superfície é iluminada pelos raios solares, em comparação com a face sombreada. Alguns fatores influenciam a distribuição de temperatura causada pela radiação solar, dentre eles a temperatura atmosférica, velocidade do vento, altitude e condições meteorológicas, elementos que sofrem variações contínuas ao longo do tempo (SHI *et al.*, 2022).

Durante a fase de fabricação dos suportes de concreto armado, quando o concreto ainda está fresco, a exposição aos raios solares aumenta a temperatura da superfície e favorece a resistência inicial. Isso se deve a elevação da temperatura interna e às reações de hidratação durante o processo de cura inicial, até os 7 primeiros dias. No entanto, ao longo do período de 28 dias, observa-se uma redução significativa de 40% na resistência, atribuída ao efeito prolongado da exposição ao vento e à luz solar (KIM *et al.*, 2019).

O concreto endurecido submetido à radiação solar obtém uma perda de umidade mais significativa, em torno de 50%, estimulando o processo de evaporação. Isso resulta em um maior desenvolvimento de trincas em áreas expostas ao sol, sendo essas fissuras propensas a se manifestarem de maneira mais precoce, em comparação com as regiões de concreto situadas à sombra. Nas áreas sombreadas, a velocidade do vento exerce uma influência mais proeminente na taxa de evaporação, em comparação com as regiões expostas ao sol. Nessas últimas, é o aumento da temperatura que desempenha um papel mais predominante, superando a influência dos ventos (MOELICH *et al.*, 2021; SILVESTRO; ROMANO; MOLIN, 2020).

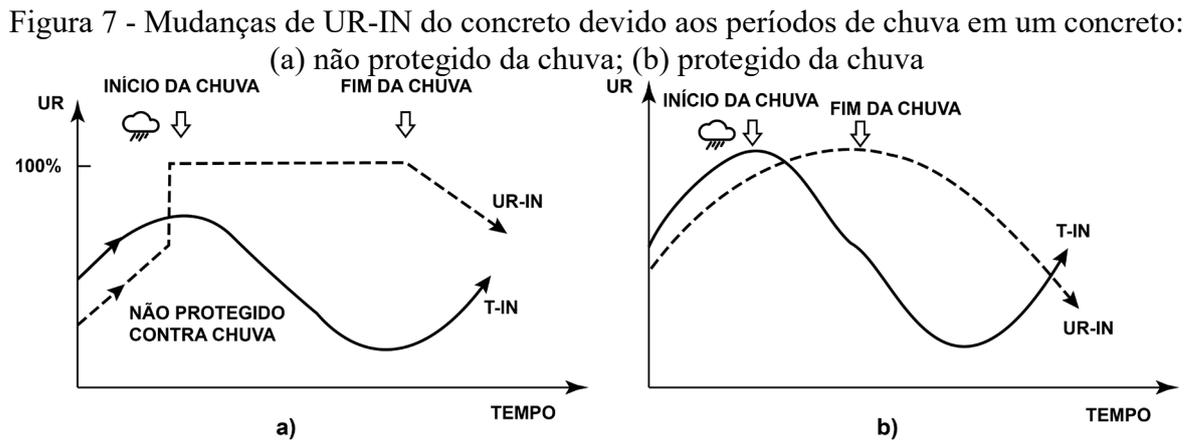
Os suportes de concreto armado, ao serem pintados, ganham uma camada protetora que contribui para reduzir a suscetibilidade à degradação causada pela umidade, especialmente quando estão localizados em áreas externas. Contudo, é importante observar que, devido à exposição prolongada à radiação solar, essas estruturas apresentam uma degradação química mais acentuada, resultando na perda de cor e brilho da pintura, além de fissuras (MAGOS *et al.*, 2016).

2.1.1.4 Precipitação Pluviométrica

A exposição dos suportes de concreto armado em áreas externas os torna suscetíveis aos impactos das chuvas, desempenhando um papel significativo na umidade interna do concreto. A água, rapidamente acumulada na superfície, é prontamente absorvida, penetrando no concreto por meio do processo de capilaridade. Durante a fase de secagem, uma porção da água presente evapora, enquanto outra parte se difunde junto com o vapor para o interior da estrutura de concreto, favorecendo os processos de carbonatação e o acesso dos íons cloretos (ANDRADE; SARRÍA; ALONSO, 1999).

Em ambientes externos sujeitos à chuva, a água pode se infiltrar no concreto tanto pela fase líquida quanto pela gasosa, sendo que a prevalência de uma sobre a outra dependerá mais da duração da exposição à chuva do que da quantidade total de água precipitada, Figura 7 (a).

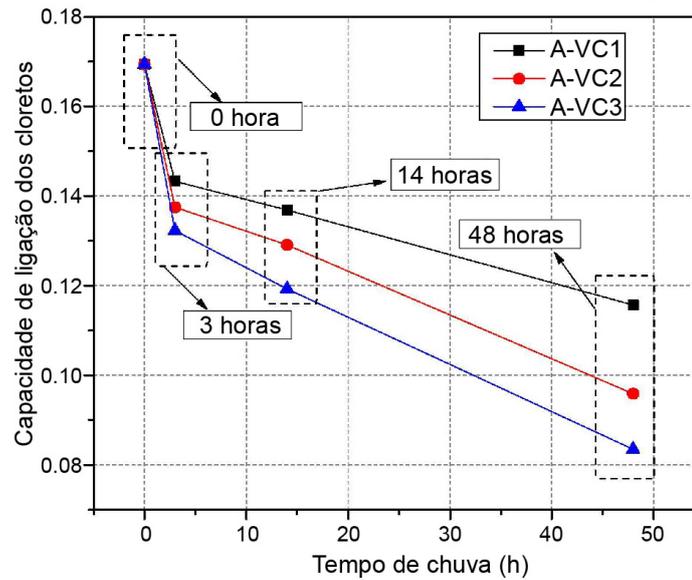
Na condição protegida da chuva, observou-se aumento gradativo da umidade relativa interna (UR-IN) e o decréscimo gradual com o fim das chuvas, decorrente do aumento na umidade relativa externa (UR-EXT), conforme Figura 7 (b) (ANDRADE; SARRÍA; ALONSO, 1999). Condição similar a encontrada por Asamoto *et al.* (2011), quando testou a perda de massa do concreto em condições de chuva e protegida, com a secagem ocorrendo ao longo de até 200 dias.



Fonte: Adaptado de Andrade (1999)

As chuvas contribuem para o aumento da umidade no interior do concreto, facilitando a entrada de agentes agressivos, entretanto, possuem a propriedade de limpeza quando a intensidade pluviométrica intensifica. À medida que a duração das chuvas se prolonga, a capacidade de penetração no interior do concreto aumenta, resultando em uma redução mais acentuada dos íons cloretos em camadas mais profundas dos poros. Foram selecionados três tipos de intensidades de chuva, adotando-se as denominações de (A) para amostra e (VC) para velocidade da chuva: A-VC1 (21,51 mm/h); A-VC2 (23,12 mm/h) e A-VC3 (26,72 mm/h). Nas chuvas com menor intensidade: 21,51 mm/h, pôde-se observar que a capacidade de ligação do íon cloreto diminui a partir das 3 horas e permanece diminuindo à medida que a chuva não cessa, todavia, à medida que a intensidade da chuva aumenta para 23,12 mm/h e 26,72 mm/h, ocorre uma acentuada diminuição dos íons cloretos de forma proporcional, conforme observado na Figura 8 (JIN *et al.*, 2021).

Figura 8 - Influência da intensidade da chuva na capacidade de ligação do íon cloreto



Fonte: Adaptado de Jin (2021)

A pintura em estruturas de concreto armado pode atuar de forma a proteger contra a entrada de agentes agressivos. Em um método de previsão de vida útil para as pinturas em ambientes de exposição externa de fachadas de edificações, considerando o período de 10,8 anos, identificou-se que o principal fator que afeta a durabilidade, além da qualidade do material, é a má execução. A radiação solar acomete de forma mais severa as pinturas, devido a degradação química, provocando perda de coesão e fissuras. Quando analisado sobre a influência da orientação dos pontos cardeais, fachadas submetidas às chuvas e ventos com menor intensidade apresentam 11% de aumento na sua vida útil, se comparado às faces com condições severas de exposição. Em distâncias menores de 1 km do mar, a vida útil é reduzida em 7% relativo aos locais com mais de 1 km da região litorânea. Já em locais com maior umidade há um incremento de 7,8% na durabilidade (MAGOS *et al.*, 2016).

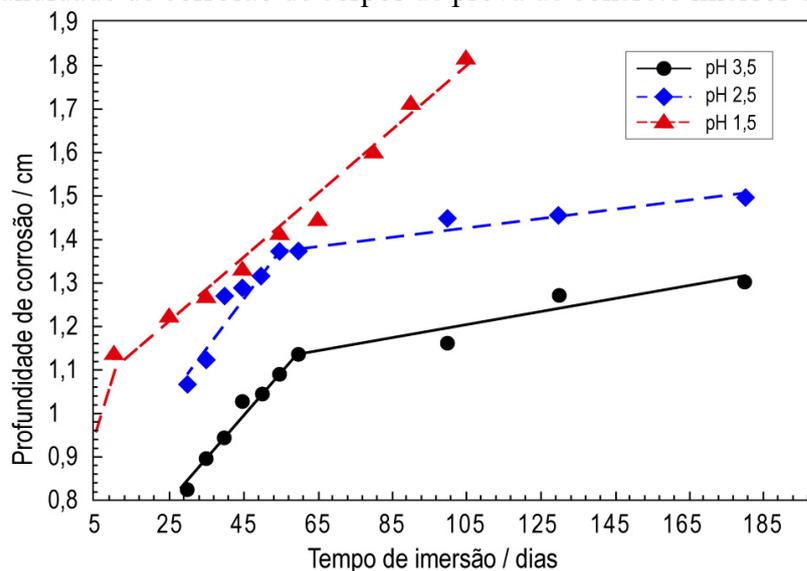
2.1.1.5 Poluição Atmosférica

A durabilidade do concreto pode ser comprometida pela ação de ácidos que reduzem o potencial hidrogeniônico (pH)¹, através de reações físicas e químicas, principalmente pelas chuvas ácidas. Em estruturas de concreto a reação química entre o hidrogênio (H⁺) e hidróxido

¹ Refere-se à concentração relativa de íons de hidrogênio numa solução, indicando acidez ou alcalinidade da mesma, sendo calculado como logaritmo negativo de base 10 da concentração de íons de hidrogênio em mols por litro.

de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) favorece a diminuição do pH, sucedendo a despassivação do concreto e corrosão da armadura. Uma análise posterior foi realizada com variações mais baixas de pH e constatou que o mais agravante para o desgaste do concreto é o tempo de exposição aos ácidos, mais do que a variação do pH, pois as superfícies ficaram pulverulentas e os cantos soltos. Três amostras de corpo de prova de concreto com pH = 3,5; pH = 2,5 e pH 1,5 foram imersas em solução ácida com duração de 185 dias e o resultado foi de uma maior profundidade de corrosão nas amostras de menor pH (FAN *et al.*, 2010), Figura 9.

Figura 9 - Profundidade de corrosão de corpos de prova de concreto imersos em solução ácida

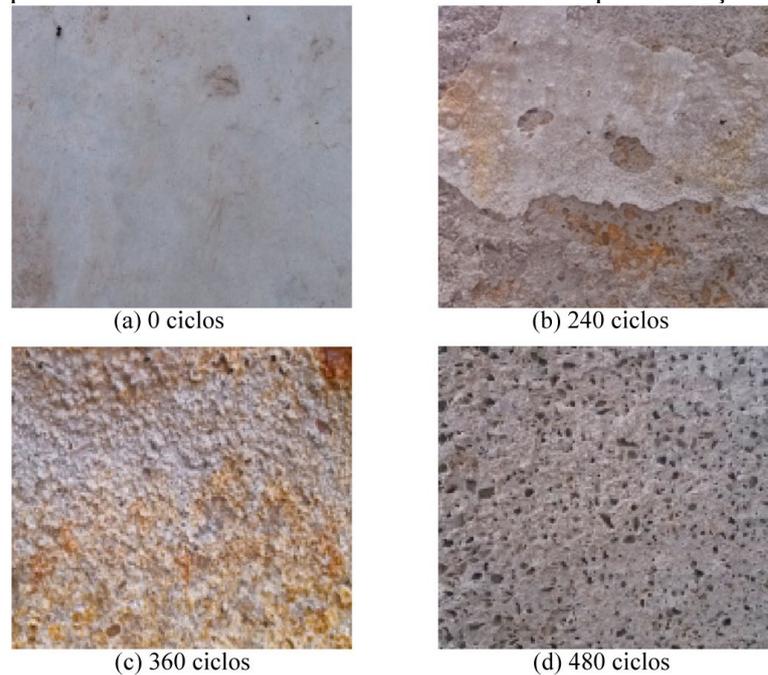


Fonte: Adaptado de Fan (2010)

Um estudo semelhante conduzido por Wang *et al.* (2017) revelou que o processo corrosivo do concreto se inicia com a entrada da solução ácida, desencadeando uma reação de neutralização e resultando em uma superfície ácida devido à relação ácido/base. À medida que o processo corrosivo se desenvolve, ele preenche os poros do concreto, dificultando o acesso dos ácidos presentes na superfície.

Ao submeter corpos de prova à simulação de chuva ácida e a testes de resistência ao cisalhamento e flexão, constatou-se uma fragilidade pronunciada na resistência ao cisalhamento, uma condição que os suportes de concreto armado precisam suportar, especialmente devido à presença dos aparelhos de ar-condicionado. Com o aumento dos ciclos de pulverização da solução ácida a partir de 240, observa-se uma intensificação no acesso dos ácidos ao interior do concreto, evidenciando o nível de deterioração com a exposição dos agregados na superfície das estruturas de concreto (ZHOU *et al.*, 2021), Figura 10.

Figura 10 - Superfícies de concreto sob diferentes ciclos de pulverização de chuva ácida.



Fonte: Adaptado de Zhou *et al.* (2021)

O principal fator que afeta o concreto é o ataque químico na superfície, em vez de questões relacionadas à ruptura física. O processo de lixiviação desempenha um papel significativo ao aumentar a porosidade e facilitar o transporte de íons nas camadas degradadas. O ácido oxálico e as precipitações de sais de oxalato de cálcio tendem a se acumular nos poros do cimento, formando uma barreira contra o processo de lixiviação. No entanto, esses elementos não geram quantidades consideráveis para uma proteção efetiva do concreto (DE WINDT; DEVILLERS, 2010).

2.1.1.6 Vento

Os ventos influenciam o transporte de íons cloretos no direcionamento das chuvas, inclusive no arrefecimento das superfícies de concreto. A concentração de cloretos na superfície do concreto aumenta com o tempo de exposição, sendo transportada pelo vento. A maior deposição de cloretos é influenciada pelo vento preferencial², fator que pode inverter a lógica da contaminação por cloretos. Em regiões onde a direção do vento não é o preferencial, os

² Os ventos predominantes ou preferencial são correntes de ar que sopram consistentemente em uma direção específica ao longo de uma determinada região ou latitude da Terra.

ciclos de molhagem e secagem possuem maior colaboração. Embora o vento favoreça a predominância de cloretos na superfície, ele também desempenha um papel na redução da umidade relativa, tanto interna quanto externa, contribuindo para a diminuição do coeficiente de difusão na superfície do concreto. O ingresso por convecção e absorção capilar são os mecanismos mais proeminentes, seguidos pelo transporte de cloretos no interior do concreto, por meio da difusão (DE MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2015).

Estruturas litorâneas localizadas em alturas mais elevadas com relação ao nível do mar, tiveram o mesmo nível de agressão por íons cloretos que as zonas de respingo de maré, tidas como as de maior agressão devido aos processos de molhagem e secagem. Em zonas marítimas, estruturas naturais ou edificadas que antecedem uma estrutura de concreto, podem servir de obstáculo quanto à deposição de cloretos (BALESTRA; REICHERT; SAVARIS, 2019).

As taxas de corrosão são maiores nos locais onde a direção dos ventos incide sobre as construções; fachadas que recebem esses ventos nos períodos de chuva e apresentam elevada umidade relativa do ar tendem a degradar com mais facilidade - um aumento ainda mais significativo ocorre nas regiões litorâneas (PAKKALA *et al.*, 2019).

A geração e o transporte de íons cloretos são influenciados pela profundidade marítima do litoral, amplitude de marés, arrebentamento das ondas e especialmente na direção dos ventos do litoral para o continente. As reduções da salinidade ocorrem em distâncias de 100 m a 150 m da costa, indo de 30 mg/dcm²/dia para menos de 5 mg/dcm²/dia (LEE; MOON, 2006). Essas distâncias são influenciadas por obstáculos, chuvas, além do efeito gravimétrico. Em João Pessoa, região nordeste do Brasil, chegou-se a reduções fortes nos primeiros 100 m a 200 m (MEIRA *et al.*, 2020).

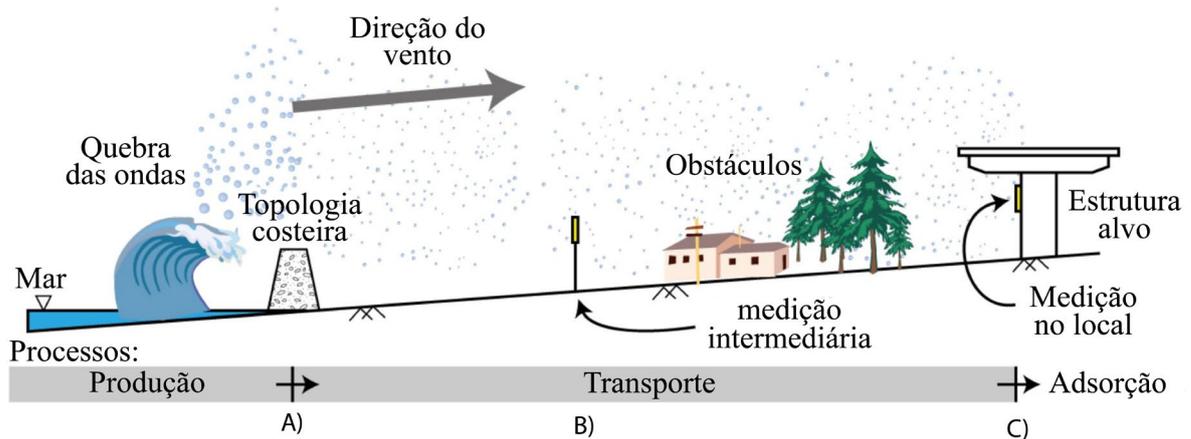
A velocidade do vento é responsável pelo aumento na geração de partículas de aerossóis marinhos e amplia com o efeito de ventos fortes, superiores a 3 m/s, embora a correlação entre a velocidade e a duração do vento seja mais significativa para a concentração salina (MEIRA *et al.*, 2008). Em locais com exposição ao ar livre e velocidade de vento superior a 2,2 m/s, já ocorre o aumento da deposição de cloretos, apesar de não haver consenso sobre esses valores mínimos (GUERRA *et al.*, 2019).

As partículas maiores e mais numerosas formadas na arrebentação das ondas, precipitam-se de forma gravitacional em distâncias mais curtas, as partículas menores - também chamadas de aerossóis, percorrem distâncias maiores com a força do vento. Os obstáculos no caminho, como construções, árvores e o efeito das chuvas pode diminuir essa concentração de sal (MEIRA *et al.*, 2008). Além das partículas salinas formadas na zona de arrebentação e na

costa, estuários influenciam em distâncias maiores na deposição, superando os 4.500 m (GUERRA *et al.*, 2019).

Um procedimento para detecção dos tamanhos de partículas de cloretos transportados, foi realizado na ilha de Shikoku, no Japão, e utilizou-se de dois pontos de coleta: A e B, com 30 m e 45 m de distância da linha costeira, sendo próximo a praia de areia e outro local com quebra mar do tipo tetrápode, com dois pontos de coleta: A e B equivalente a 60 m e 72 m de distância, numa região mais afastada e elevada. As alturas de coleta variaram de 1 m a 4 m e foi feita a captura de imagens do arrebatamento das ondas para servir de referência na deposição dos cloretos em regime de coleta seca, conforme Figura 11. As alturas das ondas médias eram de 1,6 m e 1,5 m, com velocidades do vento de 6,7 m/s e 5,4 m/s, respectivamente (BONGOCHGETSAKUL; KOKUBO, 2011).

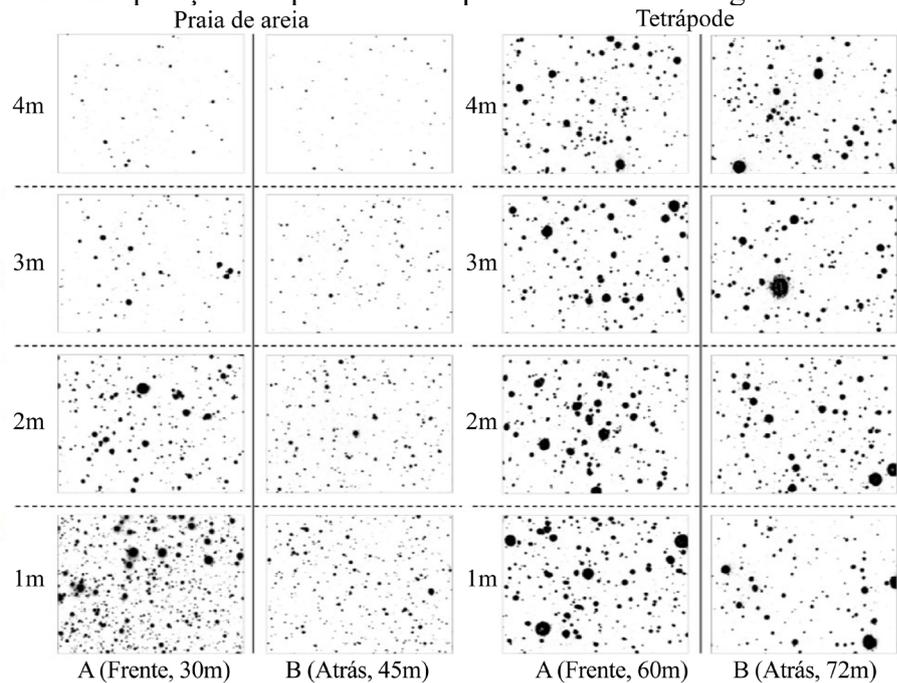
Figura 11 – Metodologia na coleta dos dados de cloreto no ar: a) ponto de geração dos cloretos; b) ponto de coleta intermediária; c) medição na estrutura de concreto armado



Fonte: Adaptado de Bongochgetsakul; Kokubo (2011)

Pôde-se constatar que na região com praia de areia, foi possível identificar a deposição dos cloretos com partículas maiores decaindo acentuadamente no ponto A e apenas as menores chegando ao ponto B. Já no local com os tetrápodes, o arrebatamento das ondas provocou espalhamento das partículas maiores com alturas superiores aos 10 m. A influência da formação geológica da costa marítima tem papel fundamental na formação, altura e distância percorrida pelos cloretos, mesmo com distâncias maiores no local dos tetrápodes, partículas maiores de cloretos foram identificadas em todas as alturas dos pontos A e B, vide Figura 12.

Figura 12 – Disposição das partículas na praia de areia e na região dos tetrápodes



Fonte: Adaptado de Bongochgetsakul; Kokubo (2011)

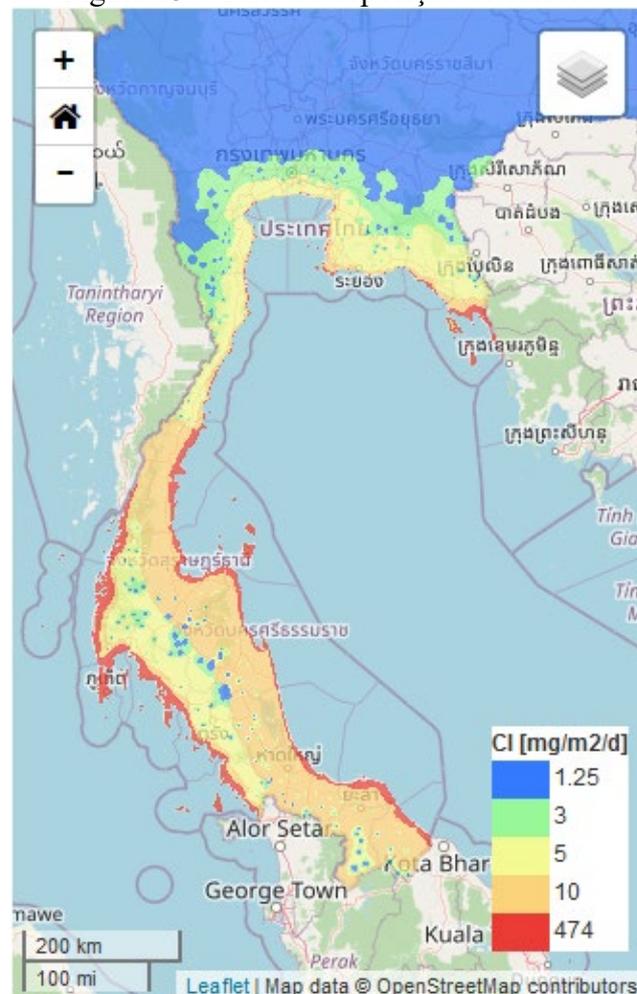
Ao longo de um ano foi monitorada a taxa de deposição de íons cloretos em 17 estações e ao longo de três zonas costeiras da Tailândia, com a utilização do método da gaze seca e estações de medição com distâncias para o mar de até 5 km, os dados sobre a velocidade e direção dos ventos eram coletados a cada 10 min. A atuação dos cloretos foi menos intensa na região costeira com menor profundidade oceânica e conseqüente produção mais restrita da salinidade. O alcance da taxa de deposição de cloretos é influenciado diretamente pela velocidade e direção dos ventos, chegando ao alcance de 5 km. Esses valores sofrem alterações anualmente em razão das variações nas direções e velocidades dos ventos (PONGSAKSAWAD *et al.*, 2021).

Com base nesses testes de campo foi implantado o modelo de Cole *et al.* (2013) para identificar a deposição de cloreto em função dos ventos. Adotou-se duas premissas: o cloreto produzido pela arrebentação (< 1 km), onde as taxas de deposição caem exponencialmente no primeiro quilômetro e as formadas pelas ondas do mar (> 1 km), que são mais leves e menores e caem gradualmente ao longo do interior do continente. Como resultado formou-se um mapa com o alcance da deposição de cloretos, com indicação em vermelho pelas altas concentrações no primeiro quilômetro, todavia, pôde-se identificar menores concentrações, atingindo quase 100 km do litoral (PONGSAKSAWAD *et al.*, 2021).

Nesse sentido, destaca-se que os ventos possuem papel decisivo, principalmente quando se percebe em alguns locais a baixíssima deposição ao norte do mapa e as altas taxas na deposição de cloretos no interior do continente, mais ao sul, onde os ventos vindos do Leste podem atingir os 11,75 m/s, demonstrados na Figura 13 (PONGSAKSAWAD *et al.*, 2021).

Em Cuba verificam-se várias concepções para a zona costeira - locais com alta concentração de edificações e vegetação alta funcionam como uma barreira para o avanço dos cloretos, com distâncias que variam de 150 m a 250 m; situação distinta de zonas onde não há a presença de montanhas, edificações e vegetação natural alta. Essas deposições podem chegar a 7.000 m, apesar de atingirem picos de 8.000 m, porém em níveis insignificantes (CASTAÑEDA *et al.*, 2018).

Figura 13 – Taxa de deposição de cloreto



Fonte: Pongsaksawad *et al.* (2021)

A forma do vento se propagar no município de Recife, bairro de Boa Viagem, foi analisada por Valença (2010), considerando condições de estabilidade atmosférica, parâmetros de velocidade do vento, insolação e nebulosidade de acordo com os normais climatológicos de 1961 a 1990, disponibilizados na Tabela 1. A condição de estabilidade atmosférica foi classificada como: extremamente instável, moderadamente instável, pouco instável, neutra, pouco estável e extremamente estável, adicionando a estabilidade noturno para a noite, vinculados ao gradiente de temperatura. Como as médias da velocidade de vento são acima de 5 m/s, os parâmetros de nebulosidade não têm efeito relevante na estabilidade atmosférica.

A atmosfera neutra ocorre em velocidades de vento razoáveis e com baixa turbulência ao passo que a atmosfera instável possui altas velocidades de vento e com o ar quente gerando mais turbulência.

Tabela 1 – Condição de estabilidade atmosférica mensal nos períodos diurno e noturno para o Recife

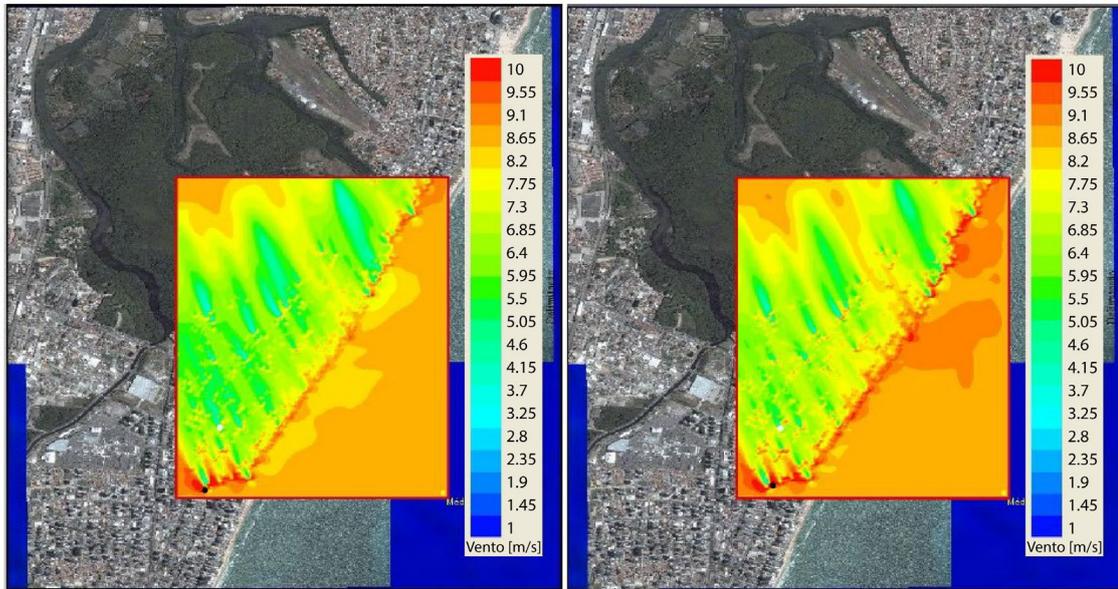
Mês	Velocidade de Vento (m/s)	Condição de Insolação Diurna	Condição de Nebulosidade Noturna	Estabilidade Atmosférica	
				Diurna	Noturna
Janeiro	6,46	Forte	Alta	Pouco instável	Neutra
Fevereiro	5,92	Moderada	Alta	Neutra	Neutra
Março	5,48	Moderada	Alta	Neutra	Neutra
Abril	5,52	Moderada	Alta	Neutra	Neutra
Maiο	6,27	Moderada	Alta	Neutra	Neutra
Junho	7,09	Moderada	Alta	Neutra	Neutra
Julho	7,54	Moderada	Alta	Neutra	Neutra
Agosto	8,01	Fraca	Alta	Neutra	Neutra
Setembro	7,92	Moderada	Alta	Neutra	Neutra
Outubro	7,54	Forte	Alta	Pouco instável	Neutra
Novembro	7,30	Forte	Alta	Pouco instável	Neutra
Dezembro	7,00	Forte	Alta	Pouco instável	Neutra

Fonte: Valença (2010)

Essas condições são premissas para as simulações da velocidade do vento e intensidade de turbulência do vento quanto aos edifícios da região litorânea do bairro de Boa Viagem, demonstrando as condições de instabilidade provocada pela grande quantidade de edificações. Os dados históricos de velocidade de vento foram coletados no *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) e *National Center for Atmospheric Research* (NCAR),

obtidos a 10 m de altura em relação a superfície no período de 1948 até 2009, sendo demonstrado na Figura 14.

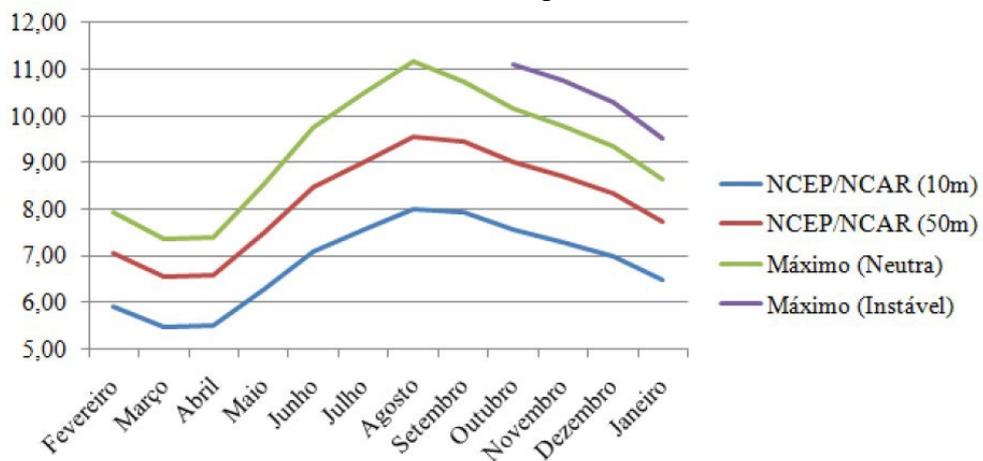
Figura 14 – Simulações para os dados do NCEP/NCAR para outubro em condições atmosféricas neutra (esquerda) e pouco estável (direita)



Fonte: Valença (2010)

Os ventos adquirem maiores velocidades com uma maior altura se comparado os dados a 10 m e 50 m de altura com a superfície. O mês de agosto tem a característica de possuir velocidade máxima, conforme pode ser visto na Figura 15.

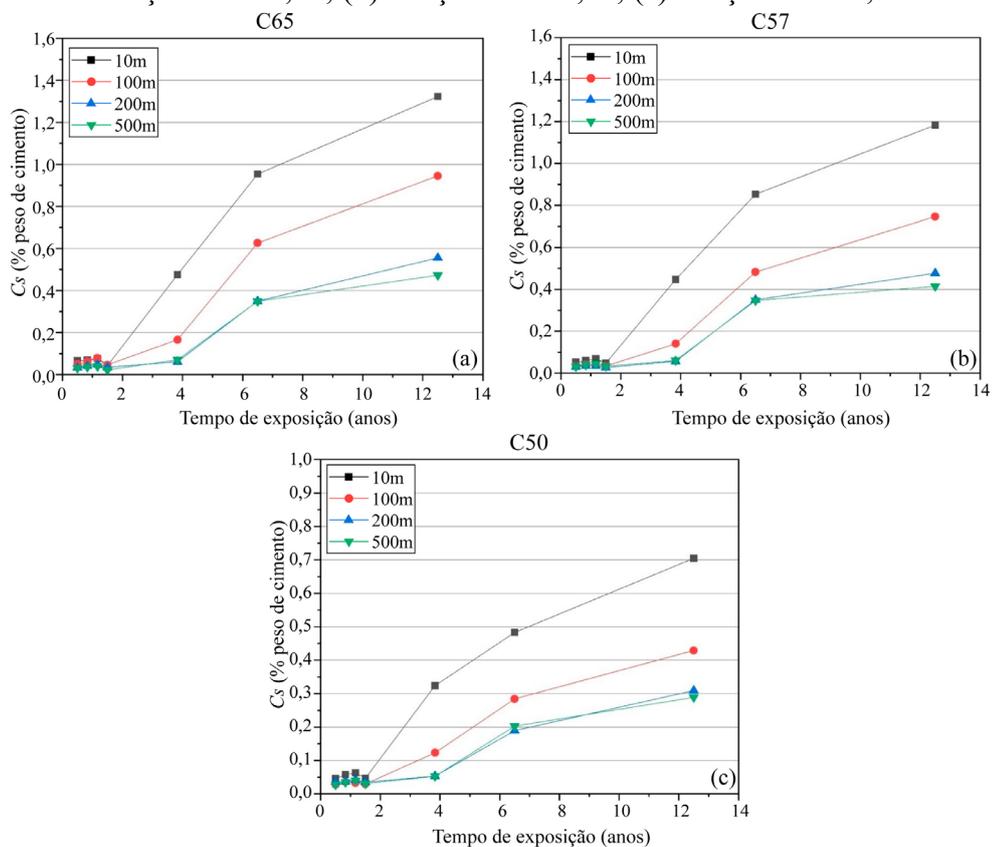
Figura 15 – Velocidade de vento máximas para os dados de NCEP/NCAR a 10 m e extrapolado para 50 m e as velocidades máximas obtidas pela simulação para condições atmosféricas neutra e pouco estável



Fonte: Valença (2010)

Em um estudo que utilizou três misturas e propriedades distintas de concreto, os mesmos foram colocados em distâncias de 10 m, 100 m, 200 m e 500 m, sendo identificado que a deposição de cloretos de superfície aumenta ao longo do tempo. Nos dois primeiros anos a taxas mantiveram-se equilibradas, crescendo de forma considerável posteriormente. Após anos há tendência de queda, porém sem definição de como seria esse decréscimo, visto que, em 12,5 anos de pesquisa não foi suficiente constatar (MEIRA; FERREIRA; ANDRADE, 2022), conforme visto na Figura 16.

Figura 16 – Comportamento de cloretos ao longo do tempo para três tipos de concreto: (a) relação a/c = 0,65; (b) relação a/c = 0,57; (c) relação a/c = 0,50



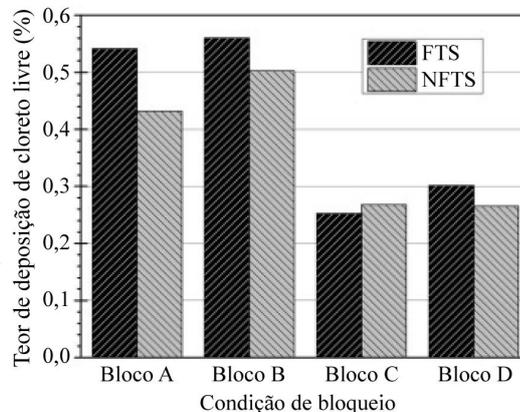
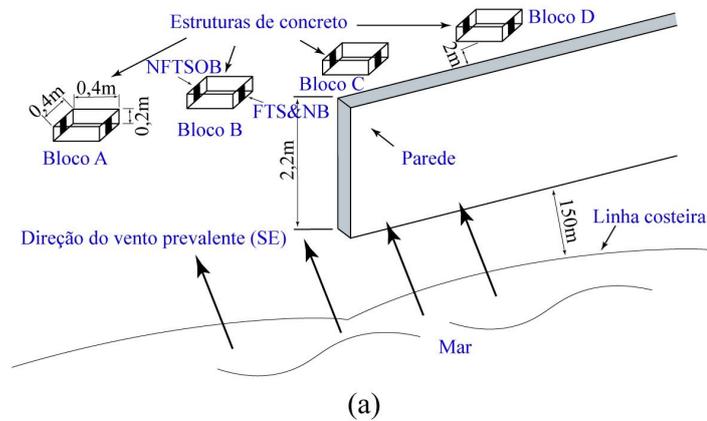
Fonte: Adaptado de Meira, Ferreira e Andrade (2022)

A partir de análises de muitas medições sobre a salinidade aérea na Austrália e no sudeste Asiático, com medidas realizadas a céu aberto e terreno livre, em regiões urbanas ao ar livre e nas fachadas das edificações, foi possível identificar o menor avanço da salinidade oceânica e a maior intensidade dos aerossóis formados pelas ondas nas praias. Na paisagem urbana edificada há uma redução de 70% do avanço da salinidade, se comparado a região aberta,

entretanto, em regiões onde a intensidade dos ventos seja elevada, há pouca interferência no efeito de abrigo (COLE *et al.*, 2013).

Um estudo sobre o efeito das construções funcionando como uma barreira na deposição de cloretos, levou em consideração quatro blocos na condição de: não bloqueio (Bloco A), bloqueio parcial (Bloco B) e bloqueio total (Blocos C e D), além da orientação de frente ao mar (FTS) e não voltado para o mar (NFTS). Se comparados a condição de não bloqueio (Bloco A) e bloqueio parcial (Bloco B) com o bloqueio total (Blocos C e D), há uma redução de 50% na deposição de cloretos, porém a diferença entre a condição de não bloqueio (Bloco A) e o bloqueio parcial (Bloco B) é quase desconsiderada. Quando há condição de bloqueio total, a orientação da superfície de concreto tem pouca influência na deposição de cloretos (LIU *et al.*, 2018). No que concerne às orientações da superfície do concreto, tem-se: frente ao mar e não bloqueado (FTS&NB) e não voltado para o mar ou bloqueada (NFTSOB), vide Figura 17.

Figura 17 – Efeito da construção de barreira na deposição de cloretos: (a) concretos expostos a diferentes condições de bloqueio; (b) comparação com as condições do Bloco A e Bloco B.



Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2018)

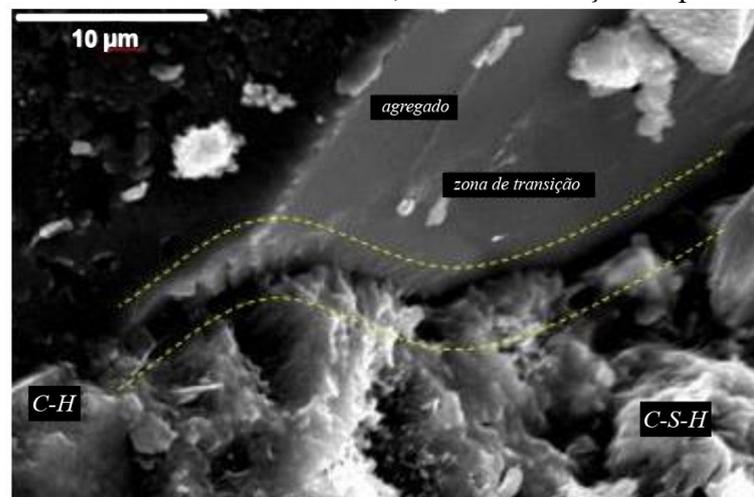
O concreto apresenta diversos mecanismos de transporte em seu interior, os quais podem influenciar diretamente em sua durabilidade. Entre esses mecanismos, destacam-se a permeabilidade, absorção capilar, difusão e migração iônica.

2.1.2 Principais mecanismos de transporte no concreto

A durabilidade está relacionada com a forma de transporte dos agentes agressivos através dos poros, vazios e fissuras e o nível de dificuldade de acesso ao interior do concreto. Fatores como a relação água/cimento, adições minerais, umidade relativa do ar e principalmente a forma de saturação vai corroborar com a passagem de líquidos e gases, através dos processos de permeabilidade, absorção capilar, migração iônica ou difusão (ZHANG; ZHANG, 2014).

A complexidade da estrutura interna do concreto pode ser vista na imagem da microestrutura do concreto por meio do microscópio eletrônico de varredura, com detalhes para as zonas de transição (linha amarela) entre os materiais que podem gerar vazios e consequentemente permitir o acesso dos agentes agressivos (DA SILVA; GACHET; LINTZ, 2020), conforme Figura 18.

Figura 18 – Microestrutura do concreto, zona de transição da pasta e agregado



Fonte: Da Silva; Gachet; Lintz (2020)

2.1.2.1 Permeabilidade

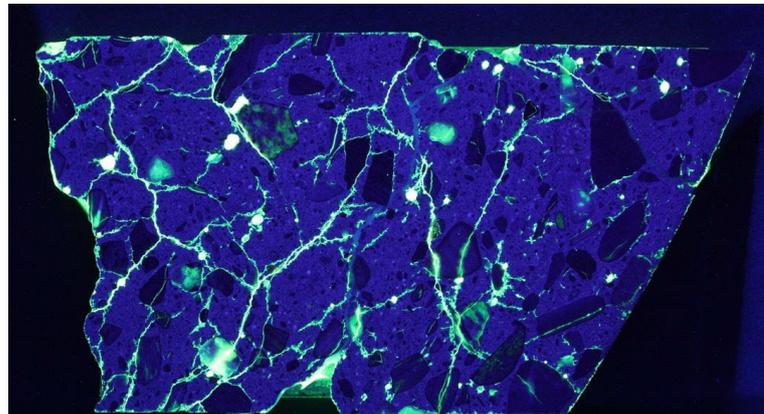
A permeabilidade está associada a capacidade de um material líquido ou gasoso de atravessar um sólido, através dos poros e sob uma diferença de pressão. Um dos fatores

principais relacionados ao concreto, deve-se a conexão entre os poros; uma maior interconectividade entre eles favorece o acesso de agentes externos. A inserção dos agregados é um outro fator devido às zonas de transição e suas respectivas microfissuras. Na pasta de cimento a permeabilidade depende fortemente da relação água/cimento, por isso, o controle de qualidade na produção do concreto está associado a menor relação água/cimento, melhor hidratação e cura do concreto, favorecendo menores taxas de permeabilidade (RIBEIRO, 2018).

Em testes de permeabilidade quanto a absorção de gás CO_2 e O_2 , observou-se que nas mesmas condições, o CO_2 é absorvido na parede de poros do concreto mais facilmente do que o O_2 . Essa relação inverte quando aumenta a relação a/c, uma vez que, a quantidade absorvida de O_2 passa a ser maior do que a de CO_2 . A permeabilidade também está associada a tortuosidade dos canais, pois as colisões entre as moléculas de gás e as paredes dos poros enfraquecem as pressões mais altas e diminui a permeabilidade do gás (QIAN *et al.*, 2021).

Em algumas análises sobre a microestrutura do concreto é possível identificar a porosidade, fissuras e o caminho dos poros, conforme pode-se verificar em uma seção de uma peça de concreto com essas falhas, demonstradas por fluorescência e fotografadas por luz ultravioleta, a exemplo da Figura 19.

Figura 19 – Foto de uma seção de concreto com fluorescência e fotografada com luz ultravioleta



Fonte: Skjolsvold; Kanstad, ([2018?])

Um estudo realizado em um período de nove anos, constatou que concreto com relação $a/c = 0,45$ tinham maiores concentrações de cloretos superficiais, porém, com concentrações inferiores em maiores profundidades. Já em concretos com relação $a/c = 0,65$ a taxa de cloretos superficiais era menor, entretanto, com maiores profundidades a taxa de cloretos aumentava (SILVESTRO; ROMANO; MOLIN, 2020).

2.1.2.2 Absorção capilar

No processo de absorção capilar o transporte de líquidos está associado mais ao grau de saturação do que propriamente a porosidade do material. E esse tipo de transporte é de difícil controle, tendo uma característica importante, pois em dutos capilares mais finos o transporte torna-se mais rápido, devido as maiores pressões capilares (RIBEIRO, 2018).

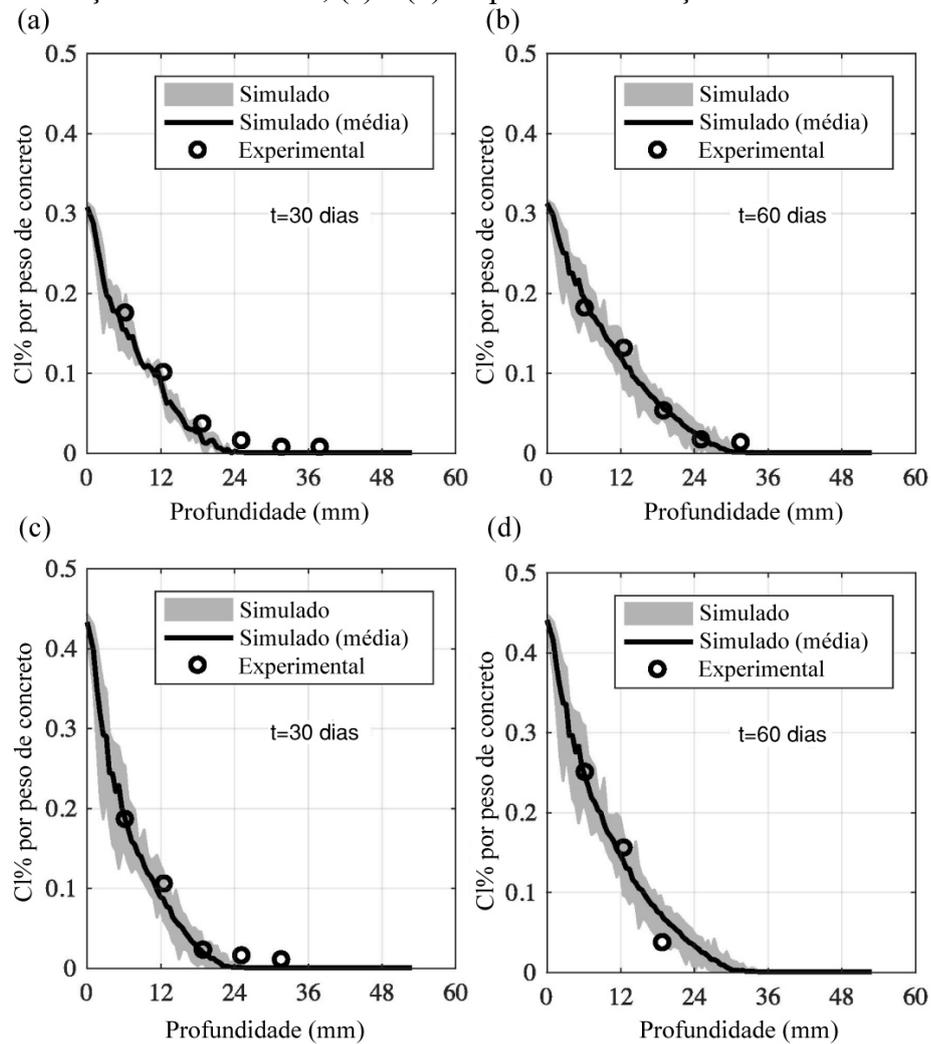
Uma melhor qualidade do concreto possibilita menores poros e maior pressão capilar, portanto deve-se buscar uma menor interconectividade entre os poros. Em concretos saturados não há pressões externas de tensão superficial e conseqüentemente não há absorção, caso haja algum tipo de penetração deverá estar associada ao processo de difusão (RIBEIRO, 2018).

2.1.2.3 Difusão

Um dos mecanismos mais dominantes no transporte é o da difusão, que se dá basicamente pelo efeito de gradientes de concentração, quando duas substâncias em contato direto tendem a equilibrar as concentrações, podendo se dar em substâncias líquidas e gasosas. Há uma correlação entre a porosidade e o coeficiente de difusão: quanto maior a porosidade, maior é o seu coeficiente de difusão. Na análise da porosidade tortuosa, relacionado a uma maior complexidade geométrica do meio poroso e caminhos mais curvos, o coeficiente de difusão é maior com uma menor porosidade tortuosa (LINARES-ALEMPARTE; ANDRADE; BAZA, 2019).

Na exposição de saturação do concreto com uma solução de cloreto de sódio (NaCl) a 3% e a 5%, foi possível verificar que em maiores concentrações da solução, deu-se a elevação da penetração de cloretos na área superficial do concreto. O acesso dos cloretos em maiores profundidades foi possível quando a solução permaneceu exposta por mais tempo, ou seja, quando $t = 60$ dias (ZHANG; LUZIO; ALNAGGAR, 2021), conforme Figura 20.

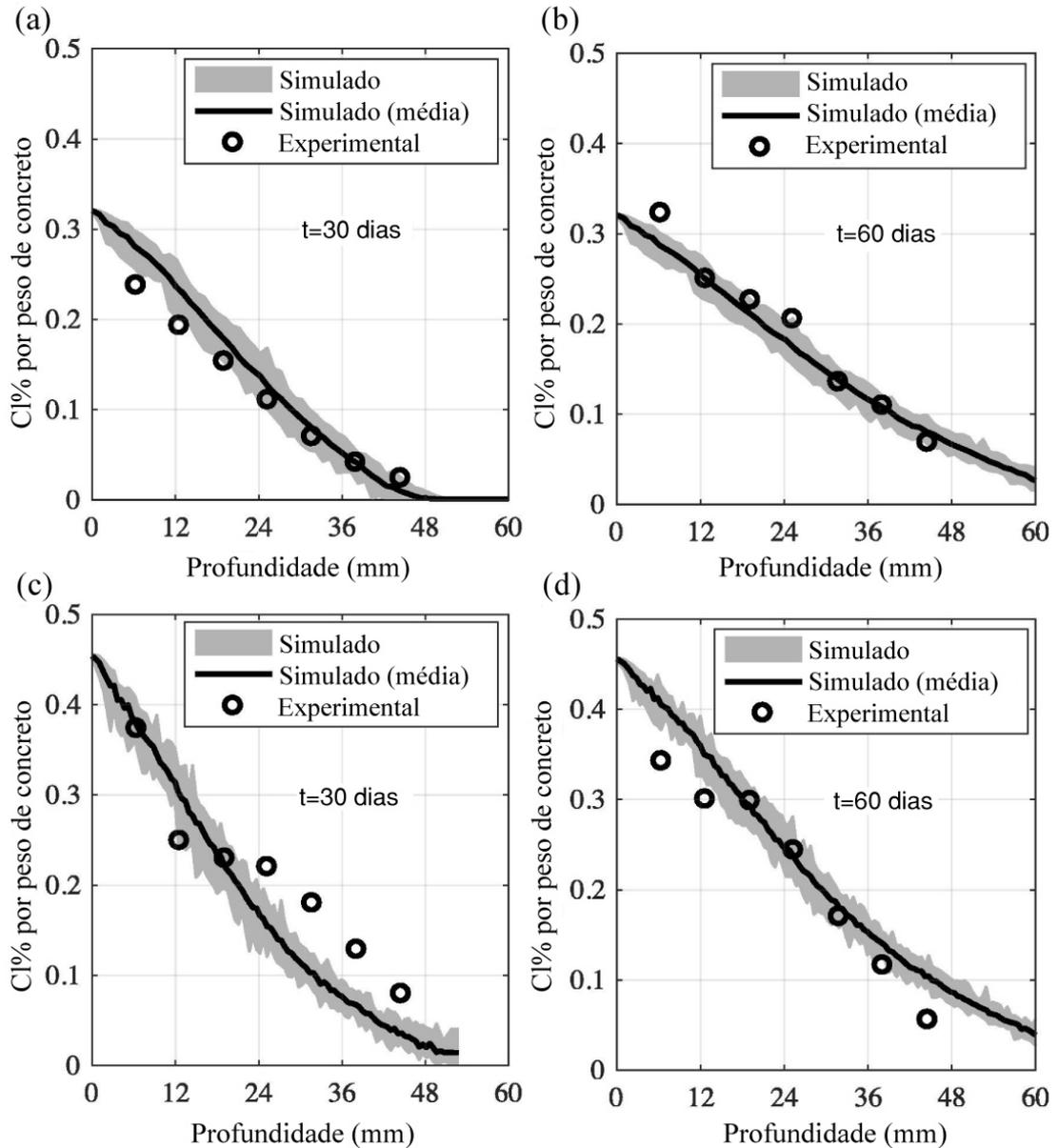
Figura 20 – Penetração de cloretos em solução totalmente saturada; (a) e (b): expostas em solução de NaCl a 3%; (c) e (d): expostas em solução de NaCl a 5%



Fonte: Zhang, Luzio e Alnaggar (2021)

Quando o concreto não está saturado a velocidade no transporte de cloretos é intensificada e a variação da umidade causa o processo de advecção, ou seja, o movimento do fluido de um lugar para outro. Essa influência pode ser observada se comparada as imagens das Figuras 20 e 21, nas quais verifica-se que a profundidade de penetração do cloreto é maior em 2 vezes no meio não saturado.

Figura 21 - Penetração de cloretos em solução não saturada; (a) e (b): expostas em solução de NaCl a 3%, (c) e (d); expostas em solução de NaCl a 5%



Fonte: Zhang, Luzio e Alnaggar (2021)

2.1.2.4 Migração iônica

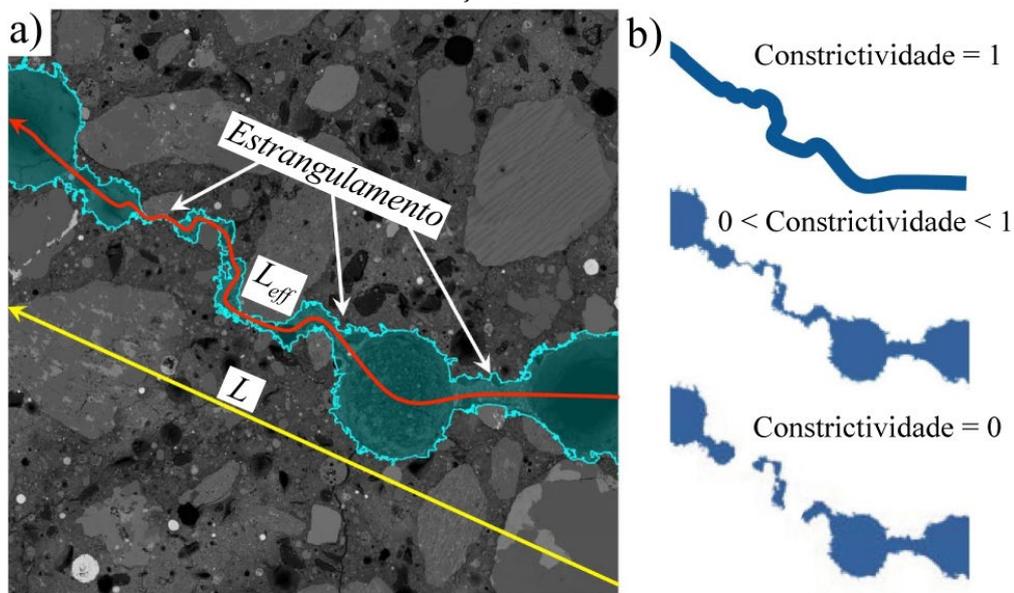
A migração iônica se dá pelo transporte dos íons sob a ação de um potencial elétrico oriundo do processo eletroquímico ou de uma fonte externa, utilizados principalmente em procedimentos de realcalinização e extração de cloretos. Na região entre a superfície do concreto e as barras de aço, o processo de extração de cloretos atua de forma relativamente rápida e eficiente, apesar de reduzir parcialmente por trás da armadura e apresentar uma

distribuição desigual na concentração, sendo indicados principalmente em estruturas onde há necessidade de remover elevadas concentrações salinas (NĚMEČEK *et al.*, 2018).

Muitos fatores estão associados ao transporte iônico, como a geometria, distribuição dos poros e sua conectividade, além das reações químicas em decorrência das ligações dos íons as paredes dos poros - quimicamente ativas - e o efeito do potencial elétrico, pois as paredes encontram-se carregadas negativamente, possibilitando o efeito do potencial de membrana, afetando a difusão de íons. O envelhecimento do concreto e o resultado das reações químicas ao longo do tempo, reflete na diminuição da porosidade e a consequente tortuosidade. Para mais, o aumento da temperatura interfere em todos os processos citados, concebendo mais capacidades de ligação (ZHANG; LUZIO; ALNAGGAR, 2021).

Como mostra a Figura 22a, é apresentado o caminho tortuoso entre os poros do concreto e o fator de constrictividade, um parâmetro associado ao processo de transporte em meios porosos, sempre menor ou igual a 1. No comprimento em linha reta, denominado de L , tem-se o comprimento efetivo formado pelos poros e chamado de L_{eff} . Na Figura 22b é demonstrada a classificação da constrictividade; quando não há estrangulamento o valor é igual a 1, em locais com redução da seção pode estar entre 0 e 1 e por último quando há descontinuidade dos poros, com fator de constrictividade igual a 0.

Figura 22 – Microestrutura porosa de concreto mostrando a) trajetória tortuosa dos poros e b) diferentes condições de constrictividade



Fonte: Adaptado de Zhang, Luzio e Alnaggar (2021)

A quantidade elevada de poros no concreto atua como reservatórios para os produtos da corrosão do aço. A maior porosidade e permeabilidade de concretos de baixa qualidade demanda mais perda de massa do aço, antes do início da fissuração do concreto. Nesses casos a taxa de produção dos produtos de corrosão tem mais influência do que a quantidade de corrosão, dado que a taxa de corrosão deve superar a difusão dos produtos de corrosão nos poros do concreto, para que as tensões de tração se acumulem ao ponto de causar rachaduras (OTIENO; IKOTUN; BALLIM, 2019).

O concreto armado é suscetível a diversas formas de degradação, conhecidas como manifestações patológicas, que resultam da exposição ao ambiente como a corrosão da armadura, a ocorrência de fissuras, além de mofo e bolor.

2.1.3 Principais manifestações patológicas em concreto armado

Dentre as manifestações patológicas, destacam-se o processo de corrosão da armadura, desencadeado pela carbonatação e o ataque por íons cloretos, o surgimento de fissuras, além da propagação de mofo e bolor. Esses fatores desempenham um papel crucial na deterioração dos suportes de concreto armado, como demonstrado a seguir.

2.1.3.1 Corrosão

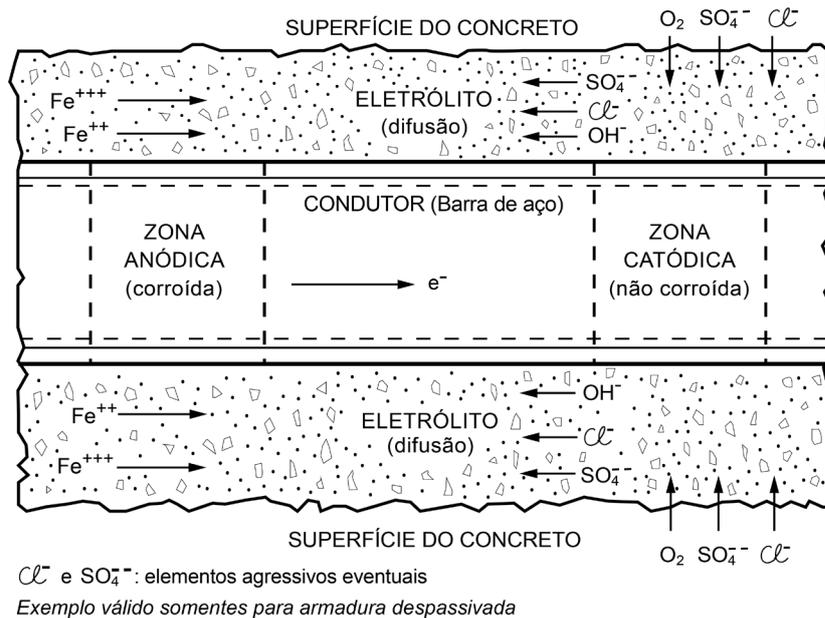
A difusão é o principal mecanismo de transporte dos íons cloretos pelos microporos do concreto. À medida que a concentração de cloretos aumenta na interface entre o concreto e a armadura, ocorre a despassivação da armadura, desencadeando assim a propagação da corrosão (PELLIZZER, 2019).

Os metais são os componentes básicos para a formação das ligas metálicas que passam por um processo industrial, como por exemplo, o aço que, em contato com o meio ambiente, passa a estabilizar o estado de energia interna e transforma os materiais que lhe deram origem, como os óxidos e hidróxidos. O Ferro (Fe) transforma-se em óxido de férrico (Fe_2O_3) hidratado, também conhecido como ferrugem, processo que aumenta o volume do aço no interior do concreto, criando uma pressão sobre o concreto com tendência a fissuração, quebra e ruptura (DE SOUSA, 2018).

No processo de corrosão da armadura ocorre a transferência de elétrons e íons entre partes distintas da peça metálica, sendo chamada de corrosão eletroquímica, uma reação

considerada espontânea e que depende de um elemento oxidante como o oxigênio e o hidrogênio e o contato com um componente metálico, recebendo elétrons e conseqüentemente sofrendo reações de redução em um meio aquoso, chamado de eletrólito. São formadas duas regiões na armadura, uma anódica, onde ocorre a reação de oxidação do metal e perda de elétrons, e a catódica, onde recebe os elétrons, processo que ocorre na própria barra de aço e que atua como um condutor entre as regiões (HELENE; FIGUEIREDO, 1986), conforme Figura 23.

Figura 23 – Processo de corrosão eletroquímica no concreto armado

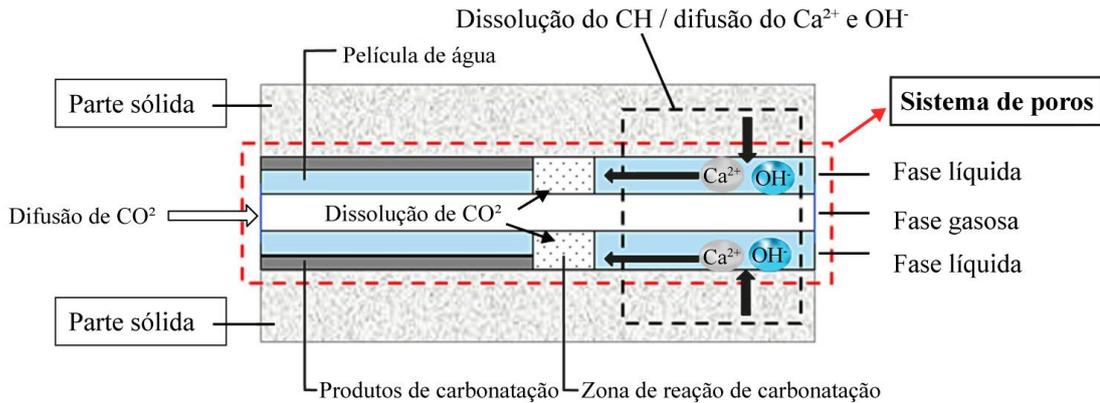


Fonte: Helene e Figueiredo (1986)

2.1.3.1.1 Corrosão por carbonatação

O dióxido de carbono ou gás carbônico, CO₂, ao entrar em contato com o concreto penetra nos poros por difusão e adsorção, e dilui-se na presença de umidade formando o ácido carbônico (H₂CO₃). Esse material formado reage com a pasta de cimento hidratada, como o hidróxido de cálcio, (Ca(OH)₂) formando o carbonato de cálcio (CaCO₃) e água H₂O. O resultado chama-se de carbonatação e está associado a lixiviação do concreto (POSSAN, 2010; XU *et al.*, 2022). As reações físico-químicas e os principais mecanismos de transporte estão ilustrados na Figura 24.

Figura 24 – Mecanismo do processo de carbonatação nos poros do concreto



Fonte: Xu *et al.* (2022)

A consequência da carbonatação é a redução do pH do concreto, que pode passar de 12,6 para 8,5, deixando o aço mais suscetível a despassivação da armadura, ou seja, do rompimento da fina película de proteção da superfície do aço, aumentando consideravelmente o início da corrosão e suas consequências, como fissuração do concreto, destacamento da camada de cobertura da armadura, redução de seção da armadura e consequente perda de sua resistência e aderência ao concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Ao contrário de outros gases, o CO_2 reage com algumas partículas sólidas presentes no concreto e seus respectivos produtos de hidratação, como o CH e o C-S-H, intensificando o nível de dureza superficial do concreto. A frente de carbonatação significa a profundidade que o dióxido de carbono degenerou o concreto (SHEN *et al.*, 2019).

Alguns fatores influenciam diretamente o processo de carbonatação, como a alta relação água/cimento devido ao aumento da porosidade capilar no tipo de cimento utilizado, pois composições com maior reserva alcalina tendem a diminuir o avanço da carbonatação. As adições minerais, se por um lado tendem a melhorar alguns aspectos como diminuição dos poros, maior controle da fissuração térmica e aumento da resistência final, por adicionar materiais pozolânicos, influencia na diminuição da reserva alcalina e na redução de $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$, facilitando o avanço da carbonatação (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Apesar da carbonatação favorecer uma corrosão generalizada, em toda a extensão da barra, conforme o modelo de Tuutti, alguns estudos indicam que a profundidade da corrosão seria local por natureza, predominantemente no formato de macrocélula (corrosão localizada) e não de microcélula (corrosão uniforme) (FRANÇOIS; LAURENS; DEBY, 2018).

A carbonatação altera a porosidade do concreto, principalmente na diminuição quando se utiliza o cimento Portland, pois propicia a formação de calcita, aragonita e varetita, materiais altamente insolúveis. Com a precipitação desses produtos, ocorre a redução da porosidade e da permeabilidade do concreto carbonatado pelo bloqueio da rede de poros, principalmente com maiores cobrimentos da armadura, pois reflete em maior quantidade de poros. Apesar disso, a ocorrência de microfissuras está associada a carbonatação e pode estar ligada a penetrabilidade do concreto relacionado à absorção de água, difusão de oxigênio e difusão de cloretos (OTIENO; IKOTUN; BALLIM, 2019).

Em temperaturas mais elevadas ocorre o aumento da taxa de formação do CaCO_3 de forma linear entre os 10 °C e 40 °C, com umidade relativa entre 60% e 70%. Com esse incremento de temperatura a profundidade de carbonatação pode acelerar em 1,7 vezes (XU *et al.*, 2022).

O ensaio para detecção do avanço de carbonatação foi baseado na norma internacional da RILEM CPC-18 (1988) e da carta técnica suplementar da RILEM (Reunion Internationale de Laboratoires D'essais et Materiaux) (PIMIENGA *et al.*, 2016), sendo fundamentado na aplicação da solução de 1% de fenolftaleína ($\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$) em 70% de álcool etílico ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) para determinação da profundidade. O teste baseia-se na mudança de cor para vermelho em concretos não carbonatados com pH acima de 10 e sem mudança de cor para concreto carbonatado e pH menor do que 10.

A presença de carbonatação pode ser validada facilmente com a aplicação de fenolftaleína, abordado na norma EN 13295 (2004), a qual também correlaciona a identificação do avanço de carbonatação por processos automatizados, com o uso de câmeras de precisão com resolução de 0,5 mm, conforme demonstrado por Giulietti *et al.* (2021).

Devido ao componente fenolftaleína apresentar características cancerígenas, alguns estudos apontam o uso de outras substâncias alternativas como o cúrcuma, um corante natural utilizado como condimento de alimentos (CHINCHÓN-PAYÁ; ANDRADE; CHINCHÓN, 2016).

2.1.3.1.2 Corrosão por cloretos

A presença de cloreto (íon Cl^-) nos suportes de concreto armado configura riscos graves no tocante a deterioração do concreto, pois é um eletrólito forte e muito condutivo, sendo a força e a condução elementos fundamentais no mecanismo da corrosão eletroquímica.

O acesso dos íons cloretos pode ser através de aditivos ao concreto, água ou agregados contaminados; sendo ainda possível o acesso pelo ambiente externo, que é o mais comum, principalmente em regiões litorâneas. Em estruturas submetidas ao ambiente marinho, a altura de contato com a maré interfere diretamente no acesso de cloretos. Nas regiões completamente submersas (saturada) e na zona atmosférica (seca) são considerados como próximo de zero. No entanto, na transição entre a zona de maré (baixa e alta) e a zona de respingos de maré identifica-se a região de maior acesso dos cloretos, devido aos processos de molhagem e secagem (BALESTRA; REICHERT; SAVARIS, 2019).

Há uma aceleração no acesso dos íons cloretos nas fases de molhagem e secagem quando o concreto está seco, pois facilita a penetração da água do mar com mais profundidade nas próximas molhagens. A proporção de umidade determina a força capilar e do gradiente de umidade, logo, quanto maior o tempo de umedecimento subsequente, maior será o transporte de umidade (ZHANG *et al.*, 2018).

Além da carbonatação e ataque por íons cloretos, outros mecanismos podem infligir na despassivação e conseqüente redução do pH no interior do concreto, como as atmosferas ácidas, retração, fuligem, fungos e sulfatos (HELENE, 1992).

Os cloretos livres são os mais nocivos para a corrosão da armadura. Quando o concreto está carbonatado pode ocorrer a dissociação dos cloretos combinados, tornando-os livres, além do aumento de temperatura do concreto, favorecendo a difusão dos cloretos no interior do concreto pela sua maior mobilidade iônica, ocorrendo processos corrosivos muito intensos (ANDRADE, 2020). A corrosão induzida de uma estrutura de concreto armado pelo ingresso de cloretos pode ser vista na Figura 25.

Figura 25 – Micrografia estéreo-óptica em seção transversal de estrutura de concreto armado demonstrando corrosão e trincas induzidas nos vergalhões de aço



Fonte: Adaptado de Snyder (2022)

A maioria dos estudos sobre a deposição de cloretos se baseava em superfícies horizontais e em locais abertos. Para ambientes urbanos e fachadas com plano vertical são relativamente recentes. Apesar da deposição de partículas nas fachadas das edificações serem relativamente lentas, o fator da rugosidade superficial é muito importante, enquanto em superfícies vítreas o processo pode levar meses, no concreto seria em anos. O método de avaliação da deposição seca em fachadas mostra-se de difícil obtenção, em consequência do deslocamento das partículas ou limpeza pelas chuvas (MARO *et al.*, 2014).

O acesso dos sais presentes nos aerossóis marinhos proporciona a cristalização no interior do concreto; os ciclos de desidratação/hidratação nos materiais possibilitam a variação volumétrica dos cristais de sal nos poros, favorecendo as trincas e fissuras. Apesar dos processos de dessalinização dos materiais afetados ser possível através de métodos químicos e mecânicos, além de eletroquímicos e banhos de imersão, o mais sensato é impedir a sua entrada mediante o uso de materiais adequados e principalmente a sua proteção (MORILLAS *et al.*, 2020).

Concentrações mais elevadas de cloretos aumentam linearmente a densidade da corrente de corrosão (I_{corr}), assim como o aumento da temperatura de exposição da barra de aço em valores de 55° C. Outra consideração perceptível é que em temperatura na faixa de 25° C a corrosão apresentou-se mais uniforme, ao passo que em temperaturas na faixa de 55° C observou-se corrosões mais agressivas do tipo pite (ADEWUMI *et al.*, 2018).

A lixiviação em excesso tende a reduzir a capacidade de ligação dos cloretos no concreto e faz com que maiores concentrações possam avançar mais profundamente para o interior do concreto. A lixiviação parcial aumenta a capacidade de ligação dos cloretos, criando um maior tempo de concentração do seu teor máximo (JAKOBSEN; DE WEERDT; GEIKER, 2016)

Um método simples para detectar a presença de cloretos na amostra, está presente no Ensaio Acelerado de Migração de Cloretos, da ASTM INTERNATIONAL C1202-10 (2010), e baseia-se na aplicação da solução de nitrato de prata (AgNO_3) em 0,1 M diluído em água destilada, tendo como possíveis resultados a cor mais branca indicando a presença de cloretos e a marrom sem cloretos livres.

A presença de carbonatação pode interferir nos resultados dos ensaios de cloretos livres, com resultados positivos para a sua presença, entretanto, o produto resultante poderá ser o carbonato de prata (Ag_2CO_3), que possui a coloração branca. A realcalinização da amostra deve ser realizada antes do ensaio do teor de cloretos (REAL *et al.*, 2015; MEDEIROS; RÉUS;

PONTES, 2018). Para viabilizar o ensaio por aspersão de nitrato de prata, Vieira Pontes *et al.* (2021) aspergiu uma solução de hidróxido de sódio (150 g/L) por uma hora e posteriormente aplicou a solução de nitrato de prata (0,10 mol/L) e após uma hora identificou-se a coloração marrom para as regiões sem cloretos.

Observou-se que a solução de hidróxido de sódio (NaOH) lançada previamente, consegue realcalinizar a amostra e viabilizar a aplicação do nitrato de prata para o correto diagnóstico da presença de cloretos livres (PONTES *et al.*, 2021^a; PONTES *et al.*, 2021b).

Há um método proposto por Tanaka; Sakai (2020) com ensaios de profundidade de carbonatação e avanço de cloretos com a profundidade de 10 cm e diâmetros de 1 mm a 2 mm, utilizando a fenolftaleína e nitrato de prata, que minimizam os impactos nas construções - muitas vezes com processos avançados de deterioração - excluindo a necessidade de remoção de testemunhos e consequente possibilidade de rompimento da armadura.

Em testes utilizando-se o nitrato de prata como reagente para a detecção da presença de cloretos, constatou-se que a umidade ou secagem da superfície não altera significativamente a mudança de coloração, não sendo necessário o tratamento preliminar de umedecimento ou secagem do local (TANAKA; SAKAI, 2020).

2.1.3.2 Fissuras

Muitos processos estão ligados a construção das estruturas de concreto armado; sistemas complexos de reações químicas, por exemplo, utilizando-se de inúmeros materiais como as variações cimentícias, agregados de várias composições mineralógicas, variações da composição química das águas, mudanças de temperatura, adições suplementares para a obtenção de propriedades específicas, enfim, todo esse emaranhado de possibilidades demanda um controle rigoroso para que o propósito seja atingido.

Apesar da declaração do arquiteto francês, Charles Rambert, sendo citado por Pfeffermann (1968), de que as fissuras são consequências de fenômenos naturais, conhecer como os materiais atuam e principalmente a interligação entre eles, pode minimizar o aparecimento de fissuras.

As principais causas de fissuras estão associadas a fatores físicos de deterioração, devido as variações volumétricas, mudanças de temperatura e umidade, cargas, utilização da estrutura ao longo do tempo e a deterioração por agentes químicos (MEHTA; MONTEIRO, 2014). De acordo com Thomaz (2020), a formação das fissuras também pode estar associada

as sobrecargas ou concentração de tensões, recalque diferenciais das fundações e retração de materiais com base de ligantes hidráulicos, como o cimento e a cal.

De forma geral, a variação de volume do concreto é resultado de tensões internas por variações ambientais ou de temperatura e umidade (mais comuns), ou seja, calor e umidade. Fissuras tendem a ocorrer com mais intensidade em amostras com baixa relação a/c; presume-se que o confinamento mais intenso da armadura com o concreto pode ser a causa (ASAMOTO *et al.*, 2011).

As fissuras também estão presentes em situações de dilatação ou contração dos materiais, principalmente quando há materiais de diferentes coeficientes de dilatação térmica ou do mesmo material em grandes vãos onde as solicitações do ambiente são diferentes, como em coberturas. Um outro aspecto observado refere-se a amplitude da movimentação térmica, visto que, variações muito bruscas impedem o tempo necessário para que os átomos internos se reorganizem, ao mesmo tempo em que uma variação lenta e gradual pode ampliar as movimentações de temperatura de um material e desfavorecer um outro material interconectado, que possui menor resposta (THOMAZ, 2020).

Quando ocorre um aumento da umidade no interior do concreto, há expansão, enquanto a diminuição da umidade resulta em contração. Esses movimentos, quando sujeitos a restrições, favorecem o surgimento de fissuras. O acesso da umidade pode se dar devido a excessos durante a fabricação dos materiais e na execução do concreto, assim como por influência do meio ambiente, como chuvas, condensação de vapores de água e capilaridade presente no solo (THOMAZ, 2020).

As fissuras podem comprometer o concreto pois aumentam a permeabilidade e desprotegem o concreto e as armaduras para os incontáveis processos físicos e químicos que podem levar a deterioração; as fissuras por retração plástica se intensificam desde o início da cura do concreto. Estima-se que 40% das fissuras formem-se antes do concreto estar endurecido, sendo que 80% das fissuras plásticas estão associadas à retração plástica (KWAK; HA; WEISS, 2010; GHOURCHIAN *et al.*, 2018).

Mesmo antes de submeter o concreto às cargas, podem existir fissuras mínimas entre o agregado e a pasta de cimento hidratada, devido às diferenças nas propriedades mecânicas desses materiais, juntamente com a retração mecânica ou movimentação térmica. As microfissuras são uma característica comum em concretos usuais e de alta resistência, mesmo quando submetidos a um processo de cura úmida, com uma relação água/cimento de 0,25. A

dimensão dessas microfissuras é considerada para valores de até 0,1 mm. À medida que as cargas atuam, as fissuras tendem a se propagar, formando ligações entre elas (NEVILLE, 2016).

A utilização de termografia infravermelha tem sido empregada na detecção de fissuras em estruturas de concreto, pois permite gerar imagens térmicas a partir da radiação eletromagnética na faixa infravermelha pelo mapeamento da diferença de temperatura junto a superfície, tendo como fonte principal de calor, as energias solares. Vale salientar que apesar de serem importantes na detecção das fissuras, não são determinantes da profundidade, o que suscita o uso de outros ensaios complementares (ROCHA *et al.*, 2017).

Para evitar as fissuras é necessário um projeto estrutural restritivo à essas formações, com base nos efeitos de temperatura, retração, deformação lenta e deslocamentos, proteção quanto a entrada de umidade, cura sistemática e escolha adequada dos materiais, inclusive nas fases de reparos (FILHO; CARMONA, 2013).

2.1.3.3 Mofo e Bolor

Mofo e bolor são contaminações causadas por fungos, organismos que se alimentam por meio de compostos orgânicos, utilizando-se do processo de absorção (ARMSTRONG, 2002). Em um estágio inicial atuam principalmente na superfície com aspecto de pólipos, sem causar grandes danos, já em um segundo estágio mais avançado podem afetar as propriedades do material, dificultando a remoção. O mofo possui poder inclusive mais destrutivo, por corroer o material afetado (GUERRERO; DA SILVEIRA, 2003).

O concreto é suscetível a inúmeros processos de degradação associados a bactérias, algas e fungos, alguns fungos filamentosos estão presentes em superfícies de concretos deteriorados, embora os fatores que influenciam essa degradação não sejam totalmente conhecidos. A capacidade de sobrevivência desses fungos é exímia, pois geram esporos que permanecem dormentes por longos períodos, conservando recursos que mantém a sua viabilidade, mesmo em baixas condições de nutrientes, assim como das condições extremas encontradas no concreto, o que inclui a alta alcalinidade (GUERRERO; DA SILVEIRA, 2003).

As fissuras no concreto podem facilitar o acesso dos fungos e somados a entrada de água e nutrientes do ambiente externo pelos poros do concreto, favorecer o desenvolvimento microbiano e assim a degeneração em camadas internas do concreto. As fontes de nutrientes podem vir de outros fungos pela biomassa celular morta e vestígios de matéria orgânica presentes em materiais de construção, como aditivos de concreto, rochas, vegetação em

decomposição, húmus, resíduos industriais e hidrocarbonetos gasosos presentes em tintas aplicadas (JIANG *et al.*, 2022).

O concreto por ser rico em cálcio (Ca), o que acaba por torná-lo um local fundamental para suprir a demanda nutricional desses organismos, em conjunto com a água (H₂O) e o oxigênio (O₂), os processos metabólicos provenientes dessa colonização suscitam a geração de ácidos e a consequente biodeterioração do concreto. Além da umidade e temperatura, fatores como rugosidade superficial, capacidade de absorção, capilaridade, fluxo de umidade entre os materiais, pH da superfície de exposição, presença de sais e polímeros na superfície podem influenciar no surgimento de bolor (D'ORAZIO *et al.*, 2014; UDAWATTHA *et al.*, 2018).

A formação de bolor nas áreas externas das edificações está associada às pontes térmicas ou transmitância térmica, ou seja, a troca de calor na envoltória da edificação, por isso, a condensação de água superficial pode levar a formação de fungos filamentosos. No Brasil não há normas técnicas com especificações que minimizem a proliferação desses organismos, entretanto alguns países possuem normas para a construção com indicações a impedir esse tipo de formação, como o bloco europeu com as normas EN ISO 14683 (ISO, 2017a) e EN ISO 10211 (ISO, 2017b).

O fator de forma da edificação associado à orientação solar contribui com o acréscimo de calor nas fachadas das edificações, assim sendo, o aumento e a manutenção da temperatura por mais tempo ocorrem quando a diferença entre o comprimento e a largura são maiores, como é o caso dos formatos retangulares, da mesma forma que as faces voltadas em 45° em relação ao sul (MOURA *et al.*, 2020; RODRÍGUEZ-ALGECIRAS *et al.*, 2018).

O ataque de microrganismos está associado a alguns efeitos na superfície do concreto, como o crescimento exponencial e a ação química do processo metabólico que leva a produção de resíduos ácidos, acelerando os processos de degeneração do concreto pela erosão superficial, aumentando a porosidade e favorecendo o aparecimento de trincas, fissuras e outros danos. A redução de cálcio na superfície do concreto em contato com o ar pode chegar a 36%. O crescimento desses microrganismos é facilitado pelo aumento da umidade, entre 60% e 98%, os ciclos de molhagem e secagem, situações de gelo e degelo, concentrações elevadas de cloretos Cl⁻ ou sulfatos (SO₄²⁻) e dióxido de carbono (CO₂), além de alguns ácidos (YAKOVLEVA *et al.*, 2018).

Os fatores principais no crescimento de fungos e musgos são a maior porosidade do material e baixo pH, todavia, concretos não carbonatados possuem proteção natural contra esses agentes (UDAWATTHA *et al.*, 2018).

3 METODOLOGIA

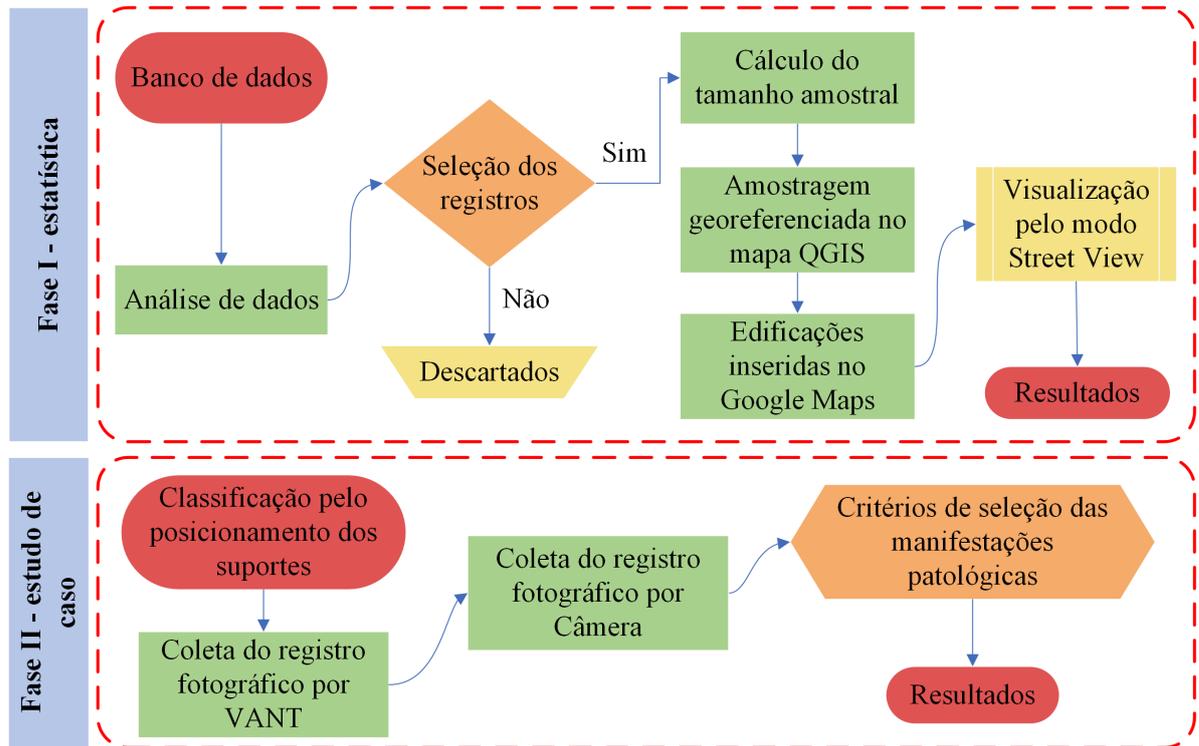
A metodologia tem início com uma revisão da literatura sobre o tema da pesquisa e os assuntos que estão interligados às manifestações patológicas das construções, com a adoção do método descritivo. Em seguida ocorre o levantamento quantitativo, através de previsões estatísticas por amostragem de construções, decorrentes de um banco de dados da Prefeitura do Recife, denominado de Fase I.

Posteriormente desenvolveu-se uma pesquisa exploratória sobre um estudo de caso de uma edificação residencial, com análise dos suportes de concreto armado por vistorias localizadas e ensaios para verificação de avanço de carbonatação e presença de cloretos, assim chamada de Fase II, Figura 26. A escolha por uma pesquisa com objetivo exploratório se deu em virtude da ausência de dados sobre o tema, o que intensificou a necessidade de ampliar as informações e tornar o problema mais conhecido, tanto no meio científico, quanto para a população de uma forma geral.

Para a coleta dos dados foi utilizado o banco de dados do Portal Informações Geográficas da Prefeitura da Cidade do Recife, por meio do APP Novo ESIG, que possui as informações de todas as edificações registradas do Recife e algumas de maior interesse para a pesquisa, como o ano de construção, altura da edificação e quantidade de habitações.

Posteriormente, os dados numéricos obtidos foram submetidos à análises estatísticas quantitativas, através do software web OpenEpi, no sentido de determinar o tamanho amostral sobre a população a ser pesquisada e com base nessas informações identificou-se a quantidade de edifícios que precisaram ser submetidos a análise visual pelo software 3D Google Maps, para identificar os tipos de suportes presentes nas edificações.

Figura 26 – Fluxograma da metodologia aplicada



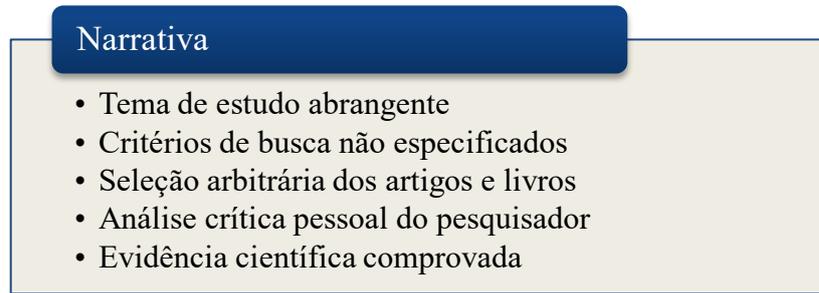
Fonte: Autor (2022)

3.1 Método da pesquisa bibliográfica

Para as buscas de referências bibliográficas sobre suportes de aparelhos de ar-condicionado em fachadas, foram realizadas pesquisas exploratórias com o objetivo de identificar os estudos na linha de pesquisa e posteriormente foram utilizadas as bases como o Google Acadêmico, *Scopus*, *Engineering Village* e *Web of Science*, utilizando-se as seguintes palavras chaves: “*conditioned air*” ou “*air conditioner*” ou “*air conditioning*” e “*support bracket*” e “*facades*”. No entanto, para a pesquisa citada, não houve resultados. Contudo, excluindo termos como “*support bracket*” foi possível identificar alguns artigos relacionados apenas à eficiência dos equipamentos de ar-condicionado e no âmbito automotivo.

O processo de revisão se baseou em duas etapas: narrativa e integrativa. Devido à escassez de pesquisas nesse seguimento de suportes de concreto armado para aparelhos de ar-condicionado, foram realizadas buscas sobre as características e formas de degradação do concreto armado, utilizando-se da técnica de revisão de literatura narrativa adaptada, baseado na Figura 27.

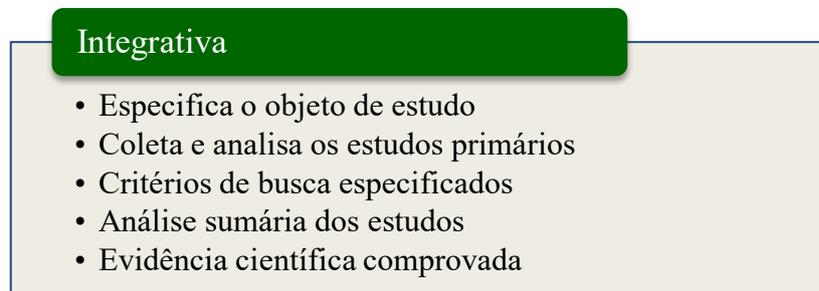
Figura 27 – Tipo de revisão da literatura narrativa



Fonte: Adaptado de Barbosa (2021)

Além das revisões bibliográficas citadas, foi necessário aprofundar assuntos associados às características de cidades litorâneas e que podem acarretar processos de aceleração da degradação, como propagação de cloretos, ventos de rajadas e umidade relativa do ar. Para essa revisão foi incorporada um tipo de pesquisa que fornecesse maior abrangência sobre o tema, adotando alguns processos do sistema Prisma (PAGE *et al.*, 2021) e enquadrando-se como revisão integrativa, vide Figura 28.

Figura 28 – Tipo de revisão da literatura integrativa



Fonte: Adaptado de Barbosa (2021)

Para a fase de revisão integrativa as pesquisas foram realizadas no buscador *Engineering Village* com as *strings* mencionados no Quadro 1, para os três temas propostos: propagação de cloretos, ventos de rajada e umidade relativa do ar.

Como resultado das buscas, tem-se para a propagação de cloretos a localização do maior quantitativo de artigos, totalizando 182, para os ventos de rajadas identificou-se o menor quantitativo, equivalente a 120 e, no que concerne à umidade relativa do ar, foram identificados 148, totalizando 450 artigos pesquisados.

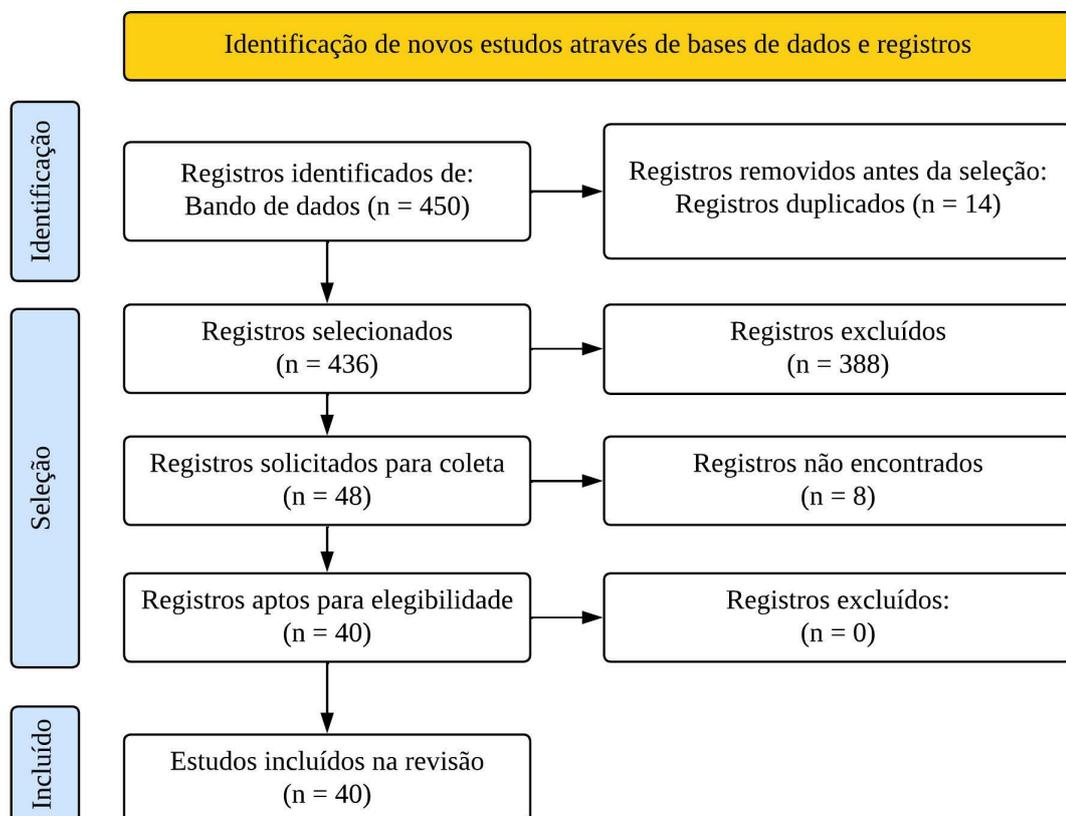
Quadro 1 - Strings de busca utilizadas na fase Integrativa

Assunto	String de busca	Artigos
Propagação de cloretos	((chloride) WN ALL) AND ((wind speed) WN ALL))	182
Ventos de rajada	((buildings) WN ALL) AND ("wind gusts") WN ALL))	120
Umidade relativa do ar	((humidity) WN ALL) OR ((moisture) WN ALL)) AND ((building*) WN ALL)) AND ((corrosion cracking) WN ALL))	148
Total		450

Fonte: Autor (2022)

Os artigos foram enviados para o aplicativo web de revisões sistemáticas, intitulado *Intelligent Systematic Review* (Ryvan), dando continuidade com a fase de seleção, o que inclui a remoção dos duplicados e posteriormente a aplicação dos critérios de seleção, excluindo registros fora do escopo da pesquisa, conforme o fluxo de informações do Prima 2020 na Figura 29.

Figura 29 – Fluxo de informações e fases da revisão bibliográfica

Fonte: Adaptado de Page *et al.* (2021)

Do total de 450 registros coletados no banco de dados, 14 foram removidos por serem duplicados. Na etapa de seleção foram analisados os 436 registros que sobraram quanto ao título e resumo com base nos seguintes critérios de exclusão: não são da área de engenharia; referenciam outros materiais não correlacionados ao concreto armado; não apresentam resumo. Sendo rejeitados 388 por não estarem de acordo com os critérios de seleção.

Os 48 artigos selecionados foram avaliados quanto a disponibilidade e 8 não estavam disponíveis para leitura, estando elegíveis 40 artigos para a etapa de elegibilidade. Nesses últimos não foram encontrados motivos para exclusão, logo, 40 artigos estavam aptos para a fase de revisão. Estes artigos foram empregados na pesquisa; no entanto, identificou-se a necessidade de complementá-los com conteúdos não abordados na revisão bibliográfica anterior. Dessa forma, foi realizada uma busca individualizada nos bancos de dados de pesquisa citados.

3.2 Método da análise estatística

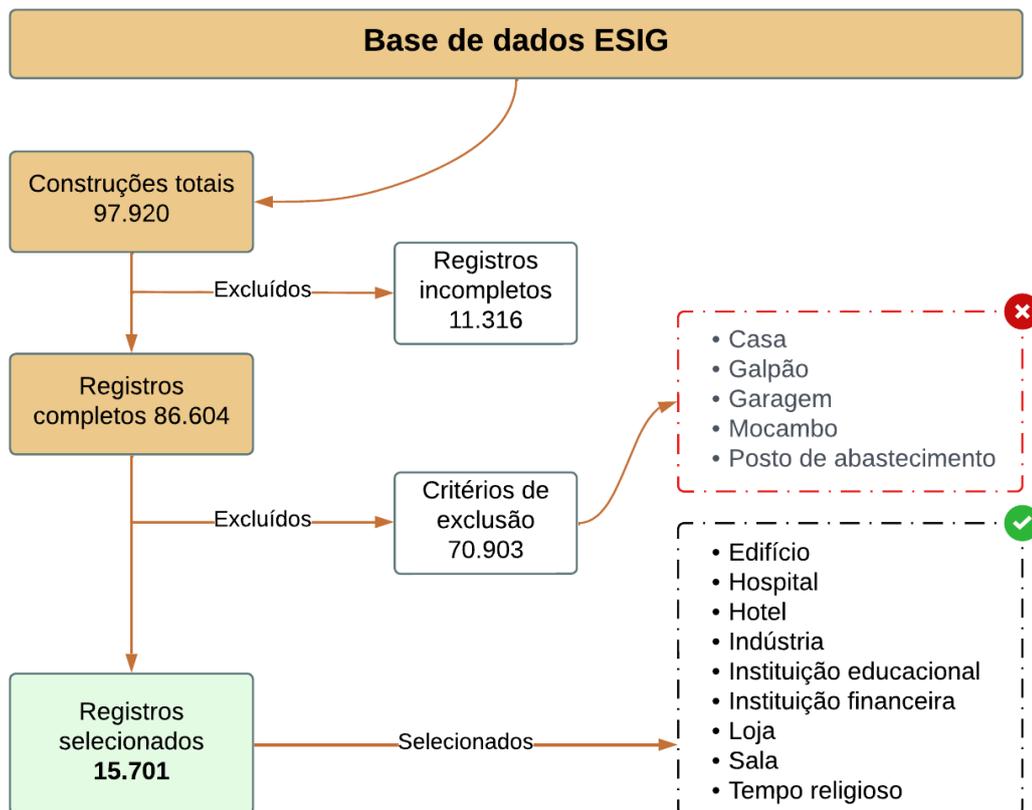
Na fase I da análise estatística, o banco de dados sobre as edificações construídas no Recife foi coletado no site da Prefeitura da cidade do Recife no portal da web ESIG – Informações Geográficas do Recife e transferidos para o software QGIS, um software de informação geográfica livre e aberto; em seguida as informações foram exportadas para uma planilha eletrônica.

Da base de dados do ESIG, que totaliza 97.920 registros de construções, foram descartados os registros incompletos, com apenas os nomes dos bairros; a exclusão representou um total de 3.704 registros. Além disso, eliminou-se também 7.612 registros que possuíam apenas o nome dos bairros e as áreas do lote e testada.

Como o objetivo da pesquisa está atrelado as edificações mais altas e de maior fluxo de passagem de pedestres em sua intermediação, foram desconsideradas as seguintes construções: casa, galpão, galpão fechado, garagem residencial, mocambo e posto de abastecimento, totalizando 70.903 registros de construções desconsideradas.

Após essa análise permaneceram as construções do tipo hospital, hotel, indústria, instituição educacional, instituição financeira, loja, sala, templo religioso e os prédios (compostos por edifício residencial, especial, comercial, misto e apartamento), totalizando 15.701 registros de construções válidas para a pesquisa, o equivalente a 16,03% do total de registros, conforme detalhamento na Figura 30.

Figura 30 – Seleção dos registros para a pesquisa



Fonte: Autor (2022)

Para o cálculo do tamanho da amostra foi utilizado o aplicativo web OpenEpi, versão 3.01 (Estatísticas epidemiológicas de código aberto para a Saúde Pública), onde:

- Tamanho da população: é o conjunto total de elementos investigados. Para a análise em questão, o tamanho da população refere-se aos 15.701 registros selecionados;
- Frequência (p) antecipada (%): refere-se a uma previsão da porcentagem da população com o resultado de interesse. Em situações nas quais não haja certeza da precisão, adota-se 50%, mas resultando em um tamanho amostral maior. Como há uma pesquisa similar a esta e com resultado de 49%, adotou-se 50%;
- Limites de confiança como +/- porcentagem de 100: é uma amplitude de valores em termos absolutos com um intervalo de confiança em torno da estimativa de ponto, ou seja, é o índice de variação dos resultados para mais ou para menos de uma pesquisa;

- Efeito de desenho (para estudos com amostras complexas - EDFF): um fator de correção utilizado para um levantamento do tipo cluster (classificação em grupos) para a metodologia de amostragem, isto é, quando os dados amostrais são complexos e são adotados pesos desiguais ou ajustes para compensação, como uma estratificação por densidades populacionais em bairros.

Em “Tamanho da População” foi inserido o valor de 15.701 registros selecionados do banco de dados; na “Frequência (p) antecipada %” foi adotado 50% baseado em estudo anterior com resultado de 49% (SILVA; MONTEIRO, 2020); para os “Limites de confiança” foi adotado 3,5%, considerando uma menor margem de erro possível, visto que, valores menores gerariam um aumento acentuado do tamanho da amostragem sem ocasionar ganhos significativos nos resultados, pois um percentual de 5% já é bem aceito nos modelos estatísticos. Para o “Efeito de desenho (para estudos com amostras complexas-EDFF)” foi adotado o valor de 1 pois foi considerado como amostra aleatória, assim sendo não houve estratificação dos dados, vide Figura 31.

Figura 31 - Entrada de dados do Tamanho da amostra.

Tamanho amostral para % de frequência em uma população (amostras aleatórias)		
Tamanho da população	15701	Caso seja grande, deixe como um milhão
Frequência (p) antecipada %	50	Valor entre 0 e 99.99. Se não for conhecido, use 50%
Limites de confiança como +/- porcentagem de 100	3.5	Precisão absoluta %
Efeito de desenho (para estudos com amostras complexas—EDFF)	1	1.0 para amostras aleatórias

Fonte: Dean, Sullivan e Soe (2022)

Os dados relevantes para a pesquisa possuem um tamanho adequado para uma aceitação do limite de confiança em 95% e conseqüente tamanho amostral de 747 registros para análise, conforme demonstrado na Figura 32.

Figura 32 - Tamanho da amostra para a frequência em uma população.

Tamanho da população (para o fator de correção da população finita ou fcp)(N):	15701
frequência % hipotética do fator do resultado na população (p):	50%+/-3.5
Limites de confiança como % de 100(absoluto +/-%)(d):	3.5%
Efeito de desenho (para inquéritos em grupo- $EDFF$):	1

Tamanho da Amostra(n) para vários Níveis de Confiança

IntervaloConfiança (%)	Tamanho da amostra
95%	747
80%	329
90%	534
97%	906
99%	1247
99.9%	1938
99.99%	2583

Fonte: Dean, Sullivan e Soe (2022)

Fórmula do tamanho da amostra utilizada:

$$n = deff \times (N\hat{p}\hat{q}) / (d^2 / (1,96)^2 \times (N - 1) + \hat{p}\hat{q}) \quad (1)$$

Onde:

n = tamanho da amostra

$deff$ = efeito do projeto

N = tamanho da população

\hat{p} = proporção estimada

$\hat{q} = 1 - \hat{p}$

d = precisão absoluta ou nível absoluto de precisão desejada

Utilizando-se da amostragem probabilística, com o uso da técnica de amostragem aleatória sem reposição (NETO, 2002), foi utilizado o software de estatística Bioestat, versão 5.3 na função de Amostragem Aleatória sem reposição, inserindo a Entrada de dados como 15.701 para o Tamanho da População e 747 para o Tamanho da amostra, conforme Figura 33.

Figura 33 - Cálculo da Amostragem.

Amostragem: Aleatória sem reposição

Imprimir

Entrada de dados

Tamanho da população: **15701** Tamanho da amostra: **747**

Executar Cancelar

Resultados

Valores aleatórios obtidos (sem reposição):

16	17	29	75	94	107	124	197	208	225
230	284	294	319	323	337	356	362	365	381
387	410	421	467	475	548	564	656	665	702
705	769	794	836	837	838	917	918	930	937
973	997	1013	1030	1038	1040	1046	1082	1163	1183
1195	1244	1245	1277	1278	1340	1352	1380	1394	1419
1426	1429	1473	1477	1479	1555	1560	1575	1604	1622
1627	1638	1640	1647	1651	1669	1685	1718	1730	1731
1750	1786	1798	1809	1830	1849	1859	1911	1913	1923
1928	1957	1971	1974	1995	2002	2044	2055	2066	2096
2102	2116	2141	2169	2181	2207	2246	2257	2333	2382
2388	2424	2429	2437	2462	2472	2485	2495	2506	2512

Fonte: Instituto Mamirauá (2022)

Na planilha eletrônica foi criada uma coluna com a numeração de todos os registros, do número 1 ao 15.701, e posteriormente, selecionando os registros encontrados pela amostragem vinda do Bioestat, equivalente a 747 registros escolhidos aleatoriamente.

Os dados foram exportados para o QGIS com o propósito de identificar as edificações da amostragem e conseguir as coordenadas geográficas para que fosse possível localizar as edificações que possuem suportes para ar-condicionado em suas fachadas, conforme demonstrado na Figura 34.

Foi inserido no mapa do QGIS pontos na região central de cada edificação para captação das coordenadas de longitude e latitude, que posteriormente foram exportadas para o Google Maps.

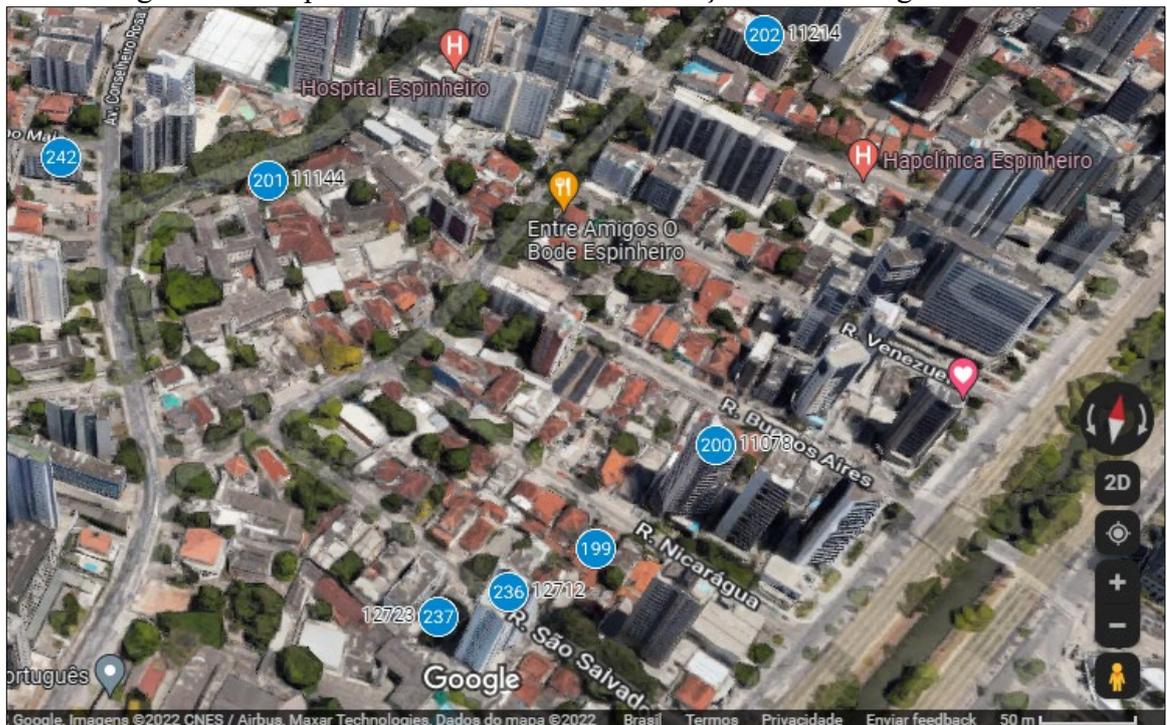
Após a importação dos dados da amostragem georreferenciada foi possível localizar através do número dos códigos ID das edificações no Google Maps, conforme Figura 35.

Figura 34 - Mapa no detalhe com a demonstração da amostragem em vermelho.



Fonte: QGIS Development Team (2022)

Figura 35 - Mapa no detalhe com a demonstração da amostragem em azul



Fonte: Google (2022)

Com a identificação da construção a ser analisada foi colocada em modo *Street View* do *Google Maps*, viabilizando o reconhecimento da existência de suportes para ar-condicionado na fachada e do tipo presente em cada edificação, a exemplo do código ID = 200 da Figura 35,

sendo demonstrado na Figura 36. As 747 amostras aleatórias foram examinadas de forma individual, conforme ilustrado na Figura 36, a fim de garantir uma representação adequada na amostragem.

Figura 36 - Imagem do Google Maps pelo Street View



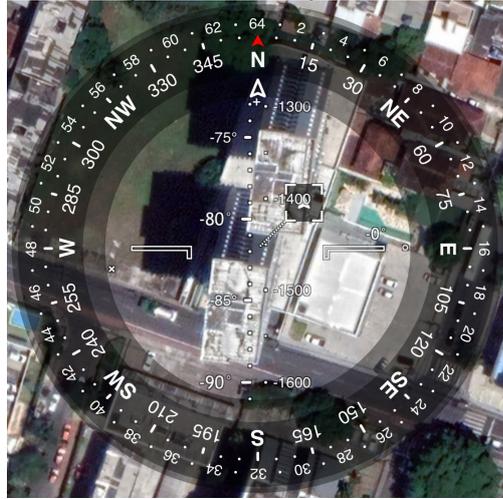
Fonte: Google (2022)

3.3 Caracterização do estudo de caso

A fase II, relativa ao estudo de caso, tem como base a cidade do Recife, capital do estado de Pernambuco (PREFEITURA DO RECIFE, [2022]), que detém uma área territorial de 218,843 km² em 2021 e população estimada em 1.661.017 pessoas, também em 2021; com densidade demográfica de 7.039,64 hab/km² em 2010 e Índice de Desenvolvimento Humano (IDHM) de 0,772 em 2010, de acordo com o (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2022).

Para identificar a orientação dos pontos cardeais foi inserido o endereço no aplicativo móvel *Comander Compas Go*, onde através da bússola digital e Sistema Global de Posicionamento (GPS) integrado do smartphone iPhone 13 Pro, foi possível identificar as orientações cardeais: N = norte, S = sul, E (ou L) = este ou leste, O (ou W) = oeste e as colaterais: NE = nordeste, SE = sudeste, SO (ou SW) = sudoeste e NO (ou NW) = noroeste, conforme demonstrado na Figura 37.

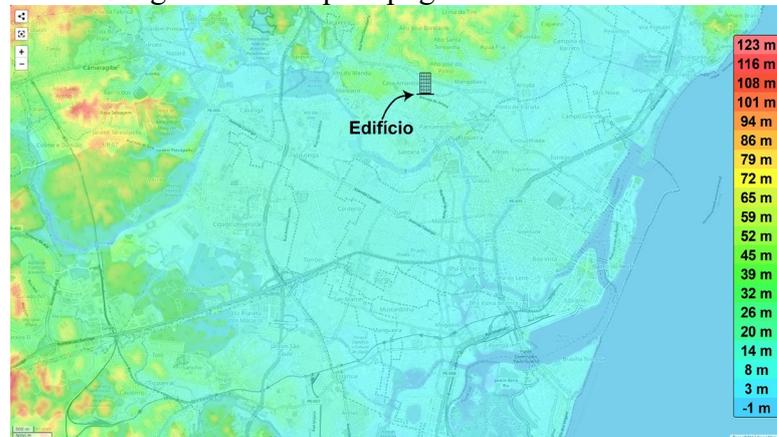
Figura 37 – Localização da edificação com sistema de bússola



Fonte: Ahafonau (2022)

Quanto ao relevo do local, foi colocado em um mapa topográfico com a disposição das altitudes e verificou-se uma variação de -1 m a 14 m até o local da edificação em estudo, indicando uma área relativamente plana, conforme Figura 38.

Figura 38 – Mapa topográfico com altitude



Fonte: Adaptado de Topographic ([201-?])

Os ventos possuem maior predominância no sentido SE, apenas nos meses de novembro e dezembro, vindos do Leste, conforme relatórios dos Normais Climatológicos do Recife no período de 1991 a 2020, tendo fator decisivo na direção das chuvas, transporte de sedimentos e aerossóis, além de poluentes (INMET, 2022).

Objetivando ter informações sobre a direção do vento, conduziu-se um mapa da Rosa dos Ventos na cidade do Recife, no período do término da construção da edificação em 2010

até 2022, onde é possível obter a direção e velocidade do vento com as direções predominantes e a velocidade dos ventos mais fortes. Observou-se que os ventos com maiores velocidades são os da direção SE, com velocidades que podem chegar a mais de 12 m/s. Apenas em 2% do ano a velocidade do vento é considerada calma, ou seja, menor que 1 m/s (IOWA STATE UNIVERSITY, 2022).

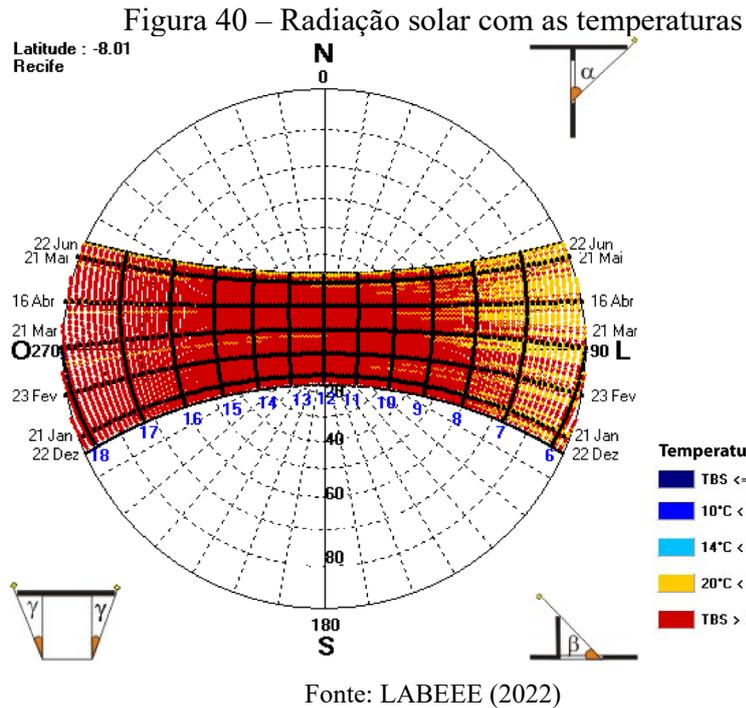
Com as informações de altitude e direção predominante dos ventos foi possível traçar o caminho da edificação até o ponto de rebentação das ondas. Através do Google Earth Pro inseriu-se a rosa dos ventos e com o traçado na direção SE obteve-se a distância de 6,64 km, conforme demonstrado na Figura 39.

Figura 39 – Traçado do edifício até o ponto de rebentação das ondas



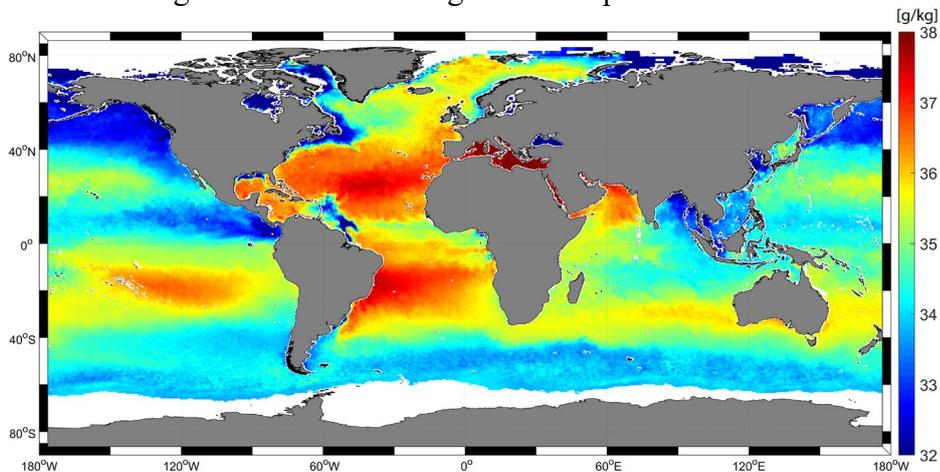
Fonte: Adaptado de Google LLC (2022)

A medição da radiação solar, que interfere na temperatura ambiente, pode ser observada na carta solar do Recife, na qual é possível constatar temperaturas ao longo do ano não inferiores a 20° C e em grande parte superior a 25° C, de acordo com a escala de medição do Termômetro de Bulbo Seco (TBS), que mede a temperatura do ambiente onde está instalado, vide Figura 40.



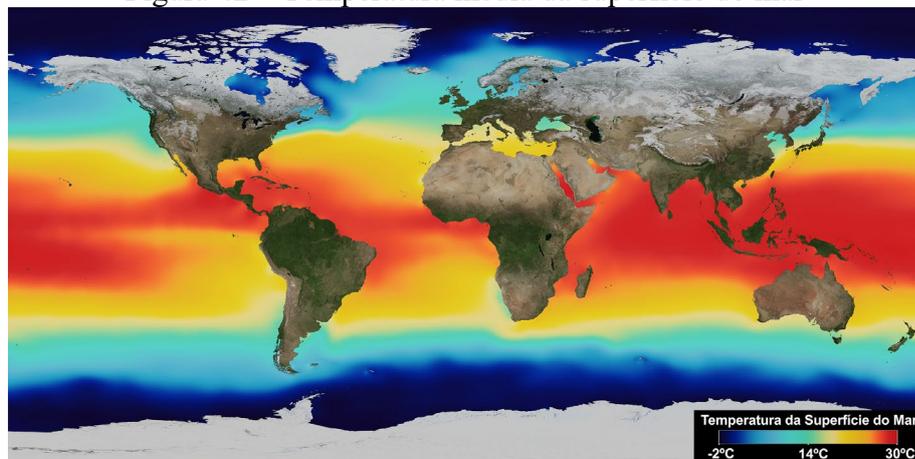
A salinidade na superfície do mar desempenha um papel importante na formação dos aerossóis marinhos. Com base em um conjunto de dados ao longo de nove anos e baseados em informações do espaço por meio dos satélites Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS), Soil Moisture Active Passive (SMAP) e o instrumento Aquarius, pode-se verificar a graduação do sal, referenciada como a massa de sais em uma unidade de massa de água em g/kg, conforme Figura 41. Há uma concentração elevada de sais na costa brasileira, sendo influenciada diretamente pela precipitação e evaporação.

Figura 41 – Salinidade global da superfície do mar



A medição da temperatura da superfície do mar é fundamental para se obter informações sobre o sistema climático global, tanto na previsão do tempo, quanto na velocidade do vento e pressão atmosférica, pois afetam a circulação oceânica. Situações sazonais como o El Niño e La Niña interferem na temperatura do oceano Pacífico e conseqüentemente no ciclo de chuvas e secas, sendo disponibilizadas pelo Integrated Ocean Observing System (IOOS) e Center for Satellite Applications and Research (STAR), integrantes National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), vide imagem na Figura 42.

Figura 42 – Temperatura média da superfície do mar

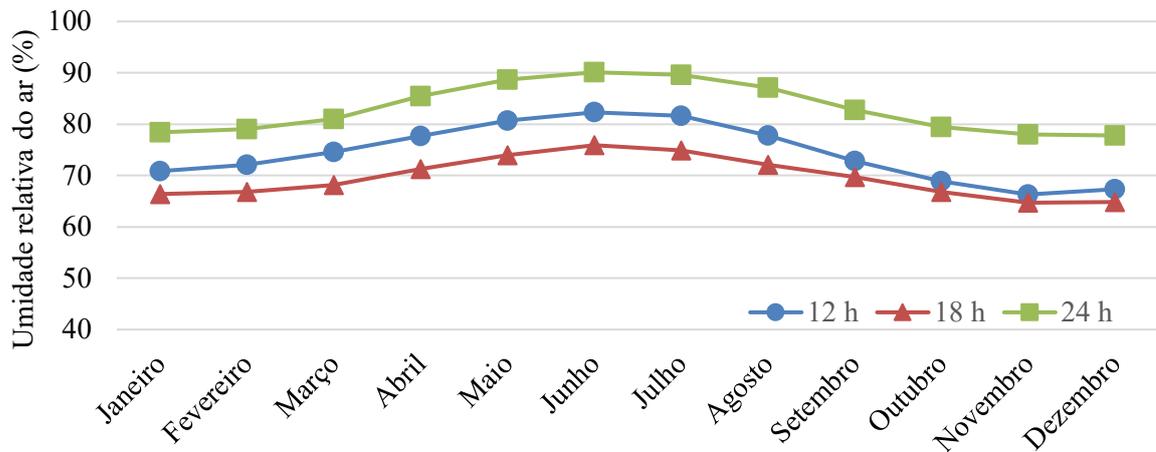


Fonte: Helen; Nicole Kostis (2019)

A umidade relativa do ar é elevada quando influenciada pelas zonas equatoriais e tropicais, além dos efluentes ou oceanos, permitindo uma maior quantidade de vapor de água na atmosfera. Através das mínimas e máximas do (INMET, 2022) para o ano de 2020³ é possível constatar a variação ao longo do dia, a exemplo da Figura 43. A umidade encontrando-se em patamares elevados conforme pode ser observado nas médias horárias das 12 horas, 18 horas e 24 horas, Figura 43, mantendo-se uma média não abaixo de 60% de umidade relativa do ar e atingindo valores máximos superiores a 90% de umidade relativa.

³ Escolheu-se o ano de 2020 pois este apresenta informações mais completas do que o ano de 2021, onde é possível encontrar a ausência de vários dados ao longo do ano.

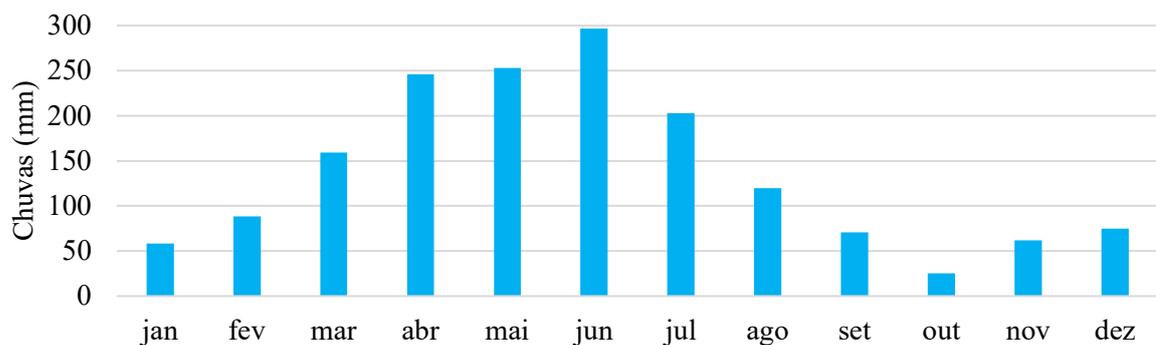
Figura 43 – Umidade relativa do ar horária no ano de 2020



Fonte: INMET (2022)

A cidade do Recife desfruta de precipitação pluviométrica durante todos os meses do ano. Com base nos dados de chuvas para o ano de 2020 do INMET (2022) é possível identificar o período mais chuvoso nos meses de março a agosto, com precipitações superiores a 100 mm, fator que afeta diretamente no aumento da umidade relativa do ar, pois eleva a quantidade de vapor de água presente na atmosfera, bem como amplia a capa de nuvens, dificultando o acesso dos raios solares e consequentemente diminuindo as temperaturas ambientes, vide Figura 44.

Figura 44 – Precipitação pluviométrica em Recife no ano de 2020



Fonte: INMET (2022)

A escolha da edificação como estudo de caso foi motivada pela facilidade de acesso ao condomínio, bem como possuir suportes de concreto armado para ar-condicionado do tipo janela. Além disso, a decisão foi influenciada pela necessidade de substituição de alguns desses suportes, devido ao avançado estado de deterioração, pois representava um risco potencial de queda de partes desses suportes.

O condomínio Barão de Vera Cruz, Localizado no bairro de Casa Amarela, na zona norte do Recife, é um edifício de uso residencial construído em 2010, composto por duas torres, denominadas A e B, com 14 pavimentos de apartamentos e 4 apartamentos por andar de aproximadamente 70 m². Os apartamentos são compostos por uma suíte e mais dois quartos, sala, cozinha, corredor, área de serviço e varanda, além de mais 3 pavimentos de estacionamento, sendo um deles subterrâneo. A propriedade possui quatro unidades habitacionais por pavimento, totalizando os dois blocos em 112 unidades habitacionais. (vide Figura 45).

Figura 45 – Localização do Condomínio do edifício Barão de Vera Cruz na cidade do Recife



Fonte: Adaptado de Google LLC (2022)

Os edifícios são constituídos por sistema estrutural de concreto armado e sistema de vedação em alvenaria convencional de tijolos cerâmicos, os dois blocos têm a mesma concepção estrutural. O sistema de revestimento externo é do tipo cerâmico com rejuntamento cimentício e juntas de dilatação com selante entre os pavimentos. Além das janelas e corrimão da varanda, em alumínio, possui suportes de concreto armado para aparelhos de ar-condicionado na fachada externa, conforme Figura 46.

Figura 46 – Vista externa dos dois blocos de edifícios

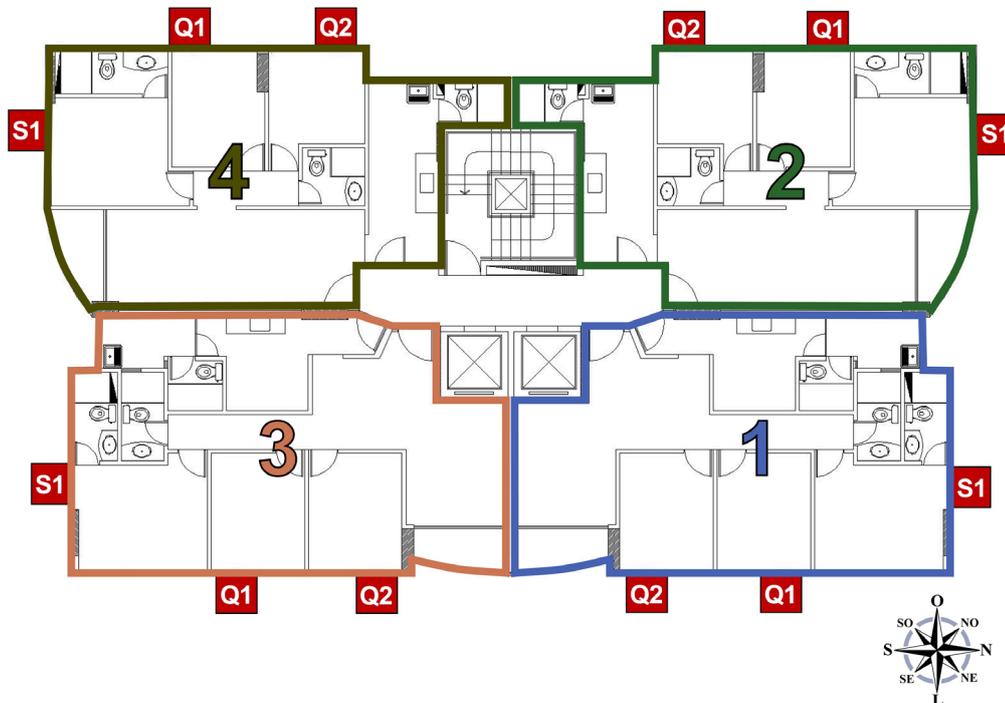


Fonte: Autor (2022)

A fachada tem suportes para ar-condicionado de concreto armado do tipo janela, totalizando 336 suportes para ar-condicionado, não sendo autorizado qualquer tipo de modificação da fachada para o uso de modelos do tipo split.

Foi realizada a separação dos dois blocos conforme os projetos do condomínio, com a denominação dos blocos A e B e a separação por Unidade Habitacional com as terminações de 1 a 4, em seguida os três quartos foram classificados em S1, Q1 e Q2, conforme Figura 47.

Figura 47 - Classificação das caixas para ar-condicionado.



Fonte: Autor (2022)

Para determinar o estado de deterioração de cada caixa realizaram-se voos com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), modelo MAVIC 2 Pro da fabricante DJI, (disponível na Figura 48, com demonstração da tela de captura de imagem na Figura 49) visando a captação de imagens para as faces superior, frontal e laterais, com uma câmera digital modelo COOLPIX P520 da fabricante Nikon para captura de imagem na face inferior, conforme Figura 50.

Figura 48 – Imagem do VANT próximo a fachada do edifício



Fonte: Autor (2022)

Figura 49 - Tela do VANT modelo DJI MAVIC 2 Pro.



Fonte: Autor (2022)

Figura 50 – Captação das imagens inferiores com a câmera digital Nikon COOLPIX P520.



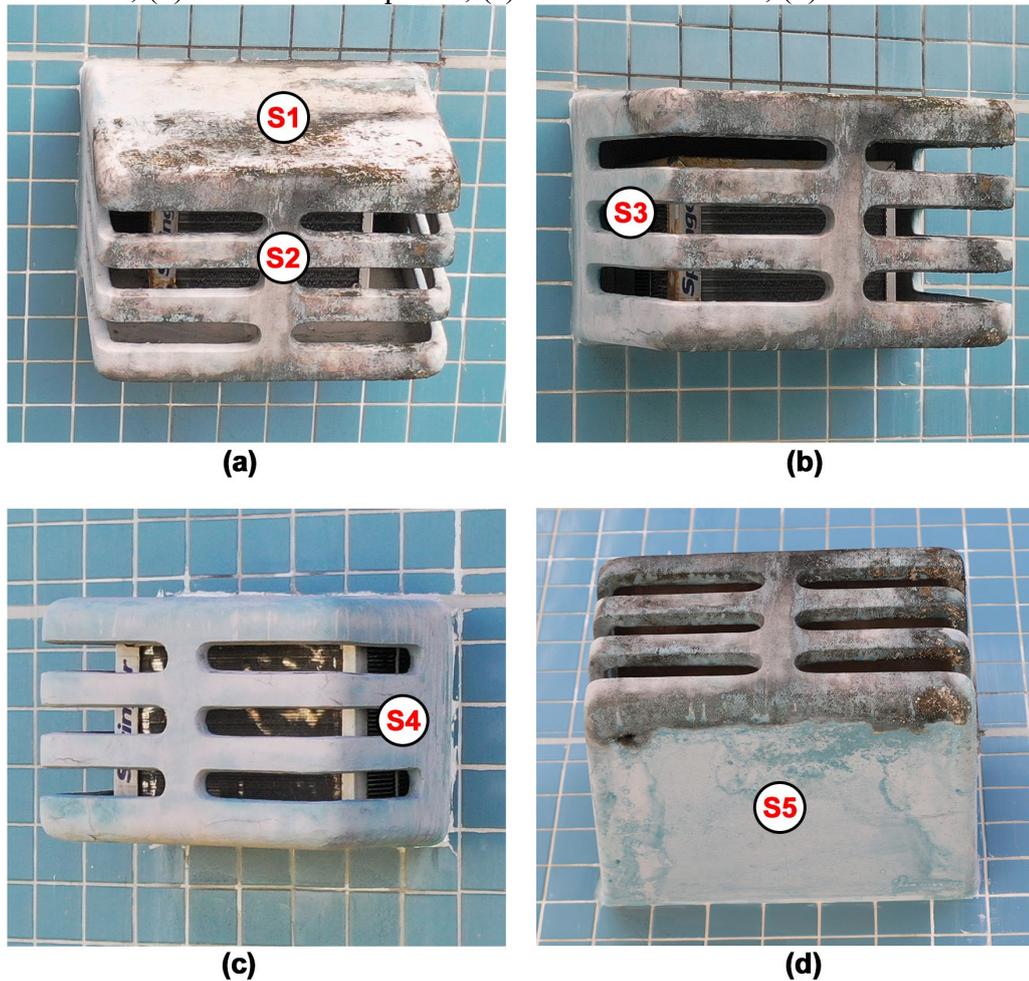
Fonte: Autor (2022)

Para que todas as faces externas da caixa de concreto armado fossem coletadas, realizou-se a captura pelo VANT de 3 imagens: uma frontal com inclinação da câmera em torno de -30° com o intuito de contemplar além da imagem frontal a imagem superior; uma foto com vista a esquerda sem inclinação da câmera e uma foto com vista a direita sem inclinação da câmera com uma distância aproximada de 4 m para o objeto - variação de 0,50 m. Distância considerada segura para uso do VANT em decorrência dos coeficientes de pressão e forma aerodinâmicas dos ventos, que provocam os efeitos de barlavento e sotavento nas estruturas.

Para complementar com a vista inferior da caixa, por ser uma limitação deste modelo de VANT, foi utilizada uma câmera digital com zoom visando captar uma imagem de cada uma das caixas na face inferior. Com o total de 336 caixas de concreto, sendo 3 por apartamento, totalizando em 1.344 imagens captadas.

Na Figura 51 estão demonstradas as realizações das capturas das imagens: S1 – face superior; S2 – face frontal; S3 – face esquerda; S4 – face direita e por fim a S5 – face inferior.

Figura 51 - Captação das imagens dos suportes de concreto armado do tipo janela: (a) vista frontal; (b) vista lateral esquerda; (c) vista lateral direita; (d) vista inferior.



Fonte: Autor (2022)

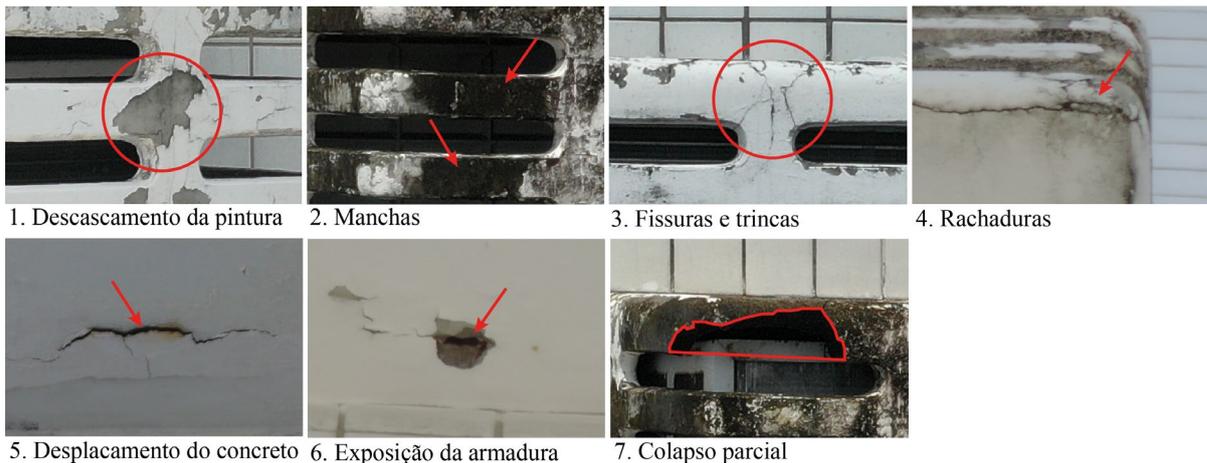
Após a coleta das imagens, as manifestações patológicas puderam ser classificadas de acordo com os tipos de problemas presentes. As fotos de cada parte dos suportes de concreto foram analisadas de acordo com os seguintes critérios: 1-descascamento da pintura, quando a camada de pintura se encontra com partes removidas; 2-manchas, podendo ser nas cores brancas, amarelas, verdes e escuras; 3-fissuras e trincas, quando há o início de aberturas em forma de linha no concreto e superficial; 4-rachaduras, quando há aberturas no concreto com ruptura de massa; 5-deslocamento do concreto, quando há o desprendimento do concreto, removendo a sua função estrutural; 6-exposição da armadura, quando a armadura se encontra exposta visualmente; 7-colapso parcial, quando parte da estrutura se encontra ausente, conforme demonstrado no Quadro 2 e visualizado na Figura 52.

Quadro 2 – Classificação das manifestações patológicas

Código	Manifestação patológica	Descrição
1	Descascamento da pintura	Quando a camada de pintura se encontra com partes removidas
2	Manchas	Quando acompanha manchas brancas, amarelas, verdes e escuras
3	Fissuras e trincas	Quando há o início de aberturas em forma de linha no concreto e superficial
4	Rachaduras	Quando há aberturas no concreto com ruptura de massa
5	Desplacamento do concreto	Quando há o desprendimento do concreto, removendo a sua função estrutural
6	Exposição da armadura	Quando a armadura se encontra exposta visualmente
7	Colapso parcial	Quando parte da estrutura se encontra ausente

Fonte: Autor (2022)

Figura 52 – Classificação das manifestações patológicas



Fonte: Autor (2022)

3.4 Ensaios de carbonatação e presença de cloretos

Foram realizados ensaios com os suportes removidos para a verificação da presença dos agentes de degradação, como a carbonatação e o ataque por íons cloretos, causadores da corrosão de armaduras e degradação do concreto.

Após vistoria realizada por empresa contratada pelo condomínio em 2021, sobre o cenário de deterioração dos suportes de concreto armado, chegou-se à conclusão da necessidade de realizar a troca de 10 suportes com substituição imediata, em razão do estado avançado de

deterioração com a queda de partes do elemento estrutural. Esses suportes de concreto armado removidos foram utilizados nesse estudo de caso.

Para a verificação do avanço de carbonatação quebrou-se partes da estrutura do suporte de concreto armado e foi aspergido a solução de 1% de fenolftaleína em 100 ml de álcool etílico sobre as peças, com isso foi possível verificar a mudança para coloração rosa em caso de o concreto estar com o pH elevado - normalmente acima de pH 9 e, em caso de não haver mudança de cor a diminuição do pH para valores menores do que 9, indicando não haver mais proteção da armadura por parte do concreto.

Durante a remoção dos suportes de concreto utilizou-se de esmerilhadeira manual com disco de corte para concreto, conforme Figura 53. As partes coletadas no local foram separadas de acordo com a unidade habitacional e o bloco a que pertencem, vide Figura 54. Algumas partes maiores precisaram ser quebradas com o apoio de marreta e pontalete para que fosse possível expor o concreto interno e realizar o ensaio, conforme visto na Figura 55.

Figura 53 – Corte do suporte de concreto com esmerilhadeira manual



Fonte: Autor (2022)

Figura 54 – Peças do suporte de concreto coletadas do local e separadas pela unidade habitacional



Fonte: Autor (2022)

Figura 55 – Utilização de pontalete e marreta para particionamento do concreto



Fonte: Autor (2022)

Na etapa seguinte foi realizada a limpeza com escova e pincel para a remoção de sujidades, conforme demonstrado na Figura 56.

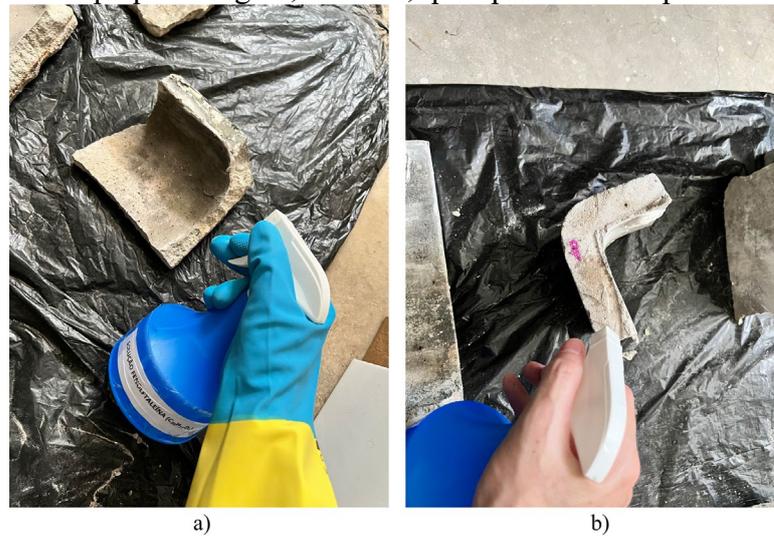
Figura 56 – Limpeza com uso de (a) escova e (b) pincel



Fonte: Autor (2022)

Após a limpeza fez-se a aspersão da solução de fenolftaleína sobre o local recém fraturado e aguardou-se alguns minutos para a verificação da mudança colorimétrica, conforme Figura 57. O ensaio tem como premissa a indicação de tons de vermelho para o pH acima de 10, portanto não carbonatado e para valores abaixo de 10, sem variação colorimétrica, indicando a carbonatação.

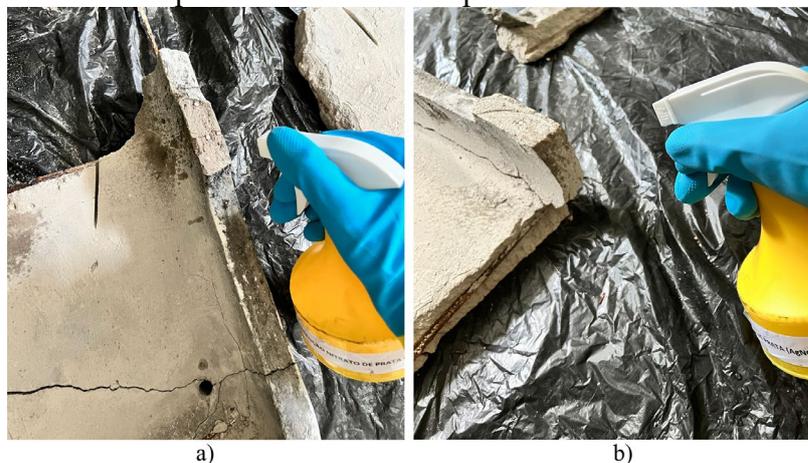
Figura 57 - Aspersão de solução de fenolftaleína: (a) completamente carbonatado; (b) uma pequena região, em rosa, que apresenta alto pH



Fonte: Autor (2022)

Os mesmos procedimentos de particionamento das peças de concreto e limpeza foram realizados para o teste com a solução de nitrato de prata, no sentido de detectar a presença de íons cloretos. O ensaio consistiu na identificação da presença de cloretos livres pelo método colorimétrico e de forma qualitativa. Quando aspergida a solução de nitrato de prata na base cimentícia, ocorre a formação de um precipitado branco devido ao cloreto de prata, indicando a presença de cloretos livres. Em regiões sem a presença de cloretos livre ou com cloreto combinado é gerado um precipitado marrom, com a formação do óxido de prata (Ag_2O). Na Figura 58 tem-se a aspersão da solução de nitrato de prata nas partes de concreto.

Figura 58 - Aspersão de solução de nitrato de prata: (a) aspersão em local com armadura; (b) aspersão em local com apenas o concreto



Fonte: Autor (2022)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

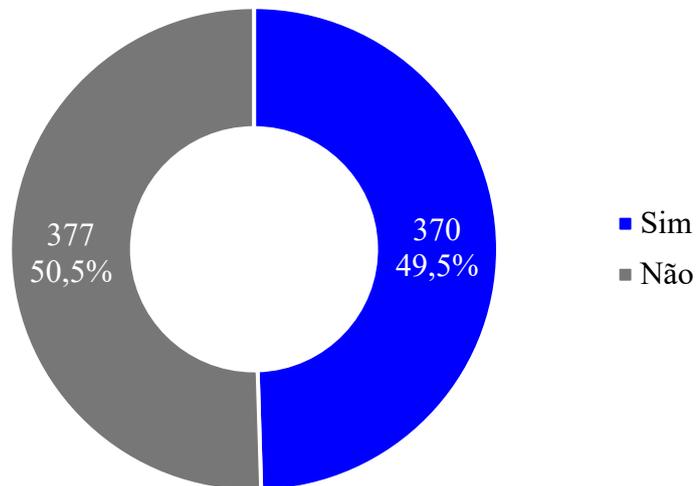
A análise estatística mostrou um resultado essencial, pois foi possível quantificar as construções que possuem suportes para ar-condicionado expostos no ambiente externo na cidade do Recife. Outra análise baseada nas vistorias e ensaios realizados, buscou verificar as condições de deterioração dos suportes de concreto armado, em razão da localização e ambiente inseridos.

4.1 Análise quantitativa

Resultados estatísticos

Com a análise estatística sobre as 747 construções que pertencem a amostragem, foi possível constatar que 370 construções - o que equivale a 49,53% do total - possuem algum tipo de suporte para ar-condicionado na área externa, conforme pode ser visto na Figura 59.

Figura 59 - Edificações com suportes para ar-condicionado nas fachadas



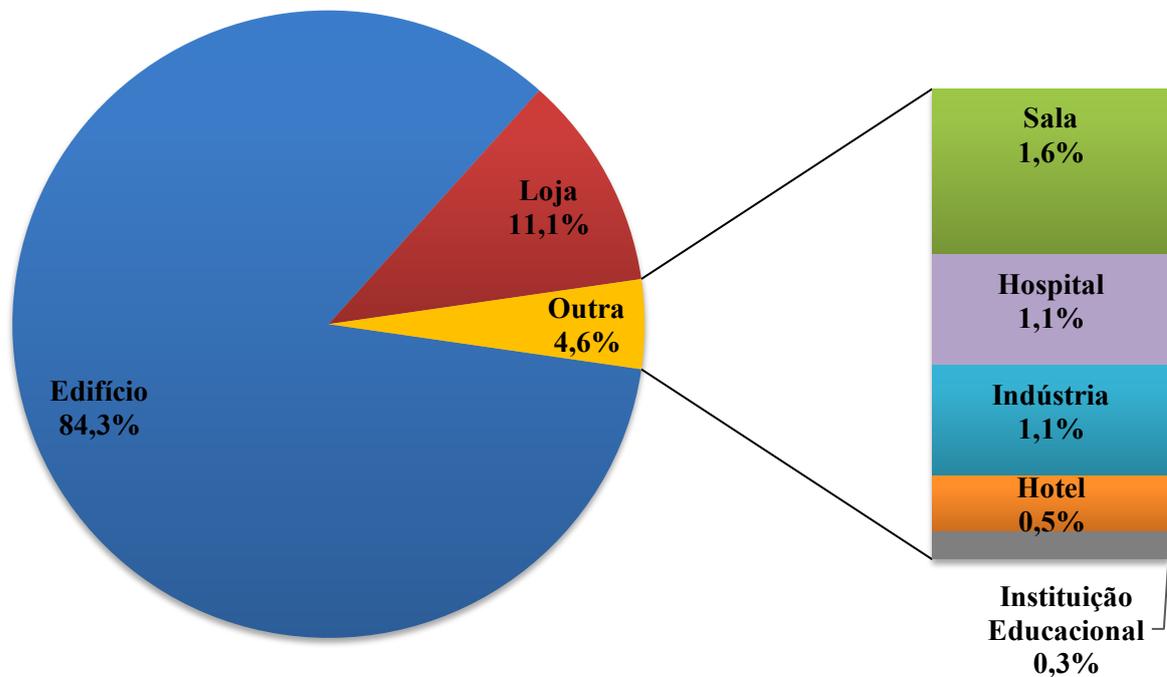
Fonte: Autor (2022)

Foram consolidadas as construções que detém diversos pavimentos e adotado a descrição de “edifício”, representando as categorias constantes no banco de dados como:

apartamento, edificação especial, edifício comercial/serviços, edifício misto e edifício residencial.

No detalhamento pode-se verificar que as construções que possuem os suportes para ar-condicionado nas fachadas são justamente os edifícios, que possuem maior altura e contam com 312 construções, correspondendo ao percentual de 84,3%, seguidas por loja, com 41 construções e 11,1%; após isso tem-se sala, com 6 construções e 1,6%, seguida de hospital e indústria com 4 construções cada e conseqüente percentual de 1,1% para cada uma; posteriormente tem-se hotel, com 2 construções equivalentes a 0,5% e instituição educacional com apenas 1 construção e 0,3%, conforme visto na Figura 60.

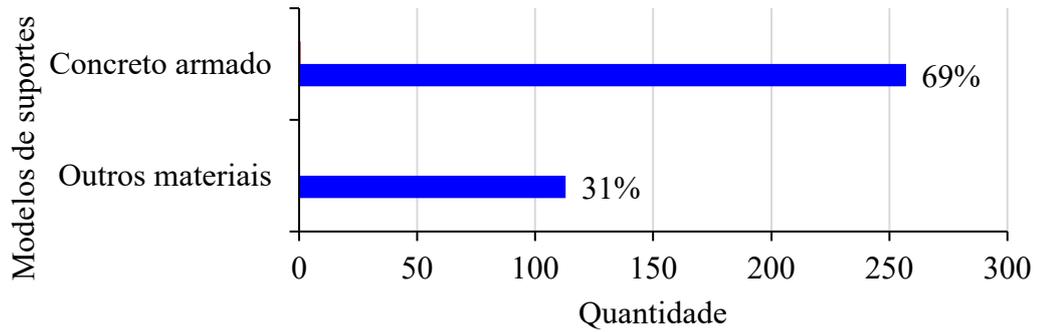
Figura 60 – Tipos de edificações que possuem suportes para ar-condicionado nas fachadas



Fonte: Autor (2022)

Com base nas construções que possuem o suporte para ar-condicionado nas fachadas, pode-se destacar o uso de suportes de concreto armado em 257 edificações, o que representa 69% do total. Outros materiais fazem parte dos 31% restantes e podem ser metálicos, fibra de vidro, alumínio ou materiais plásticos, conforme demonstrado na Figura 61.

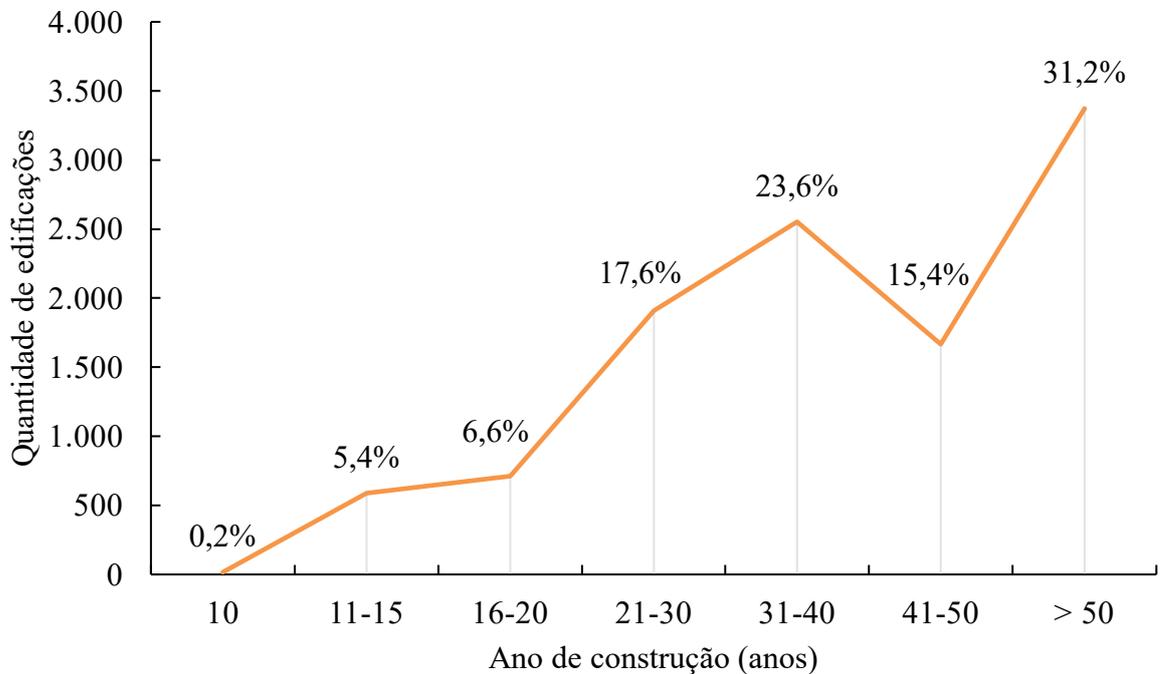
Figura 61 - Tipo de suporte presente nos edifícios



Fonte: Autor (2022)

Em edifícios mais antigos os problemas de degradação estão mais presentes, pois o tempo e as condições meteorológicas agem deteriorando essas estruturas e sem manutenções preventivas e corretivas, os suportes de concreto armado podem estar em situações de colapso. Na Figura 62 é possível verificar que mais de 87% das construções possuem mais de 20 anos e 31,2% apresentam mais de 50 anos desde a construção.

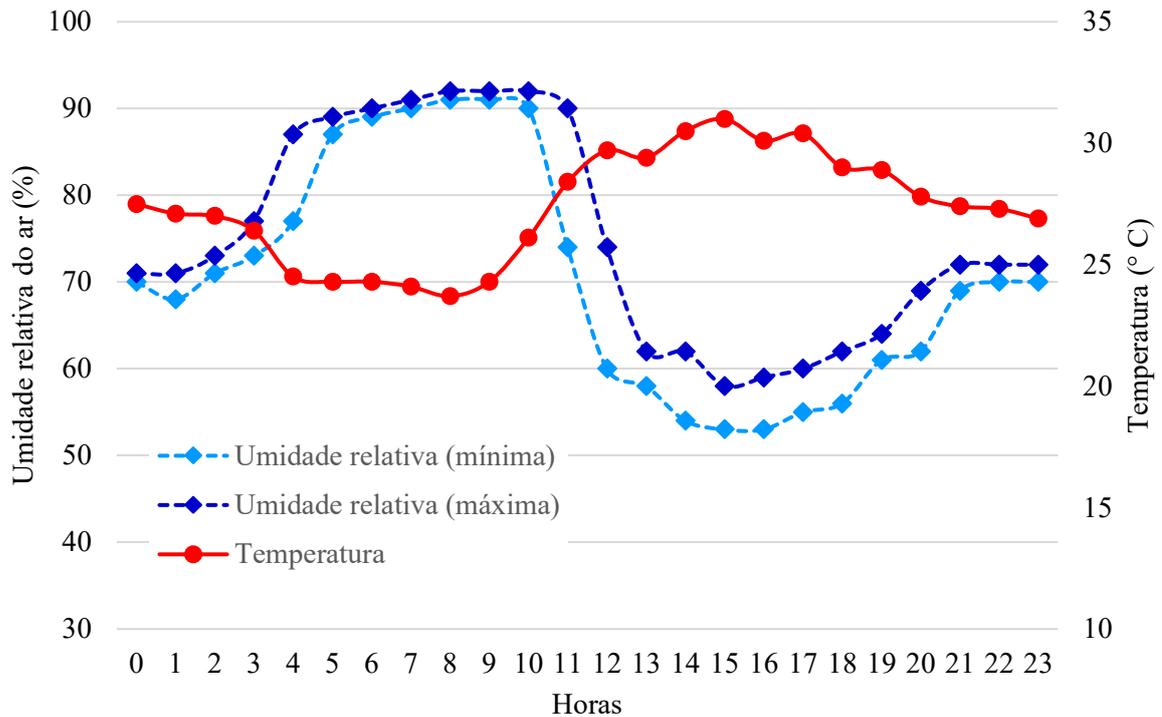
Figura 62 – Quantidade de edificações de acordo com o período de construção



Fonte: Autor (2022)

Uma correlação importante seria da umidade relativa do ar com a temperatura ambiente, sob a influência dos raios solares no período de 24 horas. Em intervalos do dia em que a temperatura é maior, há redução da umidade relativa do ar e o efeito contrário quando a temperatura diminui no período da noite e a umidade volta a elevar-se, a exemplo da Figura 63.

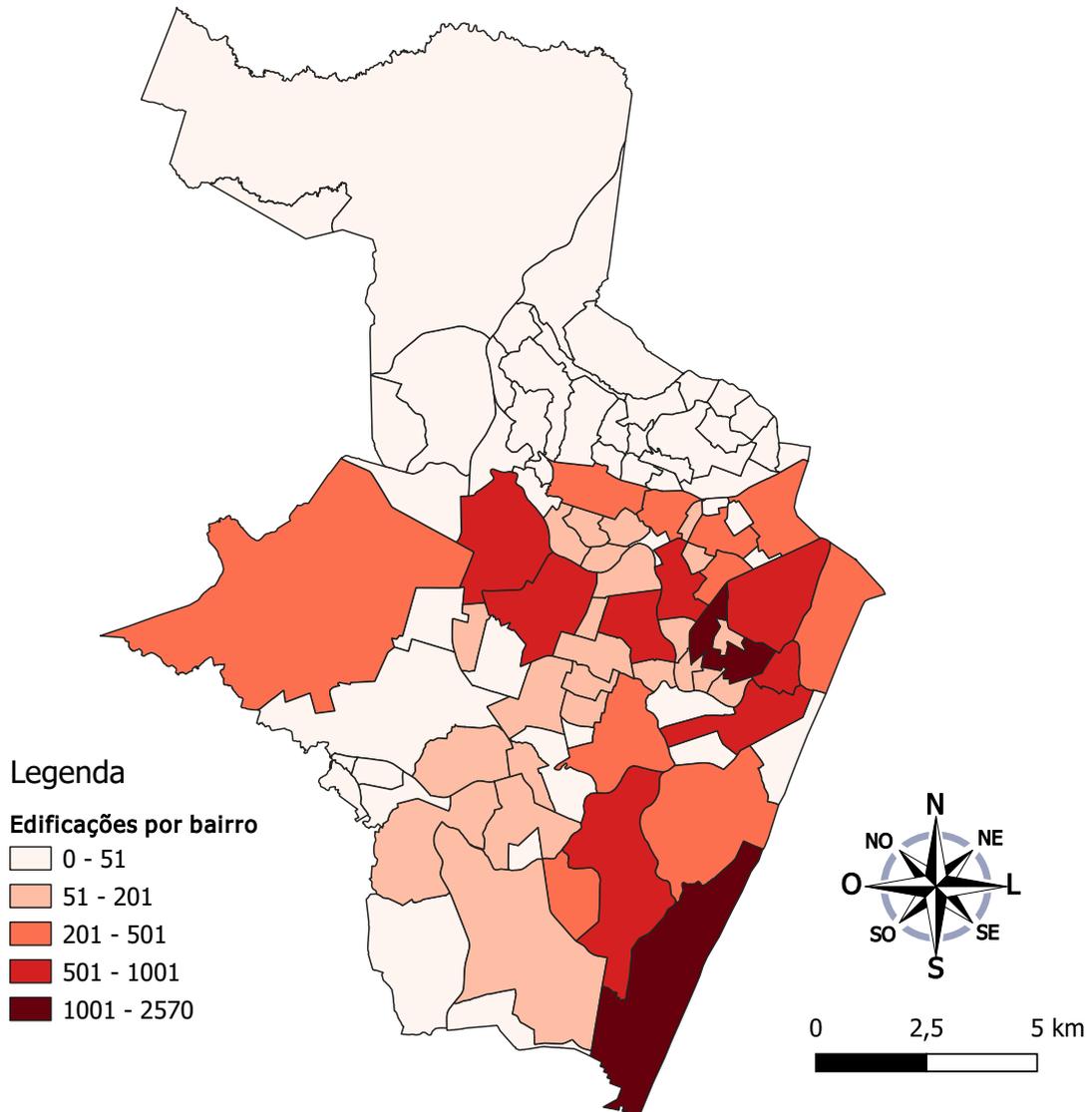
Figura 63 – Comparativo da umidade relativa do ar e temperatura no mês de janeiro de 2020



Fonte: INMET (2022)

Nas informações do banco de dados foram extraídas informações do QGIS sobre a quantidade de edificações por bairro com o intuito de visualizar a densidade de construções, ou seja, áreas mais densas tendem a apresentar mais ilhas de calor, maior concentração de trânsito e veículos e a proteção por efeito barreira. Na Figura 64 é possível verificar que os bairros de Boa Viagem, na região sul e Boa Vista, na região central, possuem mais áreas edificadas.

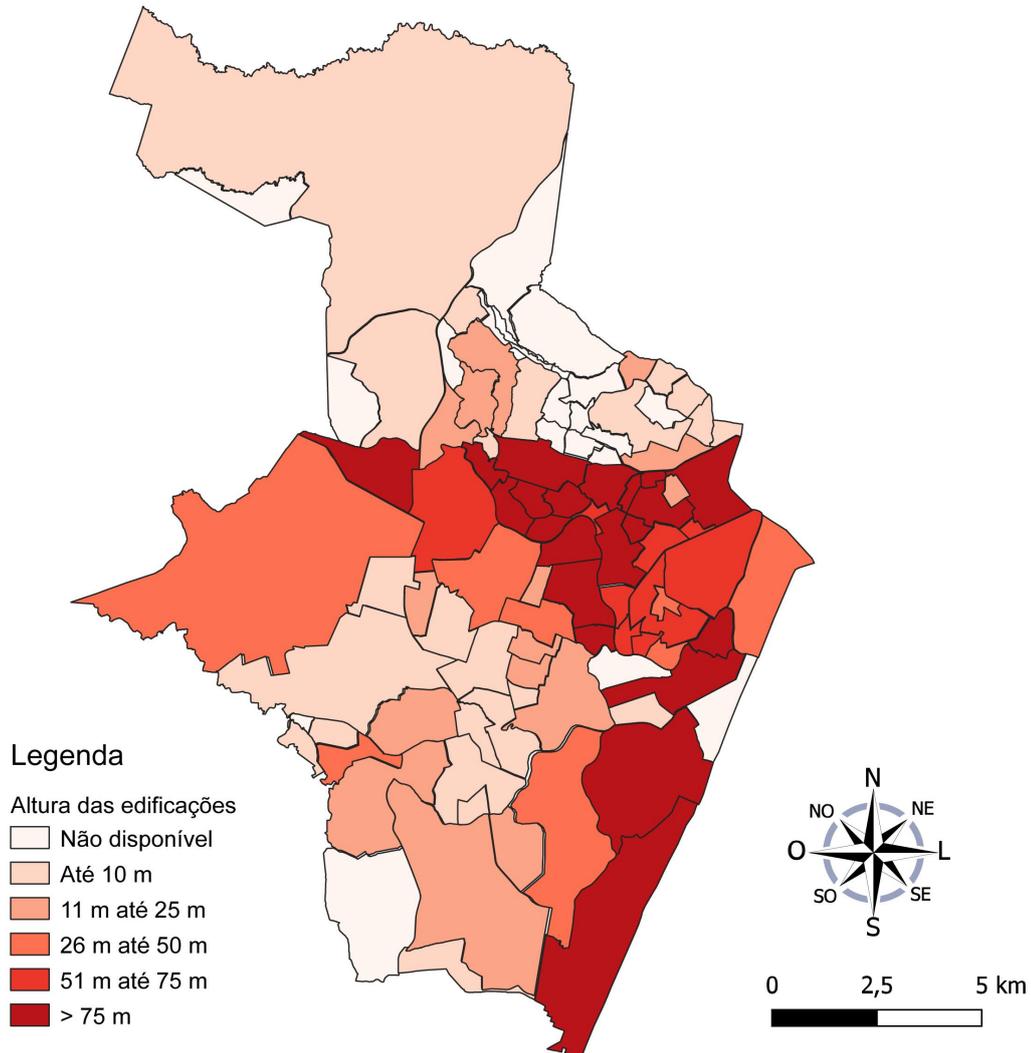
Figura 64 – Quantidade de edificações por bairro na cidade do Recife



Fonte: Autor (2022)

Ao comparar os dois mapas da Figura 64 e Figura 65, percebe-se que, embora haja edifícios altos na região Norte, em termos de densidade versus altura, é o bairro de Boa Viagem, na região Sul, que se destaca como uma verdadeira barreira edificante; demonstrado na cor vermelha mais escura e que possui maior extensão, Figura 64. Isso é evidenciado pela presença de 42 edifícios com alturas superiores a 75 metros, enquanto os bairros da região Norte geralmente contam com uma média de 1 a 6 edifícios por bairro.

Figura 65 – Altura das edificações por bairro na cidade do Recife



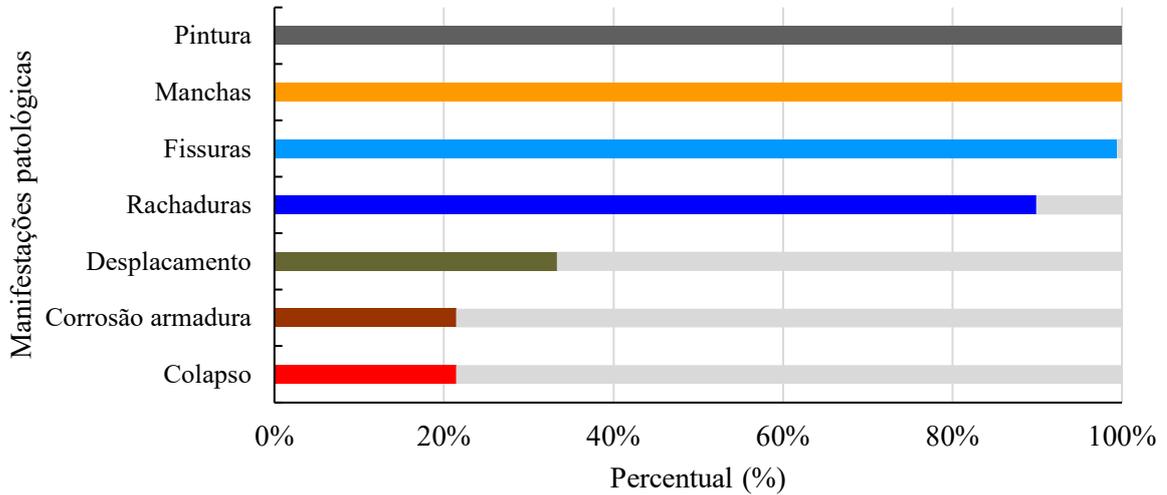
Fonte: Autor (2022)

Resultados do estudo de caso

Após apontar as manifestações patológicas dos suportes de concreto armado, foi possível identificar a deterioração da pintura e a presença de manchas em 100% dos suportes de concreto, seguidos por fissuras superficiais na quase totalidade (99%) e rachaduras em 90%. No que concerne às manifestações com maior deterioração, segue-se o deslocamento do concreto com 33%, seguidos por corrosão da armadura exposta, 21% e por último, também com 21% o estado de colapso parcial, no qual partes da estrutura encontram-se ausentes, (Figura 66).

As manifestações patológicas, como manchas e descascamento da pintura, não serão o foco deste estudo.

Figura 66 – As manifestações patológicas dos suportes de concreto armado



Fonte: Autor (2022)

As rachaduras são um indicativo do estado de degradação das estruturas de concreto, porém o simples fato de indicar a presença não demonstra o estado inicial ou avançado de deterioração, ou seja, se é apenas localizada ou generalizada. Para estratificar os 90% dos suportes com rachaduras, classificou-se em três níveis de degradação, conforme descrito no quadro 3.

Quadro 3 – Classificação das rachaduras por nível de degradação

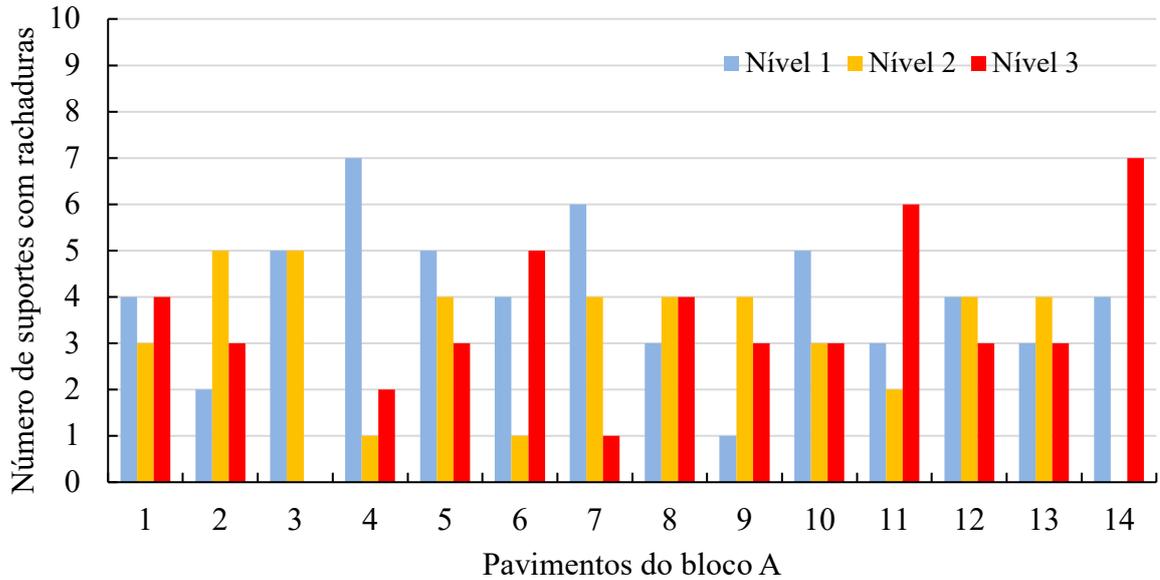
Nível de degradação	Critérios
Nível 1	Rachaduras sem continuidade e de forma localizada
Nível 2	Rachaduras em vários locais
Nível 3	Aberturas maiores das rachaduras e de forma generalizada

Fonte: Autor (2022)

Com essa classificação foi possível realizar uma vistoria nas imagens dos suportes para ar-condicionado da fachada e separar por pavimento, que dispõe de 12 suportes de concreto armado. Com exceção das classificadas como nível 1, as de nível 2 e 3 estão em situação de deterioração média a elevada.

No bloco A constatou-se os suportes com deterioração mais avançado nos pavimentos elevados, como o pavimento 11 e 14 (rachaduras de nível 3), conforme Figura 67.

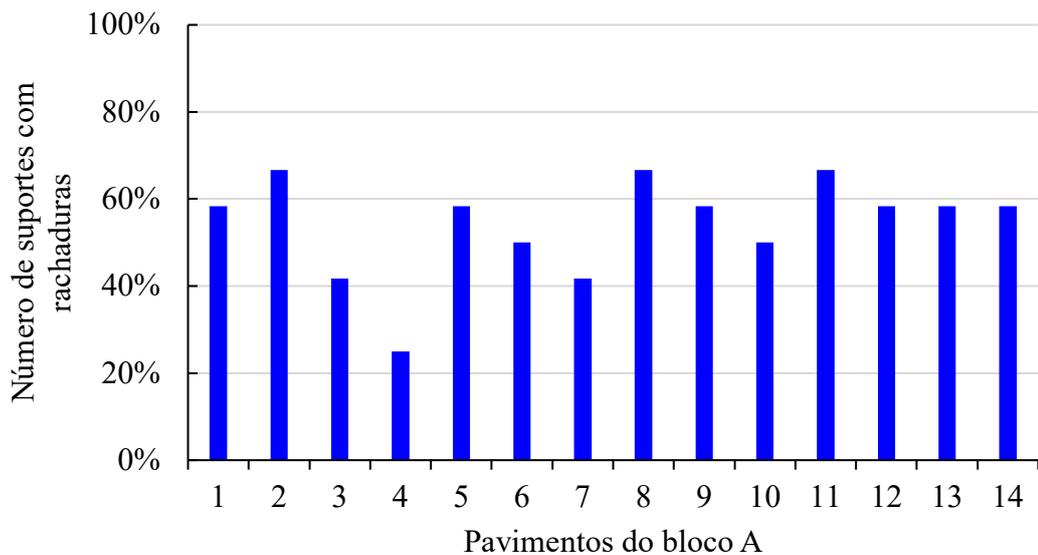
Figura 67 – Classificação das rachaduras por nível de deterioração no bloco A



Fonte: Autor (2022)

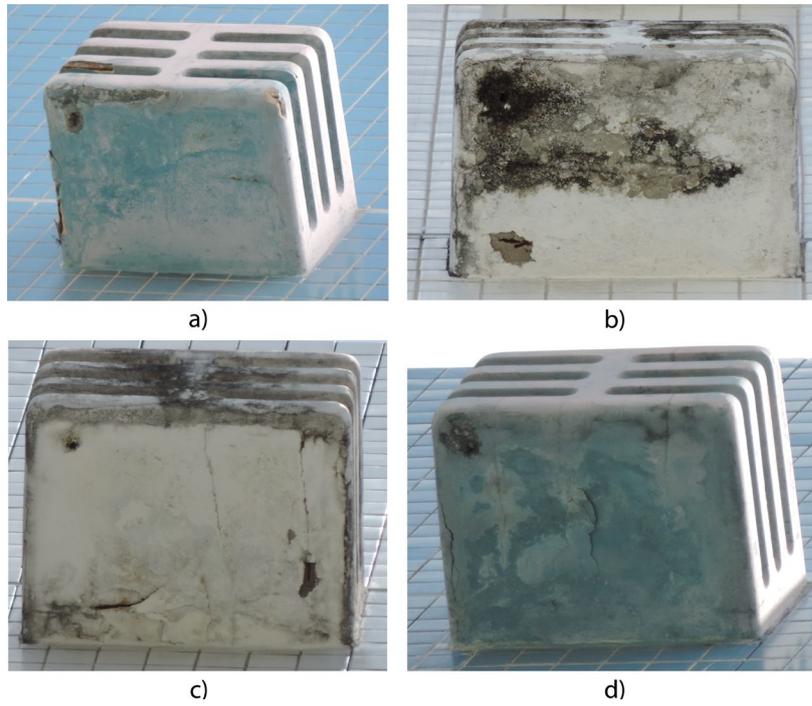
Quando os suportes na condição de nível 2 e nível 3 são somados, observa-se uma média de 54% dos suportes nessa situação, chegando a 67% nos pavimentos 2, 8 e 11. Percebe-se que não há discrepância significativa entre os pavimentos quanto ao dano apresentado nos suportes de concreto armado com relação à altura, conforme visto na Figura 68. Algumas imagens dos suportes com nível de deterioração 3 podem ser vistas na Figura 69.

Figura 68 – Suportes deteriorados no nível 2 e 3 por pavimento



Fonte: Autor (2022)

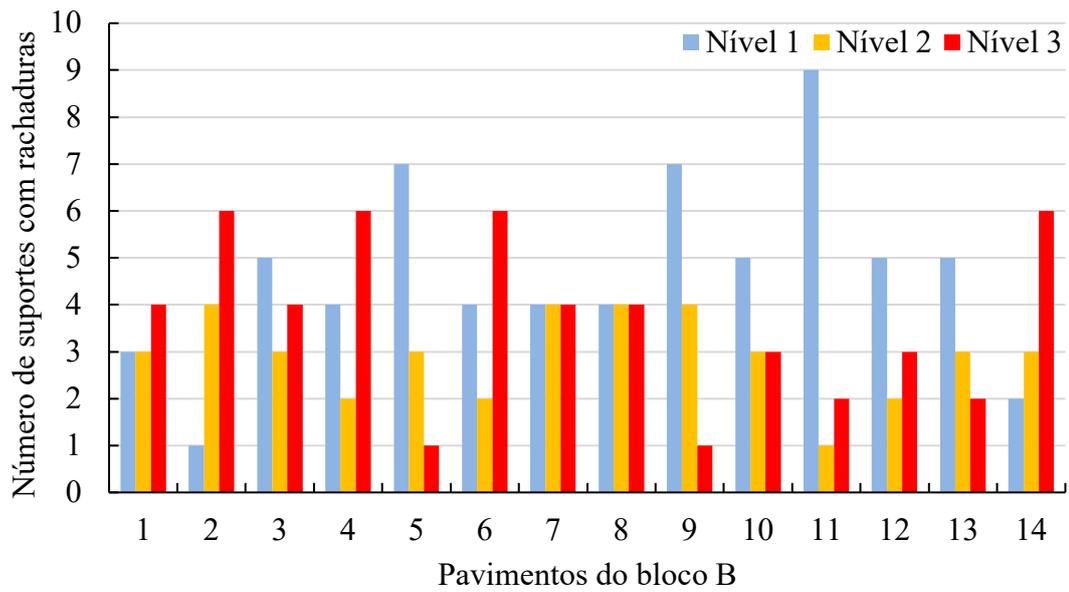
Figura 69 - Suportes de concreto armado deterioradas no bloco A: a) 804; b) 903; c) 1403; d) 1404



Fonte: Autor (2022)

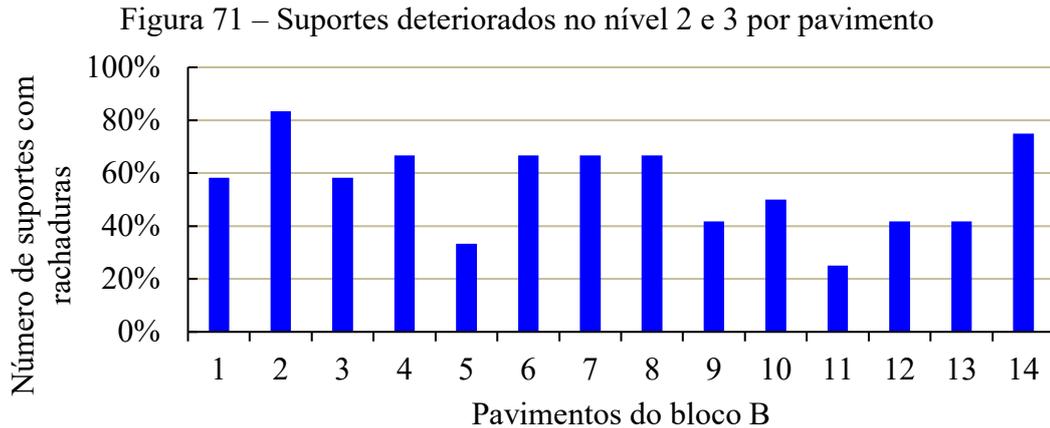
Para o bloco B constatou-se os suportes com deterioração mais elevada de nível 3 nos seguintes pavimentos: 2, 4, 6 e 14, conforme Figura 70.

Figura 70 – Classificação das rachaduras por nível de deterioração no bloco B



Fonte: Autor (2022)

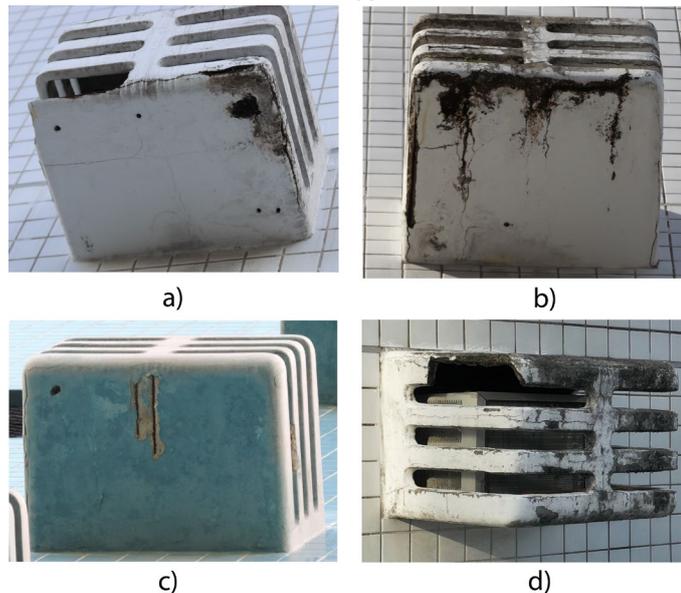
Quando os suportes na condição de nível 2 e nível 3 são somados, observa-se uma média de 55% dos suportes nessa situação, bastante similar com o bloco A, chegando ao pico de 83% no pavimento 2. No caso do bloco B percebe-se desproporção entre os pavimentos, com alguns picos e quantidades inferiores entre andares próximos, conforme visto na Figura 71.



Fonte: Autor (2022)

No bloco B pode-se verificar a situação de deterioração dos suportes de concreto armado, conforme Figura 72.

Figura 72 - Suportes de concreto armado deterioradas no bloco B: a) 101; b) 403; c) 602; d) 1203

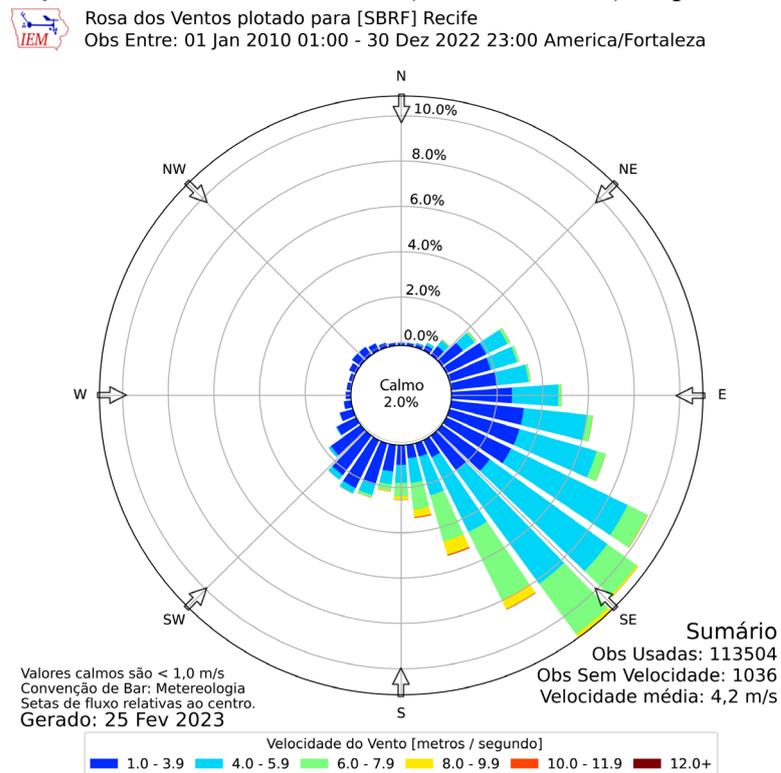


Fonte: Autor (2022)

Uma outra análise relacionou as degradações com a orientação dos pontos cardeais, no sentido de identificar correlações com a direção dos ventos, chuvas e acesso dos íons cloretos.

No mapa da rosa dos ventos é possível observar os ventos predominantes na direção sudeste e ventos do tipo rajada que chegam a 10 m/s, situação que favorece o transporte de íons cloretos a distâncias que podem chegar a 100 km do litoral (PONGSAKSAWAD *et al.*, 2021), conforme Figura 73.

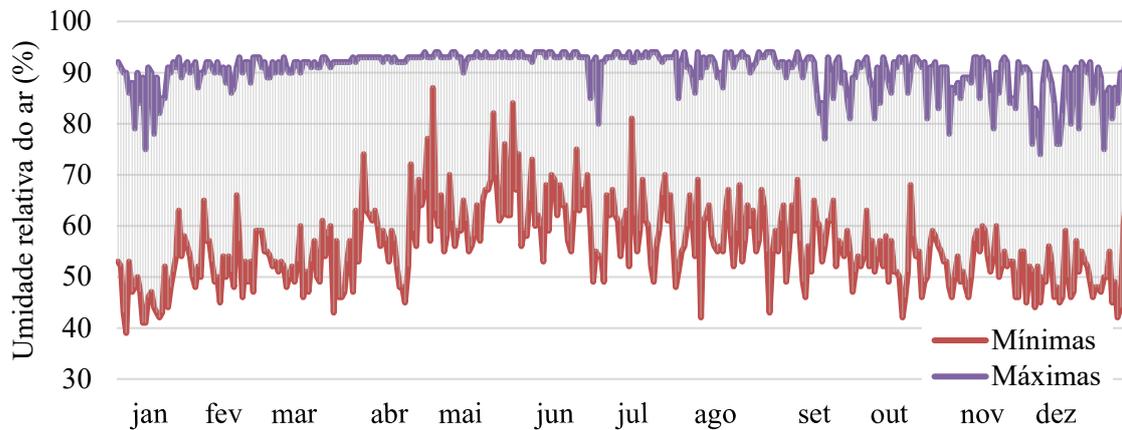
Figura 73 – Direção e velocidade dos ventos (rosa dos ventos) no período de 2010 a 2022



Fonte: Iowa State University (2023)

A umidade relativa do ar é influenciada pela precipitação pluviométrica e a variação de temperatura da radiação solar, contudo essa variedade está contemplada nos limites mínimos de 60% e máximo de 90%, que tendem a afetar mais severamente os suportes de concreto armado, conforme visto na Figura 74.

Figura 74 – Umidade relativa do ar com mínimas e máximas diárias no ano de 2020



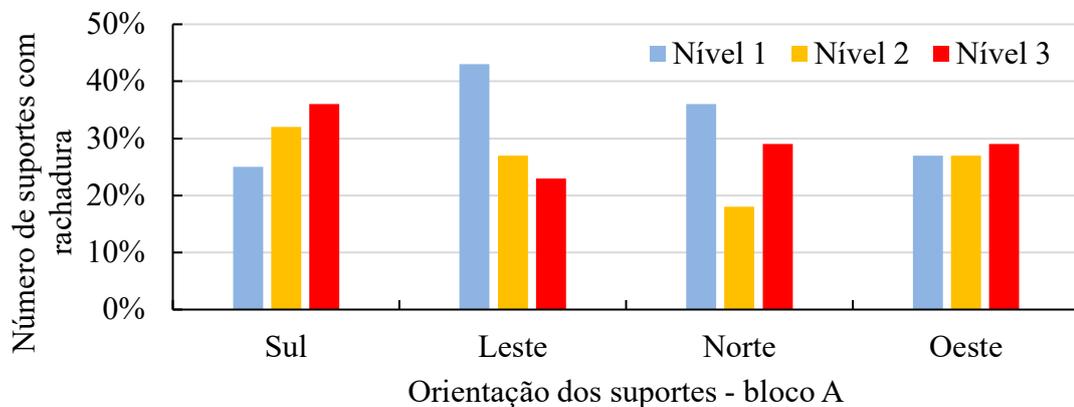
Fonte: INMET (2022)

Os suportes com rachaduras foram separados de acordo com o nível de degradação e respectivas direções: sul, leste, norte e oeste e chegou-se aos resultados no bloco A de 36% dos suportes com nível 3 de deterioração no lado Sul, seguidos por 29% no Norte e Oeste e por último com 23% no Leste, vide Figura 75.

Considerando que o vento predominante está na direção Sudeste é de se esperar que as fachadas Sul e Leste tenham maior predominância de suportes de concreto armado em estado avançado de deterioração, tanto pelo acesso dos íons cloretos transportados, quanto pela alta umidade presente ao longo do ano.

Na fachada Sul é possível verificar essa condição, que não é vista na fachada Leste, onde existem mais suportes na condição de rachaduras de nível 1.

Figura 75 – Níveis de deterioração das rachaduras nos suportes de acordo com a direção dos pontos cardeais do bloco A

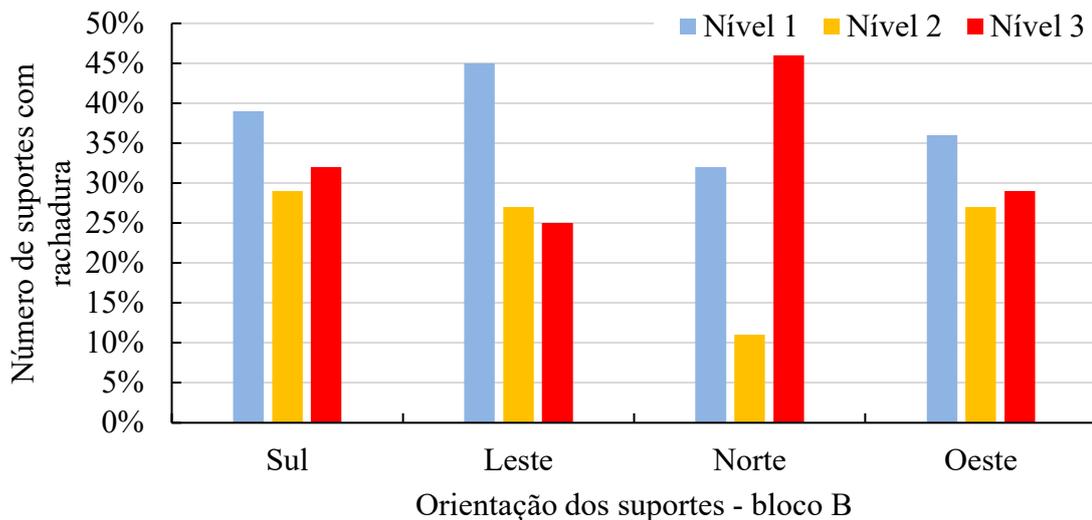


Fonte: Autor (2022)

Para o bloco B foi constatada uma maior predominância de suportes deteriorados no nível 3 na orientação Norte, com 46%, seguido por 32% no Sul, 29% no Oeste e 25% no Leste, conforme se visualiza na Figura 76.

A situação do bloco B é similar ao bloco A e o vento predominante está na direção Sudeste, onde as fachadas Sul e Leste seriam as mais afetadas pelas condições ambientais adversas, favorecendo a predominância de suportes de concreto armado em estado avançado de deterioração. Constatou-se que na fachada Norte é onde estavam os suportes com maior índice de rachaduras generalizadas, ao passo que as orientações Sul, Leste e Oeste possuíam valores próximos.

Figura 76 - Níveis de deterioração das rachaduras nos suportes de acordo com a direção dos pontos cardeais do bloco B



Fonte: Autor (2022)

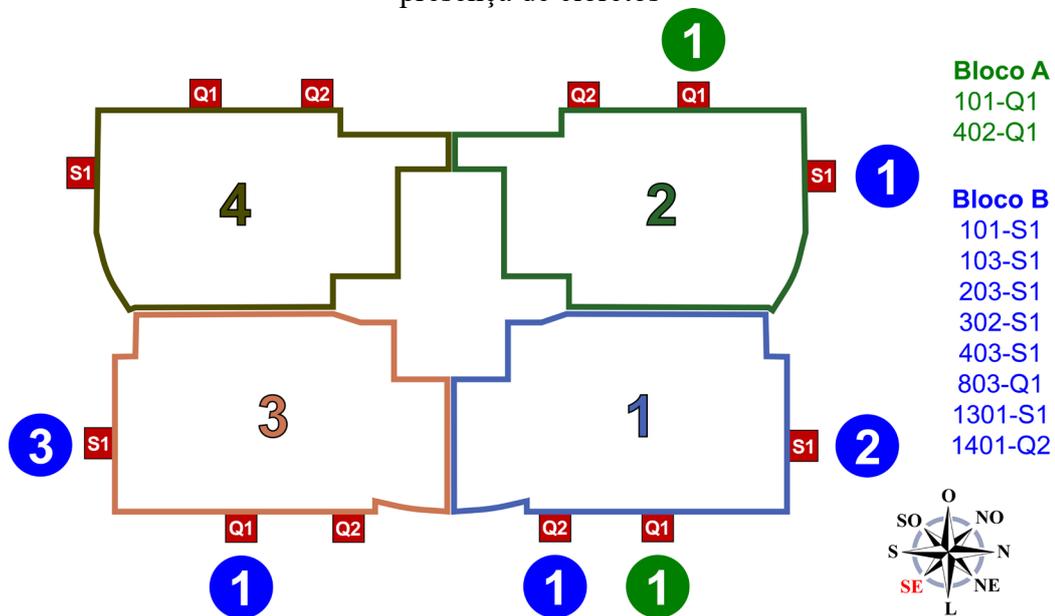
Dessa forma, os procedimentos de molhagem e secagem assumem um papel ainda mais crucial em concretos de baixa qualidade e altamente porosos do que as influências dos ventos predominantes com chuva, especialmente no que diz respeito ao acesso de agentes agressivos.

Para analisar o estado de deterioração dos suportes de concreto armado quanto a carbonatação e a presença de íons cloretos, realizou-se ensaios de avanço de carbonatação e da presença de íons cloretos.

Ensaio de campo

O ensaio de avanço de carbonatação foi realizado nos 10 suportes de concreto armado do estudo de caso que precisaram ser substituídos pelo estado avançado de deterioração. Foram removidos 2 no bloco A, representado na cor verde, das unidades habitacionais: 101-Q1, 402-Q1 e 8 no bloco B, representado pela cor azul, das unidades habitacionais: 101-S1, 103-S1, 203-S1, 302-S1, 403-S1, 803-Q1, 1301-S1 e 1401-Q2, demonstrados na Figura 77.

Figura 77 - Suportes de concreto armado submetidos a ensaios de avanço de carbonatação e presença de cloretos



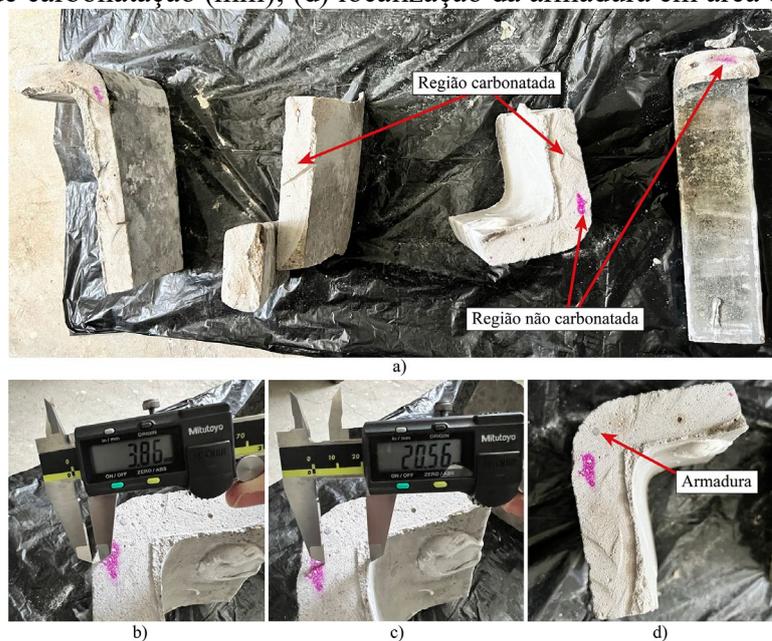
Fonte: Autor (2022)

A análise sobre a carbonatação constatou que todo concreto aspergido com a solução de fenolftaleína em volta das armaduras estava carbonatado, ou seja, sem mudança de coloração. Apenas em uma das amostras foi encontrada uma região com o pH mais elevado e que demonstrava a coloração rósea no 13º andar do bloco B, apartamento 1301 S1, porém apresentava como carbonatado em volta da armadura, e conseqüentemente não atuava mais como camada protetora, conforme pode ser visto na Figura 78.

O ensaio sobre a presença de cloretos dos 10 suportes de concreto armado constatou em todos os suportes a coloração branca, um indicativo da presença de cloretos livres e responsáveis pelo processo de corrosão da armadura. Em algumas regiões a coloração marrom

foi percebida em 30% das amostras, indicando a não contaminação por cloretos, conforme visto na Figura 79.

Figura 78 – Ensaio de avanço de carbonatação; (a) região carbonatada e não carbonatada; (b) (c) frente de carbonatação (mm); (d) localização da armadura em área carbonatada.



Fonte: Autor (2022)

Figura 79 – Ensaio para presença de cloretos: (a) (b) e (c) região marrom sem cloretos e região branca com cloretos; (d) região com coloração branca (com cloretos); (e) região em detalhe da figura d.



Fonte: Autor (2022)

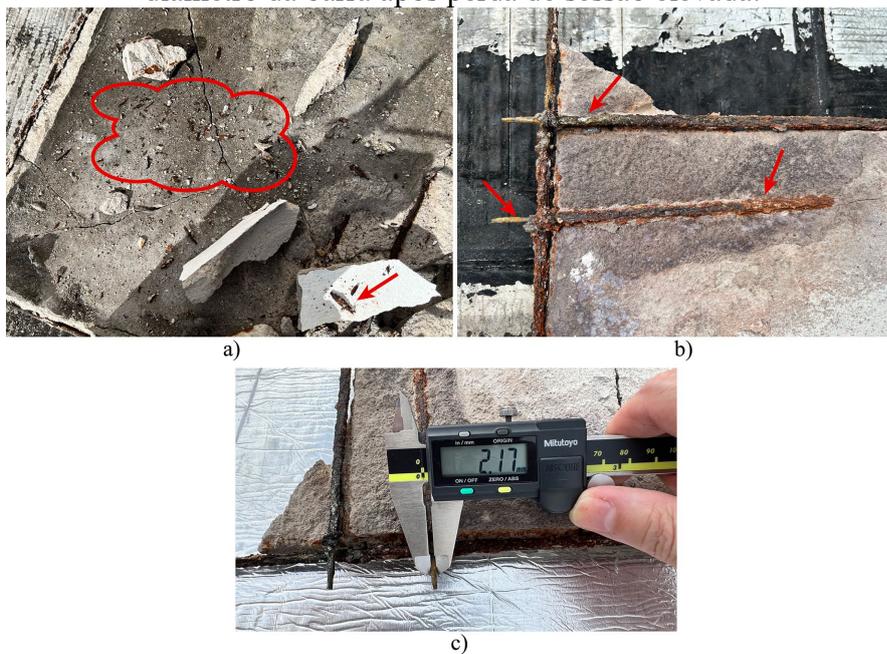
Com a obtenção do perfil de elevação desde o ponto de arrebentação das ondas até a edificação do estudo de caso, foi possível identificar as baixas variações de altitude, partindo do zero na formação das ondas até o máximo de 12 m na elevação do Parque Arraial do Bom Jesus e de 10 m no local da edificação – com uma distância de 6,64 km. Dessa forma, nota-se uma planicidade que facilita o transporte dos íons cloretos, conforme Figura 80.



Fonte: Adaptado de Google LLC (2022)

Nos suportes com maior altura foi percebida a degradação mais severa da armadura, inclusive com desprendimento de pequenas partes após o processo de corrosão e uma perda de seção da armadura em torno de 37%, com valores de 2,17 mm de diâmetro, além do rompimento da barra de aço. Esses detalhes em vermelho podem ser vistos na Figura 81.

Figura 81 – Suporte de concreto armado com corrosão avançada: (a) partes soltas da armadura; (b) estágio avançado de corrosão da armadura com perda de seção elevada; (c) diâmetro da barra após perda de seção elevada.



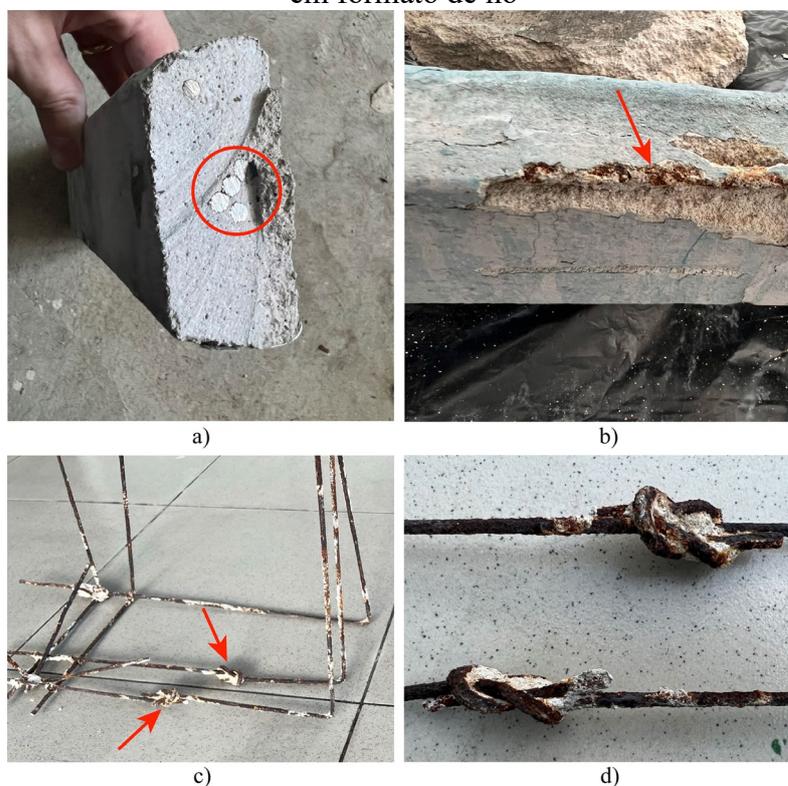
Fonte: Autor (2022)

4.2 Análise qualitativa através das características estruturais

A análise qualitativa tem como premissa avaliar as condições de degradação dos suportes, envolvendo normas técnicas de estruturas para aspectos ambientais.

As barras de aço adotadas no suporte de concreto armado são do tipo redonda lisa e próprias para serralharia, não sendo recomendadas para a construção civil, como o vergalhão nervurado. Outro item relevante deve-se a necessidade da emenda dessa armadura, que visa diminuir as perdas ou atingir grandes vãos, utilizando-se de transpasse, luva ou solda. Alguns erros de execução são identificados, como a concentração de armaduras em determinados locais, a falta de cobrimento e a conexão entre as barras de aço com o uso de nós, conforme exposto na Figura 82. Entretanto, esse tipo de emenda realizada através de nós entre as extremidades da armadura e o uso de barras não nervuradas, são procedimentos inexistentes na NBR 6118 (ABNT, 2023).

Figura 82 – Erros na execução dos suportes de concreto: (a) alta concentração de armaduras; (b) inexistência de cobrimento da armadura; (c) emenda de armaduras; (d) detalhe da emenda em formato de nó



Fonte: Autor (2022)

Verificou-se em campo qual a bitola do aço utilizado nos suportes, para isso, com uma marreta procedeu-se a quebra de partes do concreto em locais onde não havia a presença de rachaduras e possível oxidação avançada. Posteriormente o local foi limpo com escova e palha de aço para remoção do concreto e vestígios de ferrugem, em seguida mediu-se o diâmetro com paquímetro digital. Os resultados dessa análise constataram que a barra possui 3,48 mm de diâmetro, conforme Figura 83.

Figura 83 – Diâmetro da barra de aço do suporte de concreto



Fonte: Autor (2022)

Realizando uma pesquisa dos aços utilizados no mercado pelas maiores empresas do setor siderúrgico, contatou-se que para valores de diâmetro nominal do aço próximos ao registrado na Figura 83, tem-se os seguintes diâmetros, constantes no quadro 4.

Quadro 4 - Referência dos padrões para aços no mercado siderúrgico

Tipo de aço	Diâmetro nominal DN (mm) mínimo	Diâmetro nominal DN (mm) máximo	Principal uso
Aço CA-25	6,3	40,0	Estruturas de concreto armado, tirantes
Aço CA-50	6,3	9,5	Estruturas de concreto armado
Aço CA-60	4,2	32,0	Estruturas de concreto armado
Arame recozido	1,24	6,35	Fixar armaduras, peças industriais
Estribos	4,2	4,2	Estruturas de concreto armado
Barras redondas	6,35	101,6	Serralheria, estruturas metálicas

Fonte: Autor (2022)

Com base nessas informações pode-se constatar que o aço utilizado como armadura seria o arame recozido, por estar dentro da faixa de diâmetro (1,24 cm e 6,35 cm) e possuir

estrutura lisa segundo constatado nos ensaios, o que difere dos aços para construção, como o vergalhão, que teriam saliências para melhor interface aço x concreto. Em alguns suportes foi constatada a presença de armaduras com perfil ovalado, o que constata a falta de critérios para confecção dessas estruturas, visto que são aços recomendados em cercas para o controle animal, representando uma alternativa em substituição ao arame farpado. Esse perfil ovalado pode ser verificado nas dimensões apresentadas na Figura 84.

Figura 84 – Aço com perfil ovalado. (a) dimensão maior. (b) dimensão menor



Fonte: Autor (2022)

Outro ponto a ser destacado é a estrutura de concreto do suporte, com medidas de seus elementos estruturais que variam de 25 mm a 38 mm de espessura, chegando a 48 mm em suas extremidades, vide Figura 85. Considerando que essas estruturas estão expostas as intempéries e em região próxima ao mar, pode-se considerar como Classe de Agressividade Ambiental (CAA), nível III e agressividade Forte, por ser uma área marinha, conforme tabela 6.1 da NBR 6118 (ABNT, 2023) - demonstrada no Quadro 5.

Os locais de fabricação desses suportes não são dotados de controle tecnológico do concreto e os traços são realizados de forma empírica, principalmente no que se refere a dosagem da água de amassamento, suficiente para favorecer a trabalhabilidade e preencher mais facilmente a forma, o que pôde ser verificado em visita realizada em alguns locais de fabricação dessas estruturas. Esse procedimento desencadeia a baixa durabilidade do concreto por favorecer a porosidade e diminuir a resistência. De Oliveira *et al.* (2017) evidenciou que dosagens empíricas podem ter relação a/c elevados, pelo uso inadequado da água, chegando a valores de 0,63 e 0,66.

Quadro 5 - Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

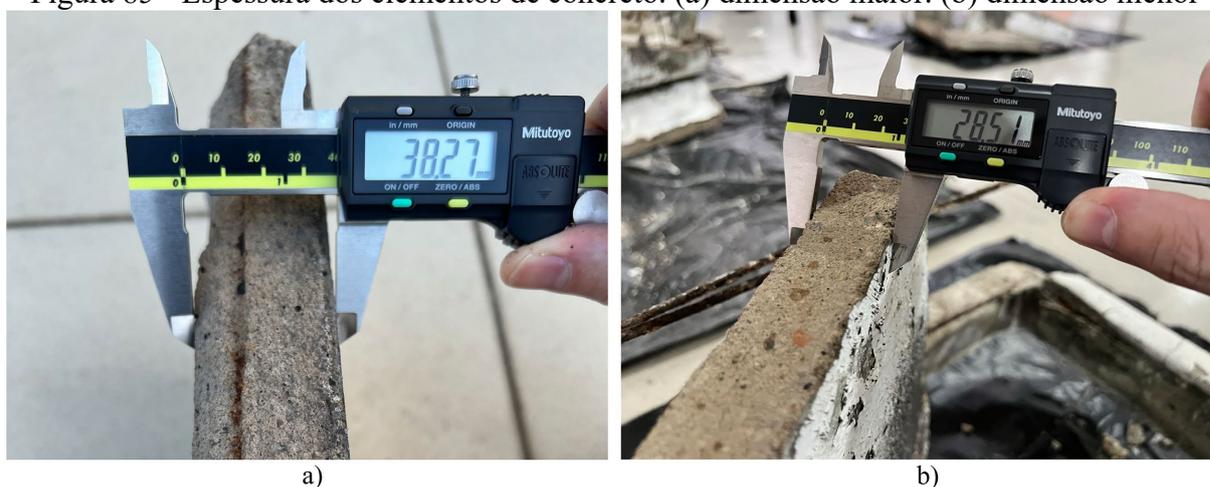
^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT (2023)

Figura 85 - Espessura dos elementos de concreto. (a) dimensão maior. (b) dimensão menor



Fonte: Autor (2022)

Com risco de deterioração considerado grande e dentro da classe de agressividade III, os valores mínimos a serem adotados para a relação a/c, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023) são menores ou iguais a 0,50, conforme demonstrado na tabela 7.1 da referida norma e constante na Tabela 2.

Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade (Tabela 6.1 da NBR 6118)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: ABNT (2023)

Aspectos relacionados a norma quanto ao cobrimento atuando como um fator protetor da armadura, igualmente estão fora de norma, pois o critério mínimo a ser adotado para as estruturas do tipo laje exigem cobrimento de 35 mm para a classe de agressividade ambiental III, segundo a tabela 7.2 da NBR 6118 (ABNT, 2023) exposta no Quadro 6.

O cobrimento do concreto apresentava pouca ou quase nenhuma espessura, tendo pouco efeito sobre a proteção da armadura. Na Figura 86 é possível verificar cobrimentos variando de 1,85 mm a 10,04 mm, todos inferiores a necessidade mínima de 35 mm para classe de agressividade ambiental III, em concordância com a NBR 6118 (ABNT, 2023).

Figura 86 – Cobrimento da armadura: (a) dimensão maior; (b) dimensão menor



Fonte: Autor (2022)

Quadro 6 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1 da NBR 6118)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	40	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

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

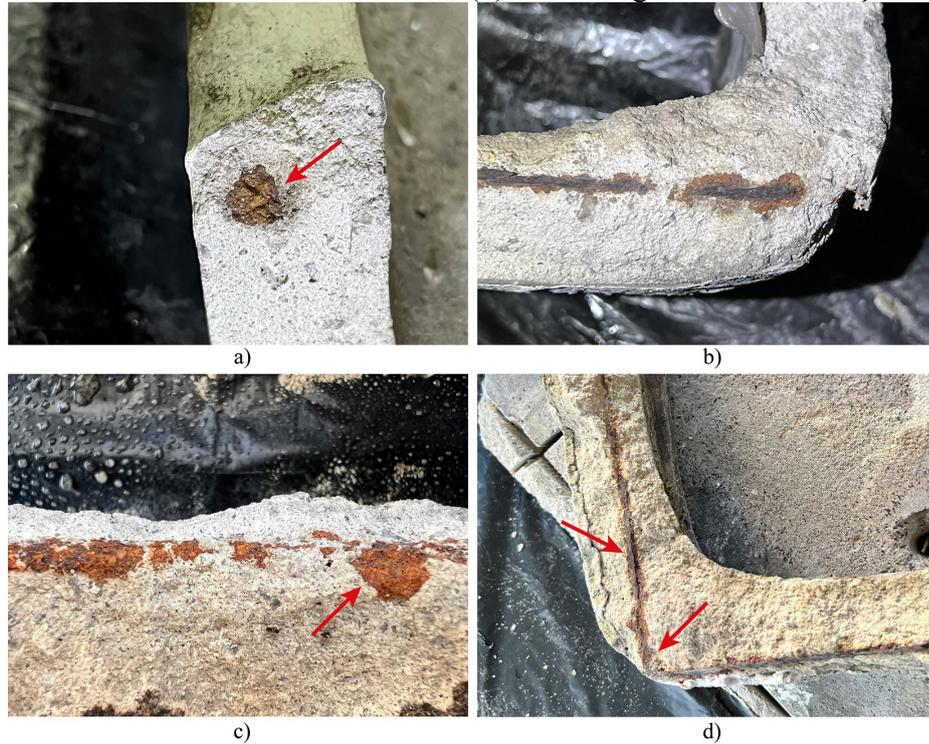
^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: ABNT (2023)

Algumas armaduras encontravam-se em estágio de corrosão avançada, mas não apresentavam rachaduras radiais provenientes das pressões ocasionadas pela expansão do processo corrosivo do aço, o que demonstra porosidade elevada do concreto. Devido a quantidade elevada de poros do concreto, os produtos da corrosão pressionam esses espaços vazios sem gerar força suficiente para a fissuração, a exemplo da Figura 87.

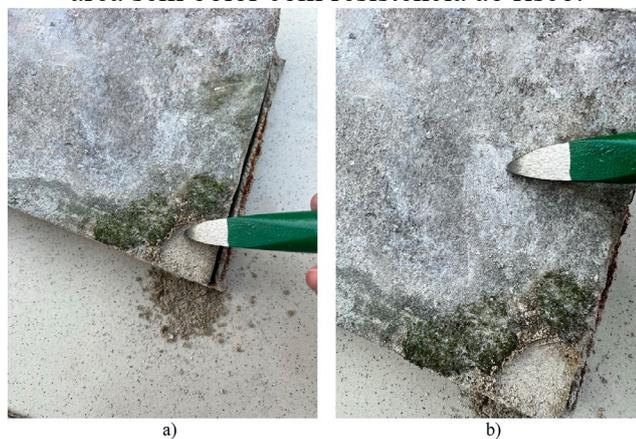
Figura 87 – Corrosão elevada e generalizada do aço: (a) em corte; (b) seção longitudinal; (c) corrosão na massa de concreto; (d) corrosão generalizada do aço



Fonte: Autor (2022)

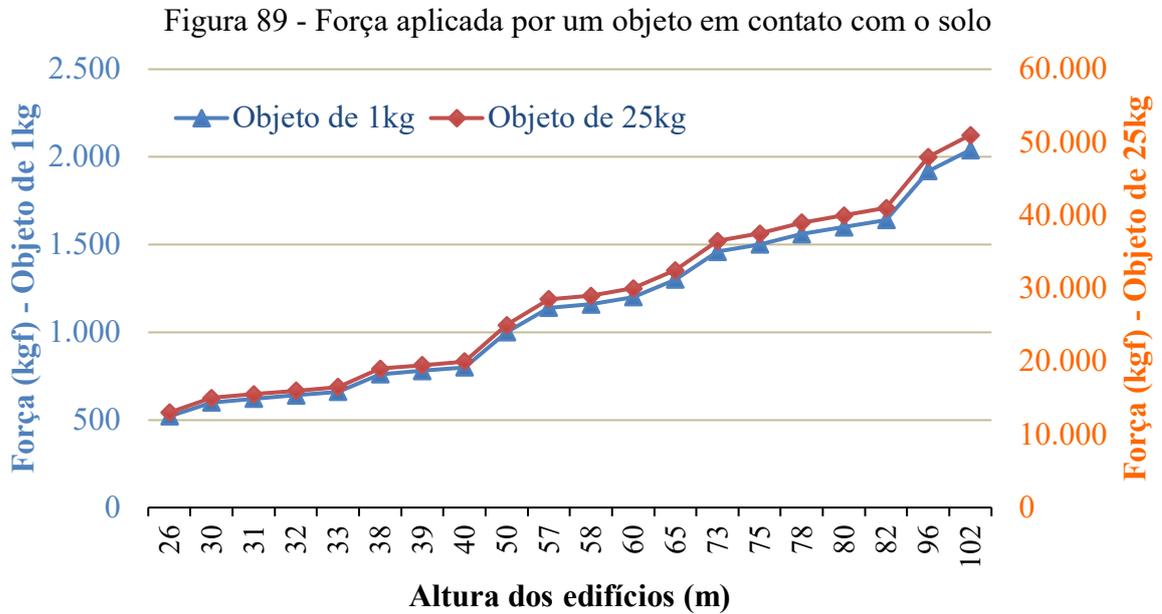
Durante a análise das manifestações patológicas, em locais com bolor, o concreto apresentava pulverulência. Com um pontalete fez-se pressão sobre a área afetada, que não demonstrou qualquer tipo de resistência ao risco; em locais onde não se verificava a presença do bolor, o mesmo procedimento não ocasionou qualquer tipo de descaracterização do concreto, vide Figura 88.

Figura 88 – Presença de bolor no concreto: (a) área com bolor sem resistência ao risco; (b) área sem bolor com resistência ao risco.



Fonte: Autor (2022)

Em um estudo de Silva e Monteiro (2020) sobre suportes para aparelhos de ar-condicionado, calculou-se a força (kgf) que partes de um suporte de concreto exercem ao cair no solo, para objetos de 1 kg e 25 kg, partindo de alturas de 26 m até 102 m, vide Figura 89.



Fonte: Silva e Monteiro (2020)

Parte de um suporte de concreto armado do estudo de caso foi coletado no piso de estacionamento, após se desprender devido a ruína provocada pelos processos de corrosão da armadura, submetendo-se a pesagem em balança com precisão de 2g, o resultado foi o peso de 326 g e medida aproximada de 12,5 cm de comprimento, conforme Figura 90.

Figura 90 – Parte de um suporte de concreto armado coletado no piso da edificação: (a) dimensões da peça; (b) peso da peça



Fonte: Autor (2022)

Um exemplo da ameaça que partes de um suporte de concreto armado podem trazer ao desprender e cair ao solo, pode ser visto no dimensionamento de Silveira (2011). Baseado nesse modelo, adotou-se uma altura de 45 m, baseando-se no pavimento 14 do edifício e adotando-se a Equação (1).

$$F = \frac{M \cdot g \cdot H}{D} \quad (1)$$

Onde:

F: força (N);

M: massa do corpo (kg);

g: aceleração da gravidade (m/s²);

H: altura (m);

D: dureza de um piso de concreto (m).

Procede-se com o cálculo:

$$F = \frac{0,326 \times 10 \times 45}{0,05} = 2.934 \text{ N}$$

Portanto, tem-se:

$$F = 293,4 \text{ kgf}$$

Logo, esse fragmento pode atingir o solo com uma força de 293,4 kgf, facilmente infligindo em dano severo a pessoas e veículos. Partes maiores podem cair e ao atingir o piso partir-se em menores fragmentos, assim como atingir os suportes inferiores e facilitar que outras partes já soltas possam-se desprender.

Exemplos de deterioração dos suportes de concreto armado

Apesar da degradação ser observada na parte externa dos suportes, por ser um local de fácil acesso, as faces internas possuem o mesmo processo de deterioração, com o agravante de estarem escondidas pelos aparelhos de ar-condicionado. Ao somar as degradações das faces

interna e externa e toda a fragilidade estrutural demonstrada, pode-se considerar o quão frágil essa estrutura encontra-se na fachada, vide Figura 91.

Figura 91 – Corrosão da armadura na face interna do suporte de concreto armado para ar-condicionado: (a) deslocamento do concreto; (b) corrosão avançada da armadura



Fonte: Autor (2022)

Realizaram-se vistorias de forma não sistemática em alguns suportes de concreto armado no bairro de Boa Viagem, uma vez que a região está localizada a poucos metros da zona de arrebatamento das ondas do mar e está sujeita a uma influência direta do ataque por íons cloretos. As imagens tornam notável o desgaste dos suportes, conforme visto na Figura 92. Importante ressaltar que essa análise não integra o estudo de caso.

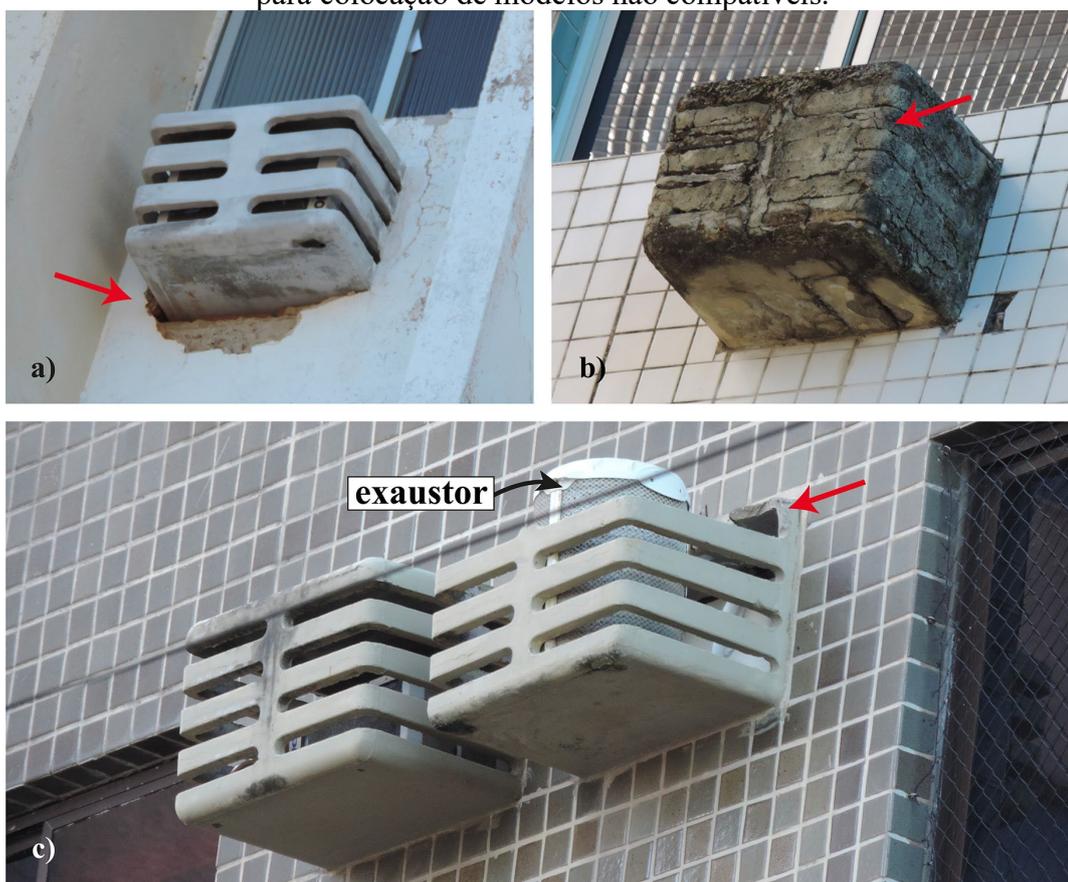
Figura 92 – Suportes de concreto armado para ar-condicionado no bairro de Boa Viagem: (a) corrosão avançada e vegetação; (b) colapso parcial; (c) deslocamento do concreto; (d) corrosão avançada



Fonte: Autor (2022)

Além do já exposto, o mau uso desses suportes eleva ainda mais as possibilidades de acidentes, infiltrações, colapsos parciais, principalmente quando são fragmentados para utilização com outros sistemas de refrigeração não compatíveis com o modelo, deixando-os ainda mais expostos as intempéries, vide Figura 93.

Figura 93 – Utilização inadequada dos suportes de concreto armado: (a) falha na execução, suscetível a infiltrações na fachada; (b) reparo executado sem eficiência; (c) quebra do suporte para colocação de modelos não compatíveis.



Fonte: Autor (2022)

5 CONCLUSÃO

Este capítulo apresenta as conclusões após análise estatística sobre os tipos de suportes para aparelhos de ar-condicionado das edificações no município de Recife, além dos fatores ambientais que interferem na degradação do concreto armado e a apresentação das manifestações patológicas e da causa da corrosão da armadura nos suportes de concreto armado do tipo janela, de uma edificação utilizada como estudo de caso.

A partir da observação dos aspectos ambientais foi possível verificar condições propícias ao desgaste prematuro do concreto, relacionado à umidade relativa do ar e temperaturas elevadas ao longo de todo o ano, a planicidade da região e proximidade com o mar, assim como a ocorrência de chuva em todos os meses do ano, associada a vento do tipo rajada, superior a 3 m/s.

Com a análise estatística constatou-se que 49,5% das construções analisadas possuem algum tipo de suporte externo para os aparelhos de ar-condicionado. Quando se analisa o tipo de suporte adotado, os de concreto armado estão presentes em 69% das construções, enquanto outros materiais como o metálico, fibra de vidro ou plásticos, representam 31%.

As construções têm a sua vida útil associada à preservação de seus componentes, que pode durar alguns anos ou décadas. Edificações com mais de 20 anos desde a construção representam 87% no município de Recife, e 31% estão com mais de 50 anos. A quantidade de construções antigas depara-se com a necessidade de manutenções e reparos constantes no sentido de preservar a sua existência.

O efeito barreira que a construção pode infligir ao reter parte dos íons cloretos é visto na densidade de edificações com mais de um pavimento no bairro de Boa Viagem, que possui 2.570 construções de frente para o mar, além da região central no bairro da Boa Vista, com 1.125 construções. Quando a análise se refere à altura das edificações o bairro de Boa Viagem possui 42 edifícios com altura superior a 75 m, ao contrário dos demais bairros que variam de 1 construção a 6 construções por bairro.

O estudo de caso composto por dois edifícios residenciais, distantes 6,64 km do mar e que possuem suportes de concreto armado do tipo janela, apresentou a predominância de fissuras superficiais em 99% dos suportes de concreto armado seguida por rachaduras, resultante da corrosão da armadura em 90% do total; já o destacamento do concreto e a ausência de partes dessas estruturas foi identificado em 33%, estando a exposição da armadura corroída e colapso parcial representada em 21% dos casos.

As rachaduras quando classificadas pelo nível de deterioração de 1 a 3 apresentaram um diagnóstico relativo à altura. Apesar do pavimento 2 e pavimento 14 estarem em situação de elevada deterioração nos blocos A e B, essa condição está dentro de uma variação em que não é determinante o fator altura, quanto a intensificação da deterioração dos suportes.

O vento predominante é no sentido Sudeste, dessa forma as condições climáticas mais desfavoráveis são nas fachadas Leste e Sul. Quando relaciona-se os suportes com rachaduras generalizadas no bloco A, a fachada Sul aparece com 36%, porém as fachadas Norte e Oeste com 29% estão em áreas mais protegidas quanto aos efeitos do vento e da chuva, sendo a fachada Leste a menos afetada, com apenas 23% das rachaduras. Com relação ao bloco B a fachada com maior desgaste dos suportes é a Norte, com 46%, seguida pela Sul com 32%, a Oeste com 29% e por último a Leste, com 25%.

O ataque por fungos pode estar associado ao processo de degradação da superfície do concreto e até mesmo internamente, mas não pode ser comparado ao processo de carbonatação em termos de gravidade, nada impede, no entanto, que ao longo do tempo a combinação gere processos degenerativos mais intensos.

Com os ensaios de campo comprova-se a carbonatação do concreto em todos os suportes analisados, o que favorece a despassivação da armadura e a consequente corrosão do aço. No ensaio relativo à presença de cloretos obteve-se a existência de cloretos em todos os suportes.

A cidade do Recife apresenta altitudes próximas ao nível do mar, associadas a ventos fortes ao longo do ano, o que facilita a propagação dos cloretos além da região costeira de 150 m. A concentração de edificações altas atua como barreira na contenção dos cloretos vindos do mar, embora tenha pouca interferência quando ocorre os ventos do tipo rajada (superior a 3 m/s), que avançam sobre o continente atingindo quilômetros de distância.

Por fim, as condições da cidade com temperaturas e umidade relativa do ar em patamares elevados durante todo o ano, o concreto do suporte desprovido de controle de qualidade e sem atendimento as características de cobertura mínimas para a região, favorece o acesso de agentes agressivos no concreto de forma acelerada, tanto pelo CO₂ quanto por íons cloretos. Todos esses fatores propiciam a degradação do suporte de concreto armado, independentemente da direção ou altura em que esteja instalado.

O conhecimento do problema e a ação preventiva são imprescindíveis para mitigar os perigos envolta da queda de partes do suporte, que a depender do tamanho e altura podem atingir o solo com força da ordem de toneladas, de forma a incapacitar ou suprimir definitivamente

peessoas ou objetos. Reforça-se, portanto, a necessidade de utilização de materiais com mais resistência aos fatores ambientais, como o alumínio, plástico de engenharia⁴ e aço inoxidável, lembrando que nenhum material está isento de deterioração no decorrer dos anos. Apesar dos novos projetos de edificações residenciais e comerciais incorporarem estruturas específicas para os aparelhos de ar-condicionado, o passivo dos suportes de concreto do tipo janela é elevado.

Sugestões para trabalhos futuros

- Ensaios de migração de cloretos para os suportes de concreto armado;
- Análise da degradação do suporte para aparelhos do tipo *split* em aço;
- Análise da degradação do suporte para aparelhos do tipo *split* em plástico de engenharia;
- Análise do alcance dos íons cloretos por ensaio de vela úmida ou equivalente em distâncias maiores do que 1 km;
- Realizar tratamento prévio do concreto carbonatado com a realcalinização, para evitar um “falso positivo” no ensaio de aspensão com o nitrato de prata.

⁴ São resinas mais estáveis em aplicações que exigem maior resistência mecânica, térmica, à tração de ruptura, química e às intempéries.

REFERÊNCIAS

- AB TELHAS. **Caixa ar condicionado janela concreto**. [1998?] Disponível em: <<https://www.abtelhas.com.br/caixa-ar-condicionado-janela-concreto>>. Acesso em: 9 fev. 2023.
- ADEWUMI, A. A. *et al.* Corrosion behaviour of carbon steel and corrosion resistant steel under elevated temperature and chloride concentration in simulated concrete pore solution. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 25, n. 3, p. 452–467, 2018.
- AHAFONAU, P. **Commander Compass Go**. 2022. Disponível em: <<https://apps.apple.com/br/app/commander-compass-go/id340268949>>. Acesso em: 11 ago. 2022.
- ALMEIDA, F. C. R.; SALES, A. **Ação do meio ambiente sobre as estruturas de concreto**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2018.
- ANDRADE, C. Carbonation Effect on the Chloride Profile. **Current Topics and Trends on Durability of Building Materials and Components - Proceedings of the 15th International Conference on Durability of Building Materials and Components, DBMC 2020**, p. p 929-936, 2020.
- ANDRADE, C.; SARRÍA, J.; ALONSO, C. Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 8, p. 1249–1259, 1 ago. 1999.
- ARMSTRONG, S. The fundamentals of Fungi. **ASHRAE journal**, v. 44, n. 11, p. 18, 2002.
- ASAMOTO, S. *et al.* Study on effects of solar radiation and rain on shrinkage, shrinkage cracking and creep of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 6, p. 590–601, 1 jun. 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2023.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C1202-10: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration**. p. 7, 2010.
- BALESTRA, C. E. T.; REICHERT, T. A.; SAVARIS, G. Contribution for durability studies based on chloride profiles analysis of real marine structures in different marine aggressive zones. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 140–150, 10 maio 2019.
- BARBOSA, E.; FRAGA, J. **Queda de marquise mata idoso e deixa dois feridos no Centro do Recife**. 2022. Disponível em: <<https://www.folhape.com.br/noticias/queda-de-marquise-deixa-uma-pessoa-morta-e-outras-feridas-no-centro-do/218213/>>. Acesso em: 20 fev. 2023.
- BARBOSA, E. R. **Aula I - Revisão de literatura e fontes de informação**. 2021. Disponível em: <<https://biblioteca.musica.ufrn.br/wp-content/uploads/2020/10/Pesquisa-em-bases-de-dados-Aula-1.pdf>>. Acesso em: 6 maio. 2023.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

BONGOCHGETSAKUL, N.; KOKUBO, S. Measurement of Airborne Chloride Particle Sizes Distribution for Infrastructures Maintenance. **Society for Social Management Systems**, v. 7, 2011.

CASTAÑEDA, A. *et al.* Penetration of marine aerosol in a tropical coastal city: Havana. **Atmosfera**, v. 31, n. 1, p. 87–104, 2018.

CHINCHÓN-PAYÁ, S.; ANDRADE, C.; CHINCHÓN, S. Indicator of carbonation front in concrete as substitute to phenolphthalein. **Cement and Concrete Research**, v. 82, p. 87–91, 1 abr. 2016.

CHO, B. *et al.* Study on the heat-moisture transfer in concrete under real environment. **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 124–129, 1 fev. 2017.

COLE, I. S. *et al.* Holistic model for atmospheric corrosion: Part 2 - Experimental measurement of deposition of marine salts in a number of long range studies. <http://dx.doi.org/10.1179/147842203225008886>, v. 38, n. 4, p. 259–266, dez. 2013.

COMBRINCK, R.; BOSHOFF, W. P. Tensile properties of plastic concrete and the influence of temperature and cyclic loading. **Cement and Concrete Composites**, v. 97, p. 300–311, 1 mar. 2019.

CONCREARTE. **Caixas de passagem de ar condicionado**. [201-?]. Disponível em: <<http://concreartepremoldados.com.br/ar/>>. Acesso em: 9 fev. 2023.

DA SILVA, B. C. L.; GACHET, L. A.; LINTZ, R. C. C. Análise microscópica de concreto pigmentado com resíduos de borracha aplicado em piso intertravado. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 4, p. 1–16, 11 dez. 2020.

DEAN A.G.; SULLIVAN K.M.; SOE M.M. **OpenEpi: Open Source Epidemiologic Statistics for Public Health**. Versão: www.OpenEpi.com, atualizado em: 06 abr. 2013. Acesso em: 15 jun. 2022.

DE MEDEIROS-JUNIOR, R. A. *et al.* Chloride penetration into concrete in an offshore platform-analysis of exposure conditions. **Ocean Engineering**, v. 103, p. 78–87, 15 jul. 2015.

DE OLIVEIRA, B. *et al.* Estudo de Dosagens Visando Obter Concretos para Obras de Pequeno Porte. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 13, n. 1, 1 jan. 2017.

DE SOUSA, C. A. C. Corrosão e degradação em estruturas de concreto. Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. Em: RIBEIRO, D. V. (ORG) (Ed.). **Princípios da corrosão eletroquímica**. 2ª ed. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2018. p. 11–32.

DE WINDT, L.; DEVILLERS, P. Modeling the degradation of Portland cement pastes by biogenic organic acids. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 8, p. 1165–1174, 1 ago. 2010.

D'ORAZIO, M. *et al.* Effects of water absorption and surface roughness on the bioreceptivity of ETICS compared to clay bricks. **Building and Environment**, v. 77, p. 20–28, 1 jul. 2014.

EUROPEAN STANDARD. **EN 13295: Products and systems for the protection and repair of concrete structures - test methods - determination of resistance to carbonation**. European. 2004

ESA. **Global sea-surface salinity**. 2019. Disponível em: <https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2019/05/Global_sea-surface_salinity>. Acesso em: 12 dez. 2022.

FAN, Y. F. *et al.* Deterioration of compressive property of concrete under simulated acid rain environment. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 10, p. 1975–1983, 1 out. 2010.

FILHO, A. C.; CARMONA, T. G. Boletín Técnico 03: Fissuração nas estruturas de concreto. **Alconpat Internacional**, p. 18, 2013.

FONSECA, D.; AGUIAR, P.; COUTINHO, K. **Desabamento de marquise deixa ao menos quatro mortos e 12 feridos em Aliança; veja vídeo**. 2022. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pe/paranaguara/noticia/2022/09/12/desabamento-de-marquise-deixa-mortos-e-feridos-em-alianca.ghtml>>. Acesso em: 20 fev. 2023.

FRANÇOIS, R.; LAURENS, S.; DEBY, F. **Corrosion and its Consequences for Reinforced Concrete Structures**. Elsevier, 2018.

GHOURCHIAN, S. *et al.* Performance of passive methods in plastic shrinkage cracking mitigation. **Cement and Concrete Composites**, v. 91, p. 148–155, 1 ago. 2018.

GIULIETTI, N. *et al.* Automated measurement system for detecting carbonation depth: Image-processing based technique applied to concrete sprayed with phenolphthalein. **Measurement**, v. 175, p. 109142, 1 abr. 2021.

GOOGLE. **Google Maps**. 2022. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-8.0472069,-34.8972663,17z>>. Acesso em: 7 set. 2022.

GOOGLE LLC. **Google Earth Pro**. 2022. Disponível em: <kh.google.com>. Acesso em: 5 set. 2022.

GUERRA, J. C. *et al.* Atmospheric corrosion of low carbon steel in a coastal zone of Ecuador: Anomalous behavior of chloride deposition versus distance from the sea. **Materials and Corrosion**, v. 70, n. 3, p. 444–460, 1 mar. 2019.

GUERRERO, R. T.; DA SILVEIRA, R. M. B. **Glossário Ilustrado de Fungos: termos e conceitos aplicados à micologia**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2003.

HELEN; NICOLE KOSTIS. **Sea Surface Temperature, Salinity and Density**. 2019. Disponível em: <<https://svs.gsfc.nasa.gov/3652>>. Acesso em: 12 dez. 2022.

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

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

HELENE, P. R. L.; FIGUEIREDO, A. Corrosão de armaduras para concreto armado. **Revista Engenharia Mackenzie PP - São Paulo**, v. 71, n. 180, p. 7–10, 1986.

HSU, T. T. C. Unified theory of reinforced concrete. **Unified Theory of Reinforced Concrete**, p. 1–313, 1 jan. 2017.

INMET. **Normais climatológicos do Brasil (1991-2020)**. 2022. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/normais>>. Acesso em: 22 dez. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados**. 2022. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/recife.html>>. Acesso em: 14 dez. 2022.

INSTITUTO MAMIRAUÁ. **BioEstat 5.3**. 2022. Disponível em: <<https://www.mamiraua.org.br/downloads/programas/>>. Acesso em: 6 maio. 2022

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14683 - Thermal bridges in building construction — Linear thermal transmittance — Simplified methods and default values**. Switzerland: ISO, 2017a. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/65706.html>>. Acesso em: 6 set. 2022

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10211 - Thermal bridges in building construction — Heat flows and surface temperatures — Detailed calculations**. Switzerland: ISO, 2017b. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/65710.html>>. Acesso em: 6 set. 2022

IOWA STATE UNIVERSITY. **IEM - Custom Wind Roses**. 2022. Disponível em: <https://mesonet.agron.iastate.edu/sites/dyn_windrose.phtml?station=SBRF&network=BR__ASOS&bin0=2&bin1=5&bin2=7&bin3=10&bin4=15&bin5=20&conv=from&units=mps&nsector=36&fmt=svg&dpi=300&year1=2010&month1=1&day1=1&hour1=0&minute1=0&year2=2022&month2=12&day2=31&>. Acesso em: 24 fev. 2023.

ISTEITA, M.; XI, Y. The effect of temperature variation on chloride penetration in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 73–82, 15 dez. 2017.

JAKOBSEN, U. H.; DE WEERDT, K.; GEIKER, M. R. Elemental zonation in marine concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 85, p. 12–27, 1 jul. 2016.

JIANG, J. H.; YUAN, Y. S. Quantitative models of climate load and its effect in concrete structure. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 102–107, 1 abr. 2012.

JIANG, L. *et al.* A critical review of the physiological, ecological, physical and chemical factors influencing the microbial degradation of concrete by fungi. **Building and Environment**, v. 214, p. 108925, 15 abr. 2022.

JIN, H. *et al.* Influence of the rainfall intensity on the chloride ion distribution in concrete with different levels of initial water saturation. **Construction and Building Materials**, v. 281, p. 122561, 26 abr. 2021.

JIN, L. *et al.* Developing a model for chloride transport through concrete considering the key factors. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. e01168, 1 dez. 2022.

JIN, X. *et al.* A Study on the Insulation Effect of the Roof Greening Overhead Structure in Hot-moist Regions. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 330, n. 2, p. 022018, 1 out. 2019.

KIM, T. K. *et al.* Prediction of Chloride Penetration Depth Rate and Diffusion Coefficient Rate of Concrete from Curing Condition Variations due to Climate Change Effect. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 13, n. 1, p. 1–13, 1 dez. 2019.

KWAK, H.-G.; HA, S.; WEISS, W. J. Experimental and Numerical Quantification of Plastic Settlement in Fresh Cementitious Systems. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 10, p. 951–966, 6 mar. 2010.

LABEEE. **Laboratório de Eficiência Energética em Edificações**. 2022. Disponível em: <<https://labeee.ufsc.br/pt-br/downloads/softwares/analysis-sol-ar>>. Acesso em: 25 fev. 2023.

LEE, J. S.; MOON, H. Y. Salinity distribution of seashore concrete structures in Korea. **Building and Environment**, v. 41, n. 10, p. 1447–1453, 1 out. 2006.

LINARES-ALEMPARTE, P.; ANDRADE, C.; BAZA, D. Porosity and electrical resistivity-based empirical calculation of the oxygen diffusion coefficient in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 198, p. 710–717, 20 fev. 2019.

LIU, J. *et al.* Atmospheric chloride deposition in field concrete at coastal region. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 1015–1022, 30 nov. 2018.

LORENÇATO, L. DE A. **Relatório técnico: laudos de inspeção de marquises da região central da cidade de Porto Alegre/RS**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

LOUZADA PRÉ MOLDADOS CAMPINAS. **Caixa para Ar Condicionado**. 2018. Disponível em: <<http://louzadapremoldados.com.br/caixa-para-ar-condicionado>>. Acesso em: 9 fev. 2023.

LP HOME CENTER. **Caixa Concreto ar-condicionado 10.000 á 12.000BTus | LP | Lojão do Ped - LP Home Center | Materiais de Construção**. [201-?] Disponível em: <<https://www.lojaodopedreiro.com.br/produto/caixa-de-concreto-para-ar-condicionado-de-10000-a-12000btus-lp.html>>. Acesso em: 9 fev. 2023.

MAGOS, M. *et al.* Application of the factor method to the prediction of the service life of external paint finishes on façades. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 49, n. 12, p. 5209–5225, 1 dez. 2016.

MARO, D. *et al.* Aerosol dry deposition in the urban environment: Assessment of deposition velocity on building facades. **Journal of Aerosol Science**, v. 69, p. 113–131, 1 mar. 2014.

MEDEIROS, M. H. F. DE; RÉUS, G. C.; PONTES, C. V. Nitrato de prata como método colorimétrico para detecção da penetração de cloretos: análise crítica. **Revista Técnico-Científica**, 22 ago. 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª ed. São Paulo: Nicole Pagan Hasparyk, 2014.

MEIRA, G. R. *et al.* Modelling sea-salt transport and deposition in marine atmosphere zone – A tool for corrosion studies. **Corrosion Science**, v. 50, n. 9, p. 2724–2731, 1 set. 2008.

MEIRA, G. R. *et al.* Behaviour of Surface Chloride Concentration in Concretes Subjected to Field Exposure in Marine Atmosphere Zone. **XV International Conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC 2020)**, p. 921–928, 25 set. 2020.

MEIRA, G. R.; FERREIRA, P. R.; ANDRADE, C. Long-Term Chloride Accumulation on Concrete Surface in Marine Atmosphere Zone-Modelling the Influence of Exposure Time and Chloride Availability in Atmosphere. **Corrosion and Materials Degradation 2022, Vol. 3, Pages 349-362**, v. 3, n. 3, p. 349–362, 12 jul. 2022.

MIN, H. *et al.* Coupled heat and moisture transport in damaged concrete under an atmospheric environment. **Construction and Building Materials**, v. 143, p. 607–620, 15 jul. 2017.

MOELICH, G. M. *et al.* The influence of solar radiation on plastic shrinkage cracking in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 123, p. 104182, 1 out. 2021.

MORILLAS, H. *et al.* Decay processes in buildings close to the sea induced by marine aerosol: Salt depositions inside construction materials. **Science of The Total Environment**, v. 721, p. 137687, 15 jun. 2020.

MOURA, J. *et al.* Pontes térmicas em estruturas de concreto. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 11, n. 11, p. e020027–e020027, 18 dez. 2020.

NAKADA, K.; MATSUZAWA, K.; KAGE, T. **Applicability of Vector Autoregressive Model to Estimation of Internal Moisture Condition of Concrete Exposed to Ordinary Natural Environment**, v. 86, n. 784, p. 871–880, 30 jun. 2021.

NĚMEČEK, J. *et al.* Simulation of chloride migration in reinforced concrete. **Applied Mathematics and Computation**, v. 319, p. 575–585, 15 fev. 2018.

NETO, P. L. DE O. C. **Estatística**. 2ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2002.

NEVES, S. **A História do Ar-Condicionado**. 2018. Disponível em: <<https://www.cemeq.ufg.br/n/103153-a-historia-do-ar-condicionado>>. Acesso em: 28 nov. 2022.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NÓVOA, X. R. Electrochemical aspects of the steel-concrete system. A review. **Journal of Solid State Electrochemistry**, v. 20, n. 8, p. 2113–2125, 1 ago. 2016.

OSWALD, F. Hong Kong Residential Buildings with Reduction of the Utilisation of Air Conditioning. **International Journal of Contemporary Architecture**, v. 4, n. 2, 2017.

OTIENO, M.; IKOTUN, J.; BALLIM, Y. Experimental investigations on the influence of cover depth and concrete quality on time to cover cracking due to carbonation-induced corrosion of steel in RC structures in an urban, inland environment. **Construction and Building Materials**, v. 198, p. 172–181, 20 fev. 2019.

PAGE, M. J. *et al.* PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, 29 mar. 2021.

PAKKALA, T. A. *et al.* Predicted corrosion rate on outdoor exposed concrete structures. **International Journal of Building Pathology and Adaptation**, v. 37, n. 5, p. 679–698, 5 set. 2019.

PEC MAQ PEC FORMAS. **Fôrmas Caixa de Ar Cond. 7500 a 9000 BTU c/grade**. [2023]. Disponível em: <<https://www.pecformas.com.br/produto/515>>. Acesso em: 9 fev. 2023.

PELLIZZER, Giovanni Pais. **Sobre a modelagem numérica da difusão de cloretos no concreto: uma abordagem pelo método dos elementos de contorno com aplicação de modelos de confiabilidade e otimização**. 2019. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-24062019-094143/publico/DO2019_GiovaniPaisPellizzer.pdf.

PERINI, K. *et al.* The use of vertical greening systems to reduce the energy demand for air conditioning. Field monitoring in Mediterranean climate. **Energy and Buildings**, v. v 143, p. p 35-42, 15 maio 2017.

PFEFFERMANN, O. **Les fissures dans les constructions conséquence de phénomènes physiques naturels**. Annales de L'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics. **Anais**. Bruxelles: 1968.

PIMIENGA, P. *et al.* Durability performance assessment of non-standard cementitious materials for buildings: a general method applied to the French context (supplementary material). **RILEM Technical Letters**, v. 1, p. 102–108, 2016.

PONGSAKSAWAD, W. *et al.* Chloride distribution model and corrosion map of structural steels for tropical climate in Thailand. **Science of The Total Environment**, v. 787, p. 147465, 15 set. 2021.

PONTES, C. V. *et al.* Procedimento para detectar a penetração de cloretos com nitrato de prata em concreto carbonatado. **Revista ALCONPAT**, v. 11, n. 2, p. 76 – 88–76 – 88, 1 maio 2021a.

PONTES, C. V. *et al.* Silver nitrate colorimetric method to detect chloride penetration in carbonated concrete: How to prevent false positives. **Journal of Building Engineering**, v. 34, p. 101860, 1 fev. 2021b.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

PREFEITURA DO RECIFE. **Caracterização do território**. [2022?]. Disponível em: <<https://www2.recife.pe.gov.br/pagina/caracterizacao-do-territorio>>. Acesso em: 14 dez. 2022.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. QGIS Association, , 2022. Disponível em: <<https://qgis.org/en/site/>>. Acesso em: 7 maio. 2023

QIAN, R. *et al.* Effects of various inlet-gas mediums on apparent permeability of concrete under steady-state flow: Comparison between carbon-dioxide and oxygen. **Cement and Concrete Composites**, v. 119, p. 103995, 1 maio 2021.

REAL, L. V. *et al.* Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata para avaliação da penetração de cloretos em concreto: estado da arte. **Revista ALCONPAT**, v. 5, n. 2, p. 151–161, 2015.

REI ARTEFATOS DE CONCRETO. **Caixa para ar condicionado**. 2021. Disponível em: <<https://www.reiartefatosdeconcreto.com.br/164-produto-caixa-para-ar-condicionado-sorriso-mt>>. Acesso em: 9 fev. 2023.

RIBEIRO, D. V. (ORG). Corrosão e degradação em estruturas de concreto. Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. Em: RIBEIRO, D. V. (ORG) (Ed.). **Estrutura dos poros e mecanismos de transporte no concreto**. 2^a ed. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2018a. p. 51–95.

RILEM TC. CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth. **Materials and Structures**, v. 21, n. 6, p. 453–455, 1988.

ROCHA, J. H. A. *et al.* Análise da Profundidade de Fissuras em Concreto com Termografia Infravermelha. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 2, n. 3, 28 ago. 2017.

RODRÍGUEZ-ALGECIRAS, J. *et al.* Influence of aspect ratio and orientation on large courtyard thermal conditions in the historical centre of Camagüey-Cuba. **Renewable Energy**, v. 125, p. 840–856, 1 set. 2018.

RYU, D. W.; KO, J. W.; NOGUCHI, T. Effects of simulated environmental conditions on the internal relative humidity and relative moisture content distribution of exposed concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 1, p. 142–153, 1 jan. 2011.

SANTANA, D. **Queda de marquise deixa uma pessoa ferida em Brasília Teimosa, Zona Sul do Recife**. 2021. Disponível em: <<https://jc.ne10.uol.com.br/pernambuco/2021/03/12035951-queda-de-marquise-deixa-uma-pessoa-ferida-em-brasilia-teimosa-zona-sul-do-recife.html>>. Acesso em: 20 fev. 2023.

SHEN, X. HAN *et al.* Combine ingress of chloride and carbonation in marine-exposed concrete under unsaturated environment: A numerical study. **Ocean Engineering**, v. 189, p. 106350, 1 out. 2019.

SHI, T. *et al.* Vertical temperature gradients of concrete box girder caused by solar radiation in Sichuan-Tibet railway. **Journal of Zhejiang University-SCIENCE A** 2022 23:5, v. 23, n. 5, p. 375–387, 27 maio 2022.

SILVA, W. W.; MONTEIRO, E. C. B. As manifestações patológicas e os riscos dos protetores de aparelhos de ar condicionado em edificações. **Revista ALCONPAT**, v. 10, n. 3, p. 377–393, 2020.

SILVEIRA, F. L. DA. **Qual o peso equivalente que uma pedra de massa igual a 1 kg chega ao solo, jogada do 6 andar de um edifício?** 2011. Disponível em: <<https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=qual-o-peso-equivalente-que-uma-pedra-de-massa-igual-a-1-kg-chega-ao-solo-jogada-do-6-andar-de-um-edificio>>. Acesso em: 31 jan. 2023.

SILVESTRO, L.; ROMANO, F. S.; MOLIN, D. C. C. D. Penetração de cloretos em concretos expostos em zona de atmosfera marinha por um período de 9 anos. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 1, p. 101–118, 13 nov. 2020.

SKJOLSVOLD, O.; KANSTAD, T. **Laboratory testing facilities**. [2018?]. Disponível em: <<https://www.sintef.no/projectweb/endurcon/testing-facilities/>>. Acesso em: 11 dez. 2022.

SNYDER, A. Testing Concrete for Chloride Penetration. **RJ Lee Group**, p. 4, 2022.

TANAKA, S.; SAKAI, Y. Minimal Drilling Technique to Measure Chloride-Penetration Depth and Carbonation Depth in Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 9, p. 04020236, 18 jun. 2020.

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2020.

TOPOGRAPHIC. **Mapa topográfico Recife (altitude)**. [201-?]. Disponível em: <<https://pt-br.topographic-map.com/map-6r951/Recife/>>. Acesso em: 12 dez. 2022.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**: CBI forskning. [s.l.] Cement- och betonginst., 1982.

UDAWATTHA, C. *et al.* Mold growth and moss growth on tropical walls. **Building and Environment**, v. 137, p. 268–279, 1 jun. 2018.

VALENÇA, D. A. DE A. **Proposição de uma metodologia para a avaliação do aproveitamento da energia eólica em ambiente urbano**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 31 jan. 2010.

VIEIRA PONTES, C. *et al.* Procedimento para detectar a penetração de cloretos com nitrato de prata em concreto carbonatado. **Revista ALCONPAT**, v. 11, n. 2, p. 76–88, 1 maio 2021.

WANG, Z. *et al.* Deterioration of fracture toughness of concrete under acid rain environment. **Engineering Failure Analysis**, v. 77, p. 76–84, 1 jul. 2017.

XU, Z. *et al.* Effects of temperature, humidity and CO₂ concentration on carbonation of cement-based materials: A review. **Construction and Building Materials**, v. 346, p. 128399, 5 set. 2022.

YAKOVLEVA, G. *et al.* Metabolic Activity of Micromycetes Affecting Urban Concrete Constructions. **Scientific World Journal**, v. 2018, 2018.

ZHANG, L. *et al.* Experimental research and mechanism analysis on chloride ingress at different concrete zone along altitude in marine environment. Part 1. Moisture distribution. **Construction and Building Materials**, v. 180, p. 629–642, 20 ago. 2018.

ZHANG, M. *et al.* Temperature Effect of Concrete Hydration Heat under Atmospheric Wind Based on Fluid-Solid Coupling. **KSCE Journal of Civil Engineering** 2022 26:3, v. 26, n. 3, p. 1177–1187, 17 dez. 2021.

ZHANG, Y.; LUZIO, G. DI; ALNAGGAR, M. Coupled multi-physics simulation of chloride diffusion in saturated and unsaturated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 292, p. 123394, 19 jul. 2021.

ZHANG, Y.; ZHANG, M. Transport properties in unsaturated cement-based materials – A review. **Construction and Building Materials**, v. 72, p. 367–379, 15 dez. 2014.

ZHOU, Y. *et al.* Experimental investigation into the seismic behavior of squat reinforced concrete walls subjected to acid rain erosion. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 102899, 1 dez. 2021.