



UNIVERSIDADE
CATÓLICA
DE PERNAMBUCO



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PEDRO ADOLFO RODRIGUES MACIEL

BALANÇO DE CO₂ (DIÓXIDO DE CARBONO), NO BLOCO G DA
UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO

Recife, 15 de agosto de 2022

PEDRO ADOLFO RODRIGUES MACIEL

BALANÇO DE CO₂ (DIÓXIDO DE CARBONO), NO BLOCO G DA
UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO

Dissertação apresentada à Universidade Católica de Pernambuco como requisito parcial, exigido pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração em Engenharia das Construções e na linha de pesquisa em Tecnologia das Construções, orientada pelo Professor Doutor Romilde Almeida de Oliveira.

RECIFE

2022

M152b

Maciel, Pedro Adolfo Rodrigues

Balanço de Co₂ (dióxido de carbono), no Bloco G da Universidade Católica de Pernambuco / Pedro Adolfo Rodrigues Maciel, 2022.

131 f. : il.

Orientador: Romilde Almeida de Oliveira
Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Mestrado em Engenharia Civil, 2022.

1. Concreto armado - corrosão. 2. Carbonatação.
I. Título.

CDU 624.012.45

Luciana Vidal - CRB 4/1338

TERMO DE APROVAÇÃO

PEDRO ADOLFO MACIEL

BALANÇO DE CO₂ (DIÓXIDO DE CARBONO), NO BLOCO G DA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO

Dissertação de Mestrado submetida ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, com ênfase em Tecnologia das Construções.

Aprovada por:



Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira
(Orientador – Engenharia Civil – UNICAP)



Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira
(Examinador Interno – Engenharia Civil - UNICAP)

Prof. Dr. João Manoel Freitas Mota
(Examinador Externo – Engenharia Civil - IFPE)

Recife, PE – Brasil
Agosto, 2022

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, que me iluminou nesta longa e árdua caminhada e a minha família, minha esposa Andréia, meus filhos: Clara, Pedrinho, Bento e Bernardo.

AGRADECIMENTOS

Neste processo em que a Universidade passou por melhorias e adequações de seus edifícios. Este estudo que teve referencial histórico e técnico, foi constituído para servir como referência à Universidade Católica de Pernambuco, rumo aos 80 anos que preza pela importância em preservação e manutenção de seus prédios. Graças a UNICAP, a qual agradeço, a oportunidade para meu desenvolvimento acadêmico e profissional. A construtora Habitar, através do Eng. Eriberto, que possibilitou e fomentou utilizar sua estrutura já montada no bloco G para extração dos testemunhos analisados. Ao Professor Dr. Romilde Almeida presto meus agradecimentos, além de ter sido o projetista na construção do bloco G, fazendo parte do GTO (Grupo Técnico de Obras), nossas conversas e sua orientação técnica me incentivou a concluir este estudo.

Aos professores da UNICAP, Dra. Roberta Richard, Dra Eliana, Dr. Joaquim Teodoro e nosso examinador externo Dr. João Manoel do IFPE (Instituto Federal de Pernambuco), sempre com suas contribuições e experiência me ajudaram a desenvolver o trabalho. Sobretudo, um agradecimento especial ao arquiteto Alex Lucena, companheiro de trabalho e amigo pessoal, a Eng. Rayssa Valéria, Eng. Leonardo do Valle, e ao estudante e estagiário de Arquitetura Guilherme Costa que de alguma forma contribuíram para enriquecer este estudo acadêmico.

A professora Galba Takaki pelo acesso ao MEV do laboratório do NPCIAMB da UNICAP, ao professor Dr. Marcos Lima da Universidade Federal Rural de Pernambuco e a Profa Dra Roberta Richard pelo auxílio na captura e edição das imagens.

Agradeço a minha esposa Andréia Maciel que me ajudou em casa com meus filhos e nossa cachorrinha Nala que sempre estiveram unidos a mim, nesta empreitada familiar.

"O sopro do Amor, fará aumentar o talento"

Dom Helder Câmara

RESUMO

Esta pesquisa científica tem como foco, elaborar o balanço do CO₂ no bloco G da UNICAP, analisando testemunhos extraídos dos principais elementos estruturais (vigas, pilares e lajes); abordando o histórico da estrutura; método construtivo; parâmetros de projeto, comparando as exigências normativas da época com as atuais e localização geográfica. O edifício em questão, é o Bloco G da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), inaugurado em 1980, localizado na cidade do Recife, a uma distância de 500 m do Rio Capibaribe e 2,02 km do Oceano Atlântico. Com ênfase na identificação da presença de agentes agressivos, principalmente de dióxido de carbono com aspersão de fenolftaleína, mas também íons cloreto, com aspersão de nitrato de prata (AgNO₃), nos testemunhos extraídos dos pilares e vigas das fachadas de maior comprimento do edifício e das lajes, totalizando 90 (noventa) testemunhos analisados, distribuídos entre nove pavimentos. Também foi feita uma análise microscópica do concreto, com a análise dos testemunhos no microscópio eletrônico de varredura (MEV), com sete amostras, a fim de entender sua estrutura correlacionando defeitos e propriedades e identificando as propriedades dos materiais utilizados. Para verificar a resistência à compressão atual da estrutura e comparar com os parâmetros de projeto, foi executado o ensaio de resistência à compressão em sete testemunhos em laboratório especializado. Através dos resultados obtidos podemos verificar quais áreas do edifício são mais afetadas e analisar os resultados das emissões de CO₂ no ambiente e relacionar com o CO₂ captado pela estrutura. A identificação desses agentes demonstra como a estrutura está sofrendo com alta probabilidade de corrosão e degradação, o que leva a maior atenção para recorrência de manutenção e recuperação estrutural e quais agentes em cada posição, tendo em vista sua posição geográfica em relação ao mar e efeito dos ventos da região, além de analisar os parâmetros de projeto utilizados na época em comparação com os atuais e identificar sua evolução e eficiência.

Palavras-chave: Balanço CO₂, Agentes agressivos, Carbonatação.

ABSTRACT

This scientific research aims to show the balance of CO₂ in the block "G" of UNICAP, analyzing specimens extracted from the main structural elements (beams, pillars and slabs); Describe the history of the structure; constructive method; design parameters, comparing the regulatory requirements of the time with the current ones and geographic location. The building in question is "Block G" of the Catholic University of Pernambuco (UNICAP), Built in 1980, located in the city of Recife, at a distance of 500m from the Capibaribe River and 2.02 km from the Atlantic Ocean. Emphasizing the identification of the presence of aggressive agents, mainly carbon dioxide with phenolphthalein spray, but also chloride ions, with silver nitrate (AgNO₃) spray. Specimens extracted from the pillars, slabs and beams of the longest facades of the building. Totaling 90 specimens analyzed, distributed among nine floors. A microscopic analysis of the concrete was also carried out, with the analysis in the scanning electron microscope (MEV), with seven specimens, in order to understand its structure, correlating defects and properties and identifying the properties of the materials used. To verify the concrete compressive strength of the structure and compare it with the design parameters, a compressive strength test was performed on seven specimens in a specialized laboratory. Through the results obtained, we can verify which areas of the building are most affected and analyze the results of CO₂ emission in the environment as related to the CO₂ captured by the structure. The identification of these agents demonstrates how the structure is suffering with a high probability of corrosion and degradation? what kinds of structural maintenance and recovery and which agents in each position on the building, in view of their geographical position in relation to the sea and effect of the region's winds, in addition to analyzing the design parameters used at the time compared to the current ones and identifying their evolution and efficiency.

Keywords: balance CO₂, aggressive agents, carbonation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 1 - Cobrimento das armaduras: NB-1: 1940..... | 22 |
| Figura 2 - Cobrimento das armaduras: NBR 6118:1980 | 23 |
| Figura 3 - Cobrimento relacionado a classe de agressividade ambiental. | 24 |
| Figura 4 - Classes de agressividade ambiental (CAA). | 25 |
| Figura 5 – Classe de Agressividade Ambiental | 32 |
| Figura 6 - Diferentes desempenhos de uma estrutura, com o tempo em função de diferentes fenômenos patológicos..... | 34 |
| Figura 7 - Mecanismo de corrosão eletroquímica | 38 |
| Figura 8 - Modelo de Vida útil proposto por Tuutti..... | 39 |
| Figura 9 – Equipamento MEV | 45 |
| Figura 10 – Campus da UNICAP e Bloco G ao fundo..... | 47 |
| Figura 11 – Locação da UNICAP | 49 |
| Figura 12 – Logística das Estacas Franki chegando na obra..... | 52 |
| Figura 13 – Cronograma da Obra | 53 |
| Figura 14 - Ficha com controle do traço do Concreto | 54 |
| Figura 15 – Ficha com resultado do ensaio de resistência a compressão | 55 |
| Figura 16 – Andamento da obra de construção do Bloco G, por etapas..... | 56 |
| Figura 17 – Planta do andamento da obra do Bloco G, por etapas..... | 56 |
| Figura 18 – Curva de densidade de Gaus..... | 746 |
| Figura 19 – Teste de arrancamento | 74 |
| Figura 20 – Mapa de danos..... | 75 |
| Figura 21 – Ensaio de aderência..... | 75 |
| Figura 22 – Amostra retirada da fachada | 77 |
| Figura 23 – Plano de mapeamento da fachada..... | 77 |

| | |
|---|-----|
| Figura 24 – treinamento da equipe de extração | 79 |
| Figura 25 – Marcação dos pontos | 80 |
| Figura 26 – Extração de testemunho de um pilar | 80 |
| Figura 27 – Amostra retirada e isolada | 82 |
| Figura 28 – Amostra cortada ao meio | 83 |
| Figura 29 – Asperção de fenoftaleína..... | 84 |
| Figura 30 – Profundidade da seção | 84 |
| Figura 31 – Testemunho com medição da seção carbonatada..... | 85 |
| Figura 32 – Planilha com dados e resultados..... | 86 |
| Figura 33 - Planta de fachada Sul | 86 |
| Figura 34 – Planta de fachada com os dados de ensaio ampliado | 86 |
| Figura 35 – Profundidade de carbonatação na fachada sul (vigas) | 93 |
| Figura 36 – Profundidade de carbonatação fachada Norte (vigas) | 94 |
| Figura 37 - Profundidade de carbonatação fachada Sul (pilares) | 100 |
| Figura 38 – Profundidade de carbonatação fachada Norte (pilares)..... | 95 |
| Figura 39 - Profundidade de carbonatação lajes..... | 95 |
| Figura 40 – Resultados do ensaio de resistência a compressão | 97 |
| Figura 41 – Ensaio com asperção de nitrato de prata..... | 103 |
| Figura 42 – Amostra 1, Detalhes do cobrimento do aço | 103 |
| Figura 43 - Amostra 1, preservação da camada passivadora..... | 104 |
| Figura 44 - Amostra 1, traço da amostra (poros)..... | 104 |
| Figura 45 – Ensaio com asperção do fenol | 105 |
| Figura 46 – Ensaio presença de cloretos amostra 1 | 105 |
| Figura 47 – Amostra 2, medida de comprimento | 106 |
| Figura 48 – Amostra 2, morfologia da amostra | 106 |
| Figura 49 – Ensaio com asperção de fenos, amostra 2 | 107 |

| | |
|---|------|
| Figura 50 – Presença de cloretos, amostra 2 | 108 |
| Figura 51 - Amostra 3, medida de comprimento | 109 |
| Figura 52 –Morfologia da amostra 2..... | 109 |
| Figura 53 – Asperção de fenol na amostra 3 | 110 |
| Figura 54 – Presença de cloreto na amostra 3..... | 111 |
| Figura 55 - Amostra 4, medida de comprimento | 111 |
| Figura 56 – superfície da amostra 4 | 112 |
| Figura 57 – Amostra 4, espaços vazios | 1139 |
| Figura 58 – Asperção do fenol na amostra 4 | 114 |
| Figura 59 – Presença de cloreto na amostra 4..... | 115 |
| Figura 60- Amostra 5, medidas de comprimento..... | 115 |
| Figura 61 – Superfície da amostra 5..... | 116 |
| Figura 62 – Superfície da amostra 5 com irregularidades (fissuras)..... | 116 |
| Figura 63 – Asperção de fenol na amostra 5 | 117 |
| Figura 64 – Presença de cloretos na amostra 5..... | 117 |
| Figura 65 – Amostra 6, medidas de comprimentos | 117 |
| Figura 66 – Superfície da amostra 6..... | 117 |
| Figura 67 – Superfície da amostra 6 (fissuras) | 117 |
| Figura 68 – Asperção de fenol na amostra 6 | 117 |
| Figura 69 – Presença de cloreto na amostra 6..... | 117 |
| Figura 70 – Rosa dos ventos do LABEEE..... | 117 |
| Figura 71 – Estudo da ação dos ventos no bloco G..... | 121 |
| Figura 72 – Distância do bloco G ao mar..... | 122 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 – Definições: Nomenclatura e conceitos | 36 |
| Quadro 2 - Principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado | 37 |
| Quadro 3 – Dados e Áreas do Bloco G | 50 |
| Quadro 4 - Resumo análise das imagens no MEV | 99 |
| Quadro 5 – Estudos científicos com captura de CO ₂ no concreto | 99 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Dados Técnico de Entrada da estrutura..... | 68 |
| Tabela 2 – Dados Técnico de Entrada | 70 |
| Tabela 3 – Resumo de dados estatísticos | 72 |
| Tabela 4 – Resultados fachada sul (vigas)..... | 88 |
| Tabela 5 – Fachada Sul (pilares)..... | 89 |
| Tabela 6 – Resultado fachada Norte (vigas)..... | 90 |
| Tabela 7 – Resultado fachada Norte (pilares)..... | 91 |
| Tabela 8 – Resultado lajes internas..... | 92 |
| Tabela 9 – Resultados do volume concretado x volume carbonatado no bloco G..... | 118 |
| Tabela 10 – dados estatísticos da amostra..... | 119 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 8 |
| 1.1 Considerações iniciais..... | 8 |
| 1.1.1 Objetivo geral..... | 12 |
| 1.1.2 Objetivos específicos..... | 12 |
| 1.2 Justificativa..... | 13 |
| 1.3 Metodologia | 14 |
| 1.4 Estrutura e organização da dissertação..... | 14 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1 CONSTRUÇÃO EM CONCRETO ARMADO – Breve histórico..... | 16 |
| 2.2 Normas técnicas – Breve histórico | 17 |
| 2.3 Estrutura em concreto armado..... | 23 |
| 2.3.1 Materiais componentes e fabricação..... | 23 |
| 2.4 Conceito de vida útil e durabilidade..... | 27 |
| 2.5 Patologias | 33 |
| 2.6 Ensaio..... | 37 |
| 2.7 Carbonatação..... | 38 |
| 2.7.1 íons cloreto..... | 41 |
| 2.7.2 Resistência do concreto | 41 |
| 2.7.3 Microscópio de varredura eletrônica – MEV..... | 41 |
| 2.8 Área de estudo da universidade católica de Pernambuco..... | 44 |
| 3. METODOLOGIA | 54 |
| 3.1 Localização o objeto de estudo..... | 58 |
| 3.2 Extração dos corpos de prova | 59 |
| 3.3 Ensaio de carbonatação..... | 60 |
| 3.4 Ensaio de resistência à compressão..... | 60 |
| 3.5 Ensaio presença de cloreto | 61 |
| 3.6 MEV..... | 62 |
| 4. DISCUSSÕES E RESULTADOS..... | 102 |
| 4.1 Metodologia para estimativa do balando CO ₂ | 111 |
| 4.2 Balanço geral do CO ₂ | 113 |
| 4.3 Cálculo das taxas de volume | 117 |

| | |
|------------------------------------|-----|
| 4.4 Estatística..... | 118 |
| 4.5 Resistência..... | 119 |
| 4.6 Umidade e ação dos ventos..... | 120 |
| 4.7 Outras considerações | 122 |
| 5. CONCLUSÃO..... | 124 |
| 5.1 Perspectivas futuras | 126 |
| 6. Referencia..... | 127 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A produção do cimento corresponde de 5% a 7%, da emissão de CO₂ no ambiente (SNIC, 2010), afetando diretamente a camada de ozônio, ampliando o efeito estufa na atmosfera, as consequências, bem conhecidas da sociedade como o aquecimento global. Atualmente, os países da Europa, estão sofrendo com uma onda de calor que ultrapassa 40°C e intensas queimadas nas florestas. Hoje, a palavra sustentabilidade é tema recorrente em vários estudos acadêmicos, possuindo vários conceitos, o mais adequado para nosso estudo é conceituar sustentabilidade com equilíbrio, daí pode-se extrair, o equilíbrio entre os recursos extraídos ou emitidos na natureza e a exploração dele pela sociedade. Com ações compensatórias, mudanças de procedimentos e inovações, devolvem ao ambiente aquilo que a foi subtraído. Surge a pergunta: relacionar o conceito de sustentabilidade para quem? para quem interessa? a pesquisa em questão do balanço do Co₂, responde esta pergunta, seria sustentabilidade para: a natureza. No Brasil a produção de cimento corresponde a 3% de emissão de CO₂ no inventário de emissões de CO₂, (MCTI, 2010). O estudo elaborado aponta para uma cadeia de emissão de CO₂, embora o percentual maior, verificado seja na produção do cimento, tornando o vilão, desta cadeia de emissão de Co₂, outros fatores influenciam e agem diretamente ou indiretamente na formação da equação de emissão de CO₂. A produção do cimento por si só reflete com uma parcela significativa, neste processo de agressão ao meio ambiente, apesar do esforço da indústria da construção civil em atenuar estes efeitos. No ciclo de vida do cimento 95% corresponde ao total de emissão de CO₂, os outros 5% corresponde a queima do combustível para a geração da energia no processo de clínquerização, (POSSAN, 2012). Nota-se que para produção de 1 tonelada de cimento, ou seja, 1000Kg de cimento, emite-se aproximadamente 600Kg CO₂(IPCC,2012).

A durabilidade de uma edificação, pode ser analisada pela sua vida útil, ou seja, quanto tempo, ao longo dos anos, aquela estrutura conserva suas características físicas e funcionais em relação a sua forma original. Uma estrutura de concreto armado exposta ao ambiente, sofre ações de vários agentes agressivos. Estes agentes causam patologias nestas estruturas e dependendo da patologia interferem

diretamente na redução da integridade física do elemento estrutural. (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE,2011)

As estruturas construídas em concreto armado, quando projetadas e executadas conforme as normas adequadas, possuem vida útil média estimada em 50 anos para construções em ambientes urbanos com pouca poluição, isso quando preservadas suas devidas manutenções (rotineiras, preventivas e corretivas).

Um dos elementos físicos que contribui significativamente para as patologias em estruturas de concreto é o dióxido de carbono (CO_2). Cujos, aumento da concentração de CO_2 na atmosfera durante os anos tem evidenciado este fator. O Brasil está entre os 10 países que mais emitem CO_2 na atmosfera, tendo como vetor agravante o desmatamento (IPÊ, 2021). A (METHA; MONTEIRO,2014). Na indústria da Construção civil os efeitos do CO_2 , ocorre desde a fabricação do cimento, na metodologia construtiva à entrega do prédio e ao longo dos anos, a exposição ao meio ambiente das estruturas de concreto (POSSAN, 2010).

A concentração de CO_2 , essencialmente, nas cidades urbanas e o aumento do desenvolvimento, apresenta desafios para a construção civil (ANTONIO, 2018). Estudos atuais, mostram uma relação bastante significativa nos ambientes de grande concentração populacional, afetando diretamente aos prédios e edifícios expostos, sobretudo pelos meios de transporte (IEA, 2017). Diversas empresas desenvolveram formas de minimizar os efeitos do CO_2 no meio ambiente. Várias patologias são encontradas nas estruturas dos prédios, com ênfase na carbonatação e na penetração dos íons cloretos. A carbonatação, processo físico-químico, estudado frequentemente, surge de uma reação química entre a relação do CO_2 da atmosfera e o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Estudos recentes demonstram que no ambiente externo a concentração de CO_2 para atingir a estrutura de um prédio é bem lenta e gradual. Esta concentração está diretamente relacionada à forma de execução do concreto. Cada vez, mais as indústrias têm melhorado em processos e equipamentos atenuantes a emissão de CO_2 .

A emissão do CO_2 no ambiente é mais acentuada na fase da fabricação do cimento, durante a sua queima. Sendo a responsável por 5% a 7% das emissões globais de CO_2 (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Notavelmente, os estudos vem avançando, e constatando que a captura de CO_2 , surge com maior frequência, no início da concretagem, na hidratação do concreto, com menor frequência, no envelhecimento da estrutura quando está exposta aos ambientes externos.

Em 2013 foi publicada a norma de desempenho para edificações habitacionais, NBR 15575, a fim de descrever o comportamento em uso das edificações e seus sistemas, sem descrição de modos construtivos, apenas estabelecendo requisitos que garantam a segurança, habitabilidade e sustentabilidade da edificação. Porém essa norma é nova, tendo menos de 10 anos de sua primeira edição. Para construções mais antigas, como a estudada neste trabalho, que possui 41 anos de inaugurada, com projetos estruturais datados do final dos anos 1970, quando a norma NBR 6118 – Projetos de estrutura de Concreto – Procedimentos, havia acabado de ser publicada, nomeada inicialmente de NB 1 e quando não existiam normas para padronizar sistemas construtivos, pois a NBR 14931:2014 (atualmente em revisão) – Execução de estruturas de concreto – Procedimento, foi publicada primeiramente em 2003. Com um cenário construtivo completamente diferente dos atuais, o Bloco G da Universidade Católica de Pernambuco foi projetado e construído, quando pouco se falava em patologias e ataques químicos, habitabilidade ou sustentabilidade.

Acreditava-se que a estrutura de concreto de um prédio possui uma vida útil infinita. Ao longo dos anos, os problemas identificados na estrutura dos prédios, mostra uma grande variedade de patologias e problemas surgidos. Ocasionalmente trincas, fissuras, manchas e até colapso de uma estrutura. A construção de um prédio passa por várias etapas, estudos preliminares, projetos, fundação, infraestrutura, superestrutura e cobertura. Estas etapas devem passar pela análise criteriosa das normas da ABNT. Nos anos 70 e 80 as normas e metodologias construtivas, possuíam diretrizes que foram ficando obsoletas devido aos desafios encontrados, como forma de garantir uma maior qualidade e uma vida útil longa às estruturas. A exemplo NB1, uma das primeiras normas construtivas criadas pelo corpo técnico brasileiro, passou por várias reformulações e atualizações. Em 1980, esta norma para o cobrimento do concreto, recomendava em média 1,5cm para vigas e pilares, atualmente a norma 6118 relaciona diretamente o ambiente que a estrutura está exposta com o aumento do cobrimento. No caso de ambientes próximos ao mar, recomenda 4cm de cobrimento.

Nas fases de planejamento de um empreendimento, na concepção, no anteprojeto, até a execução, é necessário seguir as recomendações das normas vigentes atuais, tais como para o concreto a NBR6118. Seguindo diretrizes

construtivas pré estabelecidas baseadas, no planejamento correto de execução de cada etapa da obra, com a finalidade de ter um prédio com uma durabilidade do concreto com a vida útil bem prolongada. Uma das causas que favorecem uma vida útil maior para o concreto é sua perfeita execução, desde o planejamento. Uma boa seleção dos materiais que compõem o concreto como: cimento, agregados, aditivos, a relação água/cimento e a forma. Uma concretagem bem executada baseada nas normas e obedecendo a um plano de durabilidade, faz com que a estrutura possua, longevidade e qualidade aceitável para todos os stakeholders, ou seja, todos os agentes envolvidos no processo (BOLINA; TUTIKIAN; HELENE, 2019).

A fase de planejamento é importante para estabelecer os processos construtivos. Analisamos as normas utilizadas no período de execução de projetos e construção da estrutura. Foi realizado uma análise dos documentos do período da construção, verificação de projetos e entrevista com o calculista, para entender o cenário. Como sabemos, independente do ano que construímos uma edificação em concreto armado poderá estar exposta a agentes agressivos e vulnerável ao meio em que se encontra, podendo desenvolver patologias, relacionadas a penetração de íons cloreto, CO₂ ou sulfatos; o que compromete a garantia de sua vida útil (DYER, 2015). O bloco G da UNICAP, estudo de caso desta pesquisa, durante 10 anos não foram realizados nenhuma manutenção preventiva e corretiva na sua estrutura. Durante os anos de 2019 e 2020, o Bloco G passou por uma recuperação estrutural mais elaborada, levando em consideração a situação e conhecimento atuais. Durante esse processo foram extraídos dos elementos estruturais testemunhos em concreto armado, a fim de verificarmos principalmente a presença de carbonatação, mas também a ação de íons cloreto, levando em consideração que a estrutura encontrasse em uma zona de classe de agressividade moderada. Com essas amostras verificamos também sua microestrutura no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e sua resistência à compressão, a fim de analisar sua estrutura e comparar a resistência com parâmetros de projeto, respectivamente.

Este estudo avalia a estrutura de uma obra erguida há 41 anos, o “bloco G” da UNICAP, Universidade Católica de Pernambuco. Em plena expansão, uma Universidade Jesuíta inserida no Nordeste Brasileiro e com uma Educação Comunitária e sobretudo referência no ensino universitário. Os arquitetos escolheram um partido arquitetônico, notavelmente bem apreciado e difundido na década de 80.

Toda a estrutura em concreto armado aparente e dando forma retangular ao edifício Composto por salas de aulas amplas e bem ventiladas, caprichando nos brises de concreto, protegendo contra o sol poente e o uso de cobogós nos fechamentos de elevação, enriquecendo a composição harmoniosa do prédio. Em sua composição, nota-se um volume bastante acentuado de concreto, e que apresenta algumas patologias evidentes.

Desta forma, este estudo teve como objetivo avaliar as patologias encontradas, essencialmente evidenciadas pela carbonatação. Foram realizados também testes quanto à resistência a compressão e ensaios para verificar a presença de cloretos nas amostras. As amostras carbonatadas extraídas da estrutura foram analisadas com imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

1.1.1 Objetivo geral

Apresentar conceitos e procedimentos adotados para realização de ensaios para extração de testemunhos, apresentar o resultado do balanço de CO₂, verificação de ataques químicos, análise da microestrutura e resistência, de acordo com as normas adequadas como também verificar as condições estruturais tendo em vista as exigências de projeto e localização geográfica.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver uma estimativa do balanço de Co₂;
- Apresentar o valor estimado de CO₂ emitida na produção do concreto;
- Apresentar o valor estimado de CO₂ captado pela estrutura;
- Realizar uma comparação dos parâmetros para execução de projetos da norma NB 1: 1960 e ANBT 6118:2014 (atualmente em revisão);
- Analise da posição geográfica do edifício, ventos dominantes e identificar projeção áreas com maior e menor ataque por agentes químicos;

- Analisar a microestrutura das amostras, utilizando Microscópio Eletrônico de Varredura;
- Realizar ensaio de resistência a compressão nas amostras e analisar seu crescimento;
- Comparar o volume concretado com o volume carbonatado;

1.2 Justificativa

A justificativa para esse estudo de caso é que devido a evolução dos estudos quanto a patologia nas construções, melhor entendimento sobre a ação de agentes agressivos à estrutura, criação de normas mais específicas desde a criação da ABNT em 1940, a crescente preocupação com sustentabilidade e vida útil das estruturas, nos levou a avaliar os parâmetros construtivos da década de 1980 e compara-los com os atuais, além de identificar na própria estrutura se esses parâmetros foram suficientes para proteger a mesma contra um dos principais vilões na degradação do concreto armado, que são ataques por íons cloreto e carbonatação. Além disso, surgiu a curiosidade por verificar a evolução da resistência a compressão, analisar a sua microestrutura e principalmente elaborar o balanço do que foi emitido para o ambiente e o que foi captado pela estrutura.

O presente projeto de pesquisa tem por motivação a investigação das condições estruturais de um prédio construído há cerca de 44 anos, localizado em uma região de classe de agressividade 3. Estrutura que foi construída com a utilização a norma ABNT NB-1 1976. Este estudo informará, o quanto a estrutura sofreu ao longo desse tempo quanto à penetração do CO₂. Perguntas pertinentes, tais como: Qual o valor estimado de CO₂ emitida na produção do concreto? Qual o valor estimado de CO₂ captado pela estrutura? Qual o volume de concreto carbonatado? Qual a relação do volume concretado ao volume carbonatado? O percentual carbonatado é significativo para diminuir a vida útil da estrutura? Qual o elemento estrutural mais afetado pela carbonatação? Existe alguma relação das fachadas/área carbonatada com áreas que mais sofrem mais com a ação dos ventos, temperatura e umidade? A execução utilizada na época foi significativa para a vida útil da estrutura? Poderia afirmar que os materiais utilizados no período da construção contribuíram para a carbonatação? Houve a despassivação da armadura? Como está

a estrutura do prédio, após 41 anos?

Estas questões, dentre outras compuseram um acervo de informações que sustentar a pesquisa acadêmica em questão.

O que é de extrema importância para conseguirmos cuidar das estruturas mais antigas e analisar o que precisa ser melhorado nas normas para que essas estruturas durem mais e sejam sempre seguras para os usuários.

1.3 Metodologia

Fazer uma pesquisa em arquivos e projetos antigos do Bloco G da Unicap, analisando os diários de obra da equipe de engenharia da época e fazer um levantamento de informações com o engenheiro projetista Prof. Dr. Romilde Almeida, fazer um levantamento bibliográfico sobre estruturas de concreto armado, durabilidade, vida útil e quanto ao uso da norma NBR 6118:2014, desde sua criação e estudar a posição geográfica da estrutura e a quais ataques químicos ela está suscetível. Na parte prática, avaliar testemunhos extraído dos elementos estruturais e mapear os resultados na planta do bloco para comparar os resultados com a análise geográfica.

1.4 Estrutura e organização da dissertação

Foi realizada a revisão bibliográfica, a cerca dos temas alusivos à pesquisa, citando autores da literatura técnica, para dar embasamento e fundamentar as discussões. O trabalho está dividido em seis capítulos compreendidos da seguinte forma:

Capítulo 1 – Composto pela Introdução, Justificativa, Objetivo Geral, Objetivos específicos e Estruturação da Pesquisa.

Capítulo 2 – Revisão da Literatura sobre: Durabilidade, Normas construtivas, Ensaios e Ambiente, Carbonatação, Informações histórica da UNICAP e do bloco G.

Capítulo 3 – Materiais e Métodos, Método elaborado por Possan para encontrar o balanço do CO₂, Descrição dos experimentos efetuados, Testemunhos extraídos, Retirada dos corpos de provas, tabelas resumo, plantas das amostras com dados

extraídos.

Capítulo 4 – Análise e discussão de resultados.

Capítulo 5 – Conclusões e Sugestões, Sugestão para novos trabalhos.

Capítulo 6 – Referências.

A organização desta pesquisa, ajuda a delimitar o trabalho por partes, explorando o conteúdo em uma abordagem histórica e científica da problemática em torno das patologias encontradas no estudo de caso. Encontrado frequente no capítulo 1. O estudo de caso, o edifício (bloco G), projetado para ser salas de aulas, auditórios, secretarias, coordenação e Biblioteca, compõe parte do campus da Universidade Católica de Pernambuco. A ideia original seria funcionar o centro de ciências sociais e era dividido em blocos A, B e C, relatado no capítulo 2. Após a extração de testemunhos de diversos elementos estruturais, foi realizado em laboratório diversos ensaios, fornecendo dados para uma interpretação qualitativa e quantitativa das amostras obtidas, amplamente desenvolvida no capítulo 3. A base de dados e informações, comparações do fato já existente científico e uma ampla abordagem contextualizada do estudo. Considerando as discussões e resultados analisados, de posse deste material analisado e comparado, difundido no capítulo 4, chega-se melhorias que devem ser propostas.

Existe ainda possibilidades de analisar outras patologias. Em que contribui este estudo frente aos demais que já constam em literatura? O que ainda poderá contribuir para a continuidade desta pesquisa? São fatos descritos no capítulo 5. Finalmente o capítulo 6 faz um resumo de todas as fontes analisadas e consultadas para dar robustez científica este estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Construções em concreto armado – Breve histórico

Antes do século XIX era difícil encontrar registros sobre as técnicas ou tecnologias aplicadas ao desenvolvimento de máquinas, construções ou equipamentos. Muito foi executado e pouco foi escrito sobre o processo. No fim do século XVIII enciclopedistas começaram a publicar descrições detalhadas de técnicas produtivas e ousadas para seu tempo. Iniciativa essa revolucionária para a sociedade, pois na prática a compreensão das técnicas requer muita paciência e pesquisa e isso deveria ser levado a diante por outras gerações.

Existiram períodos na história em que o conhecimento não era público e isso dificultou o acesso à informação de diversas gerações. Além disso o uso desse conhecimento exige alfabetização mínima, que foi outro bem escasso ao longo de muito tempo.

Com o passar do tempo o conhecimento foi considerado um bem público, mas antes o conhecimento era passado entre pessoas por imigração. Com o avanço da ciência e a industrialização foi necessário elaborar regras para garantir processos adequados e iguais para cada finalidade. Para isso, foi necessário enriquecer e estreitar relações econômicas e compatibilizar processos para o mercado mundial.

Com isso ocorreu a revolução industrial, o desenvolvimento das siderúrgicas, o uso efetivo da energia elétrica. A normalização de processos em escala mundial ocorreu de forma lenta, pois os investidores precisavam ter certeza de que os ganhos econômicos superariam os custos para toda regulamentação, tendo em vista que o trabalho para a construção desses documentos viria de forma voluntária.

O concreto armado foi o sistema construtivo mais utilizado do século XX, com o impacto da Revolução Industrial (metade do séc. XVIII) que aprimorou a produção do ferro, posteriormente do aço, proporcionou a melhoria do sistema e adequando-o para o uso em diversas formas e volumes (FREITAS,2019).

“Há um momento na História em que o ferro passa a ser empregado com tão diversificados fins, dentre eles a construção

de edifícios, que é inevitável o registro desse material como um fator essencial para as transformações de toda ordem por que passou a sociedade. Este momento é o século XIX (GOMES, 1986, p. 13).”

No próprio século XVIII foi inserido o uso do de barras de ferro junto ao concreto, a fim de impedir a tendência ao esforço de tração e momento fletor, em algumas estruturas às forças cortantes, como em cúpulas ou arcos as grandes catedrais antigas, como a Igreja de Santa Genoveva, em Paris. Porém, foram necessárias adequações tendo em vista que as barras eram de ferro forjado, o que possui baixa resistência e ductibilidade, tornando difícil o manuseio.

Por isso, foi necessário transformar a forma de construir e de projetar edifícios. Fato que foi consolidado pela invenção do cálculo estrutural no final dos anos 1800. Com melhoramento das técnicas de produção industrial, utilização de materiais aplicados a mais de 2.000 anos, como é o caso da pasta, formada por areia e cimento, com primeiros registros de uso na China, gesso no Império Romano (PETERS, 1996), dentre outros.

Até chegar nas normas e sistemas construtivos que temos hoje, essa evolução ocorreu de forma lenta e gradual, contudo positiva mundialmente.

2.2 Normas Técnicas – Breve histórico

No início do século XX foi criada a International Electrotechnical Commission (IEC, Comissão Eletrotécnica Internacional) comissão destinada a padronizar tecnologias elétricas e eletrônicas. É considerada a primeira organização de normas técnicas, nessa época o Brasil não participava da comissão ou contribuía para tal. Em 1928 nos Estados Unidos foi criada a American Standards Association (ASA, Associação Americana de Normas) onde já encontravam-se normas para produção de equipamentos domésticos e regras para segurança do trabalho na indústria.

Ao longo dos anos os países foram criando suas próprias organizações visadas aos processos mais comuns em sua região, como DIN (Deutsche Industrienorm, ou Norma Industrial Alemã), a Association Française de Normalisation (Associação Francesa de normatização, AFNOR), dentre tantas outras.

Mesmo com o desenvolvimento do transporte ferroviário no Brasil, no início do século XX, e o esforço para criação de normas similares as europeias, focadas nos materiais utilizados em locomotivas ou pontes, foi o concreto armado que ganhou espaço e destaque na criação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Mesmo sendo um material descoberto e utilizado depois do aço ou ferro, o concreto armado ganhou grande espaço na construção civil brasileira já no fim do século XIX. Sendo a patente concedida ao francês Joseph Monier (1823 – 1906) em 1867 o concreto armado passou a ser empregado no Brasil empregado inicialmente na construção de reservatórios de água.

Seu uso passou a ser generalizado com o passar do tempo e os engenheiros cientistas passaram a estudá-lo arduamente dentro das universidades. Ainda sem uma norma definida para execução de construções em concreto armado, cada experiência na construção e técnica aplicada ficava limitada aos mestres de obras e engenheiros da construção. Por muito tempo os brasileiros utilizaram de estudos europeus para desenvolver suas obras com esse material misto, mas devido a variáveis como clima e natureza dos materiais, criou-se a necessidade de estudar os componentes do concreto armado produzidos no Brasil e exigia mais conhecimento técnico do método construtivo.

Com isso no início dos anos 1900 na Escola Politécnica de São Paulo foi criado o Gabinete de Ensaio de Materiais, coordenado pelo engenheiro Ary Frederico. O Objetivo do gabinete era estudar e ensaiar os componentes do concreto armado, para compilar todo esse conhecimento em documentos oficiais, assim deu-se início a Associação Brasileira de Normas Técnicas. O início da associação e a crescente difusão das normas técnicas fez com que a indústria da construção civil elaborasse uma norma específica para o concreto, a criação da NBR 6118 está ligada diretamente a história da própria ABNT o que torna sua importância ainda maior para o meio acadêmico.

Com a publicação da NB-1 – Cálculo e Execução de Obras de Concreto Armado, publicada em 1940 esteve oficialmente inaugurada a ABNT e publicada sua primeira norma, inspirada na norma Alemã DIN e concebida apenas por engenheiros brasileiros. A NB-1 contém cálculo da resistência a compressão de pilares, resistência a flexão no estado limite último, também fixação do coeficiente de segurança nos cálculos. Em 1941 foi publicada a Norma Estrutural, chamada de NB-2, e se seguiram

a NB-3, NB-4, NB-5, associadas ao concreto armado, porém com estudos publicados separadamente.

Pontos relevantes sobre projetos; administração de obra; cálculo dos esforços solicitantes (variação de temperatura, retração, engastamento, mísulas, vãos, distribuição de carga, entre outros); esforços resistentes (deformações, compressão axial, flexão, flambagem, torção, aderência, cisalhamento, entre outros); disposições construtivas (lajes, vigas, pilares cintados e não cintados, disposição das armaduras de acordo com cada elemento estrutural); dobramento de armaduras, tipos de aço, emendas e ganchos; bem como a especificação dos materiais empregados (agregados, água, cimento); as características do concreto (dosagem, consistência, resistência); também especifica as tensões admissíveis no concreto armado e no aço e de forma muito específica desde a NB-1 fala-se de cobrimento das armaduras, que é a espessura de concreto na fase da estrutura, passante das barras de aço, a fim de protegê-lo do ambiente.

Um dado relevante para este trabalho foi a forma como a norma demonstrou o cobrimento das armaduras e a resistência característica a compressão do concreto armado, ao longo dos avanços e atualizações das normas. Na Figura 1, podemos ver a descrição do cobrimento retirado da própria norma NB-1. Descrito de forma específica para cada tipo de elemento estrutural, bem diferente de como estamos acostumados atualmente. Na NB-1 de 1940 não constam informações sobre classe de agressividade dos ambientes, durabilidade, vida útil ou agentes agressivos a estrutura. Dados técnicos importantes para as construções atualmente, pois estabelece uma interface com a durabilidade desta estrutura

Figura 1 - Cobrimento das armaduras: NB-1: 1940.

| Cobrimento | |
|---|--------|
| Art. 37 — Todas as barras da armadura, principal ou não, devem ter um cobrimento de concreto nunca menor que: | |
| em lajes e paredes no interior de edifícios | 1 cm |
| em lajes e paredes ao ar livre | 1,5 cm |
| em vigas, pilares e arcos no interior de edifícios | 1,5 cm |
| em vigas, pilares e arcos ao ar livre | 2 cm |
| em peças em contato com o solo | 2 cm, |
| Neste último caso, exige-se, se o solo não for rochoso, a interposição de uma camada de concreto pobre, não computada no cálculo, com espessura mínima de 5 cm. | |
| No interior de edifícios, permite-se que 0,5 cm do cobrimento exigido seja feito com emboço. | |

Fonte: NB-1 (1940), art. 37, pág. 19.

Esse sistema para escolha do cobrimento foi utilizado até a norma de 1978, em novembro de 1980, após revisão a norma passou a ser chamada de NBR 6118 – Projeto e execução de obras de concreto armado, foi quando as especificações para cobrimento mudaram, porém ainda sem levar em consideração a classe de agressividade do ambiente. A Figura 2 mostra a descrição retirada da NBR 6118:1980.

Figura 2 - Cobrimento das armaduras: NBR 6118:1980

6.3.3.1 Cobrimento

Qualquer barra da armadura, inclusive de distribuição, de montagem e estribos, deve ter cobrimento de concreto pelo menos igual ao seu diâmetro, mas não menor que:

a) para concreto revestido com argamassa de espessura mínima de 1 cm:

- em lajes no interior de edifícios 0,5 cm
- em paredes no interior de edifícios 1,0 cm
- em lajes e paredes ao ar livre 1,5 cm
- em vigas, pilares e arcos no interior de edifícios 1,5 cm
- em vigas, pilares e arcos ao ar livre 2,0 cm

b) para concreto aparente:

- no interior de edifícios 2,0 cm
- ao ar livre 2,5 cm

c) para concreto em contato com o solo 3,0 cm

- se o solo não for rochoso, sob a estrutura deverá ser interposta uma camada de concreto simples, não considerada no cálculo, com o consumo mínimo de 250 kg de cimento por metro cúbico e espessura de pelo menos 5 cm.

d) para concreto em meio fortemente agressivo 4,0 cm

Para cobrimento maior que 6 cm, deve-se colocar uma armadura de pele complementar, em rede, cujo cobrimento não deve ser inferior aos limites especificados neste item.

No caso de estruturas que devam ser resistentes ao fogo, o cobrimento deverá atender às exigências da NBR 5627, além das especificadas neste item.

além das especificadas neste item.

Fonte: NBR 6118:1980, pág.30.

Com o avanço nos estudos quanto a durabilidade, agentes agressivos e meio ambiente, no ano de 2003 a NBR 6118 passou pela sua mais considerável atualização, foi incluída a classe de agressividade dos ambientes e cada classe foi associada um cobrimento e relação água/cimento adequados de acordo com o risco suportado pela estrutura. A classe de agressividade é baseada na distância em que a estrutura encontra-se do litoral, tendo contato ou não com respingos de maré e a relação água/cimento tem influência direta do desempenho da estrutura.

Estruturas mais próximas ao litoral estão mais propensas a ataques químicos, com o maior contato com salinidade e maresia, há probabilidade de a estrutura sofrer com ataque por íon cloreto (encontrados nos sais da maresia). A identificação da classe de agressividade e o uso do cobrimento adequado auxiliam a estrutura a sobreviver durante seu período de durabilidade e vida útil. A Figura 3 mostra a classe de agressividade associada ao cobrimento na norma NBR 6118:2003.

Figura 3 - Cobrimento relacionado a classe de agressividade ambiental.

Tabela 7.2 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm

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

¹⁾ Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

²⁾ 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 tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

³⁾ Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: NBR 6118:2003, pág. 19.

Essa correspondência entre classes de agressividade e cobrimento é muito parecida com a versão atual da norma, NBR 6118:2014. A definição desta classe de agressividade ambiental (CAA) é fundamental na concepção do projeto estrutural, pois influenciará nos valores mínimos de resistências características que devem ser

respeitados, no valor mínimo do cobrimento de armadura e na máxima abertura de fissura permitida. Na Figura 4, mostra o quadro da NBR 6118:2003.

Figura 4 - Classes de agressividade ambiental (CAA).

Tabela 6.1 - Classes de agressividade ambiental

| 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 ^{1), 2)} | Pequeno |
| III | Forte | Marinha ¹⁾ | Grande |
| | | Industrial ^{1), 2)} | |
| IV | Muito forte | Industrial ^{1), 3)} | Elevado |
| | | Respingos de maré | |

¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível 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).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118:2003, pág. 14.

Vale ressaltar que a resistência mínima à compressão do concreto, aos 28 dias, testada em provas de carga em corpos de prova cilíndricos exigida na NB1:1940 era de 12,5 MPa. Portanto todos os parâmetros de projeto, materiais, consistência da mistura, dosagem e construção eram executados em torno dessa informação.

Foi observado na norma, além da classe de agressividade a resistência característica da estrutura. A vida útil é conceituada pela NBR 15575 como uma medida temporal de durabilidade e pela ASTM E632-81 (ASTM,1981).

O Ambiente é um dos fatores muito importante na execução das obras, pois quando se é relacionado com os outros fatores, desde a concepção na fase de projeto, pode interferir diretamente na composição de um concreto mais durável. Preservando suas características: físicas, mecânicas com seu desempenho funcional por longos períodos. Importante, enfatizar as normas da ABNT e internacionais foram evoluindo em paralelo as necessidades e problemas que foram surgindo durante as décadas. Por exemplo na década de 80 a norma vigente recomendava um cobrimento da armadura para ambientes próximo ao mar de 2,5cm, atualmente após várias revisões

a NBR 6118 recomenda para este mesmo tipo de ambiente um cobrimento da armadura em 4,0cm.

2.3 Estruturas em concreto armado

Sendo constituído basicamente por cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, o concreto é o material da construção civil 'mais utilizado no Brasil'. É um material composto que pode conter adições com a finalidade de aumentar a resistência, reduzir as fissuras, diminuir o calor de hidratação. Adições pozolánicas, sílica ativa e metacaulim, são exemplos dessas adições. Além de aditivos químicos com a função de melhorar a trabalhabilidade, reduzir a retração, acelerar ou retardar o tempo de pega, adicionado com a finalidade de melhorar ou modificar suas propriedades básicas (METHA E MONTEIRO, 2014).

Quando misturado, o concreto dispõe de plasticidade suficiente para manuseio, transporte e lançamento, adquirindo coesão. Com o passar do tempo ganha resistência durante sua cura, devido às relações que ocorrem entre aglomerante e água. (PETRUCCI,1998). Chamamos de pasta a mistura do cimento com a água, de argamassa a pasta misturada a areia (agregado miúdo) e de concreto a mistura da argamassa com pedra ou brita (agregado graúdo), denominamos concreto simples ou concreto sem armadura (aço) (ISAIA, 2005; BASTOS,2006).

2.3.1 Materiais componentes e fabricação

- Cimento

Embora seja um dos mais antigos materiais da construção, o processo de produção do cimento é uma combinação de fórmulas tradicionais e alta tecnologia em equipamentos. Da extração do calcário à entrega do produto final, são várias etapas para o processo produtivo do cimento. As matérias-primas para a produção de cimento são: Carbonato de Cálcio (CaCO_3); Sílica (SiO_2), Alumínio (Al) e minério de ferro. Os componentes principais, cuja determinação é feita a partir de uma análise química, são: cal (CaO), sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (FeO_3), magnésia (MgO), álcalis (Na_2O e K_2O) e sulfatos (SO_3) (PETRUCCI, 1998).

Segundo Bauer (1998) sua matéria-prima é geralmente extraídas da rocha calcária ou argila. Entre os materiais calcários utilizados encontram-se o calcário propriamente dito (conchas de origem marinha). Entre os materiais argilosos encontram-se a argila, xistos, ardósia e escória de alto-forno. É atualmente produzido em instalações industriais de grande porte, localizadas junto as jazidas que se encontram em situações favoráveis. Esses compostos são extraídos das jazidas por meio de detonação e transportados por caminhões-caçamba para a fábrica, onde são trituradas em uma máquina chamada, moinho de molas, até ficarem como uma areia fina, e são chamados de farinha ou cru.

O cru vai para outra máquina chamada silos de farinha, onde é pré-aquecido á 800°C e em seguida introduzido em um forno rotativo. A sílica, alumina, ferro e cal reagem no interior do forno, o material é aquecido a uma temperatura de 1.500°C, este calor intenso transforma a mistura em um novo material, denominado clínquer, que se apresenta em forma de pelotas (BAUER, 1998).

Durante a queima de todos os materiais ocorre uma considerável emissão de gás carbônico na atmosfera (ABCP, 2019). De acordo com Cirilo, 2019 a emissão de gases que contribuem com o efeito estufa geradas pela indústria cimenteira corresponde 7% em escala global, apenas durante a queima de componentes minerais para a fabricação do cimento Portland. Para reduzir esse problema, estuda-se a substituição por itens alternativos, como resíduos da construção civil, casca de arroz, coco babaçu e caroço do açaí.

Os principais compostos existentes na composição do clínquer após ser obtido são os seguintes:

- 01) $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ Silicato tricálcico = (C3S) → 18 a 66% em sua composição
- 02) $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ Silicato dicálcico = (C2S) → 11 a 53% em sua composição
- 03) $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ Aluminato tricálcico = (C3A) → 5 a 20% em sua composição
- 04) $4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ Ferro aluminato tetracálcico = (C4AF) → 4 a 14% em sua composição

O clínquer sofre um processo brusco de resfriamento para fixação de seus compostos também para permitir a sua estocagem em temperaturas de aproximadamente 80° C. O clínquer deve ser devidamente estocado em silos ou depósitos apropriados para manter as suas propriedades. Tendo assim o cimento em sua forma básica (BAUER, 1998).

Habitualmente com a adição de sulfato de cálcio (CaSO_4), calcário e/ou escória siderúrgica. Uma pequena quantidade de gesso (3% a 5%) é adicionada ao clínquer, para regular o seu tempo de início de pega, evitando-se, assim, que o mesmo endureça rapidamente. Durante a moagem do clínquer é permitido outras adições, além do gesso, tais como: Escória de alto-forno, pozolana ou material carbonático (BAUER, 1998).

- Adições e suas funções

O gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) é o termo genérico dado a família de aglomerantes simples, tem a função de aumentar o tempo de pega do cimento (tempo para início do endurecimento). Ele é adicionado em quantidades geralmente inferiores a 3% da massa de clínquer. Sem esta adição, o tempo de pega do cimento seria de poucos minutos, inviabilizando o uso. Devido a isso, o gesso é uma adição obrigatória, presente desde os primeiros tipos de cimento Portland (BAUER, 1998; PANZERZA, 2010).

- Filler Calcário

O calcário é uma rocha sedimentar encontrada na natureza composta por carbonato de cálcio (CaCO_3) (COIMBRA, 2006). A adição de filler calcário finamente moído, obtido da trituração da rocha calcária normalmente calcítica ou dolomítica é efetuada com a finalidade de diminuir os vazios do cimento, melhorando a trabalhabilidade, diminuir a capilaridade e permeabilidade (MARANGON, 2006; SIQUEIRA E GHISLEN, 2020).

- Materiais Pozolânicos

Provenientes de certas rochas vulcânicas, a pozolana é a cinza resultante da queima do carvão mineral de usinas termoelétricas. Também há possibilidade de se produzir pozolana artificial queimando-se argilas ricas em alumínio a temperaturas próximas de 700°C (BAUER, 1998). Os materiais pozolânicos, em partículas finas, possuem propriedade de ligante hidráulico. Quando misturadas a água reagem com o clínquer e obtemos benefícios como: diminuição do calor de hidratação, segregação dos agregados e contribuem para a durabilidade.

- Escórias de Alto-forno ou Siderúrgicas

A escória siderúrgica, é subproduto obtido na produção do ferro gusa, com a queima de carvão vegetal e ferro em alto-forno, obtida sob forma granulada por resfriamento brusco. Sua aparência é semelhante à areia grossa (MODRO, 2009). Sendo um subproduto, este material tem menor custo em relação ao clínquer e é utilizado também por elevar a durabilidade do cimento, principalmente em ambientes com presença de sulfatos. Porém, a partir de certo grau de substituição de clínquer a resistência mecânica passa a diminuir.

- Agregados

São materiais granulares formado por grãos como: areia, pedregulhos, pedrisco, rocha britada, escória de alto-forno ou resíduos de construção e de demolição, que são usados como meio comentício para produzir concreto ou argamassa. Os agregados podem ser classificados como graúdo (pedregulho e brita), o qual se refere a partículas maiores que 4,75 mm (peneira nº 4), e miúdo (areias) são aquelas partículas de agregado menores que 4,75mm, porém maiores que 75mm (peneira nº200), os agregados precisam ser distribuídos em diversas granulométricas tem a função de transmitir as tensão aplicadas ao concreto através dos grãos. Eles possuem resistência maior que a do próprio concreto. (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

- Aditivos

São definidos como materiais que não tenham as características de agregados, cimento e nem de água, e que são adicionados à dosagem do concreto imediatamente antes ou durante a mistura (GOMES; BARROS, 2009; EFNARC, 2005). Misturados de forma intencional, com o intuito de reforçar ou melhorar certas características, como aumento de compacidade, melhora da impermeabilização, aumento de durabilidade, diminuição de calor de hidratação, entre outros.

O uso destes materiais no concreto é amplamente adotado pelos muitos benefícios que são possíveis com suas aplicações, como por exemplo os aditivos químicos que modificam a pega, influenciando dessa forma na hidratação do cimento. Outro exemplo são os aditivos plastificantes, os quais diminuem o uso de água na mistura reduzindo a relação a/c, através da redução da tensão superficial da água (ANDOLFATO, 2002). São inúmeras as possibilidades de adição, porém todas tem o objetivo de otimizar as qualidades já apresentadas pela argamassa ou concreto.

- Relação água/Cimento

A água é primordial na produção de concreto pois possibilita que as reações químicas do cimento, chamadas reações de hidratação, aconteçam. No entanto, a relação água/cimento elevado faz com que o concreto seja muito permeável. A água excedente da hidratação do cimento evapora, deixando vazios, na maioria interligados. Além disso, um fator água/cimento alto provoca maior retração na pasta e leva ao aparecimento de fissuras de retração hidráulica (TENNIS et al., 2004). O mesmo ocorre com curas inadequadas ou mal executadas (principalmente em concretos cuja superfície exposta seja grande), que são causas de fissuras de retração.

2.4 Conceito de vida útil e durabilidade

O homem sempre procurou dar longevidade as suas construções. Há séculos o homem ergue construções audaciosas. As sete maravilhas do mundo são exemplos de construções duráveis. A busca por construções duráveis e vida útil infinita, fez com que o homem, procurasse e desenvolvesse materiais de alta resistência. No planejamento destas construções, o homem aprimorou suas técnicas de processo e escolha dos materiais. Notavelmente as observações analisadas, identificou vários fatores que influenciam na durabilidade de uma obra, como: clima, local, temperatura e ambiente.

Nos desgastes precoces nas construções, fizeram surgir várias patologias e problemas relacionados a durabilidade da estrutura. No setor da construção civil há uma exigência de melhorias desde o projeto a uma execução satisfatória em conformidade com as normas de desempenho.

De acordo com Souza (2005), a vida útil de um material dar-se pelo período em que suas propriedades permanecem acima de seus limites mínimos especificados. O entendimento da vida útil e da curva de deterioração de um material ou estrutura é um fator fundamental para previsões adequadas de manutenção, gastos e prevenção de problemas. A ISO 15686-1 descreve vida útil como, período após a sua instalação no qual a construção ou suas partes satisfazem as exigências de desempenho do projeto

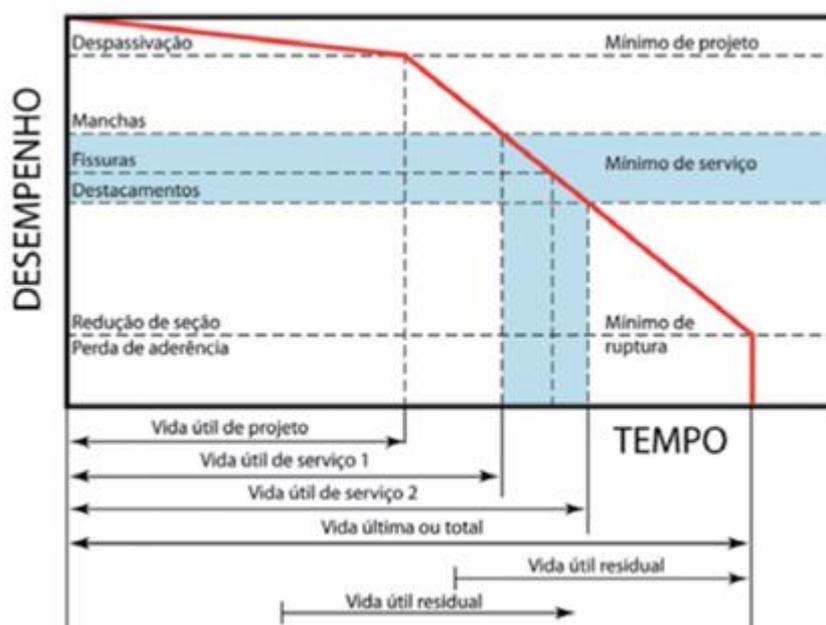
(comportamento em serviço de cada produto), sem ações imprevistas de manutenção ou reparo.

Para a ABNT 6118:2014 no item 6.2, vida útil de projeto “é o período durante o qual se mantém as características das estruturas de concreto, sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor”. Resumindo, a vida útil deve ser analisada de forma ampla, envolvendo todas as fases da construção, incluindo projeto, execução, os materiais, uso, operação e manutenção (MEDEIROS; HELENE; ANDRADE, 2011).

A Figura 5 demonstra o desempenho de uma estrutura ao longo de sua vida útil quando submetida a ataques químicos, descrita em quatro vidas úteis ao longo do tempo. Vida útil de projeto, vida útil de serviço, vida útil última ou total e vida útil residual, pautada no modelo de Tuutti (1982). Sendo:

1. Vida útil de projeto: Também chamado de período de iniciação, é o tempo necessário para que ocorra a despassivação da armadura. Representa o tempo em que a frente de carbonatação ou cloretos atinja o aço;
2. Vida útil de serviço: Período até que ocorra o destacamento do concreto de cobrimento, inicia – se quando são identificadas as fissuras e manchas na estrutura;
3. Vida útil última ou total: Período preocupante o qual ocorre ruptura total ou parcial da estrutura. Acontece uma perda significativa da seção resistente da armadura;
4. Vida útil residual: É o período em que a estrutura será capaz de desempenhar suas funções, contando logo após uma vistoria e diagnóstico. Esta vida pode ser limitada aos estados limites últimos;

Figura 5 – Classe de Agressividade Ambiental



Fonte: – Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando por referência o fenômeno de corrosão de armaduras (HELENE, 1997).

As exigências quanto a durabilidade de acordo com a ABNT 6118:2014, descreve que “as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil.”

Portando, a união desses dois conceitos é inevitável. Durabilidade consiste na capacidade que a estrutura tem de resistir a ataques químicos, intempéries ou qualquer processo de deterioração, ou seja, a capacidade que a construção possui de conservar suas propriedades originais, sua segurança, funcionalidade, estando exposto ao meio ambiente o qual foi inserido, sem a necessidade de altos custos com manutenção e reparos (CEB,1990).

De maneira análoga, Neville (2001) definiu que a durabilidade está diretamente ligada ao desempenho contínuo da edificação, mantendo sua resistência e condições normais de serviço durante sua vida útil natural. Sua durabilidade é condicionada a determinadas etapas, sendo elas:

- Concepção e projeto estrutural;
- Escolha dos materiais para execução;
- Execução correta da estrutura;
- Uso apropriado e manutenção regular;

Tais etapas possuem igual importância para a garantia da durabilidade e funcionalidade da estrutura, pois a carência de uma delas influencia negativamente sua durabilidade. Usualmente, a durabilidade de uma estrutura também está ligada a fatores como cobertura mínimo, tipo de cimento, tipo de aditivo, relação água/aglomerante etc. Fatores esses que são tomados a partir de experiências práticas em laboratório. Os resultados obtidos a partir dos estudos práticos nos levam a um grau aceitável de durabilidade, mas com variáveis (positivas ou negativas) significativas, devido a alta influência das condições ambientais a qual a estrutura está inserida e o concreto que é utilizado in loco nos elementos estruturais (ISAIA, 2001).

Sendo assim, a concepção de uma construção durável consiste na adoção de um conjunto de medidas e procedimentos que garantam um desempenho suficiente da estrutura e de seus materiais ao longo do tempo (ZARZAR JR, 2007). Segundo Helene (2001), a durabilidade de uma estrutura de concreto é determinada principalmente por quatro fatores, conhecidos pela regra dos 4 c's.

1. Composição ou traço do concreto;
2. Compactação ou adensamento efetivo do concreto na estrutura;
3. Cura efetiva do concreto na estrutura;
4. Cobrimento ou espessura do concreto de cobertura das armaduras;

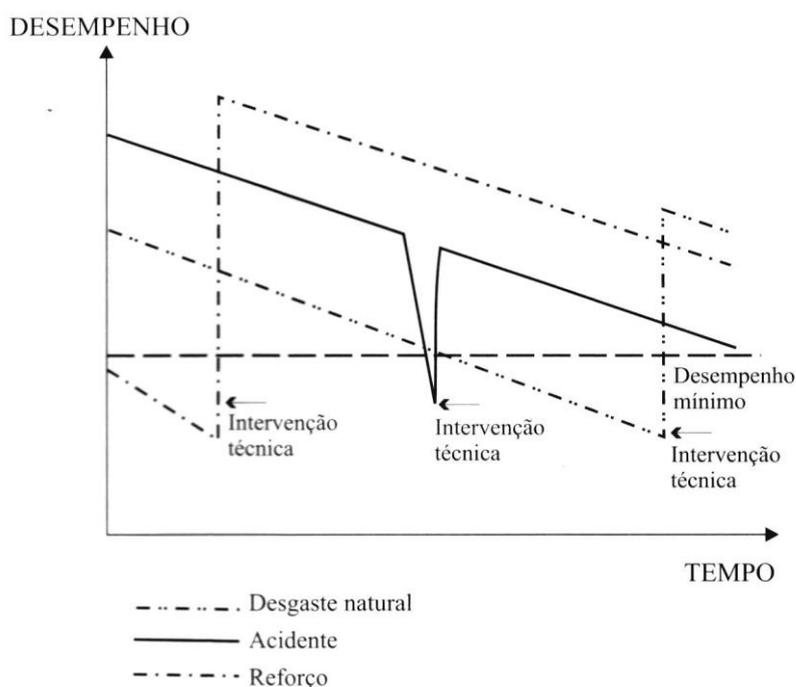
Os conceitos de vida útil e durabilidade se entrelaçam e se complementam. Durabilidade nada mais é do que o desempenho ao longo do tempo, expressa quantitativamente por meio da vida útil. (BOLINA; TUTIKIAN; HELENE, 2019).

Desempenho

Os conceitos de durabilidade e vida útil, estão bem relacionados a outro conceito, o de desempenho. O concreto tende a ter uma longevidade no seu desempenho de acordo com sua vida útil. Porém sabemos com o passar dos anos

qualquer elemento vai perdendo o seu desempenho, as manutenções existem para prolongar as funções naturais de funcionalidade. Entende-se por desempenho, o comportamento em serviço de cada produto, ao longo da vida útil, a sua medida espelhará, sempre, o resultado do Trabalho desenvolvido nas etapas de projeto, construção e manutenção (SOUZA, 2005).

Figura 6 - Diferentes desempenhos de uma estrutura, com o tempo em função de diferentes fenômenos patológicos



Fonte: (SOUZA,2005).

Na Figura 6 são representadas acima, genericamente, três diferentes histórias de desempenho estruturais, ao longo das respectivas vidas úteis, em função da ocorrência de fenômenos patológicos diversos (SOUZA, 2005).

A 1ª parte está representado pela curva traço-duplo ponto, está ilustrado o fenômeno natural de desgaste da estrutura. Quando existe intervenção, a estrutura se recupera, voltando a seguir a linha de desempenho, acima do mínimo exigido para sua utilização, podemos citar uma manutenção preventiva ou preditiva.

No segundo caso, representado por uma linha cheia, constata-se uma estrutura sujeita, em dado momento, a um problema súbito, como um acidente, por exemplo, que necessita, então, de imediata intervenção corretiva para que volte a comportar-

se, satisfatoriamente. Podemos exemplificar uma manutenção corretiva.

No terceiro caso, representado pela curva traço-único ponto, tem-se uma estrutura com erros originais, de projeto ou de execução, ou ainda uma estrutura que tenha necessitado alterar seus propósitos funcionais, situações em que se caracteriza a necessidade de reforço. A situação ideal, em relação a uma estrutura, será a de se desenvolver o projeto de forma que a construção venha ser bem feita e o trabalho de manutenção facilitado, mantendo-se a deterioração em níveis mínimos. (ZARZAR, 2007)

Durante o período de 2006 a 2012, o Brasil passou por um “BOOM da Construção Civil”, muitas obras e reformas foram erguidas com muito incentivo do governo. A construção civil atingiu seu ápice durante este período de notável quantidade de obras. Entretanto, se por um lado desencadeou um desenvolvimento em várias indústrias, principalmente as que estão diretamente ligadas ao setor construtivo. Tipo: Cerâmica, cimento, vedações etc.

Contudo, foi verificado a necessidade de um controle maior quanto ao desempenho dos materiais empregados. Diversas patologias ou problemas, identificados nestes materiais foram analisados e enviados aos laboratórios para estudo. A comunidade científica, junto com os conselhos técnicos e a sociedade, sentiram a necessidade de contribuir e a sociedade, sentiram a necessidade de contribuir de uma forma mais eficaz, na melhoria e padronização destes materiais quanto a sua performance ao longo do tempo. Surgiram as normas de desempenho em 2017. Dentre elas a NBR15575 Norma de Desempenho para edifícios habitacionais.

Foi criada com o objetivo de demonstrar claramente como os produtos usados em uma construção se relacionam com a qualidade de uso do imóvel ao longo do tempo. Ela estabelece os seguintes conceitos: para durabilidade do edifício e de seus sistemas é uma exigência econômica do usuário pois está diretamente associada ao custo global do bem imóvel. A durabilidade de um produto se extingue quando ele deixa de cumprir as funções que lhe forem atribuídas, quer seja por obsolescência funcional. O período compreendido de atender as exigências do usuário preestabelecidas é denominado vida útil. (NBR15575, 2019).

2.5 Patologias

Pathos, vem do grego significa doença, sofrimento, Logos: ciência, estudo, ou seja, estudo das doenças. A construção civil trouxe esta palavra bastante utilizado na área da saúde, e a identificou como patologias das construções. Anomalias e problemas na estrutura são identificados e visualizados com frequência nas construções.

A patologia das construções visa estudar os sintomas e os índices dessas anomalias, problemas (doenças). As análises obedecem a uma sequência semelhante na identificação de doenças. Identificar o problema os sintomas, sua consequência, suas origens (diagnóstico), recolher os dados (anamnese), analisar as consequências (prognóstico), propor a solução mais adequada (terapia), tomar as medidas preventivas para o problema não continuar em outras edificações (profilaxia). (BOLINA; TUTIKIAN; HELENE, 2019).

Quadro 1 – Definições: Nomenclatura e conceitos

| NOMENCLATURA | DEFINIÇÃO |
|-------------------------------|---|
| Patologias das construções | É a ciência que estuda os defeitos e as falhas em edificações e construções em geral. |
| Patólogo ou inspetor | É o profissional que trabalha com patologias das construções. |
| Vida útil de projeto (VUP) | Vida útil prevista e demonstrada no projeto executivo, com |
| Manutenção | Pode ser a preventiva, corretiva, preditiva e detectiva. Ver NBR 5674(ABNT,2012a) |
| Manifestação Patológica | São os defeitos, falhas e danos observados nas construções. Ex. Uma fissura ou um manchamento de elemento estrutural. |
| Profilaxia | São medidas preventivas adotadas para que não ocorram problemas nas construções. Ex. Adotar um cobrimento de concreto adequado para proteger as armaduras da corrosão. |
| Sintomatologia | É o estudo de como os defeitos se manifestam visualmente, no qual um patólogo ou inspetor se baseia para um diagnóstico preliminar do problema. |
| Anamnese | É a análise de documentos, projetos e do histórico da edificação. Pode incluir entrevistas com moradores ou usuários com conhecimento sobre o objeto de estudo, como um síndico ou vizinho antigo. |
| Ensaio não e semi destrutivos | Os ensaios não destrutivos não causam qualquer dano ao objeto de estudo, como no caso de uma esclerometria ou ultrassom. Já os ensaios semidestruídos causam alguma perturbação, como quando se extrai um corpo de prova de concreto para |

| | |
|-------------|---|
| | averiguar a resistência do elemento. |
| Diagnóstico | É a busca por se entender o que aconteceu. Qual o fenômeno instalado, por que ocorreu, quais as consequências: deve explicar os sintomas, as origens, e o mecanismo dos fenômenos envolvidos. |
| Prognóstico | É o que irá ocorrer com a edificação enferma caso nada seja feito para corrigir ou estancar o problema. Ex. O prognóstico para uma viga com corrosão de armadura pode ser o colapso estrutural. |
| Terapia | É a correção dos danos. Pode ser um reforço, reparo, restauro, retrofit, entre outras opções. |

Fonte: adaptado et al HELENE, 2019, pág. 33.

Nas normas da ABNT NBR 6118:2007 e ABNT NBR 12655:2006, relaciona os principais problemas de deterioração e envelhecimento do concreto (Medeiros; Andrade; Helene, 2011).

Problemas mais comuns em concreto:

- Expansão (sulfatos, magnésio, reação alcali-agregado);
- Lixiviação (águas puras e ácidas);
- Reações deletérias (eflorescências);

Problemas mais comuns na armadura:

- Corrosão devido a carbonatação;
- Corrosão devido a altos teores de ions cloretos;

Problemas de deterioração da estrutura:

- Ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, ações cíclicas (fadiga), deformação lenta (fluência), relaxação etc.

Quadro 2 - Principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado

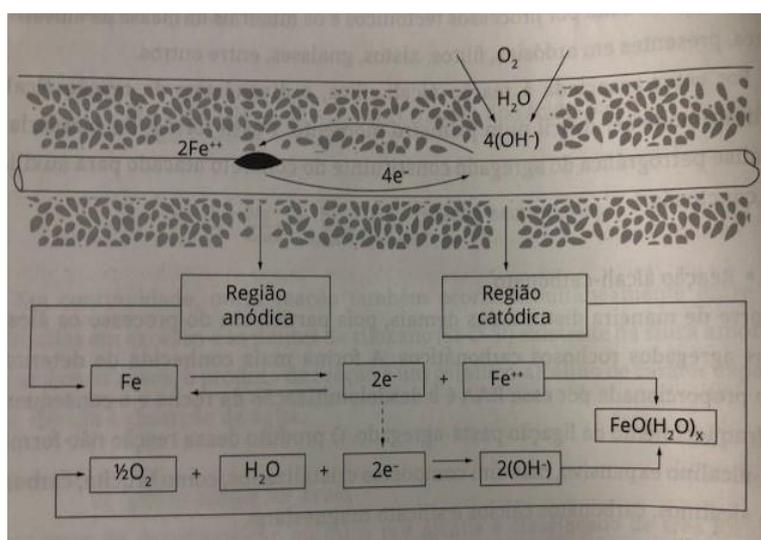
| Agressividade do ambiente | | Consequências sobre a estrutura | |
|----------------------------------|-------------------------------|--|---|
| Natureza do processo | Condições particulares | Alterações iniciais na superfície do concreto | Efeitos a longo prazo |
| Carbonatação | UR 60% a 85% | imperceptível | Redução do PH Corrosão das armaduras Fissuras superficiais |
| Lixiviação | Atmosfera ácida, águas puras | Eflorescências e manchas brancas | Redução do PH Corrosão das armaduras Desagregação superficial |

| | | | |
|-------------------------|--|--|--|
| Retração | Umedecimento e secagem, secagem, ausência de cura, UR baixa (<50%) | fissuras | Fissuras Corrosão das armaduras |
| Fuligem | Partículas em suspensão na atmosfera urbana e industrial | Manchas escuras | Redução do PH Corrosão das armaduras |
| Fungos e mofo | Temperaturas altas (>20°C e <50°C) com UR>75% | Manchas escuras e esverdeadas | Redução do PH Desagregação superficial Corrosão das armaduras |
| Concentração Salina, Cl | Atmosfera marinha e industrial | imperceptível | Despassivação e corrosão de armaduras |
| Sulfatos | Esgoto e águas servidas | fissuras | Expansão – fissuras Desagregação do concreto Corrosão de armaduras |
| Alcali agregados | Composição do concreto umidade, UR>95% | Fissuras e gel ao redor do agregado graúdo | Expansão – fissuras Desagregação do concreto Corrosão de armaduras |

Fonte: adaptado *et al*/HELENE, 2019.

A Corrosão é conceitualmente a interação destrutiva de um metal com o ambiente, promovendo a sua dissolução em íons metálicos por meio de reações químicas ou eletroquímicas (BOLINA; TITIKIAN; HELENE,2019). A corrosão mais comum encontrada é a eletroquímica que consiste num desencadeamento de reações de oxidação (regiões anódicas) e de redução (regiões catódicas), conforme apresenta a Figura 7.

Figura 7 - Mecanismo de corrosão eletroquímica



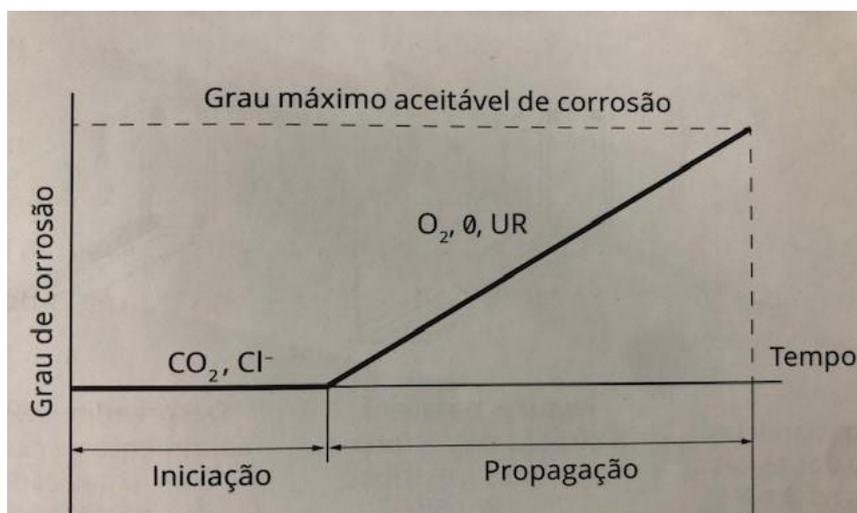
Fonte: Adaptado *et al*/Bolina, Tutikian, Helene, pág. 98, 2019

O processo de corrosão é um processo fácil de identificar quando se inicia, verificamos logo a cor avermelhada ou amarronzada, cor de ferrugem comum. O composto, descrito por $\text{FeOOH} + \text{H}_2\text{O} - \text{FeOOH}$, (PANNONI,2015). Sempre que ocorre uma reação o volume aumenta em comparação ao original, podendo chegar a 6 vezes o diâmetro original.

Na construção civil, é muito importante como forma de proteção do aço, para evitar a corrosão, o concreto, a camada de cobrimento do aço. O concreto promove uma proteção física e química. Proteção física quando o concreto fabricado é de boa qualidade, homogêneo e compacto, diminuindo sua porosidade, vai evitar a entrada de agentes agressivos. Proteção química está relacionada a alta alcalinidade do dos poros do concreto, devido aos hidróxidos produzidos na hidratação do cimento. A alta alcalinidade evita a corrosão pois, a barra de aço está passivada.

Num processo de corrosão os dois fatores principais que despessam o aço, segundo Tuutti (2019), são a carbonatação e a presença de íons cloreto, conforme figura abaixo.

Figura 8 - Modelo de Vida útil proposto por Tuutti



Fonte: Adaptado *et al*/ Bolina, Tutikian, Helene, pág. 99, 2019.

Para muitos pesquisadores, brasileiros os agentes agressivos quando atingem a armadura, independente das reações de corrosão a VUP, Vida útil de projeto é considerada finalizada. (BOLINA; TITIKIAN; HELENE,2019)

2.6 Ensaaios

Os Ensaaios podem ser classificados como: Destrutivos, Semidestrutivos e Não destrutivos. Os Destrutivos são aqueles que danificam o elemento a ser estudado, podemos relacionar os mais comuns, ensaios de resistência e tração. Os Semi destrutivos são aqueles ensaios que promovem um dano localizado, geralmente provocam um dano estético da peça, sendo necessário um reparo do dano. Exemplos: aspersão de fenolftaleína, aspersão de nitrato de prata, extração de testemunhos, espectrometria de fluorescência de raios X e a penetração de pinos.

Os ensaios não destrutivos são os mais indicados para estudos e análises. Eles não danificam o elemento estudado. Exemplos: fissurômetro, esclerometria, ultrassom, pacometria, resistividade elétrica, permeabilidade, termografia infravermelha e extensometria elétrica.

Na fase da análise do elemento a ser estudado, no nosso caso, os elementos estruturais do bloco G, vigas, pilares e lajes. Elaboramos um diagnóstico do problema, as manifestações patológicas podem ser identificadas sob a forma direta e indireta. Direta, seria nos casos que visualmente identificamos a patologia. Da forma indireta nos casos, é necessária utilização de equipamentos e materiais que possibilitam uma análise mais criteriosa e adequada para uma interpretação mais apurada.

Dentre os vários ensaios utilizados na academia, destacamos os ensaios realizados para o nosso estudo.

Aspersão de fenolftaleína

É um ensaio semidestrutivo, utilizado para definição da profundidade da carbonatação do concreto. Trata-se da remoção de um testemunho de concreto ou pó do material para borrifar a solução de fenolftaleína(C₂₀H₁₄O₄) Esta solução é diluída com álcool etílico para formação de um líquido quando aplicado no elemento a ser analisado pode apresentar a cor rosa o PH(potencial hidrogênico) está com PH acima de 12, ou seja, podemos afirmar que as armaduras estão protegidas contra a corrosão. A Penetração do CO₂ não atingiu a armadura. Não ocorreu a despassivação da armadura. Quando a cor do concreto estudado não muda de cor, ele encontra-se

com PH baixo 8,3 a 10,0. Ambiente de baixa alcalinidade propicio a despassivação da armadura, ou seja, a corrosão.

Aspersão de Nitrato de Prata

É um ensaio semidestrutivo muito utilizado para a identificação da profundidade de contaminação por íons cloreto de uma estrutura. Remove-se um testemunho da estrutura ou recolhe o pó. Asperge a solução de nitrato de prata (AgNO_3). Em peças contaminadas serão notadas duas regiões. Uma esbranquiçada indicando precipitação de AgCl - ou seja, a presença de íons cloreto no concreto e a outra marrom indica inexistência de íons.

Extração de Testemunhos

A extração de testemunhos é bastante relevante para se analisar as condições de uma estrutura. Utilizando equipamentos específicos (perfuratriz) para retirar o corpo de prova integro, obedece-se às medidas indicadas na norma NBR5738:2015, geralmente, forma cilíndrica (2X1), Ex. diâmetro 10cm e altura 20cm. Os ensaios mais utilizados de resistência a compressão e a tração.

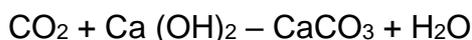
Microscópio de Varredura Eletrônica - MEV

O Microscópio de Varredura Eletrônica é um dos equipamentos mais utilizado quando se quer ampliar as imagens de uma amostra sólida. Estas imagens são bastantes eficazes na análise de características micro e nanoestruturais de amostras sólidas. Por meio de feixe elétrons de alta energia o equipamento permite obter imagens tridimensionais de amostras sólidas.

2.7 Carbonatação

A carbonatação é um processo físico-químico. O CO_2 dióxido de carbono, presente no ambiente penetra nos poros do concreto quando encontra espaço, reage com os hidróxidos de cálcio, do cimento Portland hidratado, ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Esta reação com o hidróxido de cálcio resulta o carbonato de cálcio (CaCO_3) o qual acidifica o

concreto.



O concreto possui um PH da ordem de 12,5 devido ao $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Silva, 1995), O principal efeito da carbonatação, segundo Metha e Monteiro (2008), é a redução da alcalinidade do concreto, ou seja, seu PH (potencial hidrogênico), hidróxido de cálcio se transforma em carbonato de cálcio.

O dióxido de carbono mais o hidróxido de cálcio reduz a alcalinidade para $\text{PH} < 9,0$. O Fenômeno da carbonatação reduz o PH para valores abaixo de 9,0 que compromete a camada passivadora do aço, favorecendo a corrosão.

As condições ambientais interferem diretamente no processo da carbonatação, a concentração do CO_2 no ambiente, a temperatura e a umidade. Um ambiente úmido e com grande concentração de CO_2 , penetra nos poros saturados do concreto, até a atingir a armadura para iniciar a corrosão. A umidade estimula a velocidade da carbonatação. Nos ambientes de exposição internos a carbonatação é maior que nos ambientes externos. Em ambientes externos em dias chuvosos a carbonatação é mais lenta devido a saturação dos poros. (Andrade, Ortolan, Schiavon, 2018).

Alguns fatores aceleram o fenômeno da carbonatação como: a porosidade, tempo de cura, aditivos, composição química e o tipo do cimento, associados ao ambiente úmido com alta concentração de CO_2 . Se a profundidade da carbonatação (CO_2) < Cobrimento do aço, a estrutura encontra-se em estado de segurança.

Se a profundidade da carbonatação (CO_2) > Cobrimento do aço, a estrutura encontra-se em estado de alerta e inspira cuidado. O estudo da carbonatação é extremamente importante para se analisar a durabilidade do concreto.

O ensaio para identificar se a estrutura de concreto está carbonatada ou não, é o ensaio de fenolftaleína, onde esta solução misturada com álcool etílico, é aspergida no concreto. Se a cor for incolor a peça está carbonatada então se mede com um escalímetro ou paquímetro, esta seção que houve a captura. Se a cor na seção for cor de rosa a seção não foi carbonatada, ou seja, a armadura está em segurança.

Alguns estudos indicam que a velocidade da carbonatação é lenta ao longo do tempo. Esse processo é devido a hidratação crescente do cimento e devido ao próprio produto da carbonatação o CaCO_3 , se não forem lavados pela água da chuva,

colmatam os poros mais superficiais, dificultando a entrada e a renovação do CO₂ (BOLINA, TUTIKIAN, HELENE, 2019). A velocidade desta reação é de $t^{1/2}$, sendo t o tempo, (TUUTTI, 1982).

Existe uma divergência na academia com relação ser ou não ser prejudicial as estruturas de concreto? Enquanto sustentam que a perda da alcalinidade, diminuição do PH, pode corroer o aço, outra defende que a carbonatação através do processo eletroquímico não é capaz de se propagar, devido a colmatação dos poros, proporcionado pelo CaCO₃.

O cimento no seu processo de calcinação, origina-se de um processo inverso a descarbonatação da rocha calcária. O Calcário extraído de uma jazida, no processo exotérmico, ou seja, na queima (calor), em torno de 1500°C, se transforma no clínquer que é o óxido de cálcio com a emissão do CO₂. A este processo se chama de clinquerização.



Os estudos sobre o balanço do CO₂, demonstraram que as estruturas possuem a capacidade de captar ou sequestrar o CO₂, através do processo de carbonatação. A carbonatação é um processo químico (POSSAN,2012), pois o hidróxido de cálcio, presente na matriz cimentícia reage em contato com água. A carbonatação ocorre em toda a vida útil de uma estrutura de concreto e até mesmo após sua demolição onde é mais intensa (PADE;GUIMARÃES, 2007). No pocesso químico de reação, a presença da água na pasta hidratada do concreto, diminui a alcalinidade do concreto que em bom estado possui, seu pH em torno de 12,5, a carbonatação no seu efeito deletério diminui a alcalinidade para níveis em torno de 9,0ph, facilitando a retirada de cátions +, que podem através da corrosão, despassivar a armadura. Ocorre um processo inverso, no caso a carbonatação aprisiona o CO₂, enquanto na produção do cimento libera para o ambiente o CO₂.



2.7.1 Íons Cloreto

O ataque por cloretos é extremamente prejudicial a estrutura de concreto, pois na presença de cloreto o concreto tende a acumular mais umidade, torna o espaço propício para a corrosão, conseqüentemente a iniciar o processo de despassivação da armadura.

Os íons cloretos podem ser encontrados no ambiente (principalmente em região próximo ao mar) ou na fase de preparação do concreto, nos materiais utilizados no traço do concreto.

Os parâmetros envolvidos na penetração dos íons cloretos são praticamente iguais aos da penetração do dióxido de carbono. São: tipos de cimento, a relação água/cimento, o grau de saturação dos poros, o efeito do cátion que acompanha o íon cloreto, a existência de fissuras, a carbonatação e a temperatura (apud et al, Helene, 2019).

2.7.2 Resistência do Concreto

O ensaio da resistência a compressão é um dos testes, mais comuns utilizados para extrair a resistência mecânica mínima para um concreto cumprir seu desempenho estrutural. O teste é realizado em laboratório com uma prensa, insere corpo de provas, e através da deformação, estabelece um gráfico das tensões com os fck's obtidos. A norma que estabelece os critérios para realizar o ensaio a compressão é a NBR 5738 e NBR 5739. Os testes a compressão são importantes para uma qualidade de uma obra. Garantir os parâmetros mínimos estabelecidos pela norma de desempenho daquele elemento estrutural.

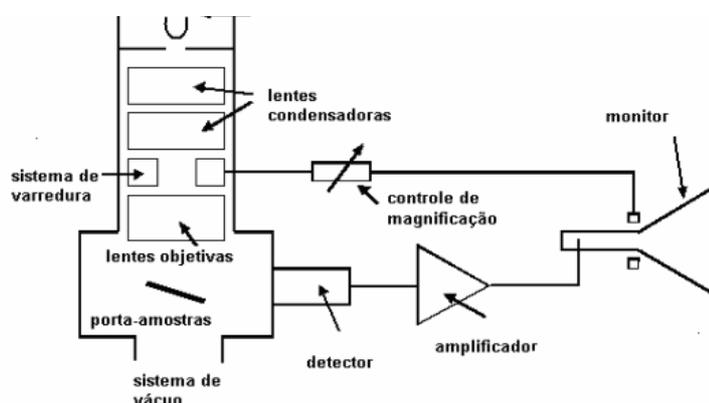
As análises são avaliadas pela idade dos corpos de provas a partir do dia da moldagem em 7, 14 e 28 dias durante a hidratação do concreto. Numa obra, na fase de concretagem da estrutura, retira-se um corpo de prova com o molde metálicos, geralmente cilíndrico, cujas medidas de 10cm X 20cm das amostras, estes moldes são retirados para o ensaio de acordo com suas idades, 7 dias, 14 dias e 28 dias.

2.7.3 Microscópio de Varredura Eletrônica - MEV

Oriundo da biologia, o estudo das microestruturas é separado em Microscopia

Eletrônica de Transmissão (MET) e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A microscopia eletrônica de transmissão permite a visualização da estrutura em duas dimensões. A microscopia eletrônica de varredura permite a visualização da microestrutura em três dimensões com elevado índice de detalhamento da amostra (TORTORA, FUNKE, CASE; 2005). Seu uso tem se tornado bastante comum nos últimos anos para análise de estrutura de materiais cimentícios, como concreto e argamassas (CORREIA et al, 2014). Equipamento e descrito da Figura 9 abaixo.

Figura 9 – Equipamento MEV



Fonte: DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007, p. 14.

O MEV consiste em utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra, ele captura os elétrons recebidos e faz uma análise da amostra, um leitor capta o feixe disperso de elétrons transmitindo-o para uma tela, o sinal da imagem resulta da interação do feixe incidente com a superfície, dependendo da deformidade da amostra obtemos um objeto tridimensional (TORTORA, FUNKE, CASE; 2005).

Para uma interpretação da forma correta, deve-se levar em consideração a presença dos elétrons do próprio átomo. O elétron do feixe ao penetrar no átomo irá interagir também com os elétrons ao redor do átomo resultando principalmente em espalhamento inelástico do elétron e transferência de energia para o átomo. O elétron perde energia no seu caminho através do material. Esta energia é então liberada da amostra de diferentes formas, dependendo do tipo de interação entre o elétron primário e os átomos da amostra.

A observação da microscopia do concreto possibilita a identificação de três componentes do concreto: a pasta de cimento, as partículas de agregado e os vazios. Três fases são de importante observação: agregado, matriz da pasta de cimento e uma interfase bem definida entre estas, denominada de Zona de Transição (ZT) (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A zona de transição é definida por ser uma região com maior porosidade e heterogeneidade que o restante da amostra. Este aumento na quantidade de poros é atribuído à elevação da relação a/c na mistura, em decorrência do filme de água que se forma ao redor do agregado graúdo, que com o passar do tempo desaparecem deixando espaços vazios (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Amostras de concreto foram analisadas no MEV, com a finalidade de observar a microestrutura do traço, e consistiam em fragmentos de concreto retirados diretamente da estrutura do edifício. As amostras foram tratadas com álcool etílico para paralisação das reações de hidratação. A preparação prévia do material a ser analisado consiste na aplicação de uma fina película de ouro, e para tanto foi utilizado o equipamento de vácuo.

Acochado ao microscópio, existe o equipamento de Espectrometria de Dispersão de Energia (EDS), o qual possibilita a identificação dos elementos químicos presentes nos pontos selecionados nas imagens durante o processo de varredura, auxiliando então na identificação de cristais, vazios e componentes.

Ao analisar as imagens, pode-se obter informações tanto estruturais quanto químicas. Em relação as análises estruturais, podemos obter uma orientação quanto a qualidade da interfase entre agregado graúdo e pasta, presença de impurezas, bolhas, trincas, superfícies irregulares, entre outras coisas. Essas identificações ajudaram a mapear o concreto, a partir dos resultados podemos verificar sua resistência, relação água cimento grande ou pequena, probabilidade de resistência alta ou baixa.

A utilização das imagens por meio da microscopia eletrônica de varredura está sendo bastante utilizada para análise de uma estrutura de concreto. Estas imagens captadas ajudam na identificação dos materiais constituintes, a forma da amostra e possíveis mecanismos e patologias que afetam esta amostra. A ferramenta pressupõe a análise de seções polidas, preparadas anteriormente, o MEV micrografias através de um feixe de elétrons capazes de ampliar a imagem 300.000 vezes.

Os materiais constituintes da amostra, tipo dos agregados, poros grandes, pasta, defeitos, podem ser estudados quando a imagem é obtida em baixas ampliações. Em ampliações elevadas, é possível observar a morfologia das fases amorfas (C-S-H) e cristalinas (monosulfatos, ettringita) e poros muito pequenos, (CORREIA, 2014). O MEV consiste numa varredura de feixe elétrons que captam a imagem de interesse e coletam informações.

2.8 ÁREA DE ESTUDO: UNIVERSIDADE CATOLICA DE PERNAMBUCO – BLOCO G

A UNICAP – Universidade Católica de Pernambuco, está localizada na cidade do Recife, capital do Estado de Pernambuco, está localizada na Região Nordeste do país, numa área territorial de aproximadamente 218 km². Situada à beira mar do Oceano Atlântico, cujas coordenadas geográficas, latitude 8° 04' 03" s e longitude 34° 55' 00" w. É formada por uma planície aluvial com ilhas, penínsulas e manguezais que perfazem as suas principais características geofísicas, como mostra a Figura 10.

Figura 10 – Campus da UNICAP e Bloco G ao fundo



Fonte: Plano diretor da UNICAP,2017.

De acordo com o IBGE/2021, a cidade de Recife possui grande densidade demográfica. Com uma população de mais de 1,6 milhões de habitantes, alcança uma proporção mais de 7 mil habitantes por Km²: uma média bem superior à estadual, que é de aproximadamente 89 habitantes por km².

A capital pernambucana absorve a quarta maior infra-estrutura de gestão federal, entre as capitais do país. É reconhecida pela dimensão do seu polo médico, protagonismo no turismo de negócios e nos campos da tecnologia da informação e de serviços em geral. O PIB do Grande Recife é superior a R\$33 bilhões, como resultado da diversidade de suas atividades econômicas, o que faz da capital pernambucana o município de maior importância econômica e representatividade populacional de Pernambuco e do Nordeste.

Nesse passo, a cidade de Recife se faz singularmente complexa, sob o ponto de vista ecológico, que traduz aspectos econômicos, urbanísticos, geofísicos e sociais, a definirem uma irrequieta identidade local.

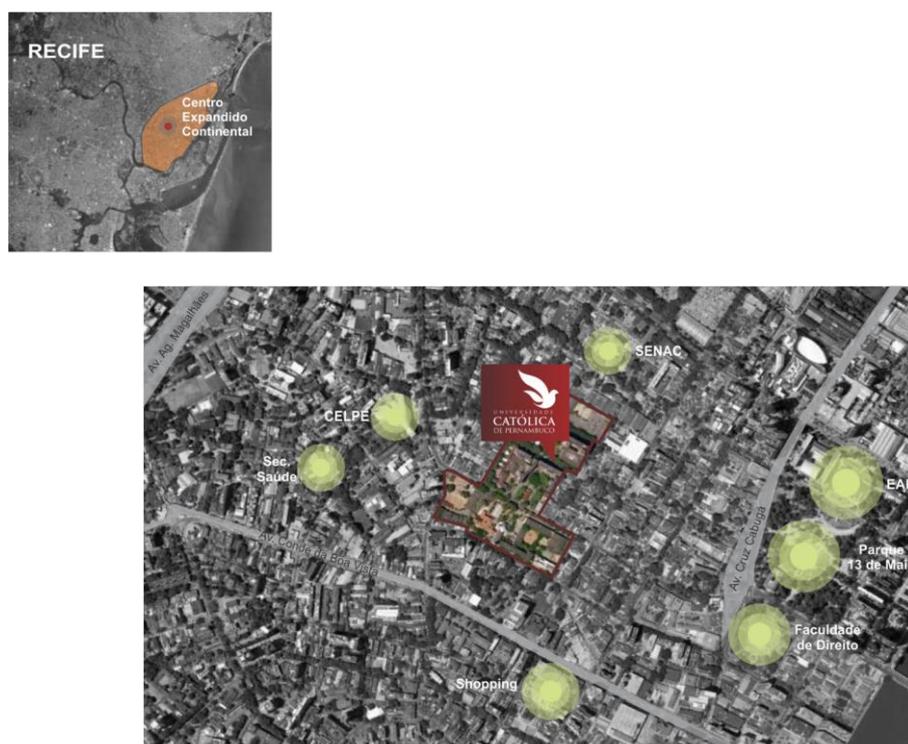
A Prefeitura classificou em 2015, a área localizada da UNICAP, especificamente a localização do bloco G em: O Centro Expandido Continental do Recife compreende os seguintes bairros: Ilha do Leite, parte do bairro do Paissandu, Coelhos, Boa Vista, Santo Amaro e Soledade. Trata-se de uma área de aproximadamente 600 ha, que vai da Avenida Agamenon Magalhães até a frente d'água banhada pelos rios Capibaribe e Beberibe, à Rua da Autora.

É um lugar de confluência de pessoas que vêm de diversos pontos do Recife e outros municípios, para a realização de compras, utilização das estruturas de serviços e lazer existentes, práticas de cultos religiosos, entre outras atividades que acontecem numa região em que, diariamente, circulam cinco vezes mais pessoas do que a população nela residente. O Centro Expandido Continental da Cidade do Recife também vem se constituindo num ponto de referência para a integração interbairros, a partir da ligação que se estabelece entre várias linhas de ônibus.

Esse espaço da cidade concentra corredores, vias arteriais principais e secundárias, e vias coletoras do tráfego do Recife, com uma demanda média de 60 mil veículos durante o dia. Cerca de 74,5% das linhas de transporte coletivo circulam por seus principais corredores viários. Nota-se neste trecho da cidade do Recife uma grande concentração de pessoas e meios de transporte, com grande concentração de CO₂, atenuadas pelas ruas ricas em arbustos e árvores históricas.

A situação geográfica da UNICAP, ente os bairros da Boa Vista e Santo Amaro, é identificada como marco referencial do Centro Continental do Recife. O acesso às principais vias de conexão da cidade [Avenidas Conde da Boa Vista (eixo leste-oeste), Governador Agamenon Magalhães e Cruz Cabugá (eixos norte-sul)] e a sua proximidade com diversos equipamentos urbanos, de grande valor para a cidade, como o Parque Treze de Maio, a Faculdade de Direito do Recife, o SENAC, Shopping Boa Vista e a Cia. Energética de PE, dentre outros, vocaciona o campus da UNICAP a uma das principais áreas de uso da população, nessa região central da cidade, como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Locação da UNICAP



Fonte: Plano diretor da UNICAP,2017.

Além dos serviços educacionais e das missas diárias, o acesso à Biblioteca Central e a serviços jurídicos e de saúde, ofertados pela UNICAP, atrai pessoas para o seu campus, ampliando a área antes compreendida como central da cidade, desde que passou a reunir características comuns às observadas no conhecido centro do Recife, com a criação de atividades comerciais e de prestação de serviços destinadas não só aos seus professores, estudantes e trabalhadores em educação.

No entorno da UNICAP, além da conhecida atividade comercial, tem-se o desenvolvimento de importante núcleo jurídico da cidade, com dezenas de escritórios

de advocacia nas ruas adjacentes ao seu campus. Outrossim, serviços educacionais que caracterizam essa área como um proeminente núcleo educacional, oferecem cursos de idiomas, preparatórios para o acesso ao ensino superior e concursos, técnico-profissionalizantes, além da educação infantil, média e superior, através de escolas e outras instituições de ensino de diversas naturezas.

Mais serviços, como os de alimentação, estacionamento e laboratorial, ainda são identificados nas áreas próximas ao campus, integrando uma profícua relação entre a UNICAP e a cidade, cujas dinâmicas apresentam fatores de influência mútua, a definir aspectos de mobilidade e infraestrutura, dentre outros, que compõem o Centro Continental do Recife.

O Bloco G da UNICAP é composto por 70 salas de aulas, diretório acadêmico de Direito, salas de convivências, auditórios, salas multiusos, laboratórios, quiosques comerciais, salas administrativas e secretarias, coordenações e salas de professores. Ocupando uma área de 15.912,30m². Dividido em 3 partes ou setores. Conforme projeto A, B e C. Bloco com função acadêmica que ao longo do tempo foi denominado operacionalmente em G1, G2 e G3. Sua área construída está descrita no Quadro 3.

Quadro 3 – Dados e Áreas do Bloco G

| Bloco | | Rua Afonso Pena, 178 | | Função: | | Acadêmico | | | | |
|------------------------------|-----------|-------------------------|-----------|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|---------|
| G | | | | Sequencial: | | 116707.3 | | | | |
| Área Total Construída | | 15912,30 | | m² | | | | | | |
| | 2º | | 5º | | 6º | | | | | |
| Térreo | 1º pavto. | 2º pavto. | 3º pavto. | 4º pavto. | 5º pavto. | 6º pavto. | 7º pavto. | 8º pavto. | c. máquinas | coberta |
| 1593,05 | 2091,65 | 1683,78 | 1567,18 | 1916,98 | 1683,78 | 1683,78 | 1683,78 | 1683,78 | 324,54 | 1719,24 |

Fonte: Autor, 2021

Em 21 de outubro de 1977, foi formado um grupo técnico de obras (GTO), definido pela Reitoria e presidido pelo Eng. Mario de Oliveira Antonino, com o objetivo de planejar à execução das obras de ampliação do “Campus” da UNICAP. O histórico apresenta trabalhos desenvolvidos por este grupo antes da formação oficial, trabalhos estes iniciados em julho de 1977. O final da quinzena de janeiro de 1978, marca o encerramento do Reitorado do Monsenhor Rubens Gondim Lóssio e início da gestão

do Pe. Antônio Geraldo do Amaral Rosa S.J., coincide também com a liberação da primeira parcela da verba da Caixa Econômica Federal, destinada ao financiamento parcial da construção do prédio Acadêmico, seria identificado posteriormente como bloco G, Prédio Administrativo, aprovação de projetos e providências iniciais para a edificação do prédio da Biblioteca Central.

2.8.1 Características Técnicas e Início da obra

O Grupo Técnico de Obras, composto pelos Engenheiros, Mário Antonino, Romilde Almeida e José Maria. Realizou todo o planejamento: de projetos, aprovações dos projetos, contratação das empresas para execução, fiscalização e controle técnico.

O projeto estrutural foi elaborado pelo Eng. Romilde Almeida. O controle tecnológico estabelecido pelo Eng. José Maria Vasconcelos, com traços para concreto com resistência de (FCK) 15Mpa e após 28 dias 25 Mpa, estabeleceu aí, um parâmetro médio para as resistências a compressão. Os Ensaio de concreto a compressão em conformidade a ABNT MB 3, confirmaram as resistências pré-estabelecidas na fase de projeto estrutural.

O estaqueamento foi executado pelas estacas Franki Ltda, concluído em 24 de janeiro de 1978, totalizando 38 estacas de 520mm de diâmetro e 244 estacas de 600mm, conforme projeto elaborado, na Figura 12 mostra a execução das estacas na construção.

O GTO informava tecnicamente, através do diário de obras mensalmente a direção da UNICAP. O ITEP- Instituto Tecnológico de Pernambuco, realizou os ensaios a resistência a compressão da obra, informando e registrando as diferentes resistências encontradas em diversas peças. Este material foi documentado e registrado pelo GTO. A empresa executora e ganhadora da concorrência foi a MARPEF Engenharia S.A.

Em janeiro de 1978 foi concluído a etapa de estaqueamento e durante o período de maio a julho de 1978 foram realizadas as seguintes etapas: serviços de infraestrutura, blocos sobre estacas e cintas de fundação. Continuação serviços de superestrutura durante este mês. A laje de piso do 2º pavimento, no projeto havia sido prevista do tipo pré-moldada, por razões técnicas foi realizada em concreto armado estrutural.

No dia 24 de maio, foram iniciadas as escavações para as sapatas de fundação, atividades necessárias ao cumprimento do cronograma físico da obra. Atendidas as exigências da Prefeitura Municipal do Recife, especialmente as vinculadas ao estacionamento, no dia 16 de junho, foi deferida a licença de construção, do prédio administrativo.

Figura 12 – Logística das Estacas Franki chegando na obra

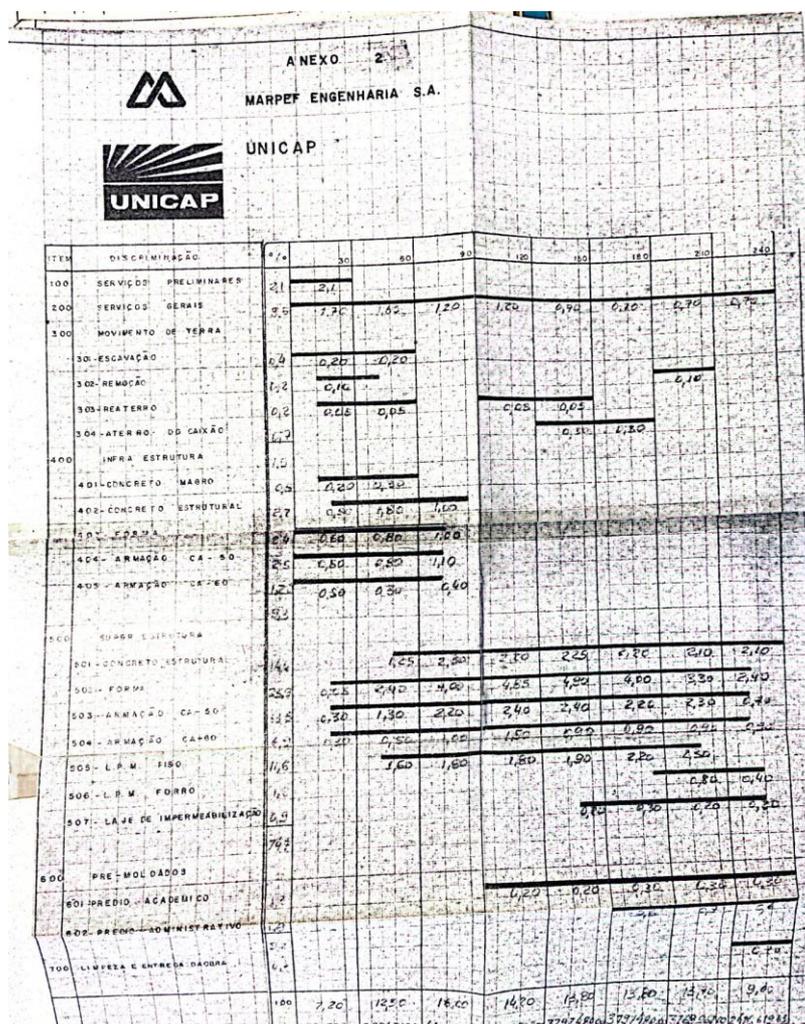


Fonte: Relatórios UNICAP, 1978

A Rampa, no mês de maio, foram iniciadas as escavações para as fundações, preparo de formas e armações. Até final de julho a obra já havia movimentado: Concreto magro $135,00\text{m}^3$, concreto estrutural: infraestrutura e superestrutura $2.432,00\text{ m}^3$. Formas: $17.085,00\text{m}^2$, Armação CA 60 e CA50 com 347.377 toneladas, lajes pré-moldadas e pisos $1.214,00\text{ m}^2$. Fonte: diário do GTO de maio a 15 de julho de 1978.

Através do diário de obra e relatórios o GTO documentava e informava a direção da Universidade, estes procedimentos ocorreram durante a execução da obra que foi prevista para durar 240 dias, como mostra o cronograma na Figura 13. Relatos como este acima, compõe um marco com a cronologia de execução. Conforme figura abaixo o cronograma da obra, foi elaborado pela MARPEF Engenharia, com prazo de 240 dias, cada etapa, foi dividida com seus percentuais de execução:

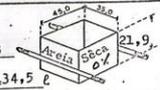
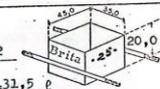
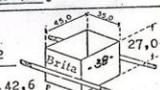
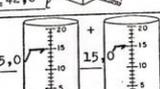
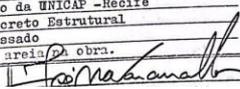
Figura 13 – Cronograma da Obra



Fonte: Relatórios UNICAP, 1978

Complementando os dados técnicos da obra do bloco G, conseguimos pesquisar, através dos relatórios elaborados pelo GTO (Grupo Técnico de Obra), o controle tecnológico da obra que consiste: a resistência a compressão, de acordo com projeto estrutural do Professor Romilde e traços elaborados pelo Professor José Maria, com tensões iniciais de 17 Mpa e aos 28 dias 25 Mpa. Os traços eram elaborados pelo Professor José Maria, emitindo fichas de controle e determinando as quantidades necessárias de cimento, agregados e água. Os ensaios eram realizados no ITEP com supervisão do Professor José Maria, sua ficha de controle está mostrada na Figura 14.

Figura 14 - Ficha com controle do traço do Concreto

| MATERIAIS | | EM PESO | | EM VOLUME | | EM VOLUME | |
|-------------------------|---|---|--------|--------------------|---------|------------------------|---|
| | | UNITAR. | Em kg. | UNITAR. | Em Lit. | AGREGADOS em CILINDROS | |
| CIMENTO | | 1,00 | 50,0 | 1,00 | 35,2 | 1 | |
| CP - 320 | | | | | | |  |
| AREIA | Um. Sup.: 0 % D. max. = 2,4 mm $\delta = 1,44 \text{ g/cm}^3$ | 2,98 | 149,0 | 2,94 | 103,5 | 3 |  |
| BRITA "A" | D. max. = 25 mm $\delta = 1,34 \text{ g/cm}^3$ | 1,69 | 84,5 | 1,79 | 63,0 | 2 |  |
| BRITA "B" | D. max. = 38 mm $\delta = 1,35 \text{ g/cm}^3$ | 2,30 | 115,0 | 2,42 | 85,2 | 2 |  |
| AREIA | Um. Sup.: 4 % D. max. = 2,4 mm $\delta = 1,23 \text{ g/cm}^3$ | 3,10 | 155,0 | 3,58 | 126,0 | 3 |  |
| ÁGUA | A = 7,53 % | 0,60 | 30,0 | 0,85 | 30,0 | 15,0 |  |
| Adensamento: Vibratório | | Consumo de Cimento (previsto) = 282 kg/m ³ | | Controle: Razoável | | | |
| | | Água máxima para areia a 4 % = 24,0 l | | | | | |
| | | f _r = 170 kg/cm ² - Cont.: Razoável - f _d = 255 kg/cm ² (Aos 28 dias) | | | | | |
| | | Prédios: Acadêmico e Administrativo da UNICAP - Recife | | | | | |
| | | MARPEP ENGENHARIA SA - Concreto Estrutural | | | | | |
| | | Materiais fornecidos pelo interessado | | | | | |
| | | * Correção para unidade média da areia da obra. | | | | | |
| | | CERTIFICADO:  | | | | | |

Fonte: Relatórios do GTO, 1978

Nota-se no controle tecnológico a preocupação do GTO, na qualidade dos materiais empregados para o traço do concreto. Os agregados: areia, brita, eram identificados e realizados uma análise para identificar a procedência. As fichas de controle, orientavam a medir, conforme as especificações técnicas da norma da ABNT MB-03.

O cimento utilizado foi o Poty 320 do grupo Votorantin. As britas e areias eram selecionadas e catalogadas de acordo com sua granulometria e origem. Existia um procedimento criterioso de seleção e controle destes agregados, a fim de obter a resistência em conformidade com o projeto estrutural. Na Figura 15 mostra os resultados dos ensaios de compressão.

Figura 15 – Ficha com resultado do ensaio de resistência a compressão

R. Buenos Aires, 137 - Espinheiro - Fone: 2222924 - Recife, PE
 Engenheiro Civil - CREA: 685 - D 2.ª R
 Matrícula INEP: 10937641645
 Inscrição PISM: 30292-1
 CPF: 000436094

CERTIFICADO: 167 / 78

ensaio de concreto à compressão
 (ABNT-MB-3)

obra: Prédios: Acadêmico e Administrativo da UNICAP
 local: CAMPUS da Univ. Católica de Pe. - Recife
 interessado: MARPEF ENGENHARIA SA
 data: 16/5/78

| corpo de prova | | data de moldagem | data de ruptura | idade (d) | resistência à compressão (kg/cm ²) | |
|----------------|------------|------------------|-----------------|-----------|--|-------|
| n.º | referência | | | | individual | média |
| 1 | 324/78 | 30/3/78 | 03/5/78 | 34 | 230 | 234 |
| 2 | | | | | 238 | |
| 3 | 325/78 | 31/3/78 | 03/5/78 | 33 | 240 | 243 |
| 4 | | | | | 246 | |
| 5 | 326/78 | 31/3/78 | 03/5/78 | 33 | 244 | 246 |
| 6 | | | | | 248 | |
| 7 | 327 | 04/4/78 | 02/5/78 | 28 | 242 | 242 |

obs.:

a) Moldagem do CP: (MB-2) Pelo interessado
 b) Cimento empregado: CP - Poty - 320
 c) Referência de moldagem:

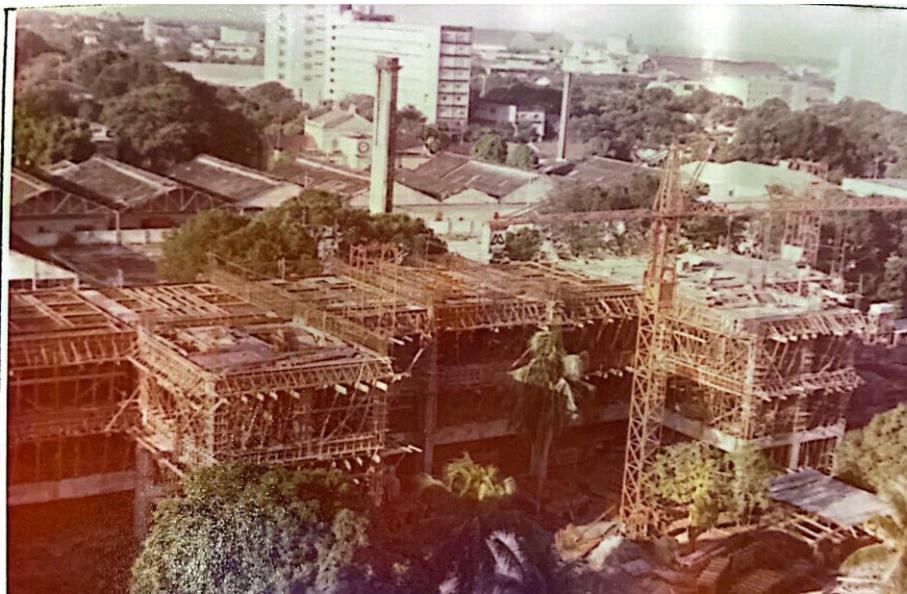
324/78 - : Bloco-A : Bl. Fundação -P.10
 325/78 - : Bloco-B : Pilar -P.7 - (Vib. Imeroso)
 326/78 - : Bloco-B : Pilar -P.7
 327/78 - : Bloco-C : Bl. Fundação -P.4 - (Vib. Imeroso)

[Assinatura]

Fonte: Relatórios do GTO, 1978

Após pesquisas dos históricos construtivos do campus da UNICAP, encontramos várias fichas com resultados dos ensaios de resistência a compressão, onde cada elemento estrutural era identificado e podemos extrair uma média de 25Mpa o resultado geral das resistências obtidas para 28 dias de cura do concreto. O GTO, elaborava trimestralmente relatórios para informar a direção da UNICAP, o andamento da obra, com as características técnicas da obra, acompanhamento do cronograma, diários de obra, fichas de controle e fotos das etapas, ou seja, realizava um gerenciamento construtivo do bloco G., na Figura 16 mostra ao andamento da construção.

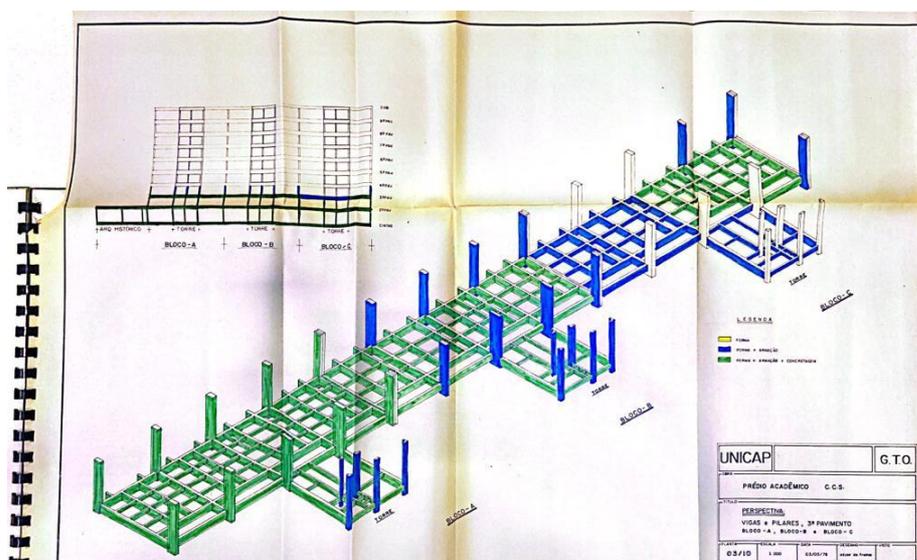
Figura 16 – Andamento da obra de construção do Bloco G, por etapas



Fonte: Relatórios do GTO,1978

O gerenciamento realizado pelo GTO da UNICAP, consistia em vários documentos técnicos gerenciais, inclusive o desenho do andamento da obra por etapas conforme Figura 17, abaixo.

Figura 17 – Planta do andamento da obra do Bloco G, por etapas



Fonte: Relatórios do GTO,1978

3 METODOLOGIA

O método utilizado para desenvolver esta pesquisa baseia num método de análise qualitativo e quantitativo de amostras extraídas do bloco G da UNICAP.

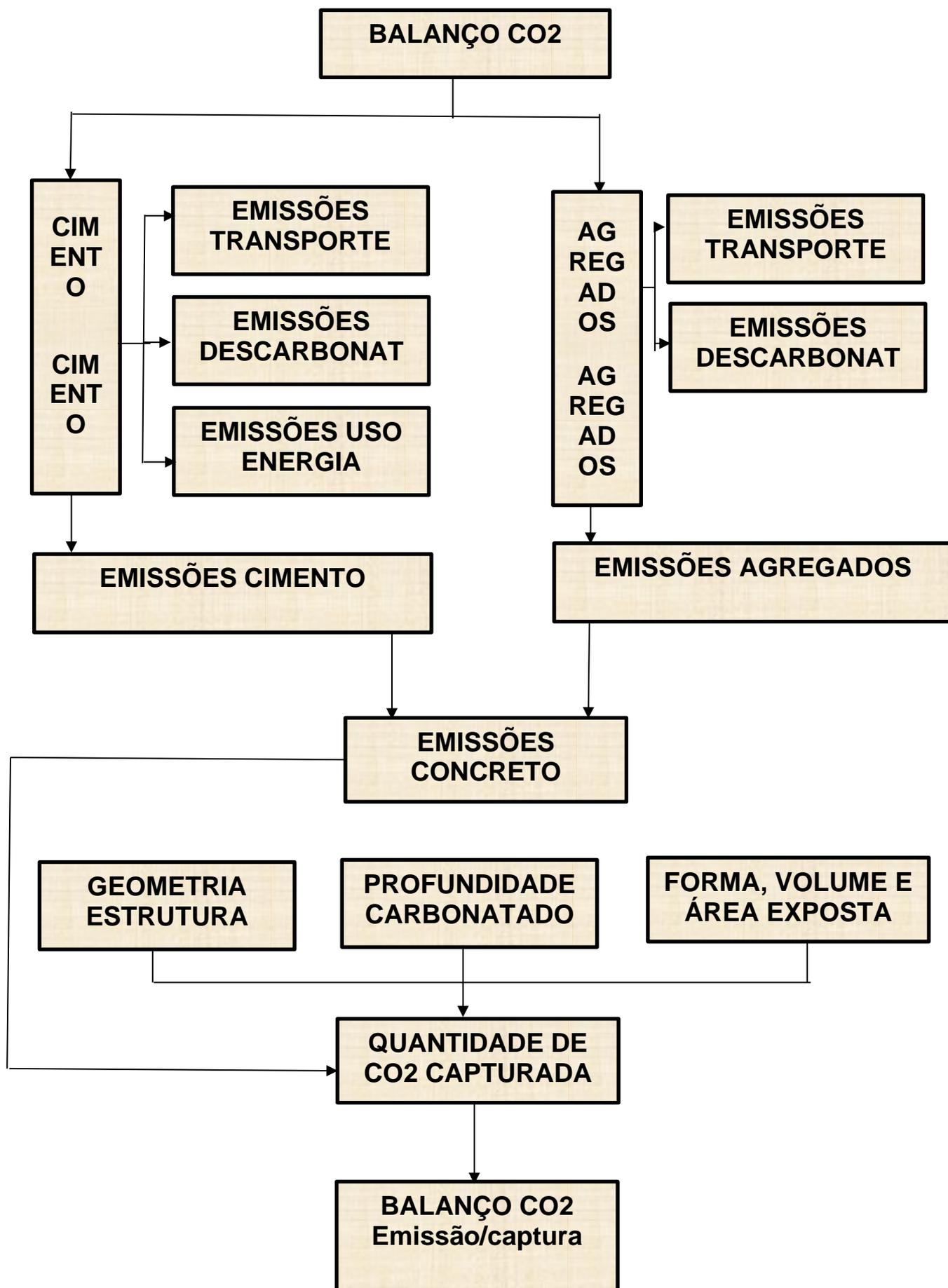
Método Qualitativo utilizado compreende uma análise exploratória e documental, utilizando técnicas de pesquisas documentais e bibliográficas. O método qualitativo tem o objetivo de como a amostra se apresenta, suas características físicas, sua composição, se estão carbonatadas? Qual a profundidade carbonatada? Para enriquecer o estudo serão identificadas, se as amostras indicam presença de íons cloretos.

Foi realizado uma média da resistência a compressão de algumas amostras, para compararmos com o traço e ensaios pré-estabelecidos no período da construção. Outro fator importante analisado no estudo foi a análise por imagens no MEV de algumas amostras carbonatadas, apresentando mais detalhadamente a composição física destas amostras. Além da análise do referencial teórico e o que foi literalmente identificado. O método quantitativo foi elaborado a partir de técnicas estatísticas, utilizando inferências estatísticas, através do método da curva normal, desenvolvida por Gauss, os cálculos do balanço do CO₂ seguiram a metodologia desenvolvida por Possan e os cálculos obtidos a partir do levantamento dos dados técnicos construtivos do bloco G, foi possível obter os resultados de percentuais do volume carbonatado e volume concretado da amostra. Foi avaliada a quantidade da amostra e suas referências numéricas. Qual a média das profundidades carbonatadas? Qual o percentual da amostra carbonatada em relação ao volume concretado? Qual o percentual das amostras com presença de cloretos? Qual foram os valores dos ensaios a resistência a compressão?

Para obtenção do balanço do CO₂, utilizamos o método elaborado por Possan e Félix em 2017. Metodologia para estimativa do balanço do CO₂.

Devido o assunto de captação do CO₂, associado as estruturas de concreto ser recente, a literatura apresenta poucos trabalhos, adotamos a metodologia desenvolvida por Felix, Possan e Thomaz em 2017, foi dividido em etapas e desenvolvido um fluxograma para se adequar ao estudo corrente, conforme fluxo abaixo:

Fluxograma para determinação do BCO2 no bloco G



ETAPAS

Etapa 1: Determinação das características do concreto e das condições de exposição da estrutura;

Etapa 2: Estimativa das emissões de Co₂;

Etapa 3: Estimativa da profundidade de carbonatação;

Etapa 4: Estimativa da captura de CO₂ ao longo da vida útil da estrutura de concreto;

Etapa 5; Estimativa da captura de CO₂ no período pós demolição;

Etapa 6: Balanço do CO₂:

Etapa 1: Determinação das características do concreto e das condições de exposição da estrutura;

Diversos fatores influenciam direto e indiretamente a carbonatação no concreto, podemos citar: Traço do concreto, tipo de cimento, geometria da estrutura, ambiente, características do ambiente, exposição da estrutura, umidade, agentes agressivos do ambiente. Onde podemos determinar estas variáveis e estabelecer uma tabela com dados de entrada.

Etapa 2: Estimativa das emissões de CO₂

As emissões de Co₂, provenientes da produção do concreto foram estimadas, desde a fabricação do cimento, produção dos agregados e o transporte até o canteiro de obra, seja o concreto usinado ou concretado em obra. Felix e Possan, através de dados do IPCC (Intragovernmental Panel on Climate Change) e o CSI (Cement Sustainability Initiative), desenvolveram equações com base em cálculos estequiométricos para estimar o CO₂ na produção.

Equação 1: $E_{cim} = E_{ene} + E_{desc} + E_{transp}$ (KgCO₂/t)

E_{cim} – Emissões na produção do cimento;

E_{ene} – Emissões por uso de energia;

E_{desc} – Emissões de energia por decomposição da matéria prima;

E_{transp} – Emissões pelo transporte na produção do cimento;

Equação 2: $E_{con} = E_{cim} + E_{agr} + E_{trans-com}$ (KgCO₂/t)

E_{con} – Emissões na produção do concreto;

E_{cim} – Emissões na produção do cimento;

Eagr – Emissões na produção dos agregados;

Etransp – Emissões no transporte do concreto;

Etapa 3: Estimativa da profundidade de carbonatação;

Possan, elaborou um modelo matemático considerando o tempo e a exposição da estrutura, levando em conta as variáveis que contribuem para ocorrer a carbonatação;

$$Y = k_c \cdot (20/f_c)^{k_{fc}} \cdot (t/20)^{1/2} \cdot \exp((K_{ad} \cdot ad^{1/2}/40 + f_c)/40 + f_c) + (K_{co2} \cdot CO_2^{1/2})/60 + f_c - (K_{ur} \cdot (UR - 0,58)^2/100 + f_c) \cdot k_{ce}$$

Obs. Esta equação desenvolvida por Possan, constará a título de informação, não será detalhada neste trabalho, pois na nossa pesquisa a profundidade foi medida in loco, ou seja, as tabelas com as amostras extraídas possuem a profundidade obtidas pelo ensaio com aspersão da fenolftaleína.

Etapa 4: Estimativa da captura de CO₂ ao longo da vida útil da estrutura de concreto;

Por meios de cálculos estequiométricos, estimou-se a captura do CO₂ devido a carbonatação do concreto pela equação abaixo:

$$CO_2 = y \cdot c \cdot Ca \cdot r \cdot A \cdot M \text{ (Kg CO}_2\text{)}$$

Onde;

y – Profundidade de carbonatação do concreto em metros;

c – quantidade de cimento empregada para produzir um m³ de concreto (sem considerar as adições) em Kg/m²;

Ca – quantidade de óxido de cálcio contido no cimento em %;

r – É a proporção de CaO totalmente carbonatada em %;

A – Área superficial do concreto exposta a ação do CO₂ em m²;

M – é fração molar do CO/CaO.

Etapa 5; Estimativa da captura de CO₂ no período pós demolição;

A estimativa da quantidade de CO₂, capturada após o período de demolição da estrutura, foi elaborada a partir da simulação dos elementos do concreto que foram britados e tiveram dimensões reduzidas a de agregados.

Obs. Considerando que a nossa pesquisa, não foi levado em conta este fator de

demolição da estrutura, pois o estudo de caso que foi o bloco G da UNICAP, encontra-se em funcionamento e possui 41 anos de construção, não iremos aprofundar esta etapa 5, elaborada por Possan.

Etapa 6: Balanço do CO₂:

Para o balanço do CO₂ durante o ciclo de vida (CV), Possan elaborou a equação abaixo:

$$B_{CO_2} = E_{con} - C_{cap} \text{ (KGCO}_2\text{)}$$

B_{CO_2} – Balanço do CO₂;

E_{con} – Emissão de CO₂ na produção do concreto;

C_{cap} – Quantidade de CO₂ capturada pelo concreto;

A elaboração do método seguiu a sequência para análises:

- Localização do objeto a ser estudado;
- Extração da amostra;
- Ensaio de Carbonatação;
- Ensaio de resistência a compressão;
- Ensaio de presença de cloretos;
- Análise no MEV – Microscópio de Varredura Eletrônica;

3.1 Localização o objeto do estudo

Localizado no bairro da Boa Vista, no centro da cidade do Recife, no estado de Pernambuco, o Bloco G da UNICAP.

A presente pesquisa tem por objetivo analisar os corpos de prova extraídos do bloco G da Universidade Católica de Pernambuco ao longo do ano de 2019 e 2020, com a finalidade de verificar a presença de agentes agressivos a estrutura com a identificação de frente de carbonatação ou presença de íons cloreto, também foram avaliados os fatores intervenientes a durabilidade e o ensaio avançado para a caracterização dos materiais constituintes no concreto da estrutura, o ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com a finalidade de verificar o grau de corrosão da estrutura baseando-se na caracterização dos materiais.

3.2 Extração dos corpos de prova

A extração dos testemunhos está de acordo com a NBR 7680-1:2015 que estabelece os critérios para extração dos corpos de prova. A extração dos testemunhos por meio de uma perfuratriz é um método destrutivo, pois foi retirado uma amostra do elemento estrutural que será necessário ser recomposto.

O Equipamento utilizado deverá permitir a extração do testemunho homogêneo e íntegro do concreto. Para o mapeamento da estrutura e formação dos lotes e quantidades de testemunhos a serem extraídos, refere-se a tabela 1 da norma NBR 7680-1, Amostragem total, embora a tabela oriente na formação do lote, até 8m³ com a quantidade de 3 unidades por lote, nos baseamos na observação C que diz: “ Em se tratando de um único elemento estrutural a quantidade de testemunhos deve ser reduzida a dois de forma a evitar danos desnecessários”. Nesta extração foi mapeada para retirada de 2 amostras por elementos estrutural, um ponto mais alto e outro mais baixo para se ter uma análise qualitativa e não prejudicar a peça estrutural.

A escolha do local da estrutura, seguiu a orientação da norma NBR7680-1:

- a) A estrutura foi dividida em lotes;
- b) Os testemunhos foram extraídos com distância superior ao seu diâmetro com relação as bordas ou juntas de concretagem.
- c) Utilizou-se o pacômetro para evitar cortar as armaduras;
- d) As distâncias mínimas das bordas das perfurações não foram inferiores a diâmetro o testemunho;
- e) Em pilares e elementos verticais passíveis de sofrerem com maior intensidade o fenômeno de exsudação, a extração deve ser pelo menos 30cm distante dos limites superior e inferior da etapa de concretagem do elemento estrutural.
- f) Foi localizado os pontos para evitar um comprometimento maior que 10% da seção.

A escolha das dimensões foi para dar uma maior segurança e preservar maior integridade do elemento estrutural, segundo a norma NBR7680-1, a relação $2X1$, ou seja, $1 < h/d < 2$, onde h = altura do testemunho e d = diâmetro do testemunho. O processo de retirada e extração foram documentados por fotos, identificados, acondicionados, obedecendo a um croqui pré-estabelecido. Nos locais onde foram

realizados os furos, foi realizado o reparo dos locais com inserção de grouwth, para recompor a estrutura e não prejudicar o desempenho e durabilidade da construção.

Para a extração dos testemunhos, foi utilizado os seguintes equipamentos e materiais:

- Perfuratriz com broca de 5,0cm e 10,0cm
- Andaimes Mecânicos;
- Multiscanner-I550-onestep da Zircon e um Pacômetro;
- Pontaletes, baldes, cordas e EPI's(Equipamentos de Proteção Individual);
- Plantas baixa e fachadas do prédio;

3.3 Ensaio de carbonatação

A carbonatação presente em compostos cimentícios produz a redução do Ph da estrutura (propriamente da argamassa do concreto), causando redução da resistência à corrosão. Em decorrência da carbonatação ocorrem mudanças químicas nos compostos de cimento hidratado, reduzindo o pH da pasta, provocando a despassivação das armaduras (HELENE, 1993). O principal efeito da carbonatação é a redução da alcalinidade do concreto. (METHA;MONTEIRO,2008).

Para avaliação da profundidade de carbonatação nos corpos de prova foram utilizados 90 testemunhos de diversos tamanhos. Após a extração estes testemunhos foram, acondicionados em sacos plásticos e identificados pelo local da fachada em conformidade com o mapeamento realizado. Em laboratório foi realizado o ensaio com aplicação da solução em fenolftaleína. Os testemunhos foram extraídos com dimensões aproximadas de 5,0cm X 10,00cm, (Na retirada da amostra do equipamento, alguns testemunhos não saíram inteiros) Foi utilizado o ensaio de Fenolftaleína, com 5% de álcool etílico e a solução de fenolftaleína. Para a aplicação da solução em fenolftaleína, antes foram cortados os testemunhos ao meio.

3.4 Ensaio de Resistência à Compressão

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado pela Tecomat Engenharia, empresa especializada em controle tecnológico, foram enviados sete testemunhos cilíndricos. O ensaio é normatizado pela NBR 5739:2018. O objetivo

deste ensaio consistia na identificação da resistência de uma pequena amostra para compararmos o resultado obtido na resistência à compressão do período da construção os obtidos nos ensaios de 28 dias após a cura do concreto e os resultados atuais após 44 anos do início da construção.

3.4 Ensaio presença de cloreto

O foco principal deste trabalho, como esta descrito no título é análise da estrutura quanto a carbonatação, entretanto foram obtidos uma quantidade significativa de amostras de um bloco acadêmico, importante para a Universidade. A fim, posteriormente de aprofundar melhor com relação a outras patologias, foi realizado o ensaio para identificar se havia presença de cloretos nestas amostras, inclusive a profundidade foi aferida. A solução de nitrato de prata foi usada para obter este resultado. Quando grande quantidade de íons cloretos estão presentes, o concreto tende a reter umidade, ampliando o risco a corrosão do aço, devido a diminuição da resistividade elétrica (METHA; MONTEIRO,2014).

A presença dos íons cloreto em grande quantidade é capaz de despolarizar a armadura, mesmo em elevado pH do concreto. Estabelece aí, um risco maior que a carbonatação. Os íons cloreto atacam estruturas em ambientes com classe de agressividade maior, principalmente em estruturas próximas ao mar, zonas de respingo de maré, solos contaminados, saís de degelo de neve e limpezas com uso de ácido muriático. Os íons cloreto podem afetar a estrutura também por agentes internos como: agregados contaminados, aditivos aceleradores de pega e endurecimento, água e adições do traço contaminada.

A NBR 12655, estabelece limites mínimos de presença de cloretos no concreto, ou seja, um teor de íons cloreto mínimos em percentual sobre a massa de cimento. Para concreto protendido em 0,05%, para concreto armado exposto a íons cloreto em 0,15%, para o concreto armado exposto a condições não severas em 0,40% e 0,30% para o concreto armado submetido em outras exposições. Para realizar o ensaio da presença de cloretos utilizamos a solução do nitrato de prata (AgNO_3), é um método colorimétrico para avaliar a profundidade de penetração de cloretos no concreto.

A Aspersão de nitrato de prata na superfície de um concreto fraturado ou seccionado, causa a formação de duas regiões bem definidas, uma esbranquiçada

com precipitação do AgCL, indicando a presença de cloretos e outra marrom que corresponde a região livre de cloretos (MEDEIROS,2008; TRINDADE,2011; MARCONDES, 2012). Entretanto, apesar da simplicidade do método, a reação química que leva a mudança de cor é afetada pela concentração da solução de nitrato de prata, pelo pH do meio, pela presença de carbonatos e pelo teor de cloretos do concreto. (REAL; OLIVEIRA; SOARES: MEDEIROS, 2015) O método é afetado diretamente pela presença de carbonatos (que leva a redução do pH do concreto) (OTSUKI *et al*, 2012; FRANÇA,2011; KIM *et al*,2013)

3.5 MEV – Microscópio de Varredura Eletrônica

O uso da técnica de análise das imagens por meio do MEV, microscopia eletrônica de varredura, tem se tornado uma ferramenta importante na análise do concreto e materiais cimentícios. Foi utilizado o laboratório de núcleo e práticas de ciências biológicas e ambientais da UNICAP, com o auxílio dos professores Marcos Lima e Roberta Richard, da escola de saúde. A ferramenta consiste em captar imagens ampliadas que não podem ser analisadas visualmente. O MEV capta imagens até 1000 vezes ampliadas da seção pré-selecionada e tratada.

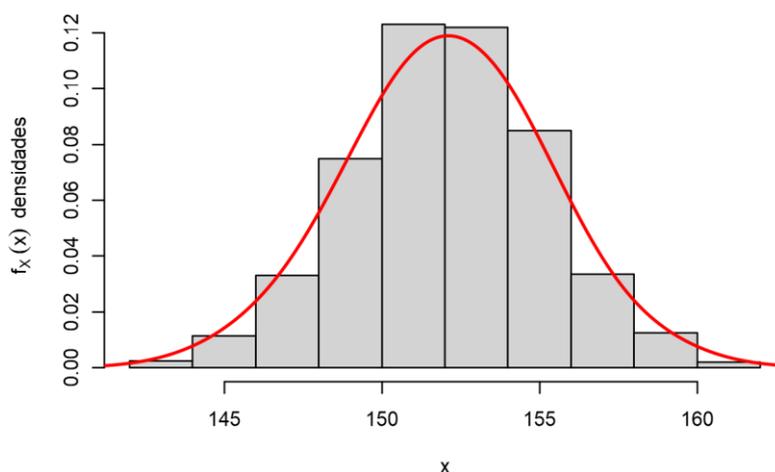
Observa-se seções polidas preparadas a partir de amostras selecionadas por meio de micrografias obtidas por elétron retro espalhados. O arranjo dos agregados, poros grandes, pasta e defeitos, podem ser estudados quando as imagens são obtidas em baixas ampliações. Em ampliações elevadas é possível observar a morfologia das fases amorfas (C-S-H) da amostra, cristalinas (Etringita e monossulfetos) e poros muito pequenos. Por outro lado, a captação das imagens, pelo MEV, constitui uma ferramenta importante para se analisar a composição química da amostra, com imagens bastante ampliadas.

O objetivo de utilizar o MEV, no nosso estudo foi analisar a morfologia em alguns testemunhos, principalmente com relação a superfície, a relação dos poros e índice de vazios das amostras.

3.6 ANÁLISE ESTÁTISTICA

Segundo Rusch, a distribuição normal ou de Gauss, é um modelo matemático que pode representar de maneira satisfatória a distribuição das profundidades da carbonatação na amostra. O método utilizado para caracterizar os dados foi a normalização da amostra desenvolvido por Gauss. Esta função densidade de probabilidade, está associada ao fato de que aproxima de forma bastante satisfatória as curvas de frequências das profundidades de medidas físicas, essa curva é conhecida como distribuição normal ou gaussiana.

Figura 18 – Curva de densidade Gaussiana



Fonte: – ZIBETTI, Prob. Normal, 2018

A distribuição normal possui dois parâmetros, a média (μ), ou seja, onde está centralizada e a variância ($\sigma^2 > 0$) que descreve o seu grau de dispersão.

Parâmetros:

μ – é a média da distribuição

σ^2 – é a variância da distribuição;

σ – é o desvio padrão da distribuição;

A distribuição normal padronizada é uma distribuição normal sempre com os mesmos parâmetros que são $\mu = 0$, $\sigma^2 = 1$. Uma vez que essa distribuição possui sempre esses

mesmos parâmetros, significa dizer que sempre que deseja calcular a probabilidade pode se recorrer a uma tabela, onde os valores foram previamente calculados para essa distribuição.

3.7 UMIDADE E FREQUÊNCIA DE VENTOS

O método estabelecido para analisar a umidade foi determinado pelo LABEEE – UFSC, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade de Santa Catarina. O LABEEE, desenvolveu aplicativos e programas técnicos que auxiliam aos arquitetos e engenheiros nos estudos de concepção e projetos arquitetônicos de locação e sustentabilidade nas cidades do Brasil. Através do programa ANALYSIS BIO, é possível extrair considerações técnicas sobre a carta de vento anual das cidades, neste caso a cidade do Recife.

4. DISCUSSÕES E RESULTADOS

4.1 Estimativa do balanço do CO₂

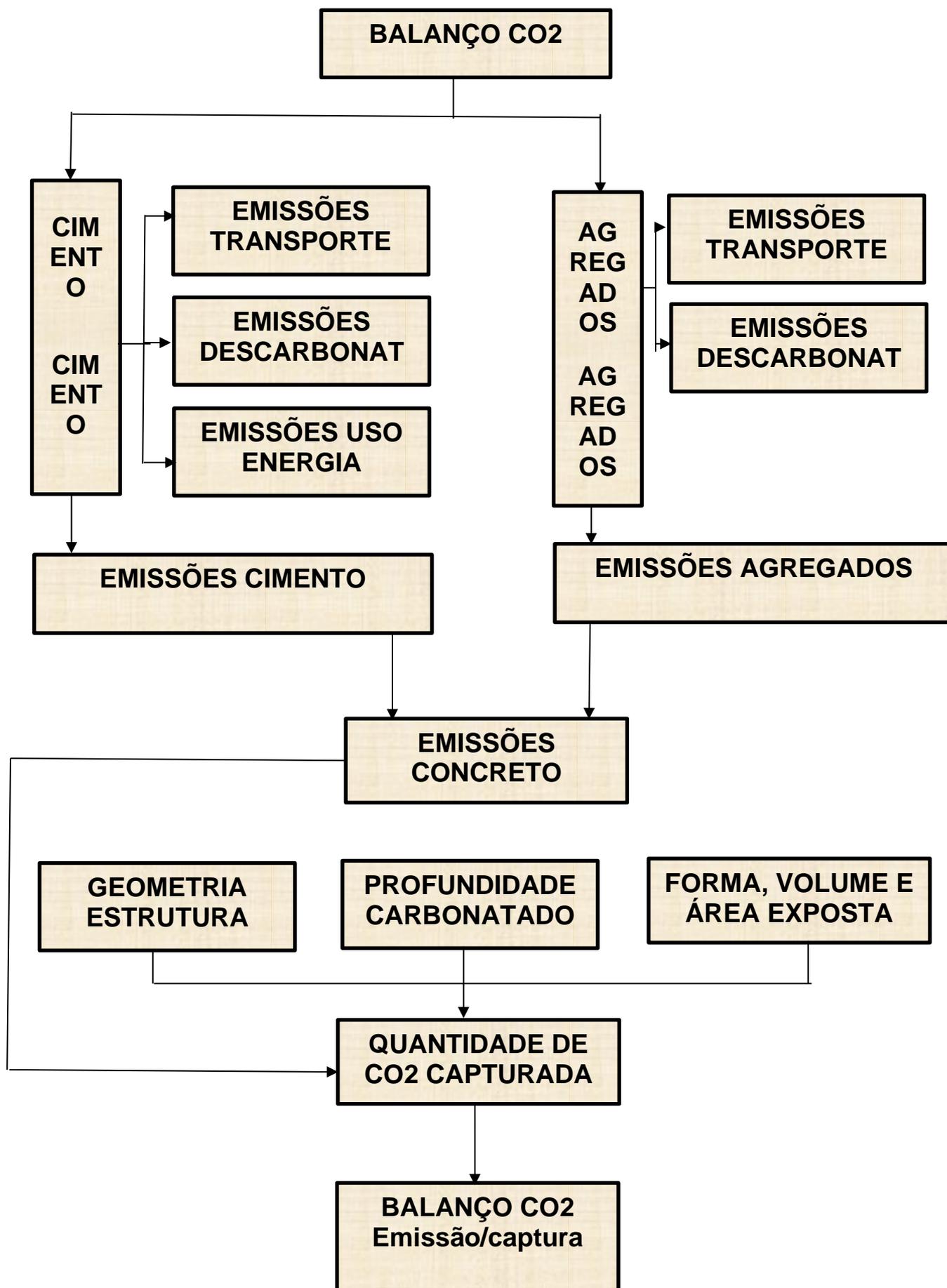
Para obtenção do balanço do CO₂, utiliza-se o método elaborado por Possan e Félix em 2018. Na pesquisa foi obtida os resultados estimados das emissões de CO₂ emitidos na atmosfera na produção do concreto e no resultado estimado da captação do CO₂ pela estrutura no caso o bloco G, foi caracterizado e sintetizado através deste fluxograma abaixo. Representa os dados encontrados nas emissões da produção do cimento, na produção dos agregados e nos valores das emissões no transporte do concreto. O valor estimado da emissão do CO₂ captado pela estrutura, também foi considerado neste cálculo. Conforme a metodologia de Possan, não foi considerado o valor das emissões por demolição do prédio, por se tratar da análise de uma estrutura de 41 anos e em pleno funcionamento, embora os estudos acadêmicos relatam um grande percentual de emissão na etapa de pós demolição.

Tabela 1: Dados Técnicos de entrada da estrutura

| VARIÁVEIS DA ANÁLISE | DADOS |
|---|---------------------------------|
| TIPO DE CIMENTO | POTY 320/CPI Comum sem aditivos |
| RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, FCK, MÉDIA 28DIAS (Mpa) | 25Mpa |
| AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO | Externo |
| UMIDADE RELATIVA (%) | 5% |
| TEMPO (ANOS) | 41 |
| ASSE DE AGRESSIVIDADE | III |
| ELEMENTOS ESTRUTURAIS | LAJES, VIGAS E PILARES |
| FACHADAS | SUL E NORTE |

Fonte: Autor, 2022

Fluxograma para determinação do BCO2 no bloco G



4.2 BALANÇO CO2 GERAL DA ESTRUTURA

Etapa 1: Determinação das características do concreto e das condições de exposição da estrutura;

Tabela 2: Dados Técnicos de entrada da estrutura

| VARIÁVEIS DA ANÁLISE | ADOS |
|---|-------------------------------|
| TIPO DE CIMENTO | POTY 320/CPI comum, sem aditi |
| RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, FCK, média 28 dias (Mpa) | 25Mpa |
| AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO | Externo |
| UMIDADE RELATIVA (%) | 5% |
| TEMPO (ANOS) | 41 |
| CLASSE DE AGRESSIVIDADE | III |
| ELEMENTOS ESTRUTURAIS | LAJES, VIGAS E PILARES |
| FACHADAS | SUL E NORTE |

Fonte: autor, 2022

Etapa 2: Estimativa das emissões de CO2

$E_{con} = E_{cim} + E_{agr} + E_{trans-com}$ (KgCO2/t)

$E_{con} = E_{cim} + E_{agr} + E_{trans-com}$

E_{con} – Emissões na produção do concreto;

E_{cim} – Emissões na produção do cimento;

E_{agr} – Emissões na produção dos agregados;

E_{transp} – Emissões no transporte do concreto;

$E_{cim} = E_{ene} + E_{desc} + E_{transp}$ (KgCO2/t)

$E_{cim} = E_{ene} + E_{desc} + E_{transp}$

E_{cim} – Emissões na produção do cimento;

E_{ene} – Emissões por uso de energia;

E_{desc} – Emissões de energia por decomposição da matéria prima;

Etransp – Emissões pelo transporte na produção do cimento;

Dados:

Emissões do cimento:

As emissões produzidas na fabricação do cimento corresponde a 601,63 KgCO₂/t de acordo com o IPCC, 2012. Divididos em Emissões/ano: Por uso de energia: 210,27 Kg CO₂/t; Pela descarbonatação: 361,10 KgCO₂/t e pelo Transporte: 30,26KgCO₂/t.

Emissões dos agregados: dados obtidos em Possan, pagina 6, artigo do balanço das emissões e da captura de CO₂. Foram extraídos de estudos científicos de diversos autores.

Areia Natural: 5,81KgCO₂/t

Brita: 15,46Kg CO₂/t

Transporte: 8,4 KgCO₂/t

Logo: Econ = 601,63 + 21,27 + 8,40 = 631,30 KgCO₂/t – 31,56 KgCO₂

O volume do bloco G em m³: 3.699,54m³

O consumo em m³ foi de 1.043.270,28Kg ou 20.865,40sc de cimento de 50Kg;

Se, 1000kg de cimento corresponde a 631,30KgCo₂, então:

Econ = 658.616,53 KgCO₂

Etapa 3: Estimativa da profundidade de carbonatação;

Esta equação desenvolvida por Possan, constará a título de informação, não será detalhada neste trabalho, pois a pesquisa em questão, a profundidade foi medida in loco, ou seja, as tabelas com as amostras extraídas possuem a profundidade obtidas pelo ensaio com aspersion da fenolftaleína

Tabela 3: Resumo de dados estatísticos da Planilha de profundidade carbonatação

|  UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO | | | | | | | | | |
|--|-----------|------|---------|------------------|------------------|---------------|-----------|----------|-----------|
| TABELA DOS DADOS ESTÁTISTICOS | | | | | | | | | |
| DADOS ESTADÍSTICOS DA PLANILHA DE RESULTADOS | | | | | | | | | |
| | Média (u) | Moda | Mediana | Profundidade máx | Profundidade mín | Desvio padrão | Variância | Amostras | Unid |
| RESULTADO GERAL | 1,36 | 0,00 | 1,50 | 8,00 | 0,00 | 1,14 | 1,31 | | 90 |
| Fachada Sul Geral | 1,57 | 1,6 | 1,6 | 2,3 | 0,5 | 0,38 | 0,14 | | 32 |
| Fachada Norte Geral | 1,6 | 0 | 1,5 | 5 | 0 | 1,61 | 2,59 | | 42 |
| Fachada Sul Vigas | 1,43 | 1,5 | 1,5 | 2,3 | 0 | 0,52 | 0,27 | | 24 |
| Fachada Sul Pilares | 1,75 | 2 | 1,75 | 1,8 | 1,5 | 0,18 | 0,03 | | 8 |
| Fachada Norte Vigas | 1,39 | 0 | 1,5 | 4,5 | 0 | 1,26 | 1,59 | | 29 |
| Fachada Norte Pilares | 2,88 | 3 | 2,94 | 8 | 1,4 | 2,03 | 4,15 | | 13 |
| lajes | 0,83 | 1 | 0,75 | 2,5 | 0 | 0,68 | 0,46 | | 16 |

Fonte: autor, 2022

Etapa 4: Estimativa da captura de CO₂ ao longo da vida útil da estrutura de concreto;

$$\text{CO}_2 = y \cdot c \cdot \text{Ca} \cdot r \cdot A \cdot M \text{ (Kg CO}_2\text{)}$$

Onde;

y – Profundidade de carbonatação do concreto em metros – 1,36cm – 0,0136m ;

c – quantidade de cimento empregada para produzir um m³ de concreto (sem considerar as adições) em Kg/m² – conforme fichas técnicas construtivas – consumo 282,00 Kg/m²;

Ca – quantidade de óxido de cálcio contido no cimento em % - corresponde a 65%.

r – É a proporção de CaO totalmente carbonatada em %, corresponde a 75%.

A – Área superficial do concreto exposta a ação do CO₂ em m², 14.546,67m²

M – é fração molar do CO₂/CaO, corresponde a massa molecular de cada elemento –
CaCO₃ – 100%

CaO – 56%

CO₂ – 44%

$$\text{Logo: CO}_2 = 0,0136 \cdot 282,00 \cdot 0,65 \cdot 0,75 \cdot 13.291,24 \cdot 0,785$$

$$\text{CO}_2 = 19.507,33 \text{ (Kg CO}_2\text{)}$$

Etapa 5; Estimativa da captura de CO₂ no período pós demolição;

Considerando que a pesquisa em questão, não foi levado em conta este fator de demolição da estrutura, pois o estudo de caso que foi o bloco G da UNICAP, encontra-se em funcionamento e possui 41 anos de construção, portanto não foi calculada esta etapa 5, elaborada por Possan.

Etapa 6: Balanço do CO₂:

Para o balanço do CO₂ durante o ciclo de vida (CV), Possan elaborou a equação abaixo:

$$B_{CO_2} = E_{con} - C_{cap} \text{ (KGCO}_2\text{)}$$

B_{CO_2} – Balanço do CO₂;

E_{con} – 658.616,53 KgCO₂

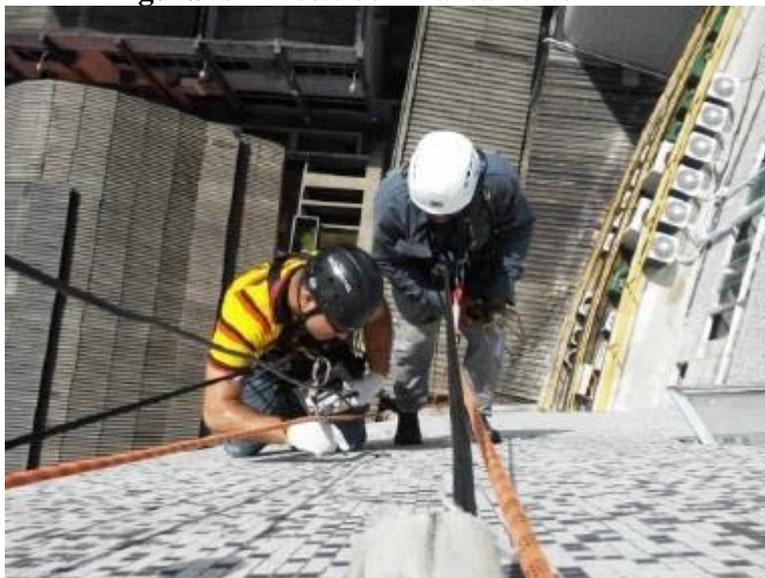
C_{cap} – 19.507,33 (Kg CO₂)

$$\mathbf{BCO_2 = 658.616,53 - 19.507,33 = 639.109,21KgCO_2}$$

4.3 PREPARAÇÃO, EXTRAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

O estudo tem como objeto o bloco G da UNICAP, a partir de um planejamento da Reitoria e do Escritório Técnico de recuperação e modernização dos blocos da UNICAP. O Escritório Técnico da UNICAP elaborou um planejamento com os princípios do modelo de gestão de projetos pelo PMI (*Project Management Institute*), onde foi apresentado a comunidade universitária no período da semana docente. Iniciando pelo Bloco A da UNICAP e concluindo no bloco G. A sequência obedeceu aos critérios de problemas e patologias encontradas nos prédios. Fez parte do planejamento a identificação dos problemas, um mapa de dano do prédio e realização de testes de “arrancamento”, através da empresa Tecomat.

Figura 19 – Teste de Arrancamento



Fonte: Autor, 2018

Uma das principais causas para a modernização dos blocos da UNICAP, foi a substituição do revestimento da fachada. Originalmente o revestimento era pastilhas cerâmicas. A inviabilidade econômica e a inexistência deste material no mercado, somado as patologias, vícios e problemas construtivos, justificaram a modernização dos prédios. Partindo de um pressuposto técnico em consonância as normas da ABNT, o escritório apresentou um diagnóstico das situações dos blocos.

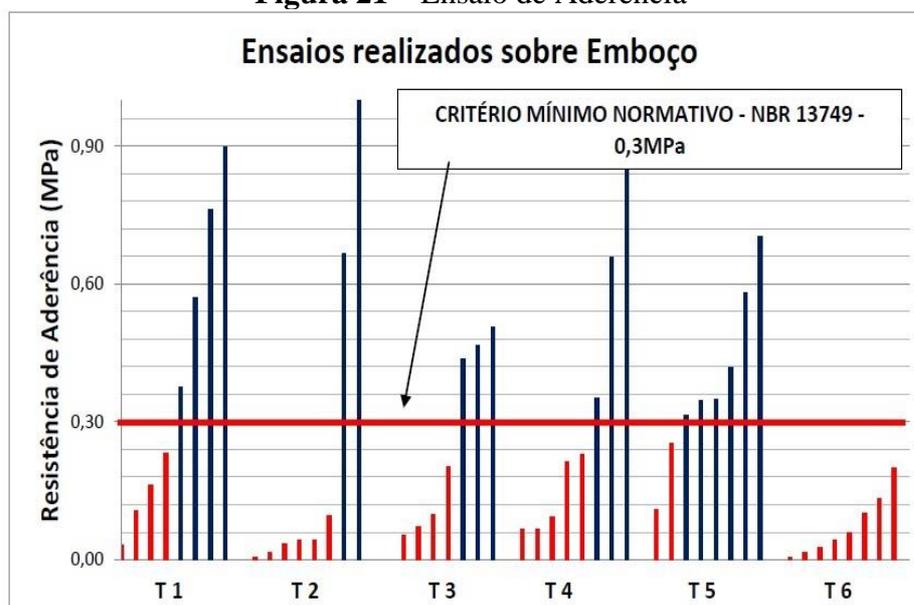
Figura 20 – Mapa de Danos



Fonte: Autor, 2018

O Teste de arrancamento consiste num ensaio de tração dos revestimentos e substratos, segundo a norma NBR 13528:1995, a avaliação da aderência é feita segundo a NBR 13749:1996. O resultado no bloco G, apresentou:

Figura 21 – Ensaio de Aderência



Fonte: Autor, 2018

Conclui-se que: com os resultados obtidos dos ensaios conforme estabelece a norma NBR 13749:1996, o referencial mínimo da resistência de aderência é de 0,3Mpa, as amostras obtidas apresentam resistências abaixo da mínima, em vários pontos da fachada.

Figura 22 – Amostra retirada da Fachada

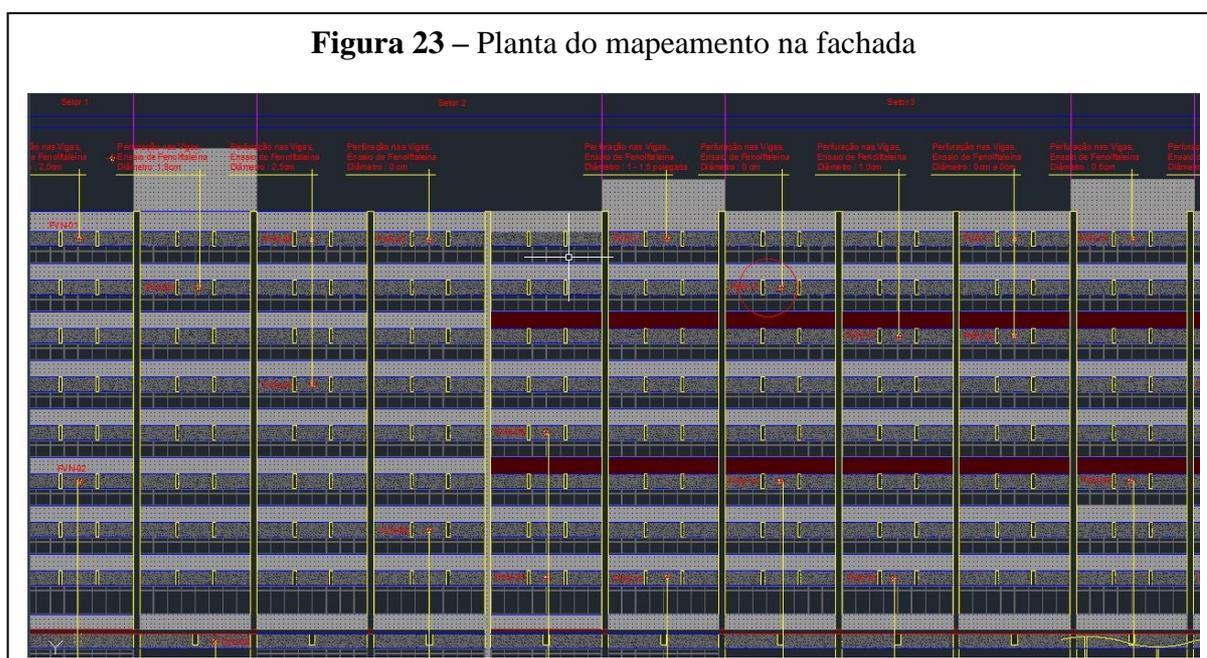


Fonte: Autor, 2018

Nas amostras retiradas da fachada do bloco G, indicavam a substituição também da retirada do substrato, ou seja, do em boco em algumas partes mapeadas na fachada.

Conforme o planejamento elaborado pelo SEAR/ Escritório Técnico da UNICAP, a modernização e recuperação da fachada do bloco G, iniciou em 2018 e concluiu em 2020. A construtora Habitar foi a empresa contratada para realizar este serviço. Com o apoio da empresa, aproveita-se para retirar as amostras para servir de estudo para a pesquisa em análise. A empresa estava na fase de retirada do revestimento das fachadas com a utilização de andaimes mecânicos, o planejamento da modernização consistia em retirar o revestimento por fachadas, logo foi aproveitado para retirar os primeiros testemunhos. Estes testemunhos serviram de base para este estudo técnico.

A etapa para a retirada dos testemunhos consistiu primeiramente num mapeamento baseado no mapa de danos e levantamentos realizados pelo Escritório Técnico da UNICAP. Em conjunto com o Prof. Romilde de Oliveira, foram identificadas as amostras numa planta de fachada, a fim de mapear, identificar, cada amostra coletada. Obtendo uma catalogação dos corpos de prova.



Fonte: Autor, 2021

Esta coleta e extração das amostras foram realizadas concomitantemente a modernização da fachada, ou seja, o cronograma, estava em conformidade ao avanço da construtora. Foi definida a equipe em conjunto com estagiários, alunos do curso de Engenharia Civil, acompanhados e orientados pelo Professor Romilde Oliveira, Eng. Pedro Adolfo, Técnicos de Segurança e Eng. Eriberto da Construtora Habitar.

Etapas para extração das amostras nas fachadas:

1. Mapeamento e identificação das amostras ou testemunhos;
2. Treinamento em segurança do trabalho: NR35 (trabalho em alturas), e NR06 (EPI – Equipamento de Proteção Individual).
3. Treinamento como trabalhar e manusear os andaimes mecânicos;
4. Com a utilização do Scan, marcar o local do ponto a ser extraído, se afastando das ferragens.

5. Identificar o ponto no local;
6. Extrair a amostra com a perfuratriz;
7. Acondicionar a amostra dentro de saco virgem de plástico com identificação;
8. Realizar no laboratório os ensaios;

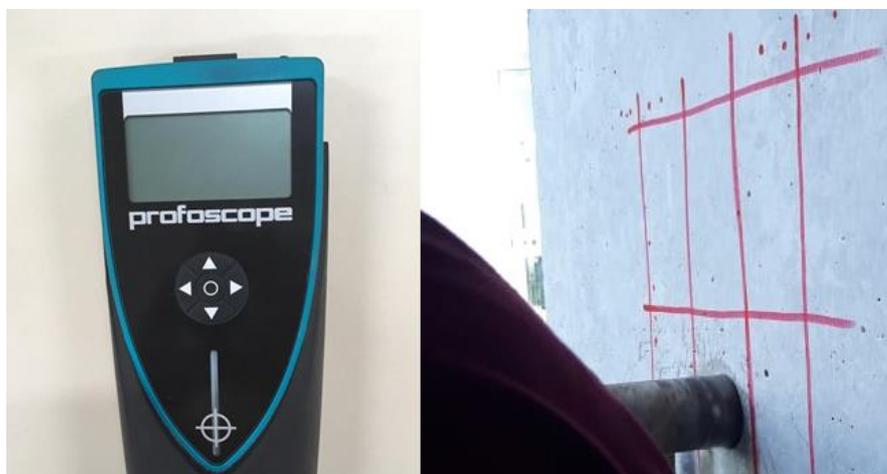
Figura 24 – Treinamento da equipe de extração das amostras na fachada



Fonte: Autor, 2020

As extrações seguiram uma sequência pré-estabelecida com a construtora, devido ao cronograma de execução da recuperação e modernização na fachada. Neste cenário, as equipes formadas extraíram os testemunhos, durante os períodos semanais e finais de semana. Obedecendo sempre ao roteiro do mapeamento nas plantas, cuja identificações foram organizadas para não misturar as amostras. Utiliza-se também, um scan para identificar a localização da armadura no elemento estrutural, desta forma facilitaria a extração, evitando a perfuratriz atingir algum aço. Na Figura 24 abaixo, mostra esquema da marcação para a extração.

Figura 28 – Marcação dos pontos



Fonte: Autor,2020

Desta forma foram minimizados os riscos de atingir as armaduras, nos casos em que foram atingidas a estrutura, não avançava-se até certificar que não causaria nenhuma ruptura. Em poucas situações em que ocorreram, fizemos logo a recuperação estrutural da peça. As amostras eram acondicionadas em saco plástico, não utilizado, com identificação, numa impressora em adesivo plástico para uma melhor sistematização. Evitando trocar as amostras, assim obtem-se um resultado mais confiável possível. Conforme Figura 25, abaixo.

Figura 26 – Extração de um testemunho em Pilar



Fonte: Autor,2020

Figura 27 – Amostra retirada e isolada



Fonte: Autor, 2020

As amostras deveriam obedecer a um padrão único de 5,00cm X 10,0cm, entretanto não foi possível retirar estes testemunhos integro, as dimensões variavam, devido vários fatores:

- Dificuldade na retirada da amostra do equipamento;
- O testemunho se rompia na perfuração;
- Na perfuração, o equipamento encontrava algum obstáculo;
- Dificuldade na perfuração, devido ao local ser bem criterioso e difícil acesso;
- Dificuldade em alguns pontos com a broca do equipamento;

Logo, estes testemunhos possuíam dimensões diversas, mas que não impediram para realizar os ensaios de carbonatação, presença de cloretos, resistência a compressão e imagens pelo MEV. Os critérios de análise das amostras permitiram separá-las de acordo com as dimensões mínimas exigidas por normas para realização de cada ensaio, portanto não comprometeu o resultado. Exemplos: para o ensaio de resistência a compressão as amostras foram selecionadas com as dimensões mais em torno de 5cmX 10cm, ou seja, as amostras cujas dimensões se aproximavam destes valores foram selecionados para o ensaio. Como as dimensões são discriminadas em milímetro (mm).

As dimensões variavam de 49mm a 49,9mm de diâmetro e 61,1mm a 91,8mm de comprimento. As amostras mapeadas e identificadas na planta foram 120 unidades. Embora, a quantidade efetivamente extraída foi num total de 92 amostras. Algumas extrações não foram possíveis devido a incompatibilidade de horários de aulas e locais que não foram permitidos pelos setores competentes, onde o furo estava localizado.

Todavia, 90 testemunhos representam uma amostra significativa para dar uma representatividade as considerações e análises constituintes do objeto do estudo. Estas amostras foram divididas em:

Vigas da Fachada Sul – 24 amostras;

Pilares da fachada Sul – 8 amostras;

Vigas da fachada Norte – 29 amostras;

Pilares da fachada Norte – 13 amostras;

Lajes – 16 amostras;

As dimensões dos testemunhos extraídos das lajes foram de 5,0cm x 10,0cm e os testemunhos com dimensões maiores foram de 15cm x 15cm.

4.4 CARBONATAÇÃO

Em laboratório foi realizado o ensaio com aplicação da solução em fenolftaleína. Os testemunhos foram extraídos com dimensões aproximadas de 5,0cm X 10,00cm, (Na retirada da amostra do equipamento, alguns testemunhos não saíram inteiros) Foi utilizado o ensaio de Fenolftaleína, com 5% de álcool etílico e a solução de fenolftaleína. Para a aplicação da solução em fenolftaleína, antes foram cortados os testemunhos ao meio. Por meio de serra elétrica com disco diamantado. Como mostra a Figura 27.

Figura 35 – Amostra cortada ao meio



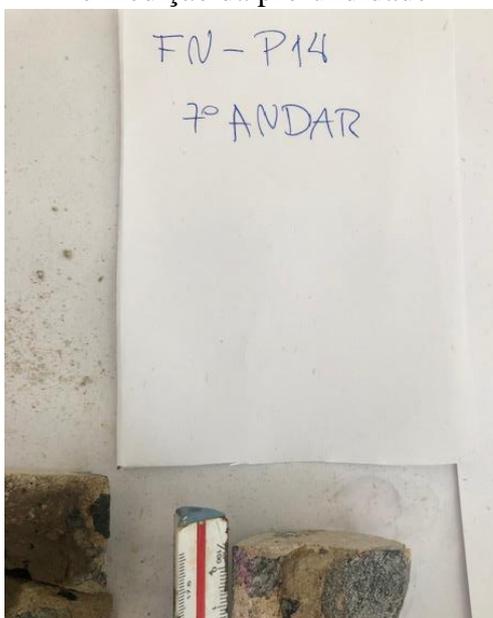
Fonte: Autor, 2020

Imediatamente após o corte de cada peça ao meio, foi aplicado a solução e medida a penetração da carbonatação. Visualmente foi identificado se a peça esta

carbonatada. Com a aspersão de fenolftaleína ($C_2O_4H_4$), indicador colorimétrico. Quando em contato com a fenolftaleína o concreto com PH abaixo de 8,2 aproximadamente fica com a tonalidade original, logo está carbonatado. Com o uso de uma escala medimos esta seção que esta com a cor original do concreto.

Com o PH entre 8,2 e 9,8 aproximadamente, a cor resultante é rosa. E com pH acima de 9,8 a cor é vermelho carmim, logo não está carbonatada, boa condição do concreto.

Figura 36 - Aspersão de fenolftaleína e medição da profundidade



Fonte: Autor, 2020

Este procedimento era sequencial, foram extraídos os testemunhos, separados, isolados, acondicionados, cortados ao meio, aplicava-se a solução de fenolftaleína com álcool, a seção carbonatada foi medida, em uma planilha a profundidade foi registrada de cada testemunho que apresentava carbonatada. Algumas peças conseguimos visualizar o corte do aço dentro da estrutura, como mostra a figura a abaixo. Neste caso, mostra a seção carbonatada e o cobrimento de projeto no concreto, indicado no período da construção de 2,5cm. A seção carbonatada apresenta uma profundidade de 1,5cm.

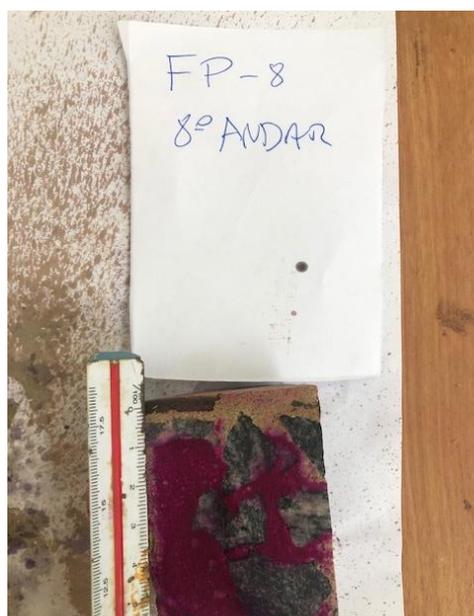
Figura 30 - Profundidade da seção carbonatada e cobrimento do concreto



Fonte: Autor, 2020

Os ensaios com aspersão da solução em fenolftaleína, foram realizados em todas as amostras extraídas das fachadas do bloco G. A profundidade variou entre 0,2cm a 3,00cm.

Figura 31 - Testemunho com medição da seção carbonatada



Fonte: Própria,2020

Na configuração do estudo técnico, extrai-se uma maior quantidade possível de testemunhos com a finalidade de dar robustez e significância ao estudo. Entretanto,

alinhamos nossa agenda em conformidade com a construtora Habitar que estava realizando o serviço de recuperação e modernização da fachada do bloco G. E por diversas circunstâncias, não foi possível extrair o total de 140 amostras mapeadas.

Devido:

- O período extraído os testemunhos, a obra já estava com seu cronograma em estado avançado.
- As condições de segurança, meteorológica e do equipamento impossibilitaram a extração;
- Em determinados pontos nos elementos estruturais, o equipamento não conseguiu extrair, devido presença da armadura ou ponto inadequado.

Os testemunhos extraídos foram catalogados e planilhados, conforme figura abaixo:

Figura32 - Planilha com dados e resultado geral dos ensaios

| PLANILHA GERAL DAS AMOSTRAS EXTRAIDAS DO BLOCO G(PESQUISA MESTRADO DE PEDRO ADOLFO) | | | | | | | | |
|---|-------------------------------|-----------------|--------------|---------------------------|---------------|------------------------|------------------------------------|----------------------|
| CP | LOCAL (FACHADA E ANDAR) | ELEMENTO | TAMANHO (cm) | CONCRETO EXPOSTO (N ou S) | ÁREA (I OU E) | Dimensões da Estrutura | CARBONATAÇÃO PROF. NA AMOSTRA (cm) | PRESENÇA DE CLORETOS |
| 1 | Sul - FVS - 1 (Tais) | FVS - 1 | | N | E | 30 x 120 | 1,3 | X |
| 2 | Sul - FVS - 2 (Tais) | FVS - 2 | | N | E | 30 x 120 | 1,6 | X |
| 3 | Sul - FVS - 3 (Tais) | FVS - 3 | | N | E | 30 x 120 | 1,4 | X |
| 4 | Sul - FVS - 8 3º Andar | FVS - 8 | 4,90 x 8,90 | N | E | 30 x 120 | 1 | sim |
| 5 | Sul - FVS - 18 1º Andar | FVS - 18 | 4,90 x 7,70 | N | E | 30 x 120 | NÃO HOUE | NÃO HOUE |
| 6 | Sul - FS - P1 (Tais) | FS - P1 | | N | I | 60 x 120 | 2 | X |
| 7 | Sul - FS - P7 - 1 5º Andar | FS - P7 - 1,2,3 | 2,30 x 4,80 | N | E | 60 x 120 | 0,4 | SIM |
| 8 | Sul - FS PILAR Térreo | FS PILAR | 5,00 x 4,20 | N | E | 60 x 120 | 1 | SIM |

Fonte: Autor, 2020

Após inserir todos os dados dos ensaios na planilha, os dados nas plantas de fachada do bloco G foram descritas para facilitar as análises e discussões.

Figura 33 - Planta de fachada sul com os dados do ensaio



Fonte: Autor, 2020

Figura 34 - Planta de fachada com os dados do ensaio ampliada



Fonte: Autor, 2020

As fachadas foram divididas de acordo com a direção dos ventos, fachada sul e fachada norte. Com o objetivo de avaliar qual a fachada mais afetada pela agressividade dos agentes externos. Selecionamos os elementos estruturais, identificamos primeiramente as vigas, pilares e posteriormente as lajes. Foi elaborado

planilhas detalhadas com os resultados dos ensaios realizados, com o mapeamento através da planta de fachada, identificamos os pontos, nas fachadas sul e norte. A planilha consta, os seguintes detalhes: CP – Corpo de Prova, Fachada com identificação do ponto, qual foi o setor (1, 2, 3 e 4), de acordo com a caixa de escada.

De posse do projeto estrutural, identificamos qual o elemento estrutural e inserimos sua dimensão, por exemplo: Viga – (30,00 X 120,00) cm. Foram descritas o tamanho do testemunho, informado se estava exposto no ambiente externo ou interno, a área extraída da estrutura estava na parte interna ou externa e os resultados da profundidade da carbonatação e se havia presença de cloretos.

Os dados obtidos após os ensaios realizados, foram sintetizados em planilhas e plantas no CAD. A apresentação destes resultados consiste em uma fácil leitura e interpretação dos valores obtidos, nos ensaios de carbonatação, presença de cloretos, resistência a compressão e a análise das imagens pelo MEV.

RESULTADOS – PLANILHA RESULTADOS FACHADA SUL PILARES

TABELA 5: PLANILHA RESULTADO FACHADA SUL, PILARES

|  TABELA DOS DADOS E ENSAIOS NO BLOCO G, FACHADA SUL, PILARES | | | | | | | | | |
|--|---------------------------|-----------|----------|--------------|---------------------------|---------------|------------------------|------------------------------------|----------------------|
| CP | FACHADA | SETOR | ELEMENTO | TAMANHO (cm) | CONCRETO EXPOSTO (N ou S) | ÁREA (I OU E) | Dimensões da Estrutura | CARBONATAÇÃO PROF. NA AMOSTRA (cm) | PRESENÇA DE CLORETOS |
| 1 | Sul - FS - P1 | 1 | PILAR | - | N | I | 60 x 120 | 2 | X |
| 2 | Sul - FS - P2 | 1 | PILAR | - | N | I | 60 x 120 | 1,5 | x |
| 3 | Sul - FS P3 | 2 | PILAR | | S | E | 60 x 120 | 1,8 | x |
| 4 | Sul - FS P4 | 2 | PILAR | | S | E | 60 x 120 | 1,6 | x |
| 5 | Sul - FS P5 | 3 | PILAR | | S | E | 60 x 120 | 2 | x |
| 6 | Sul - FS P6 | 3 | PILAR | | S | E | 60 x 120 | 1,6 | x |
| 7 | Sul - FS - P7 5° Andar | 4 | PILAR | 2,30 x 4,80 | S | E | 60 x 120 | 1,7 | x |
| 8 | Sul - FS P8 | 4 | PILAR | | S | E | 60 x 120 | 1,8 | x |
| | | Média (u) | Moda | Mediana | Profundidade | Profundidade | Desvio padrão | Variância | |
| | | 1,75 | 2 | 1,75 | 1,8 | 1,5 | 0,18516402 | 0,034285714 | |

Fonte: Autor, 2022

PLANILHA RESULTADOS FACHADA NORTE VIGAS

TABELA 6: PLANILHA RESULTADO FACHADA NORTE, VIGAS

|  TABELA DOS DADOS E ENSAIOS NO BLOCO G, FACHADA NORTE, VIGAS | | | | | | | | | |
|--|----------------------------------|---------|-------------|--------------|---------------------------|----------------|------------------------|------------------------------------|---------------------|
| CP | FACHADA | SETOR | ELEMENTO | TAMANHO (cm) | CONCRETO EXPOSTO (N ou S) | ÁREA (I OU E) | Dimensões da Estrutura | CARBONATAÇÃO PROF. NA AMOSTRA (cm) | PRESEÇA D CLORETO S |
| 1 | Norte - FVN - 1 | 1 | VIGA | 5,00 X 10,00 | S | E | 30 x 120 | 2 | X |
| 2 | Norte - FVN - 2 | 1 | VIGA | 5,00 X 10,00 | S | E | 30 x 120 | 2 | X |
| 3 | Norte - FVN - 4 | 2 | VIGA | | S | E | | | |
| 4 | Norte - FVN - 5 | 2 | VIGA | 4,90 x 7,40 | S | E | 30 x 120 | 2,5 | sim |
| 5 | Norte - FVN - 6 8º Andar | 2 | VIGA | 4,90 x 7,40 | S | E | 30 x 120 | 2,5 | SIM |
| 6 | Norte - FVN - 7 8º Andar | 2 | VIGA | 5,00 x 11,20 | S | E | 30 x 120 | 0 | |
| 7 | Norte - FVN - 8 2º Andar | 2 | VIGA | 5,00 x 11,20 | S | E | 30 x 120 | 4,5 | SIM |
| 8 | Norte - FVN - 9 4º Andar | 2 | VIGA | 5,00 x 9,90 | S | E | 30 x 120 | 3 | SIM |
| 9 | Norte - FVN - 10 1º Andar | 2 | VIGA | 4,90 x 8,50 | S | E | 30 x 120 | 0 | |
| 10 | Norte - FVN - 11 8º Andar | 2 | VIGA | 4,90 x 8,51 | S | E | 30 X 120 | 0 | não |
| 11 | Norte - FVN - 3 | TORRE 1 | VIGA | 5,00 X 10,00 | S | E | 30 x 120 | 1,8 | X |
| 12 | Norte - FVN - 12 1º Andar | TORRE 2 | VIGA | 5,00 x 9,80 | S | E | 30 x 120 | 0,5 | SIM |
| 13 | Norte - FVN - 19 8º Andar | TORRE 3 | VIGA | 5,00 x 10,90 | S | E | 30 x 120 | 0,5 | SIM |
| 14 | Norte - FVN - 20 3º Andar | TORRE 3 | VIGA | 4,90 x 9,50 | S | E | 30 x 120 | 3 | SIM |
| 15 | Norte - FVN - 27 8º Andar | TORRE 4 | VIGA | 4,90 x 9,70 | S | E | 30 x 120 | 1,5 | SIM |
| 16 | Norte - FVN - 28 4º Andar | TORRE 4 | VIGA | 4,90 x 10,70 | S | E | 30 x 120 | 3,2 | SIM |
| 17 | Norte - FVN - 16 1º Andar | TORRE 4 | VIGA | 4,90 x 9,50 | S | E | 30 x 120 | 0,2 | SIM |
| 18 | Norte - FVN - 13 | 3 | VIGA | 4,90 x 5,00 | S | E | 30 x 120 | 0 | sim |
| 19 | Norte - FVN - 14 3º Andar | 3 | VIGA | 4,90 x 5,00 | S | E | 30 x 120 | 0,2 | SIM |
| 20 | Norte - FVN - 15 6º Andar | 3 | VIGA | 5,00 x 9,90 | S | E | 30 x 120 | 1 | SIM |
| 21 | Norte - FVN - 16 1º Andar | 3 | VIGA | 4,90 x 9,50 | S | E | 30 x 120 | 0,2 | SIM |
| 22 | Norte - FVN - 17 | 2 | VIGA | | S | E | | | |
| 23 | Norte - FVN - 18 6º Andar | 3 | VIGA | 5,00 x 9,40 | S | E | 30 x 120 | 0 | sim |
| 24 | Norte - FVN - 21 - 1 1º Andar | 4 | VIGA | 2,00 x 7,00 | S | E | 30 x 120 | 1,6 | SIM |
| 25 | Norte - FVN - 22 - 1 5º Andar | 4 | VIGA | 2,40 x 3,70 | S | E | 30 x 120 | 0,2 | SIM |
| 26 | Norte - FVN - 23 5º Andar | 4 | VIGA | 4,90 x 9,10 | S | E | 30 x 120 | 2,5 | SIM |
| 27 | Norte - FVN - 24 1º Andar | 4 | VIGA | 4,90 x 7,10 | S | E | 30 x 120 | 2 | SIM |
| 28 | Norte - FVN - 25 | 4 | VIGA | 4,80 x 10,80 | S | E | 30 x 120 | 0,3 | SIM |
| 29 | Norte - FVN - 26 4º Andar | 4 | FVN - 26 | 4,90 x 10,60 | S | E | 30 x 120 | 1,5 | SIM |
| | | | Média (u) | Moda | Mediana | profundidade m | profundidade m | Desvio padrão | Variância |
| | | | 1,359259259 | 0 | 1,5 | 4,5 | 0 | 1,261945768 | 1,59250712 |

Fonte: Autor, 2022

PLANILHA RESULTADOS FACHADA NORTE PILARES

TABELA 7: PLANILHA RESULTADO FACHADA NORTE, PILARES

|  TABELA DOS DADOS E ENSAIOS NO BLOCO G, FACHADA NORTE, PILARES | | | | | | | | | |
|--|--------------------------------------|------------------|-------------|----------------|---------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------------------|----------------------|
| CP | FACHADA | SETOR | ELEMENTO | TAMANHO (cm) | CONCRETO EXPOSTO (N ou S) | ÁREA (I OU E) | Dimensões da Estrutura | CARBONATAÇÃO PROF. NA AMOSTRA (cm) | PRESENÇA DE CLORETOS |
| 1 | Norte - FP - 1 (Tais) | 1 | PILAR | 5,00 X 10,00 | S | E | 60 X 120 | 1,4 | X |
| 2 | Norte - FP - 2 4º Andar (Tais) | 1 | PILAR | 5,00 X 10,00 | S | E | 60 X 120 | 2,5 | X |
| 3 | Norte - FN - P5 2º Andar | 2 | PILAR | 4,90 x 9,10 | S | E | 60 x 120 | 1,5 | SIM |
| 4 | Norte - FN - P6 1º Andar | 2 | PILAR | 4,90 x 9,90 | S | E | 60 x 120 | 2 | SIM |
| 5 | Norte - FN - P7 7º Andar | TORRE 2 | PILAR | 4,90 x 9,70 | S | E | 60 x 120 | 3 | SIM |
| 6 | Norte - FN - P12 7º Andar | TORRE 3 | PILAR | 2,40 x 10,50 | S | E | 60 x 120 | | NÃO HOUE |
| 7 | Norte - FN - P8 7º Andar | 3 | PILAR | 4,50 x 9,90 | S | E | 60 x 120 | 3 | SIM |
| 8 | Norte - FN - P9 7º Andar | 3 | PILAR | 4,90 x 3,80 | S | E | 60 x 120 | 1,5 | SIM |
| 9 | Norte - FN - P10 7º Andar | 3 | PILAR | 2,40 x 8,80 | S | E | 60 x 120 | | NÃO HOUE |
| 10 | Norte - FN - P13 - 1 1º Andar | 4 | PILAR | 2,40 x 2,50 | S | E | 60 x 120 | 8 | SIM |
| 11 | Norte - FN - P14 7º Andar | 4 | PILAR | 4,90 x 9,10 | S | E | 60 x 120 | | |
| 12 | Norte - FN - P15 - 1 7º Andar | 4 | PILAR | 4,90 x 4,80 | S | E | 60 x 120 | 3 | SIM |
| 13 | Norte - FN - P17 6º Andar | 5 | FN - P17 | 4,90 x 9,30 | S | E | 60 x 120 | TECOMAT | |
| | | Média (u) | Moda | Mediana | Profundidade m | Profundidade n | Desvio padrão | Variância | |
| | | 2,877778 | 3 | 2,9388889 | 8 | 1,4 | 2,036404784 | 4,146944444 | |

Fonte: Autor, 2022

PLANILHA RESULTADOS LAJES INTERNAS

TABELA 8: PLANILHA RESULTADO LAJES INTERNAS

|  TABELA DOS DADOS E ENSAIOS NO BLOCO G, LAJES | | | | | | | | |
|---|-----------------------|----------|--------------|---------------------------|---------------|------------------------|------------------------------------|--------------------|
| CP | FACHADA | ELEMENTO | TAMANHO (cm) | CONCRETO EXPOSTO (N ou S) | ÁREA (I OU E) | Dimensões da Estrutura | CARBONATAÇÃO PROF. NA AMOSTRA (cm) | PRESENÇA D CLORETO |
| 1 | Laje - FL1 - 1º Andar | LAJE | 5,00 x 7,20 | N | I | - | 1,5 | SIM |
| 2 | Laje - FL2 - 1º Andar | LAJE | 4,90 x 4,40 | N | I | - | 0 | NÃO HOUVE |
| 3 | Laje - FL3 2º Andar | LAJE | 5,00 x 5,60 | N | I | - | 0,2 | SIM |
| 4 | Laje - FL4 2º Andar | LAJE | 5,00 x 6,10 | N | I | - | 2,5 | SIM |
| 5 | Laje - FL5 3º Andar | LAJE | 5,00 x 8,00 | N | I | - | 1 | SIM |
| 6 | Laje - FL6 3º Andar | LAJE | 5,00 x 5,00 | N | I | - | 1 | SIM |
| 7 | Laje - FL8 4º Andar | LAJE | 5,00 x 4,00 | N | I | - | 0,5 | SIM |
| 8 | Laje - FL9 5º Andar | LAJE | 5,00 x 4,00 | N | I | - | 0,2 | SIM |
| 9 | Laje - FL10 5º Andar | LAJE | 5,00 x 4,00 | N | I | - | 1 | SIM |
| 10 | Laje - FL11 6º Andar | LAJE | 5,00 x 7,00 | N | I | - | 0,5 | SIM |
| 11 | Laje - FL12 6º Andar | LAJE | 4,90 x 10,50 | N | I | - | 1,5 | SIM |
| 12 | Laje - FL13 7º Andar | LAJE | | N | I | - | 0,2 | SIM |
| 13 | Laje - FL14 7º Andar | LAJE | 5,00 x 5,60 | N | I | - | 0,5 | SIM |
| 14 | Laje - FL15 8º Andar | LAJE | 5,00 x 9,40 | N | I | - | 1 | SIM |
| 15 | Laje - FL16 8º Andar | LAJE | 5,00 x 5,50 | N | I | - | TUDO CARBONATADO | SIM |
| 16 | Laje - FLT Térreo | LAJE | 5,00 x 7,40 | N | I | - | TUDO CARBONATADO | SIM |

Fonte: Autor, 2022

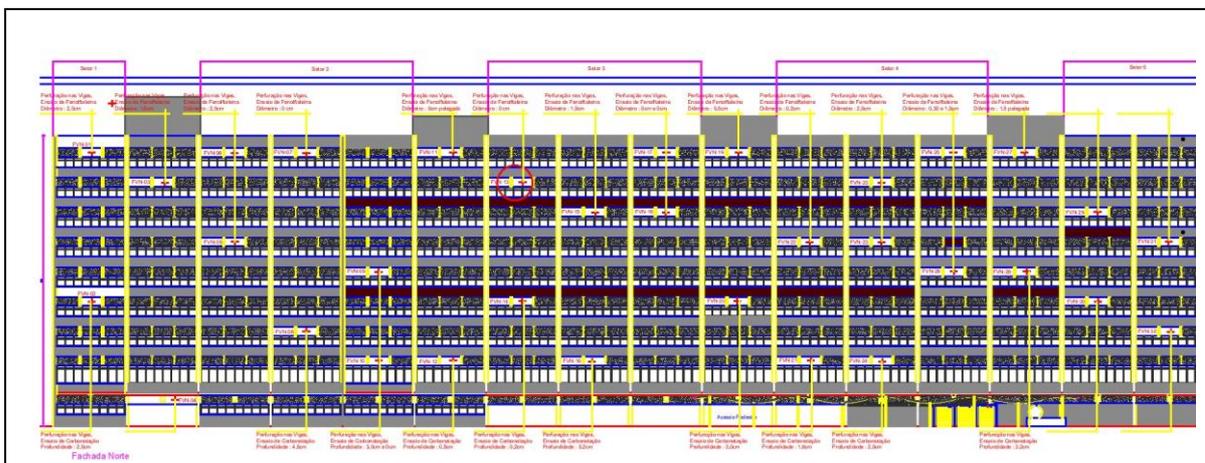
A planilha elaborada descreve os dados obtidos, no ensaio com aspersão da solução em fenolftaleína, determinando a profundidade da penetração da carbonatação nos 101 corpos de provas extraídos da fachada do bloco G, apenas 90 amostras foram analisadas quanto a profundidade da carbonatação, devido a sua integridade física e 7 amostras foram selecionadas para o ensaio de resistência. A planilha possui informações como: quantidade de corpos de provas, identificação da fachada, identificação da amostra ou testemunho, dimensão do testemunho, qual o elemento estrutural da fachada (Viga, Pilar ou laje), o elemento estrutural esta localizado internamente ou externamente, a dimensão do elemento estrutural de acordo com o projeto, profundidade da carbonatação e existência de cloretos. Foi elaborado no CAD, os resultados dos ensaios por fachada na planta de fachadas do bloco G para melhor visualização dos dados.

Figura 35: Resultados da Profundidade da carbonatação na fachada Sul (Vigas).



Fonte: Autor, 2021

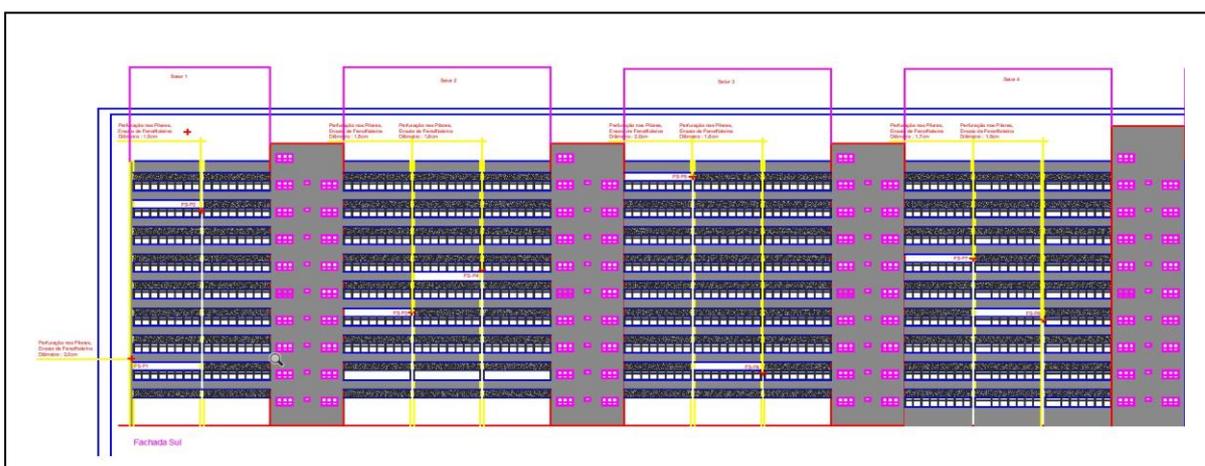
Figura 36: Resultados da Profundidade da carbonatação na fachada Norte (Vigas).



Fonte: Autor, 2021

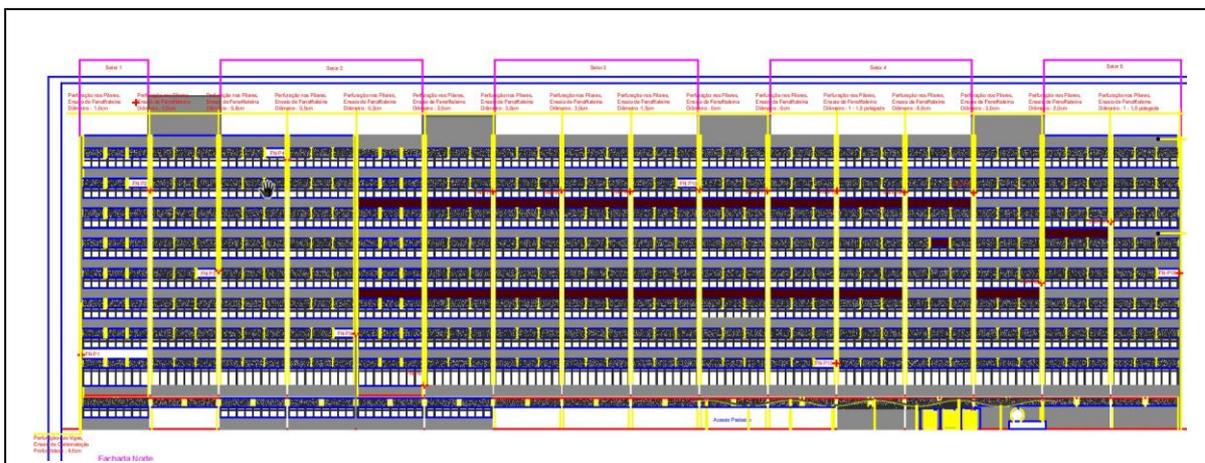
Na fachada sul encontramos um testemunho com a profundidade máxima de 2,3 cm, item 12, viga, identificada como FVS -12, na tabela 4. Na fachada norte, encontramos a profundidade máxima em um testemunho, na viga identificada, FVN -08, item 7, cuja profundidade da carbonatação é de 4,5cm, Tabela 6. Nota-se, nos resultados analisados das tabelas, 9 amostras com profundidade, maior ou igual a 2,5cm na fachada norte. Na fachada sul, nenhuma das amostras apresenta profundidade maior ou igual a 2,50cm.

Figura 37: Resultados da Profundidade da carbonatação na fachada Sul (Pilares).



Fonte: Autor, 2021

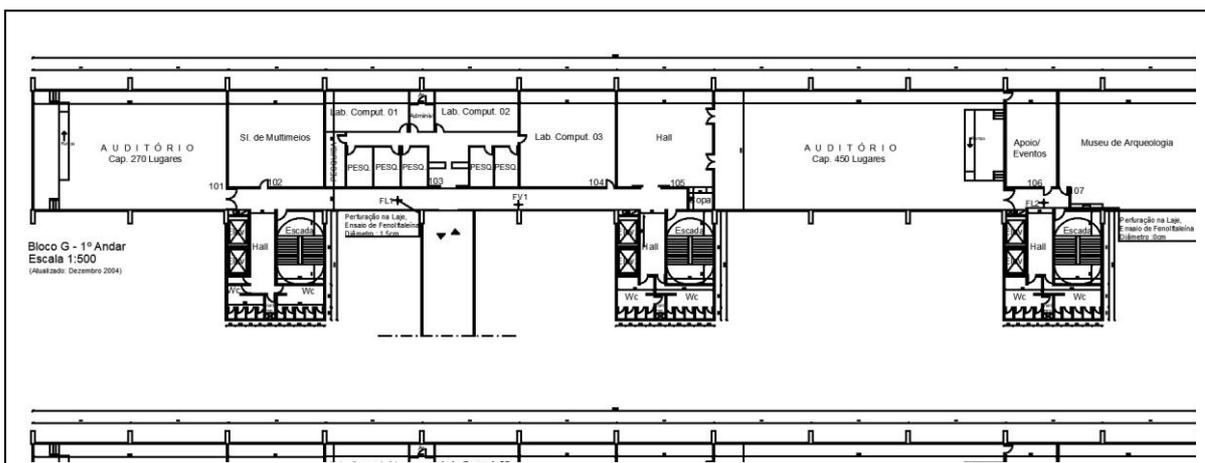
Figura 38: Resultados da Profundidade da carbonatação na fachada Norte (Pilares).



Fonte: Autor, 2021

Na fachada sul encontramos um testemunho com a profundidade máxima de 2,0 cm, pilar identificado como FS -P1 e P5, na tabela 5. Na fachada norte, encontramos a profundidade máxima em um testemunho, no pilar identificado, FN -P07,P08 e P15, cuja profundidade da carbonatação é de 3,0cm. Nota-se, nos resultados analisados da tabela 7, 4 amostras com profundidade, maior ou igual a 2,5cm na fachada norte. Na fachada sul, pilares, nenhuma das amostras apresenta profundidade maior ou igual a 2,50cm para os pilares.

Figura 39: Resultados da Profundidade da carbonatação no bloco G (lajes).



Fonte: Autor, 2021

De acordo com a tabela 8 o resultado do ensaio para verificar a profundidade da carbonatação nas lajes internas, apresenta 1 testemunho com profundidade de 2,5cm,

FL4 – localizada no 2 andar. A metodologia construtiva das lajes de acordo com o projeto e confirmada “in loco”, trata-se de laje pré moldada com bloco cimentício.

4.5 RESISTÊNCIA

O teste de resistência não foi realizado nos laboratórios da UNICAP, devido estarem fechados durante o período da Pandemia do COVID, entretanto os os testemunhos foram selecionados por setores da fachada e levados para o laboratório da empresa Tecomat, onde foram testados. As dimensões das amostras variam aproximadamente em 5,00cm X 10,00cm, condição mínima para poder elaborar o ensaio baseado na norma NBR5739:2018. As amostras foram selecionadas de 2 vigas, 3 pilares e 2 lajes, de pontos diversos do prédio. Estes testemunhos foram identificados e acondicionados. Os testes foram realizados em 2020, conforme planilha anexa, abaixo.

A resistência a compressão de 7 testemunhos, qualificados e adequados segundo a norma NBR 5739:2018, concreto, ensaio de compressão de corpos de provas cilíndricos. O objetivo é analisar a resistência de alguns testemunhos de diferentes locais do prédio do bloco G, após 44 anos de construção qual a resistência encontrada nos ensaios e se existe alguma relação com a durabilidade ou vida útil do concreto. As amostras foram selecionadas e encaminhadas para a empresa TECOMAT, que realizou o ensaio de resistência.

Figura 40: Resultados do ensaio de resistência a compressão

| TECOMAT Engenharia | | DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM TESTEMUNHOS DE CONCRETO | | | | | | | | | | | | | | RELATÓRIO Nº: EC-162.21-00 | | | | | |
|--|---|---|---------------|----------------------|---------------------|------------------------|-------------|----------------|-----------|------------------------------|---------------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|----------------------------|----------------------------|---------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| CLIENTE: | PEDRO ADOLFO RODRIGUES MACIEL | | | | | | | | | | | | | DATA DE EMISSÃO: | 02/09/2021 | | | | | | |
| CONSTRUTORA: | - | | | | | | | | | | | | | DATA DO ENSAIO: | 02/09/2021 | | | | | | |
| OBRA: | BLOCO G UNICAP | | | | | | | | | | | | | RESPONS. TÉCNICO: | PEDRO ADOLFO | | | | | | |
| ENDEREÇO: | RUA DO PRÍNCIPE 526, BOA VISTA, RECIFE - PE | | | | | | | | | | | | | fck-PROJETO (MPa): | 15,0 | | | | | | |
| NBR 5739-2018 - CONCRETO - Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| NORMA(S) DE REFERÊNCIA: NBR 6118-2014 - Projeto de Estruturas de concreto - Procedimento | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| NBR 7680-1:2015 - Concreto - Extração, preparo e ensaio de testemunhos de estruturas de concreto - Parte 1: Resistência à compressão axial | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| EQUIPAMENTO(S) DO ENSAIO: EMIC DL-60000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM TESTEMUNHOS DE CONCRETO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N.º | Data da moldagem* | Data da extração* | Idade (dias)* | Sentido da extração* | Condição de umidade | Massa específica kg/m³ | Diâmetro mm | Comprimento mm | Carga kgf | f _{c,EXP,INDIC} MPa | Fatores de correção | | | | | f _{c,EXP} MPa | f _{c,EXP,REQ} MPa | Desvio Máximo | f _{c,EXP,REQ} MPa | Descrição das peças * | Tipo de ruptura NBR 5.739 |
| | | | | | | | | | | | Relação h/d | K ₁ | K ₂ | K ₃ | K ₄ | | | | | | |
| 1 | - | 14/12/2020 | - | Ortogonal | Seco | 2391 | 49,1 | 81,7 | 7.971 | 41,3 | 1,66 | -0,03 | 0,12 | 0,05 | -0,04 | 45,5 | - | - | - | Pilar - FN - P14 - 7º Andar | Cônica |
| 2 | - | 14/12/2020 | - | Ortogonal | Seco | 2512 | 49,0 | 73,4 | 11.164 | 58,1 | 1,50 | -0,04 | 0,12 | 0,05 | -0,04 | 63,3 | - | - | - | Pilar - FN - P17 - 8º Andar | Cônica |
| 3 | - | 14/12/2020 | - | Ortogonal | Seco | 2191 | 49,0 | 91,8 | 4.290 | 22,3 | 1,87 | -0,01 | 0,12 | 0,05 | -0,04 | 25,0 | - | - | - | Viga - FVN - 07 - 8º Andar | Cônica |
| 4 | - | 14/12/2020 | - | Ortogonal | Seco | 2397 | 49,1 | 76,1 | 9.332 | 48,3 | 1,55 | -0,04 | 0,12 | 0,05 | -0,04 | 52,9 | - | - | - | Viga - FVN - 10 - 1º Andar | Cônica |
| 5 | - | 14/12/2020 | - | Paralelo | Seco | 2226 | 49,6 | 75,1 | 6.048 | 30,7 | 1,51 | -0,04 | 0,12 | 0,00 | -0,04 | 32,0 | - | - | - | Laje - FL - 12 - 6º Andar | Cônica |
| 6 | - | 14/12/2020 | - | Ortogonal | Seco | 2421 | 49,9 | 61,1 | 8.367 | 42,0 | 1,22 | -0,08 | 0,12 | 0,05 | -0,04 | 44,2 | - | - | - | Pilar - FP - 8 - 8º Andar | Cônica |
| 7 | - | 14/12/2020 | - | Paralelo | Seco | 2190 | 49,8 | 64,6 | 6.304 | 31,7 | 1,30 | -0,06 | 0,12 | 0,00 | -0,04 | 32,2 | - | - | - | Laje - FL - 15 - 8º Andar | Cônica |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Fonte: Autor, 2022.

Nota-se, as resistências obtidas nas 7 amostras, resistências superiores ao de projeto com $f_{ck}=25\text{Mpa}$ que previa inicialmente f_{ck} de 15 Mpa, porém as fichas dos ensaios realizados apresenta resistência média de 25Mpa em 28 dias de cura. Mostra a qualidade de controle tecnológico dos materiais, agregados e procedimentos utilizados na fase de execução. O valor da resistência média, é de 42,15Mpa. O tempo, corrobora também para uma resistência maior, embora nas fichas de controle tecnológico evidencia um crescimento da resistência acima do projetado.

4.6 ENSAIO DE PRESENÇA DE CLORETOS

No estudo, os ensaios realizados com aspersão do nitrato de prata AgNO_3 , apresentaram as seguintes colorações. Uma seção mais escura e outra mais clara (incolor).

Figura 41 - Ensaio com aspersão do Nitrato de Prata



Fonte: Autor, 2020

Nota-se que a cor apresentada após inserção do nitrato de prata, não foi esbranquiçada na seção com teor de cloretos, e na seção com uma cor mais escura, próxima do marrom escuro. Pode ser devido a presença de carbonatos na seção, (que leva a redução do pH do concreto) (OTSUKI *et al*,2012; FRANÇA,2011; KIM *et al*,2013), ratifica-se que todas as mostras apresentaram estas cores pós aspergida com Nitrato de prata. Outro fato importante a destacar foram as dimensões das profundidades eram semelhantes as dimensões da carbonatação.

4.7 MEV- MICROSCÓPIO DE VARREDURA ELETRÔNICA

Quadro 4 - Resumo análise das imagens no MEV

| AMOSTRA | IDENTIFICAÇÃO FACHADA | CARBONATAÇÃO cm | PRESENÇA DE CLORETOS | COMENTÁRIO |
|---------|-------------------------|-----------------|----------------------|--|
| A1 | FVS 18 | 0 | Não | Nota-se uma superfície bem compacta, preservação da camada passivadora do aço. |
| A2 | FVS 08 | 1 | Sim | Apresenta vazios no seu traços até 178um, mas não atinge o aço |
| A3 | FS direita viga 5 andar | 1,7 | Sim | Mostra superfície com vazios até 703um, mas não atinge a camada passivadora |
| A4 | FVN 27 | 1,5 | Sim | Camadas cristalizadas e porosidade |
| A5 | FVN18 | 0 | Sim | Apresenta superfície com fissuras, entrada de cloretos |
| A6 | FVN11 | 0 | 0 | Camadas com vazios até 117um e porosidade na amostra |

Fonte: Autor,2022

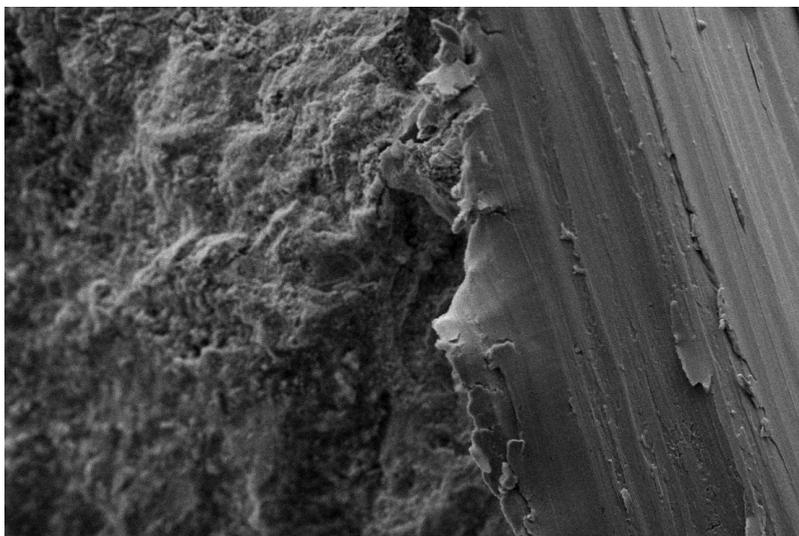
Observa-se a análise de 6 testemunhos que foram selecionados e tratados para serem inseridos no MEV. O equipamento utilizado no laboratório do NPCIAMB, da UNICAP, localizado no bloco J, foi o microscópio eletrônico referência JSM5600LV, componente external scan interface referência MP-65250. As 6 amostras selecionadas de acordo com os lotes definidos no mapeamento. Foram escolhidas 3 amostras da fachada sul e 3 amostras da fachada norte. Estas amostras foram cortadas para se adaptarem ao suporte de análise do MEV. São amostras com dimensões aproximadas, variando entre 2 cm e 5 cm e foram pintadas com cobertura de ouro para que os elétrons possam captar com qualidade a morfologia da superfície, neste caso foi utilizado acetona na superfície, sem comprometimento da análise. Algumas imagens captadas pelo MEV apresenta, pontos de cristalização, vazios, poros e fissuras. Estas imagens ampliadas constam a unidade de medidas em microns ou micrômetro, significa a milésima parte do milímetro.

Figura 42 - Amostra 1, detalhes do revestimento do aço



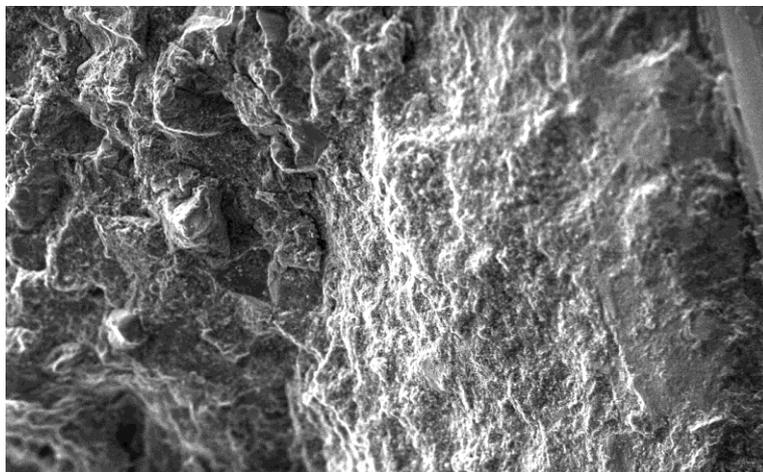
Fonte, Autor, 2021

Figura 43 - Amostra 1, Preservação da camada passivadora do aço



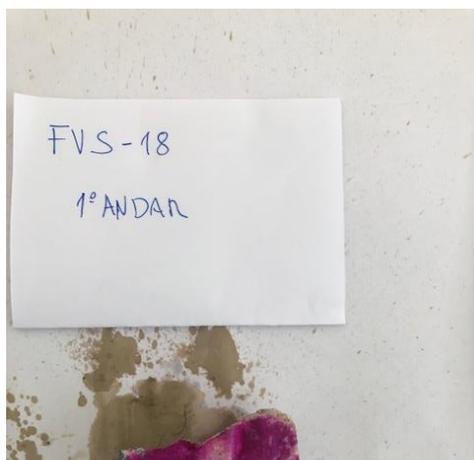
Fonte: Autor, 2021

Figura 44- Amostra 1, Traço da amostra, apresenta poros bem compactos, dificultando a entrada do CO₂



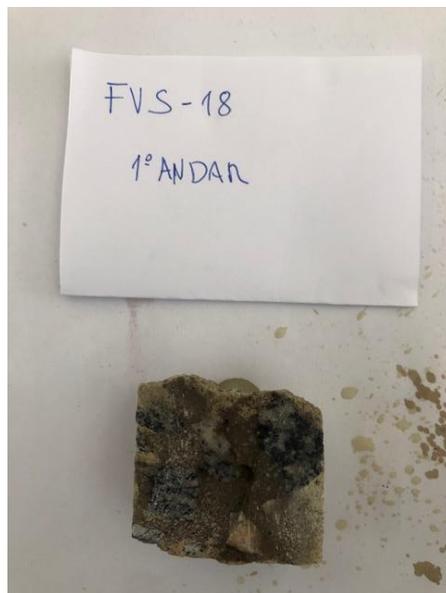
Fonte: Autor, 2021

Figura 45- Ensaio com aspersão do fenol, determinando a profundidade da carbonatação na amostra 1, neste caso não houve carbonatação



Fonte: Autor, 2021

Figura 46 - Ensaio para identificar a presença de cloretos na amostra 1, neste caso não há presença de cloretos



Fonte: Autor, 2021

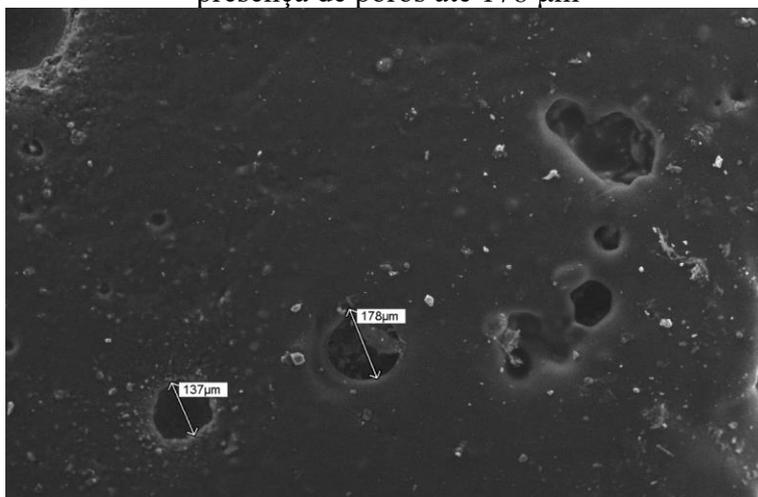
Figura 47 - Amostra 2, medida de comprimento aproximada de 2,0cm



Fonte: Autor, 2021

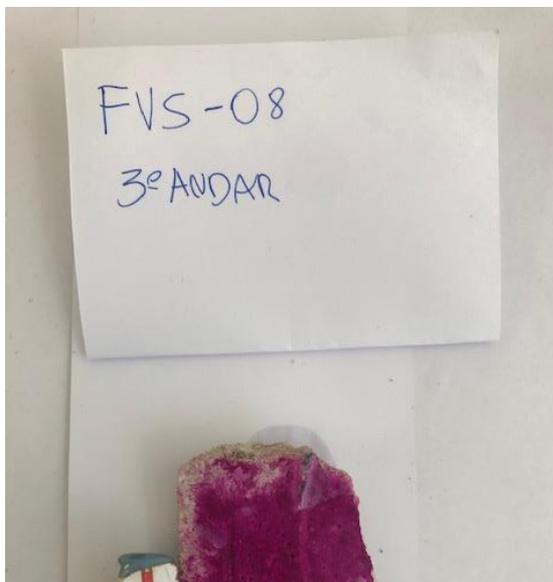
A Amostra 2, cujo testemunho está localizado na viga da fachada sul, nos ensaios de carbonatação apresentou profundidade de 1,00cm verifica-se a presença de cloretos, praticamente com a mesma profundidade. Nota-se que não atingiu a camada passivadora do aço. O cobrimento do aço, de acordo com o projeto é de 2,5cm. Portanto, Profundidade da carbonatação < Cobrimento do aço.

Figura 61 – Amostra 2, apresenta na sua morfologia presença de poros até 178 μm



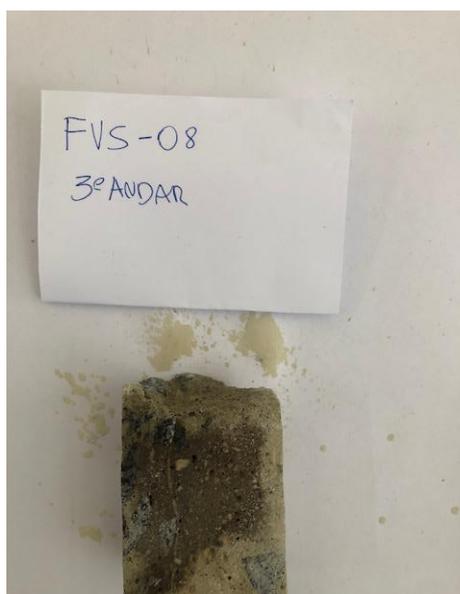
Fonte: Autor, 2021

Figura 64 - Ensaio com aspersão do fenol, determinando a profundidade da carbonatação na amostra 2, neste caso houve 1cm de profundidade



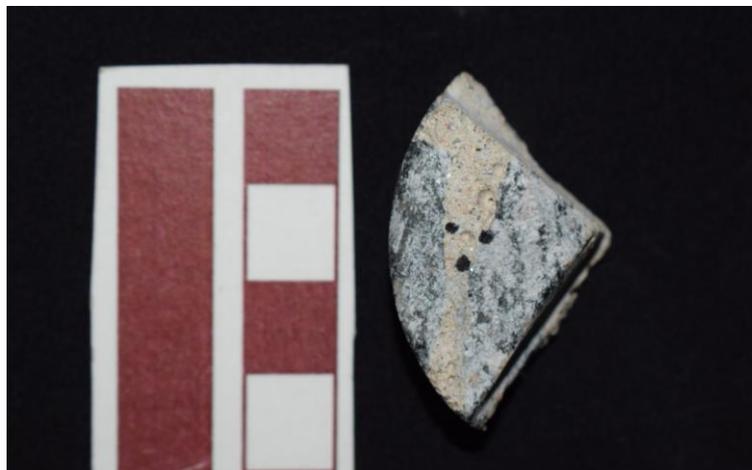
Fonte: Autor, 2021

Figura 50 - Ensaio para identificar a presença de cloretos na amostra 2, neste caso há presença de cloretos



Fonte: Autor, 2021

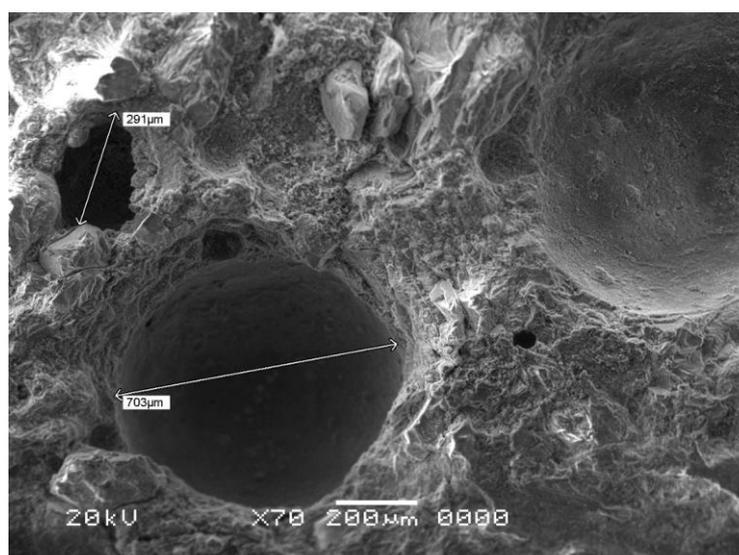
Figura 51 - Amostra 3, medida de comprimento aproximada de 4,0cm



Fonte: Autor, 2021

A amostra 3, foi selecionada da fachada sul, no 5 andar do bloco G. O teste calorímetros com a solução de fenolftaleína revelou a presença de carbono com a profundidade de 1,7cm. O teste com a solução de nitrato de prata identificou a presença de cloretos. Entretanto o CO₂ e a presença de cloretos não atingiram a armadura.

Figura 52 – Amostra 2, apresenta na sua morfologia presença maior porosidade, com até 703 μm



Fonte: Autor, 2021

Figura 53 - Ensaio com aspersão do fenol, determinando a profundidade da carbonatação na amostra 3, neste caso houve 1,7cm de profundidade



Fonte: Autor, 2021

Figura 54 - Ensaio para identificar a presença de cloretos na amostra 3, neste caso há presença de cloretos

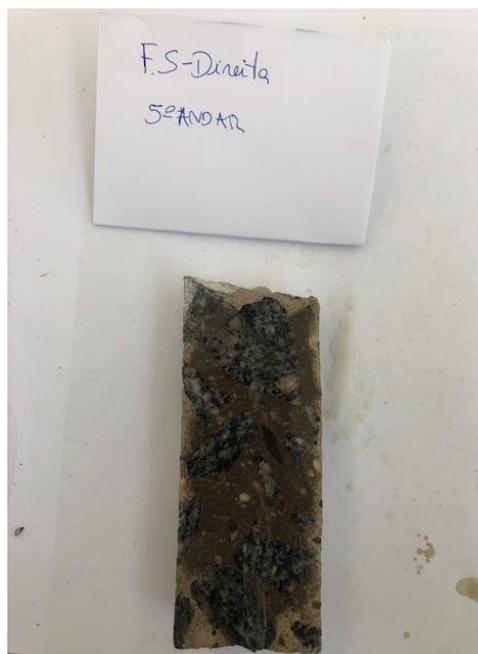
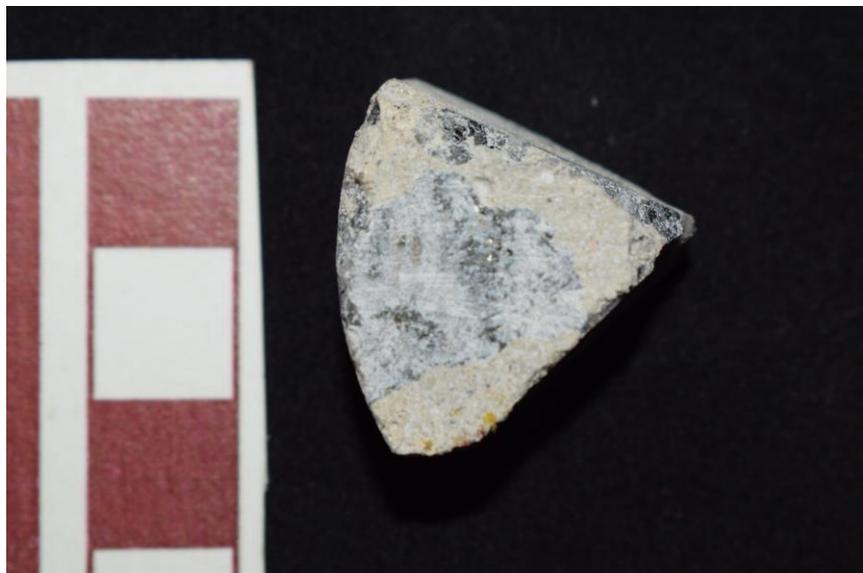


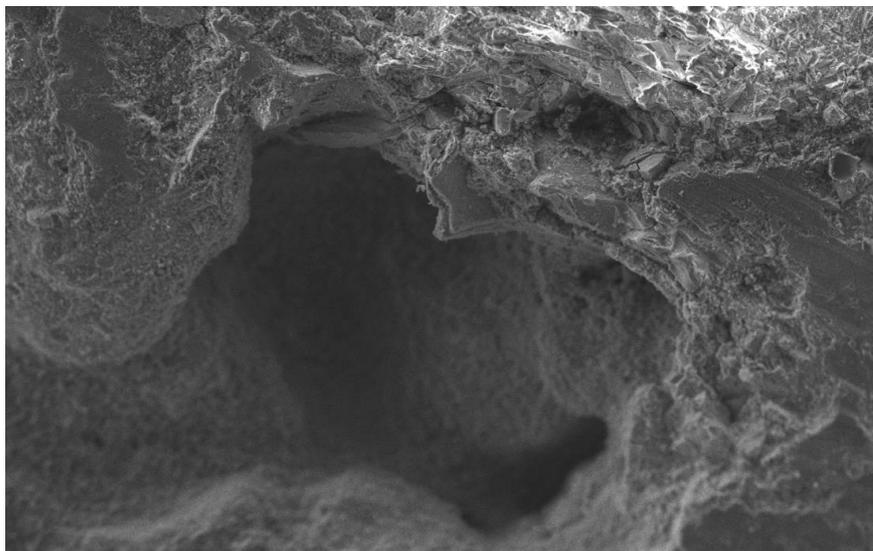
Figura 55 - Amostra 4, medida de comprimento aproximada de 2,5cm



Fonte: Autor, 2021

As amostras selecionadas para o MEV, seguiram um pré-requisito de serem pontos diferentes das duas fachadas sul e norte, ou seja, trabalhamos com vigas de diferentes andares. A amostra 4, está localizada na fachada norte na viga, de acordo com o mapeamento prévio realizado. Os testes com a fenolftaleína, apresentou uma amostra com 3,2cm de profundidade e no teste com a aspensão do nitrato de prata, verificamos a presença de cloretos.

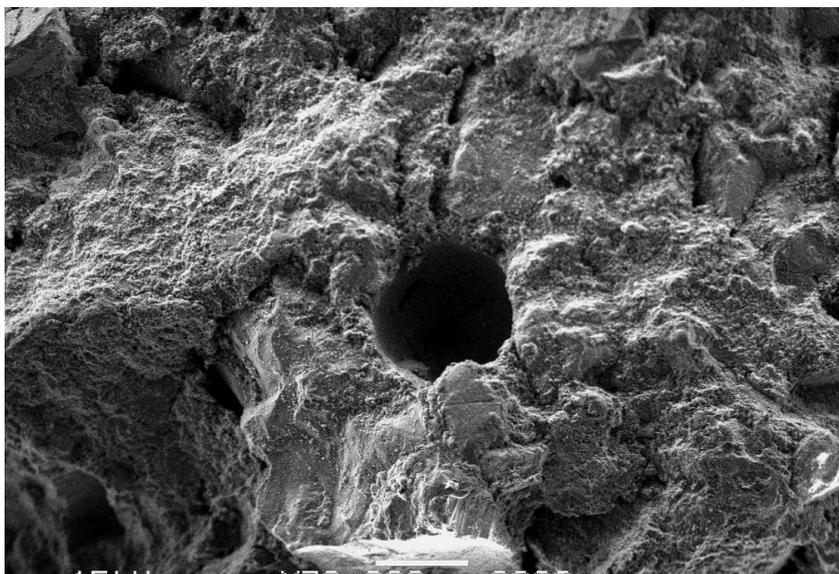
Figura 56 - Amostra 4, apresenta na sua superfície, irregularidades e composição do traço menos compacta com poros mais espaçados



Fonte: Autor, 2021

A porosidade do concreto reflete na facilidade de penetração do CO₂ na estrutura e ao longo de sua vida útil. Quando há reação química do CO₂ com a pasta de concreto, diminuindo sua alcalinidade, facilita a penetração do dióxido de carbono, até despassivar a armadura, iniciando o processo de corrosão do aço. A presença de cloretos, ou seja, a penetração de cloretos na amostra, facilitada por fissuras, espaços vazios, torna a reação mais agravante para a estrutura. Por isso, a importância do planejamento eficaz, principalmente nas fases iniciais de projeto, como por exemplo um traço bem homogêneo, com amassamento bem coeso, tornando o concreto bem compacto.

Figura 57 - Amostra 4, apresenta na sua superfície espaços vazios



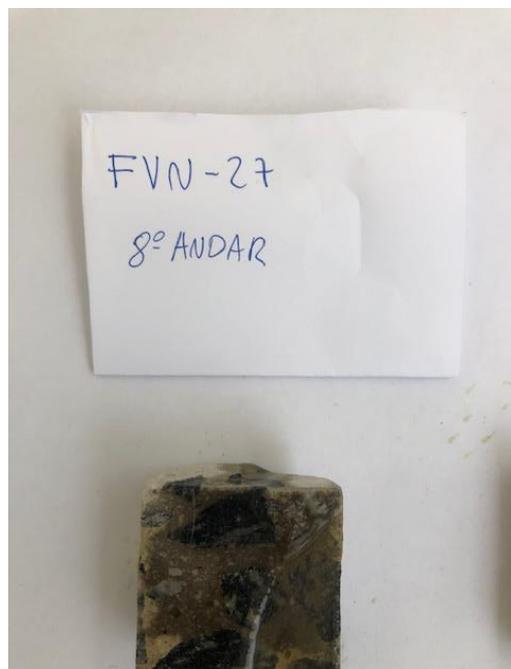
Fonte: Autor, 2021

Figura 58 - Ensaio com aspersão do fenol, determinando a profundidade da carbonatação na amostra 4, neste caso houve 1,5cm de profundidade



Fonte: Autor, 2021

Figura 59 - Ensaio para identificar a presença de cloretos na amostra 4, neste caso há presença de cloretos



Fonte: Autor, 2021

A amostra 5, foi extraída de uma viga localizada, no 6 andar, da fachada norte do bloco G. Os resultados para os ensaios de carbonatação constataram que não há presença de CO₂, porém foi verificado positivo para presença de cloretos, como mostra as figuras abaixo. Foi visualizado, ainda a presença de fissuras e vazios nas imagens captadas com resolução com 100um e ampliação 160X. Pode-se relacionar estas fissuras e presença de poros na amostra com a penetração de cloretos, entretanto constatamos a não despassivação da armadura, ou seja, a penetração de cloretos foi menor que 2,5cm do revestimento do aço. Os estudos acadêmicos, evidenciam a alcalinidade do concreto em acima de 12 do potencial hidrogeniônico (pH), importante para a proteção da armadura.

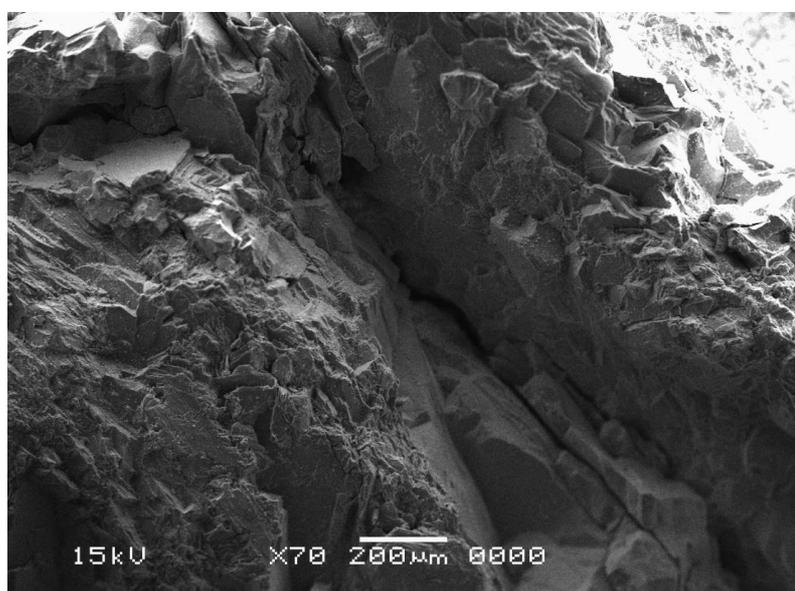
É uma camada em que o concreto está estável, suas características físicas e químicas, encontra-se em equilíbrio (BOLINA; TUTIKIAN; HELENE,2019). A análise pelo MEV, destas amostras revelam uma alternância de patologias encontradas em diferentes pontos da fachada. Identifica-se amostras carbonatadas e a presença de cloretos foi positiva na maioria das amostras, que pode ser influenciado pela sua classificação quanto ao grau de agressividade, conforme a norma 6118.

Figura 85 - Amostra 5, medida de comprimento aproximada de 2,5cm



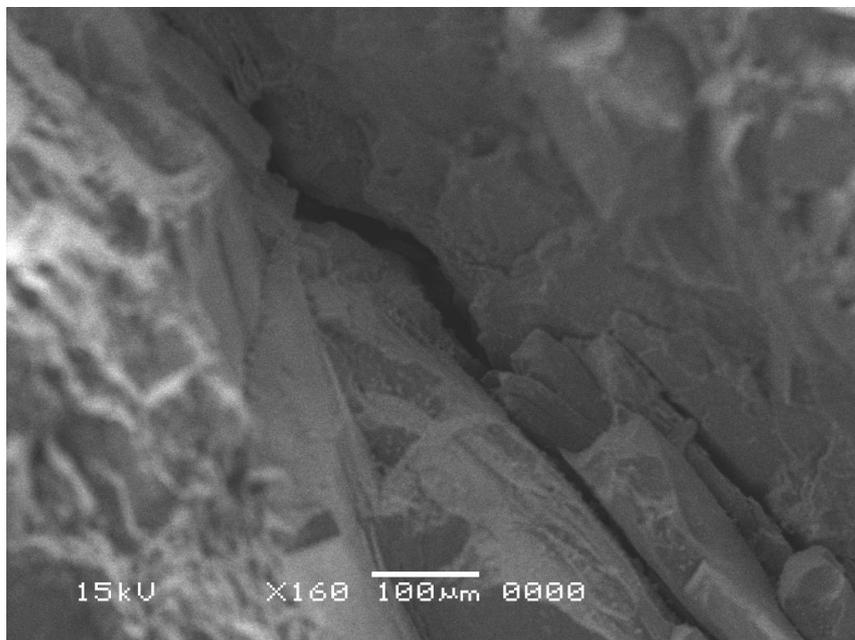
Fonte: Autor, 2021

Figura 61 - Amostra 5, apresenta na sua superfície, irregularidades e composição do traço menos compacta com poros mais espaçados e fissuras



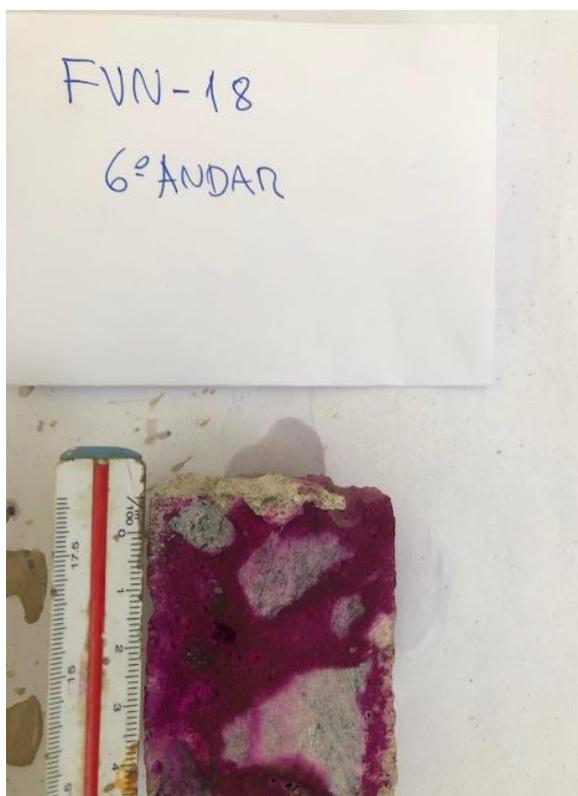
Fonte: Autor, 2021

Figura 62 - Amostra 5, apresenta na sua superfície, irregularidades e composição do traço menos compacta com poros mais espaçados e fissuras



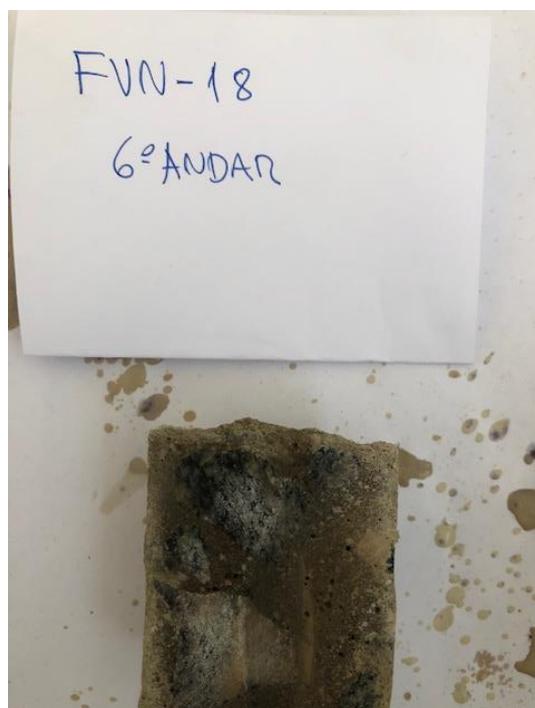
Fonte: Autor, 2021

Figura 63 - Ensaio com aspersão do fenol, determinando a profundidade da carbonatação na amostra 5, neste caso não ocorreu carbonatação



Fonte: Autor, 2021

Figura 64 - Ensaio para identificar a presença de cloretos na amostra 5, neste caso há presença de cloretos



Fonte: Autor, 2021

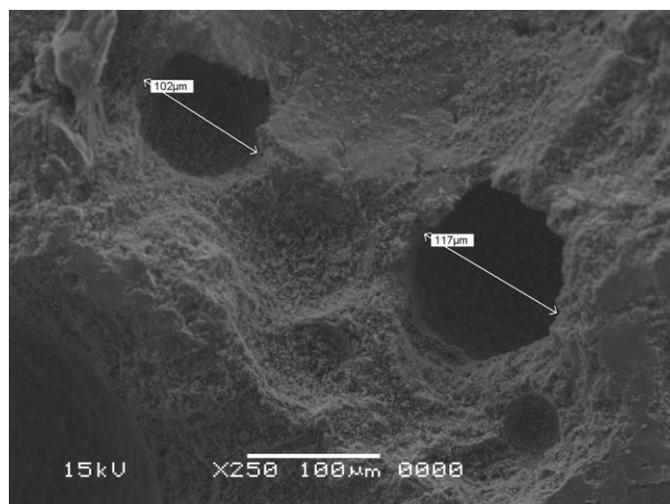
A amostra 6, extraída da fachada norte, localizada na viga do 8º andar, identificada como FVN11, fachada/viga/norte/sequência11, após o ensaio calorímetro com aspersion da fenolftaleína não apresentou presença de dióxido de carbono. O resultado do ensaio com aspersion da solução em nitrato de prata, também não houve presença de cloretos na mostra analisada.

Figura 65 - Amostra 6, medida de comprimento aproximada de 2,5cm



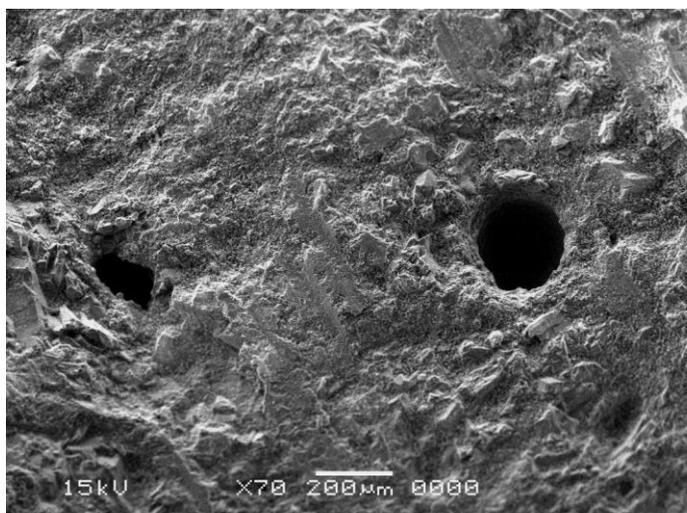
Fonte: Autor, 2021

Figura 66 - Amostra 6, apresenta na sua superfície, irregularidades e composição do traço menos compacta com poros mais espaçados e fissuras



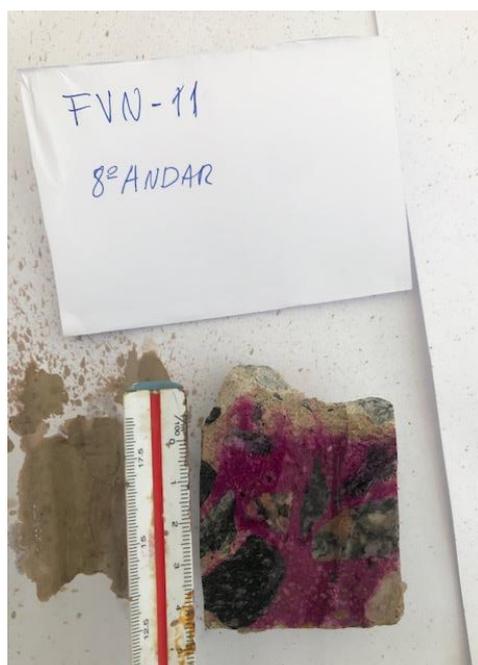
Fonte: Autor, 2021

Figura 67 - Amostra 6, apresenta na sua superfície fissuras, alguns vazios muito pequenos, com 117um quando ampliamos 70 vezes



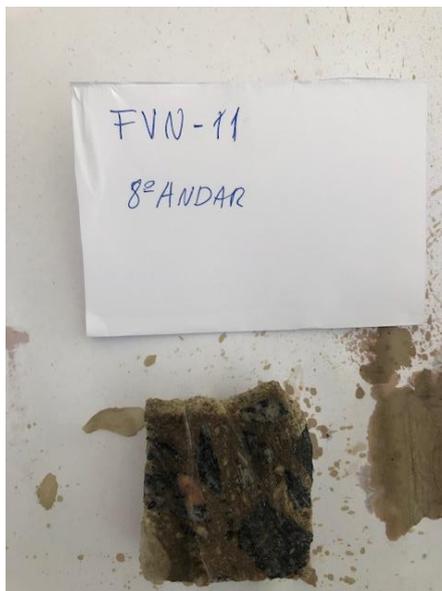
Fonte: Autor, 2021

Figura 68 - Ensaio com aspersão do fenol, determinando a profundidade da carbonatação na amostra 6, neste caso não ocorreu carbonatação



Fonte: Autor, 2021

Figura 69 - Ensaio para identificar a presença de cloretos na amostra 6, neste caso não há presença de cloretos



Fonte: Autor, 2021

4.8 CÁLCULO DAS TAXAS DE VOLUME CARBONATADO EM RELAÇÃO AO CONCRETADO

Apresenta-se uma tabela, com os dados construtivos de volume concretado e volume carbonatado, esta tabela possui o objetivo de comparação entre os volumes.

Tabela 9: Resultados do volume concretado x volume carbonatado no bloco G

|   | | | |
|--|---|-------------------|------------------|
| Volume de Concreto total do bloco G | | Volume m3 | |
| Lajes | $(105,75 \times 11,90 \times 0,12 \text{ esp}) \times 9 \text{ lajes}$ | 1.359,09 | |
| vigas | $(11,75 \times 0,30 \times 1,20) \times 13 + (115,20 \times 0,30 \times 1,20) \times 3 \times 9 \text{ lajes}$ | 1.614,69 | |
| pilares | $(1,20 \times 0,60 \times 42,00) \times 24 \text{ pilares}$ | 725,76 | |
| Fundação | $(3 \times 3 \times 0,50 \times 24 \text{ pilares}) + \text{cinta } (0,40 \times 1,20 \times 235,30)$ | 0,00 | 3.699,54 |
| Volume Total | | 3.699,54 | |
| Volume Total de Concreto Carbonatado Bloco G | | Volume m3 | % |
| Lajes | $(105,75 \times 11,90 \times 0,0083 \text{ m}) \times 9 \text{ lajes}$ | 94,00 | 6,92 |
| vigas | $((9,75 \times 0,014 \times 1,20) \times 3 \times 24 + (11,75 \times 0,014 \times 1,20) \times 13 + (115,20 \times 3 \times 0,014 \times 1,20)) \times 9 \text{ lajes}$ | 181,44 | 11,24 |
| pilares | $(1,20 \text{ m} \times 0,023 \text{ m} \times 42,00 \text{ m}) \times 24 \text{ pilares} \times 9 \text{ andares}$ | 250,39 | 34,5 |
| Fundação | $(3 \times 3 \times 0,50 \times 24 \text{ pilares}) + \text{cinta } (0,40 \times 1,20 \times 235,30)$ | 0 | 0 |
| Volume Total | | 525,83 | 14,21% |
| CÁLCULOS DAS ÁREAS | | Área m2 | |
| lajes | $(105,75 \times 11,90) \times 9 \text{ lajes}$ | 11.325,82 | |
| vigas | $((0,30 \times 1,20) \times 24 + (0,30 \times 1,20) \times 13 + (115,20 \times 3 \times 0,30 \times 1,20)) \times 9 \text{ lajes}$ | 1.239,66 | |
| pilares | $(1,20 \times 0,60 \times 42,00) \times 24 \text{ pilares}$ | 725,76 | |
| | | ÁREA TOTAL | 13.291,24 |

Fonte: Autor, 2021

Para afirmar se esta relação do volume carbonatado com a vida útil do concreto, possui significância, conforme a NBR6118 da ABNT para execução de obra em concreto armado e sua classe de agressividade, onde identifica-se classe de agressividade 3. O volume carbonatado, afetaria a vida útil do concreto, a partir que atingisse a passivação da armadura, ou seja, a depassivação ocorre quando a profundidade da carbonatação é maior do que cobertura da armadura. A porcentagem calculada na tabela indica para viga 11,24% do volume carbonatado em relação ao seu volume concretado e 34,50% do volume carbonatado em relação ao seu volume concretado para pilares. O percentual geral de volume carbonatado em relação ao volume concretado é de 14,21%.

4.9 ESTATÍSTICA

A Amostra forneceu os seguintes dados estatísticos:

TABELA 10: DADOS ESTATÍSTICOS DA AMOSTRA

|  TABELA DOS DADOS ESTATÍSTICOS | | | | | | | | |
|--|-----------|------|---------|------------------|------------------|---------------|-----------|---------------|
| DADOS ESTATÍSTICOS DA PLANILHA DE RESULTADOS | | | | | | | | |
| | Média (u) | Moda | Mediana | Profundidade máx | Profundidade mín | Desvio padrão | Variância | Amostras Unid |
| RESULTADO GERAL | 1,36 | 0,00 | 1,50 | 8,00 | 0,00 | 1,14 | 1,31 | 90 |
| Fachada Sul Geral | 1,57 | 1,6 | 1,6 | 2,3 | 0,5 | 0,38 | 0,14 | 32 |
| Fachada Norte Geral | 1,6 | 0 | 1,5 | 5 | 0 | 1,61 | 2,59 | 42 |
| Fachada Sul Vigas | 1,43 | 1,5 | 1,5 | 2,3 | 0 | 0,52 | 0,27 | 24 |
| Fachada Sul Pilares | 1,75 | 2 | 1,75 | 1,8 | 1,5 | 0,18 | 0,03 | 8 |
| Fachada Norte Vigas | 1,39 | 0 | 1,5 | 4,5 | 0 | 1,26 | 1,59 | 29 |
| Fachada Norte Pilares | 2,88 | 3 | 2,94 | 8 | 1,4 | 2,03 | 4,15 | 13 |
| lajes | 0,83 | 1 | 0,75 | 2,5 | 0 | 0,68 | 0,46 | 16 |

Fonte: Autor, 2022.

Inserindo os dados da tabela 1, numa distribuição normal de probabilidade estatística, podemos definir, qual a probabilidade que a profundidade de carbonatação seja superior ao cobrimento da armadura, o projeto estrutural indica um cobrimento de 2,5cm.

Para a amostra com os testemunhos, coletados e informados na tabela 1, a média (u) obtida é de 1,36cm e o desvio padrão é de 1,14cm. $P(x > 2,5\text{cm})$. Logo tem que normalizar a amostra, calculando o Z. Conforme a fórmula Gaussiana da normal.

$Z = (X - u) / S$, onde :

Z = Variável aleatória normal padronizada;

X= Variável aleatória;

u=Média;

S= Desvio Padrão;

Substituindo na equação da normal, temos: $Z = (2,5 - 1,36) / 1,14 = 1$

Na tabela da distribuição normal Z = 1 equivale a 34,13% a probabilidade de ocorrer uma profundidade da carbonatação maior que 2,5cm.

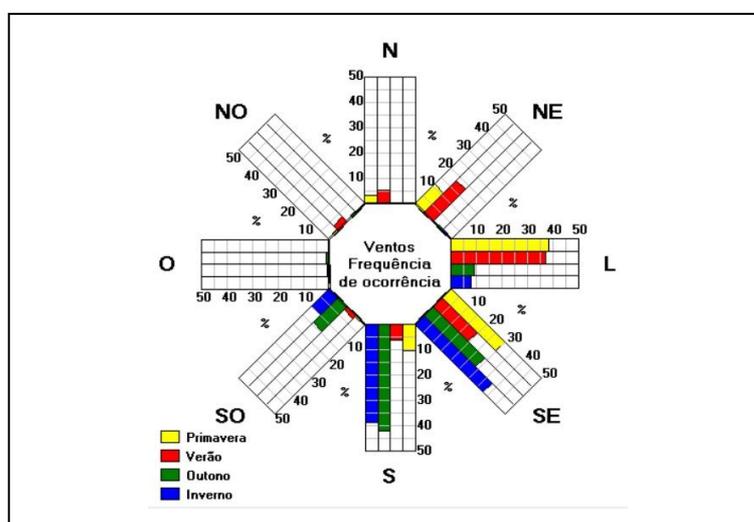
4.10 UMIDADE E FREQUÊNCIA DOS VENTOS

Outro dado obtido durante a pesquisa, foi com relação a ação dos ventos, a umidade e quantidade de CO₂(dióxido de carbono) emitido no ambiente. A Carbonatação é um processo físico-químico. O CO₂ dióxido de carbono, presente no ambiente penetra nos poros do concreto quando encontra espaço, reage com os hidróxidos de cálcio, do cimento Portland hidratado, (Ca (OH)₂). Esta reação com o hidróxido de cálcio resulta o carbonato de cálcio (CaCO₃),(MEHTA;MONTEIRO,2008).

As condições ambientais interferem diretamente no processo da carbonatação, a concentração do CO₂ no ambiente, a temperatura e a umidade. Um ambiente úmido e com grande concentração de CO₂, penetra nos poros saturados do concreto, até a atingir a armadura para iniciar a corrosão. A umidade estimula a velocidade da carbonatação. Nos ambientes de exposição internos a carbonatação é maior que nos ambientes externos. Em ambientes externos em dias chuvosos a carbonatação é mais lenta devido a saturação dos poros. (Andrade, Ortolan, Schiavon, 2018).

Analizamos, a frequência dos ventos que sopram nas fachadas do bloco G. Através do Laboratório de Eficiência Energética em Edificação, da Universidade Federal de Santa Catarina. Foram desenvolvidos vários programas, pelo laboratório com a finalidade de auxiliar e contribuir para o conforto térmico na concepção e projeção de edifícios. Utilizamos o Analysis BIO, que contribui com a carta de ventos ao longo das estações climáticas na cidade de Recife. A Umidade relativa do ar em Recife possui média de 75%.

Figura 70: Rosa dos ventos com frequencia dos ventos pelo LABEEE



Fonte: LABEEE, Analysis BIO.

A análise pelo Software desenvolvido pelo LABEEE, Laboratório de Eficiência Energética em Edificação da Universidade federal de Santa Catarina, apresenta a frequência dos ventos, nas 4 estações do ano em Recife, com maior frequência nos pontos NE (Nordeste), L(Leste) e SE(Sudeste). No verão maior predominância de ventos está no Nordeste e Leste. Podemos afirmar que a fachada mais afetada pela ação do vento é a fachada norte de acordo com os resultados da tabela 1. A Figura 71, mostra a imagem da rosa dos ventos sob a localização do bloco G, a frequência dos ventos durante as estações do verão e inverno mostra uma maior intensidade nas direções nordeste e leste que seriam identificadas na tabela 1 como a fachada Norte.

Figura 71: Estudo da ação dos ventos no bloco G



Fonte: imagem google Earth,2022.

A classe de agressividade, conforme a NBR6118:2003, para a localização do bloco G, foi a classe III, agressividade Forte, Classificação Marinha com risco de deterioração da estrutura, grande. A distância do bloco G em linha reta para o mar é de 2,02Km, conforme figura 72.

Figura 72: Distância do bloco G ao mar



Fonte: imagem google Earth,2022.

4.11 OUTRAS CONSIDERAÇÕES DA ANÁLISE

Foi analisado também a presença de cloretos nos testemunhos extraídos, foi utilizado o teste com aspersão do nitrato de prata para determinar a presença ou não, de cloretos na amostra, embora não objeto do nosso estudo principal, foi verificada presença de cloretos em 90% das amostras analisadas, com profundidades semelhantes, as profundidades encontradas com CO₂ (dióxido de carbono).

Considerando a fachada norte, mais deteriorada, conforme os resultados obtidos na análise da profundidade da carbonatação. Pode-se estabelecer uma relação direta com ação e frequência dos ventos nesta direção NE- Nordeste e L – Leste, correspondem a fachada norte da Tabela 1. A Fachada norte, voltada para a rua Almeida Cunha, tende a ser área com maior emissão de CO₂, transmitido pela circulação de automóveis e a queima de 20.000 litros de diesel pelos geradores de energia. Além de ser área voltada para parte comercial e residencial. A fachada Sul do bloco G, está localizada entre os jardins, Biblioteca e Bloco R, da UNICAP. Esta área funciona como uma caixa de proteção. Há uma maior frequência das chuvas, ou seja, esta área possui maior concentração de água, atingindo a fachada sul. Portanto estabelece uma saturação na fachada, diminuindo a velocidade de propagação da carbonatação.

Considera-se, após dados, documentos, relatórios e fichas de controle, os materiais construtivos utilizados no período da construção foi determinante para elevar a vida útil do prédio. Nota-se a resistência determinada no ensaio a compressão com média

de 42,15Mpa.

Considerando a profundidade da carbonatação, verificamos, embora de acordo com a distribuição normal, determinar que poderá existir para esta população da amostra, 34,13% pode estar carbonatada acima da profundidade do cobrimento do projeto, de 2,5cm, valor recomendado pela norma vigente, NBR 6118:1980. Afirma-se que a carbonatação só deteriora a estrutura quando atinge a passivação do aço. Logo, profundidade da carbonatação < cobrimento do aço a estrutura está em estado de segurança. Profundidade da carbonatação > cobrimento do aço a estrutura poderá em estado crítico, depende do grau da corrosão.

As normas foram se atualizando de acordo com a necessidade do mercado da construção, as patologias que foram surgindo e a necessidade de dar mais durabilidade a estrutura. Como atualização podemos citar a evolução da NBR 6118, surgiu como NB1 em 1940, o cobrimento do concreto era de 1,5cm, com a NBR 6118:1980, o cobrimento passou a 2,5cm e posteriormente a NBR6118:2003, estabelecia uma ligação direta com a classe de agressividade ambiental, o cobrimento aumentou em conformidade a ação de agentes agressivos ao ambiente.

Considerando, a análise que foi realizada das amostras selecionadas para o MEV – Microscopia de Varredura Eletrônica, o equipamento, através da Microscopia, permitiu analisar com ampliação até 1000 vezes com resolução superior, a superfície da amostra exposta a carbonatação e a presença de cloretos. Identifica-se nas imagens obtidas, fissuras, a morfologia da amostra com maior porosidade e a zona de transição entre a armadura e a pasta do concreto. Em face do estudo sobre as patologias encontradas no prédio do bloco G, afirma-se a existência de um plano de manutenção preventiva e corretiva por parte do setor técnico. A manutenção periodicamente aumenta a vida útil de um prédio. O desempenho da estrutura e de seus elementos estruturais retardam em perder suas funcionalidades específicas, proporcionando segurança e maior durabilidade.

O percentual obtido de 14,21% da comparação do volume carbonatado pelo volume concretado, conclui-se que 14,21% de CO₂ foi capturado pela estrutura do bloco G.

A intervenção realizada no bloco G de recuperação estrutural e modernização da fachada do bloco G, iniciada em 2018 e concluída em 2021, ratifica a contínua atenção da UNICAP em conservar seus imóveis.

5. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

5.1 Conclusão

Em, 2016 o custo total da corrosão para vários países foi estimado entre 4% e 10% do PIB, das patologias existentes, cerca de 50% é devido a corrosão em estruturas de concreto armado, (MEDEIROS; DASCHEVI; ARAÚJO, et al 2022). A partir deste dado, exemplifica-se a necessidade de conservação do patrimônio que se faz necessário, através de uma manutenção eficiente para prolongar a vida útil de determinada estrutura. Comintantemente, há uma preocupação mundial com a necessidade de reduzir os efeitos do aquecimento global. Em face, do uso de inovações de processos e tecnologias, iniciando pela indústria da construção civil e em toda cadeia produtiva do cimento até a concretagem na estrutura. Seria a captação do CO₂ através da estrutura uma alternativa para estabelecer o equilíbrio do balanço do CO₂? Outro ponto a considerar e importante, na intervenção realizada nesta fachada ocorreu a utilização da aplicação de produto de impermeabilização nas vigas e pilares, o hidrofulgente ou hidrorepelente, possui em sua composição química a base de silano e siloxano, são substâncias que repelem a água. Na manuetnção corrente em fachadas no grande Recife, é comum utilizarem este verniz de poliuretano, capaz de dificultar a presença de água na estrutura, conseqüentemente retardando os efeitos da carbonatação.

Este estudo técnico sobre o balanço do CO₂, permitiu concluir as seguintes observações:

Conforme os resultados obtidos podemos verificar:

1. É possível relacionar o volume carbonatado verificado com o volume concretado, a porcentagem carbonatada refere-se a 14,21% do volume concretado, não posso afirmar se esta carbonatação compromete a estrutura de um prédio, conseqüentemente não posso atribuir a este percentual uma redução da vida útil da estrutura, entretanto na intervenção realizada os pontos na estrutura onde ocorreu oxidação foram tratados e recuperados pela construtora.

2. Considera-se que a profundidade da carbonatação deteriora a estrutura quando atinge a camada passivadora do aço, iniciando a despassivação e se não houver um reparo, poderá comprometer a segurança.
3. Nos testemunhos extraídos e testados, o elemento estrutural mais afetado pela carbonatação foi o pilar e a fachada mais atingida pelo CO₂ foi a fachada norte, entretanto identifica-se 4 amostras em que a profundidade da carbonatação foram maior que o cobrimento do projeto, representa um percentual pequeno de acordo com a Tabela 1.
4. A fachada Norte da tabela 1 e na carta de ação dos ventos em Recife, de acordo com o LABEEE e o programa Analysis BIO, a fachada Nordeste e leste são as quem mais recebem ação do ventos durante os periodos de verão e inverno. Considerando a umidade relativa em 75% ideal para aumentar a velocidade de propagação da carbonatação.
5. Considera-se a presença de cloretos na maioria dos testemunhos analisados.
6. As imagens selecionadas no MEV, contribuíram para relacionar o indice de vazios (maior porosidade) e presença de fissuras como portas facilitadoras para penetração de agentes agressivos, neste caso a carbonatação.
7. O bloco G da UNICAP, passou por varias intervenções de conservação e modernização, esta última concluída em 2021, proporcionou uma ampliação da vida útil, embora exista uma necessidade de se avaliar a fundação do prédio.
8. O estudo histórico construtivo do prédio com análises dos projetos, relatórios, fotos, fichas e documentos, permite concluir que o prédio foi construído em conformidade com as normas vigentes durante o período, utilizando materiais e procedimetos de boa qualidade. Garantindo uma resistência dos seus elementos estruturais acima do especificado em projeto.
9. O balanço das emissões e da captura do CO₂ na estrutura do bloco G, afirma-se:
 - 9.1 A estimativa da emissão de CO₂ na produção do cimento corresponde a 95% da sua produção, conforme relacionado na literatura.
 - 9.2 A Pesquisa apresentou o seguinte resultado para a emissão do CO₂ na produção do concreto 658.616,53 Kg CO₂;
 - 9.3 A estimativa da emissão de CO₂ captada pela estrutura do bloco G, corresponde a 19.507,33
10. Econ – 658.616,53 KgCO₂

11. Ccap – 19.507,33 (Kg CO₂)

12. BCO₂ = 658.616,53 – 19.507,33 = 639.109,21KgCO₂ Representa quantidade de KgCO₂, lançada no ambiente, o valor de 639.109,21 KgCO₂, Talvez com a utilização de cálculo levando em conta uma vida útil de 100 anos e estimando a emissão do CO₂ na demolição, este número tende a aumentar e se aproximar da taxa estimada de emissão de CO₂.

13. O percentual de 14,21% captado pela estrutura de concreto armado do bloco G, quando comparado com outros estudos científicos, como:

Quadro 5: Estudos científicos com captura de CO₂ no concreto

| LOCAL | REFERÊNCIA | MATERIAL | CENÁRIO, TIPO, TEMPO | CO ₂ ABSORVIDO |
|-----------------|-----------------------------|----------|-----------------------------|---------------------------|
| Noruega | Jacobsen,2002 | concreto | 20 anos | 11% |
| Países Nórdicos | Lagerblad,2005 | concreto | 50 anos | 47Kg.CaO |
| Mundial | Pade, 2007 | concreto | 100 anos | 33-57% |
| Dinamarca | Pade, Guimarães,2007 | concreto | 70 anos + 30 demolição | 24% |
| Brasil | Felix, Possan,2014 | concreto | 70 anos + 30 demolição | 5% do volume |
| Brasil | Possan, Felix, Thomaz, 2017 | concreto | 100 anos | 35,38-93,62% |
| Espanha | Andrade, Sanjuan,2018 | concreto | Ambientes interno e externo | 10,8 a 11,2% |

Fonte: Possan, Felix, Thomaz, (2017)

Pode-se estabelecer que este resultado obtido, relacionado com os estudos na literatura não diverge dos resultados encontrados acima no quadro, ou seja, poderia considerar que este percentual, é um valor pequeno, quando comparado ao CO₂ emitido.

14. Nota-se que no estudo foi identificado a presença de produtos impermeabilizantes na fachada que funcionam como hidrorrepelentes, no caso o verniz de poliuretano, utilizado nas estruturas de concreto, funcionando como uma pintura. Conclui-se que esta pintura dificulta e retarda a carbonatação.

5.2 PERSPECTIVAS FUTURAS

Considerando as Patologias encontradas no bloco G, pode-se aprofundar e determinar uma tabela de percentual, do volume carbonatado com o percentual das amostras que despassivaram a armadura, inserindo a fundação, ou seja, analisando totalmente a estrutura. Criar e padronizar metodologias para obtenção do balanço do CO₂. Pode-se aprofundar a presença dos cloretos e estabelecer percentuais que deterioram a estrutura. Uma contribuição para a Universidade será analisar as fundação do prédio, escavando algumas sapatas e analisar se há patologias? Correlacionar a quantidade de amostras carbonatadas com a presença do CO₂ no ambiente, aferindo o percentual do CO₂ no ambiente. Através das imagens no MEV, extrair a composição química das amostras e relacionar com o traço no controle tecnológico.

Criar mecanismos de controle no processo para diminuir a influência do hidróxido de cálcio na reação com água. Criar novos tracos de concreto com menor influência do cimento.

6. REFERÊNCIAS

ANDRADE, J.J.O. Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no Estado de Pernambuco. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

ANDRADE, Jairo José de Oliveira. **Vida útil das Estruturas de Concreto**. *Concreto - Ensino, Pesquisas e Realizações*. São Paulo: Ed. SmartSystem Consulting Ltda., v. 2, Capítulo 31, p. 923-951, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5674: **Manutenção de edificações** – Procedimento. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projetos de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16230**: Inspeção de estruturas de concreto - Qualificação e certificação de pessoal - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:2018** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680:2007** Extração, Preparo e ensaios de testemunhos de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

BOLINA, Fabricio; TUTIKIAN, Bernardo; HELENE, Paulo. Patologia de Estruturas, São paulo - Oficina de textos, 2019.

BOTELHO, Manoel; MARCHETTI, Osvaldemar. Concreto armado Eu Te Amo, 10 edição, São Paulo, ed. Blucher.

DYER, Thomas. Durabilidade do Concreto. Rio de Janeiro, ed. Ciência Moderna,2015.

EURO-INTERNATIONAL COMMITTEE FOR CONCRETE. **Durable Concrete Structures**: CEB Design Guide. Switzerland: CEB: 120 p. 1992.

GAJDA J. MILLER,F.; Concrete as sink for Atmosphere Carbon Dioxid a Literature review and estimation of CO2, Chicago 2002.

GAJDA J. MILLER,F.; Concrete as sink for Atmosphere Carbon Dioxid a Literature review and estimation of CO2, Chicago 2001.

HOVDE, P. J.; MOSER, K. **Performance based Methods for Service Life Prediction**:: Part A: Factor methods for service life prediction; Part B: Engineering design methods for service life prediction. Ottawa: CIB: 108 p. 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15686-8**: Buildings and constructed assets — Service-life planning — Part 8: Reference service life and service-life estimation. Londres: ISO, 2008.

IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas inventories Intergovernmental Panel on climate Change, 2006.

CSI: Cement Sustainability Initiative. WBCSD: World Business Council for Sustainable Development, 2011;

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. "Concrete: Microstructure, Properties and Materials", fourth ed Mc Graw-Hill, 2014

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística aplicada**. Tradução VIANNA, L. F. P. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

LIMA, J. Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas, São Paulo: Tese de Doutorado em Engenharia - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, EPUSP:2010;

MARTINS, G. A.; DOMINGUES, O. **Estatística Geral e Aplicada**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2005.

PADE, C.; GUIMARAES, M. The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective. Cement and Concrete Research. vol 47, n. 9, p.1384 -1356, 2007;

POSSAN, E.; FOGAÇA, J.; PAZUCH, C. Sequestro de CO₂ devido a carbonatação do concreto: Potencialidades da barragem de Itaipu. Revista de estudos ambientais, vol.14 nº2, pp.28-38, 2012

POSSAN, E.; FELIX, E.; THOMAZ, W. CO₂ uptake by carbonation of concrete during life cycle of building structures. 2016;

POSSAN, E. Modelagem da carbonatação e previsão da vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano, Porto Alegre: Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS,2010;

SILVA, N. C. M. S. **Análise da vida útil estimada das edificações baseada na norma de desempenho (ABNT NBR 15.575:2013)**. 2016. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2016.

SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento."Relatório Anual". Rio de Janeiro, 2010.

SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento."Relatório Anual". Rio de Janeiro, 2013.

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

ZARZAR JR., F. C. **Metodologia para estimar a vida útil de elementos construtivos, baseada no Método dos Fatores**. 2007. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2007.

