

AValiação DO CONCRETO ESTRUTURAL DE PILARES DO COMANDO-GERAL DA POLÍCIA MILITAR DO AMAPÁ UTILIZANDO MÉTODOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS¹

Jullianne do Rosário Tunari²
Valdemir Colares Pinto³

RESUMO: A área de patologia na engenharia civil analisa falhas em construções, identificando causas e propondo soluções para garantir sua estabilidade. A edificação do Comando-Geral da Polícia Militar do Amapá (CGPMAP), com mais de 51 anos, apresenta patologias estruturais em seus pilares devido a intervenções e exposição ambiental, o que pode comprometer sua estabilidade estrutural e a segurança dos seus usuários. Assim, o problema da pesquisa foi: o concreto estrutural dos pilares do CGPMAP atende aos critérios técnicos de qualidade? Nesse contexto, o objetivo geral do trabalho foi de avaliar a qualidade do concreto estrutural dos pilares do CGPMAP. Para isso, foram realizados os ensaios de carbonatação, esclerometria e de ultrassom, com a finalidade de verificar se o concreto dessas estruturas atende aos critérios normativos de qualidade. Os resultados mostraram carbonatação nas amostras analisadas e resistência à compressão abaixo do mínimo exigido pela NBR 6118 (25 MPa). Conclui-se que são necessárias intervenções para corrigir e recuperar os pilares afetados do CGPMAP.

Palavras-chave: avaliação do concreto estrutural; patologias do concreto; pilares.

ABSTRACT: The field of pathology in civil engineering analyzes failures in constructions, identifying causes and proposing solutions to ensure their stability. The building of the General Command of the Military Police of Amapá (GCMPAP), which is over 51 years old, presents structural pathologies in its pillars due to interventions and environmental exposure, which can compromise its structural stability and the safety of its users. Thus, the research problem was does the structural concrete of the GCMPAP pillars meet the technical quality criteria? In this context, the general objective of the work was to evaluate the quality of the structural concrete of the GCMPAP pillars. To this end, carbonation, sclerometry and ultrasound tests were carried out, with the purpose of verifying whether the concrete of these structures meets the normative quality criteria. The results showed carbonation in the analyzed samples and compressive strength below the minimum required by NBR 6118 (25 MPa). It is concluded that interventions are necessary to correct and recover the affected GCMPAP pillars.

Keywords: assessment of structural concrete; concrete pathologies; pillars.

Data de Aprovação: 09 / 08 / 2024.

¹ Artigo apresentado ao curso de Pós-graduação em Processos Construtivos Residenciais do Instituto Federal do Amapá como requisito para a obtenção do título de Especialista em Processos Construtivos Residenciais.

² Acadêmica do curso de Pós-graduação em Processos Construtivos Residenciais. E-mail: julliannetunari@gmail.com

³ Orientador, Mestre em Engenharia Civil. Docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá. E-mail: valdemir.colares@ifap.edu.br

1 INTRODUÇÃO

O concreto armado é uma tipologia de material que combina concreto e aço para criar estruturas resistentes e duráveis. Nesse sistema, o concreto é usado como um composto de compressão, enquanto o aço é incorporado para fornecer resistência à tração. A combinação desses dois materiais cria uma estrutura que pode suportar cargas tanto de compressão quanto de tração, tornando-a ideal para uma ampla variedade de aplicações na construção civil que necessitam de alta resistência. A qualidade do concreto armado depende da aderência entre o concreto e o aço, para que possam solidariamente resistir aos esforços empregados (Matildes, 2022).

O concreto armado é amplamente utilizado na construção civil devido à sua versatilidade, tendo casos de uso em pontes, fundações, reservatórios e na estrutura de edifícios, como em paredes, lajes, vigas e pilares. De acordo com Almeida-Júnior *et al.* (2021), entre as aplicações do concreto armado, os pilares desempenham papel essencial para a composição de uma edificação. Os pilares são componentes alongados, posicionados na orientação vertical, onde as forças principais predominantes são as de compressão, recebendo as cargas de outras estruturas, como os carregamentos das vigas, conduzindo-as até a fundação, assim, sustentando as estruturas.

Segundo Matildes (2022), a vida útil do concreto armado pode ser comprometida por uma série de negligências durante sua construção e manutenção. Fatores como a inadequada proporção de concreto e aço, falhas no processo de cura do concreto e a exposição a ambientes agressivos sem proteção, podem acelerar sua degradação. Além disso, o contato com agentes como gás carbônico (CO₂) e cloretos, são as principais causas de patologias em estruturas de concreto armado do tipo pilar, visualizadas nas formas de carbonatação do concreto e corrosão das malhas de aço, o que pode levar a fissuras, trincas, rachaduras e ao comprometimento da estrutura se medidas de correção não forem tomadas.

Nesse contexto, devido a diversidade de possibilidades que podem afetar a composição estrutural dos pilares, Almeida-Júnior *et al.* (2021) argumentam ser essencial a avaliação periódica dessa estrutura, processo que compreende desde a inspeção visual até a elaboração do relatório final de vistoria, sendo a utilização de ensaios e testes um recurso indispensável para aferir a qualidade e o estado dos pilares. Segundo Ferreira (2016), uma maneira de averiguar a qualidade do concreto armado é através de ensaios técnicos destrutivos e não destrutivos, de modo a corroborar se a composição estrutural atende aos critérios normativos de qualidade.

No estado do Amapá existem diversas edificações públicas com mais de meio século de construção e que, devido a exposição ambiental, pouca manutenção e a carência de vistorias técnicas documentadas podem apresentar patologias em seus pilares. O Comando-Geral da Polícia Militar do Amapá (CGPMAP) é uma instituição com mais de meio século, nesse período, sua estrutura passou por intervenções e reformas e, aliado a fatores ambientais, construtivos e de envelhecimento dos materiais, tem apresentado patologias estruturais em seus pilares que podem colocar em risco sua estrutura e a segurança dos seus usuários.

A pesquisa detalhou uma rotina de investigação técnica sobre a existência e o nível de patologias em uma amostra de pilares do CGPMAP. Foram utilizados tanto métodos destrutivos como não destrutivos para melhor compreender o nível de degradação e a qualidade das estruturas analisadas. Em relação aos métodos destrutivos, foi realizado o ensaio de carbonatação, para verificação da existência e o nível de corrosão da estrutura, quanto aos não destrutivos, foram feitos os ensaios de esclerometria e ultrassom, com a finalidade de avaliar a integridade mecânica dos pilares.

2 METODOLOGIA

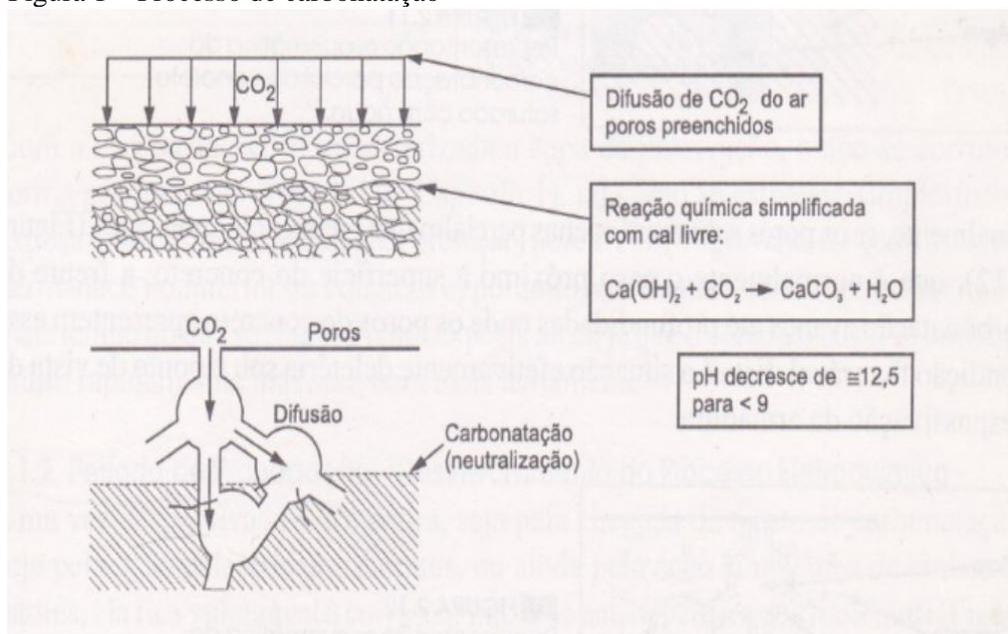
2.1 Ensaio de carbonatação

Segundo Farias e Silva (2019), a carbonatação do concreto é um fator crítico para o início do processo de corrosão das armaduras. Nas superfícies expostas das estruturas de concreto, a elevada alcalinidade, principalmente proveniente da presença de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), liberado durante as reações de hidratação do cimento, tende a diminuir com o tempo. Essa diminuição ocorre, principalmente, devido à exposição ao CO_2 do ar e a outros gases ácidos, como dióxido de enxofre (SO_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S).

De acordo com Siqueira e Pereira (2019), a carbonatação ocorre em ritmo gradual, diminuindo ao longo do tempo. Isso pode ser atribuído ao contínuo processo de hidratação do cimento e aos produtos resultantes da reação de carbonatação, como o carbonato de cálcio (CaCO_3), que preenchem os poros superficiais, dificultando progressivamente a penetração do CO_2 presente no ar no interior do concreto. Esse processo pode ser representado na reação química $[\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}]$ e na Figura 1. Também, níveis de umidade do ambiente $<70\%$, favorecem o nível de carbonatação, conforme Figura 2.

A umidade do ar exerce uma influência significativa sobre o processo de carbonatação em estruturas de concreto, que é a reação do CO_2 com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente no concreto, resultando na formação do CaCO_3 . Quando a umidade do ar está abaixo de 70% , o CO_2 consegue penetrar mais facilmente nos poros do concreto, acelerando a carbonatação. Por outro lado, em ambientes muito úmidos ($>70\%$), a água preenche os poros, dificultando a penetração do CO_2 e, conseqüentemente, retardando o processo de carbonatação. Portanto, conforme a Figura 2, existe uma faixa de relação proporcional entre o nível da umidade do ar e a suscetibilidade de carbonatação na composição do concreto (Siqueira; Pereira, 2019).

Figura 1 – Processo de carbonatação

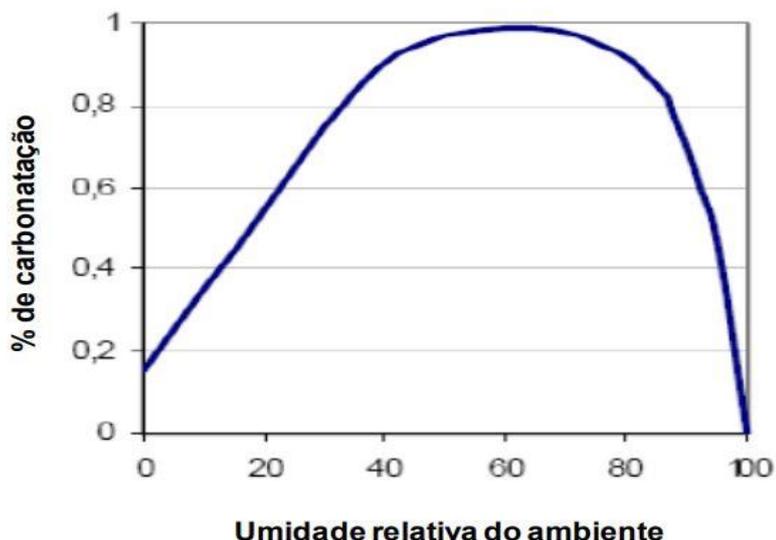


Fonte: Siqueira e Pereira (2019)

O ensaio de carbonatação é um método considerado destrutivo, porém simples e econômico, sendo um indicador eficaz de corrosão, cujo resultado varia de acordo com a qualidade do concreto e o grau de exposição à umidade. Esse teste utiliza a fenolftaleína como indicador, aplicada na superfície do concreto. A fenolftaleína é um composto químico que atua

como um indicador de pH em ensaios de carbonatação do concreto e em diversas outras aplicações. Ela é uma substância química orgânica que muda de cor em resposta a variações de acidez ou alcalinidade no meio onde é aplicada (Farias; Silva, 2019).

Figura 2 – Nível de carbonatação em relação a umidade do ar



Fonte: Siqueira e Pereira (2019)

No ensaio de carbonatação do concreto, a fenolftaleína é utilizada para detectar a presença de CO_2 que penetrou no concreto e reduziu a alcalinidade do material. Originalmente, o concreto contém íons hidroxila (OH^-) em uma solução alcalina, resultando em um pH elevado, ou seja, um meio alcalino. Quando o CO_2 do ar penetra no concreto, ele reage com a água para formar ácido carbônico (H_2CO_3). O ácido carbônico reduz o pH do concreto, tornando-o menos alcalino e, portanto, mais ácido. A fenolftaleína, que é aplicada na superfície do concreto, muda de cor em resposta a essa redução do pH, indicando ou não a presença do processo de carbonatação (Farias; Silva, 2019).

Após a aplicação, se a superfície do concreto adquire uma coloração rosa, isso indica a ausência de carbonatação, ou seja, a manutenção da alcalinidade protetora do concreto, com $\text{pH} > 8.3$. Por outro lado, se a superfície do concreto permanece incolor após a aplicação, isso indica a presença de carbonatação, ou seja, a redução da sua alcalinidade e, conseqüentemente, suscetibilidade do concreto a carbonatação e corrosão das estruturas de aço devido a acidificação do material que favorece sua oxidação, indicando $\text{pH} < 8.3$ (Siqueira; Pereira, 2019).

Quanto aos procedimentos, foi empregada uma solução de fenolftaleína (preparada dissolvendo 1 grama de fenolftaleína em 50 ml de álcool etílico e, em seguida, diluindo essa mistura com água destilada até completar 100 ml), conforme orientação de Siqueira e Pereira (2019). Para realizar o ensaio, a camada superficial do concreto foi rompida com auxílio de uma talhadeira com profundidade entre 8 e 9 mm, após a limpeza da região, a solução foi aplicada por aspersão. A partir dos pontos onde ocorre a mudança de cor, foi possível estimar a existência do processo de carbonatação no concreto.

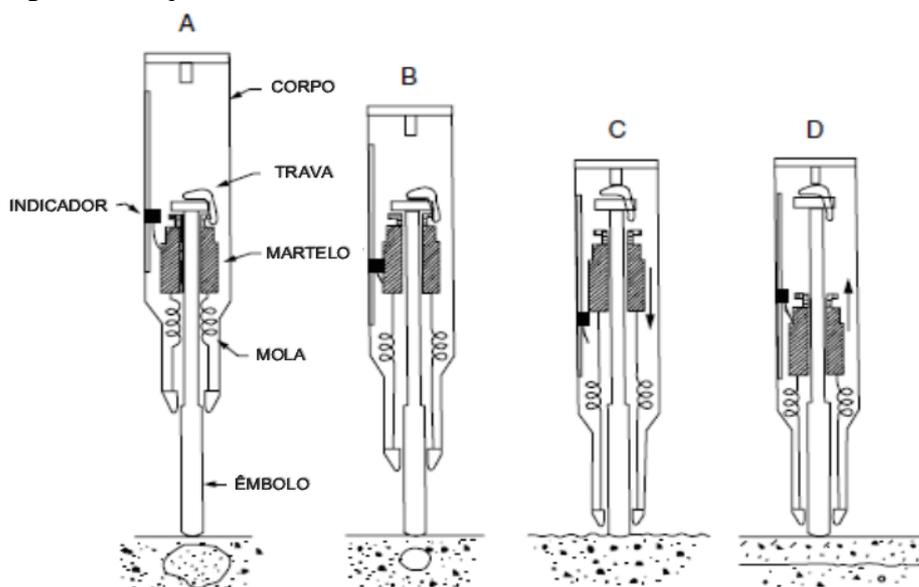
2.2 Ensaio de esclerometria

De acordo com Spíndola e Cascudo (2017), o ensaio de esclerometria, também conhecido como ensaio de “rebote”, “Schmidt Hammer” ou ainda “esclerômetro de reflexão de Schmidt”, é uma técnica não destrutiva usada para avaliar a dureza superficial do concreto e,

indiretamente, a resistência à compressão do material. Ele envolve o uso de um equipamento portátil chamado esclerômetro, que emite uma pequena pancada na superfície do concreto e mede a velocidade com que a energia do impacto é refletida de volta para o aparelho, resultando no índice esclerométrico que empiricamente indica o nível de resistência à compressão do material.

A compreensão do impacto e do retorno está ligada à teoria da propagação de ondas. Quando a superfície do concreto é perturbada, uma onda de compressão se propaga. A força de reação provoca a propagação de uma onda de compressão refletida através do êmbolo. A relação entre as amplitudes das ondas está diretamente relacionada com o número de recuo, que, por sua vez, pode ser correlacionado empiricamente com a resistência à compressão do concreto. O ensaio deve ser realizado em superfície lisa para evitar disparidade no recuo (Galvão, 2019). Na Figura 3 se pode observar o esquema de funcionamento do esclerômetro.

Figura 3 – Esquema de funcionamento do esclerômetro

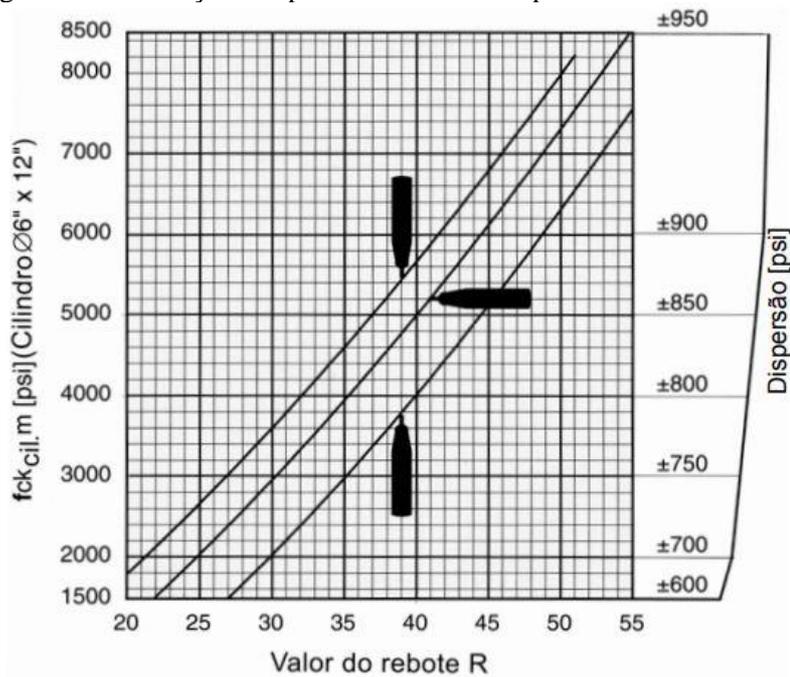


Fonte: Spíndola e Cascudo (2017)

O fabricante do esclerômetro oferece correlações empíricas para estabelecer uma relação entre o número de recuo e as propriedades de resistência do concreto, conforme exemplo da Figura 4. Aconselha-se realizar um procedimento de correlação personalizado, que envolve a preparação do ensaio de esclerometria a partir do resultado da média dos índices aferidos com o equipamento. Os resultados obtidos no ensaio são utilizados em um modelo de análise de regressão simples, aplicando o método dos mínimos quadrados, para criar uma correlação empírica mais precisa (Galvão, 2019; Spíndola; Cascudo, 2017). Na Figura 5 é apresentado o equipamento utilizado para os ensaios.

O ensaio de esclerometria fornece uma medida da dureza superficial do concreto, expressa como o valor de rebote R. Este valor é utilizado para avaliar a qualidade e a compactação do concreto, bem como para identificar áreas potencialmente fracas ou danificadas. Embora o ensaio de esclerometria não forneça diretamente a resistência à compressão do concreto, ele oferece uma estimativa qualitativa da resistência (Galvão, 2019; Spíndola; Cascudo, 2017). Portanto, o ensaio de esclerometria pode ser usado para identificar áreas onde o concreto pode estar comprometido, devido a fissuras, vazios ou carbonatação.

Figura 4 – Correlações empíricas de um cubo após 14-56 dias do esclerômetro Schmidt N/NR



Fonte: Spíndola e Cascudo (2017)

Figura 5 – Equipamento utilizado no ensaio de esclerometria



Fonte: Autora (2023)

Quanto aos procedimentos para realização do ensaio, foram seguidas as orientações da Norma Brasileira (NBR) 7584 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2012). A malha de ensaio compreendeu 16 quadrantes, sendo realizado um impacto em cada, obtendo-se seu índice esclerométrico. Após, foi realizada a média aritmética dos resultados, mantendo aqueles dentro da variação de até 10% entre os valores mínimos e máximos. Em seguida, para obtenção do Índice Esclerométrico Efetivo (IEE) foi utilizado fator de correção de 1,2, obtido durante a calibração do equipamento. Por fim, a resistência foi observada ao aplicar o IEE no ábaco fornecido pelo fabricante.

2.3 Ensaio de ultrassom

De acordo com Mohamad *et al.* (2015), o método de ultrassom implica na propagação de ondas ultrassônicas através de materiais sólidos, enquanto se registra o tempo necessário para que essas ondas percorram a distância entre um ponto de emissão e outro de recepção. As propriedades da propagação dessas ondas ultrassônicas podem ser aplicadas para caracterizar a composição, a estrutura, as propriedades, a densidade e a geometria de um material, utilizando correlações aplicáveis. Essa é uma abordagem não destrutiva, empregada para identificar e descrever imperfeições em materiais, bem como para avaliar a extensão de eventuais danos.

Segundo Spíndola e Cascudo (2017), o ensaio de ultrassom implica na conversão de um pulso de tensão em uma onda ultrassônica, bem como na sua captação por meio de um par de transdutores, um para emissão e outro para recepção. O transdutor emissor é posicionado sobre a superfície do concreto, permitindo a transmissão de uma onda ultrassônica através do interior do elemento. A onda ultrassônica atravessa o concreto e é detectada pelo transdutor receptor localizado na extremidade oposta, sendo então transformada em um pulso de tensão. Na Figura 6 é apresentado o equipamento de ultrassom utilizado no ensaio.

Com o conhecimento da distância entre os pontos de emissão e recepção, é possível calcular a velocidade da onda. A medição da velocidade da onda ultrassônica oferece uma análise pormenorizada das características do elemento sob investigação. O ensaio de ultrassom admite a aplicação de três modalidades de transmissão: a transmissão direta, a transmissão indireta e a transmissão semidireta, conforme Figura 7. Essa variação de abordagens depende das circunstâncias em que não é viável alcançar a superfície oposta da estrutura, tornando necessária a adoção do método de transmissão indireta (ou semidireta), como, por exemplo, quando se avaliam pavimentos rígidos de concreto (Spíndola; Cascudo, 2017).

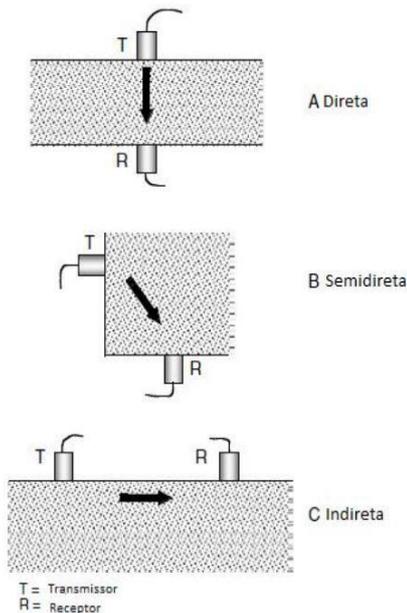
Figura 6 – Equipamento para o ensaio de ultrassom



Fonte: Autora (2023)

A classificação da homogeneidade e qualidade do concreto armado pode ser relacionada com o resultado da velocidade de propagação obtido no ensaio, onde velocidade $\geq 4.5\text{km/s}$ indica excelente, entre 3.6 e 4.5km/s indica bom, entre 3 a 3.6 indica aceitável, entre 2.1 e 3 indica pobre e menor que 2.1 indica muito pobre (Mohamad *et al.*, 2015). Assim, o ensaio de ultrassom pode ser utilizado para indicar a necessidade de reparos na estrutura bem como no planejamento da manutenção das estruturas.

Figura 7 – Modalidades de transmissão



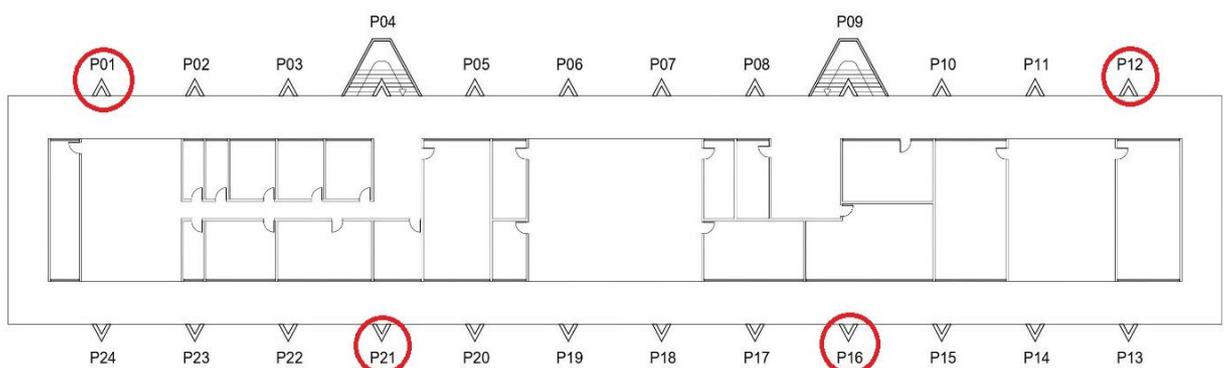
Fonte: Spíndola e Cascudo (2017)

Para o ensaio, foram seguidas as orientações da NBR 8802 (ABNT, 2019), sendo adotado o método de transmissão direta para obtenção dos resultados, sendo obtidas a velocidade e a resistência à compressão fornecidos pelo equipamento. Os pontos de emissão e recepção foram devidamente limpos e em seguida foram realizadas as medições. Foram consideradas as médias de três medições para a definição dos valores das velocidades e da resistência à compressão do concreto, conforme aplicado no estudo de Forigo, Lopes e Vanalli (2021).

2.4 Definição das amostras

O Comando-Geral da Polícia Militar do Amapá conta com 24 pilares distribuídos ao longo de sua estrutura arquitetônica. Para a realização dos ensaios, foram selecionados quatro pilares, sendo utilizado como critérios de escolha a identificação de patologias a partir de inspeção visual prévia, assim como Medeiros e Silva (2015) e Nascimento, Nascimento e Lopes (2018) fizeram em seus trabalhos. Os pilares que apresentaram maior deterioração foram os 01, 12, 16 e 21. Na Figura 8 abaixo é apresentada a localização dessas estruturas.

Figura 8 – Localização dos pilares utilizados no estudo



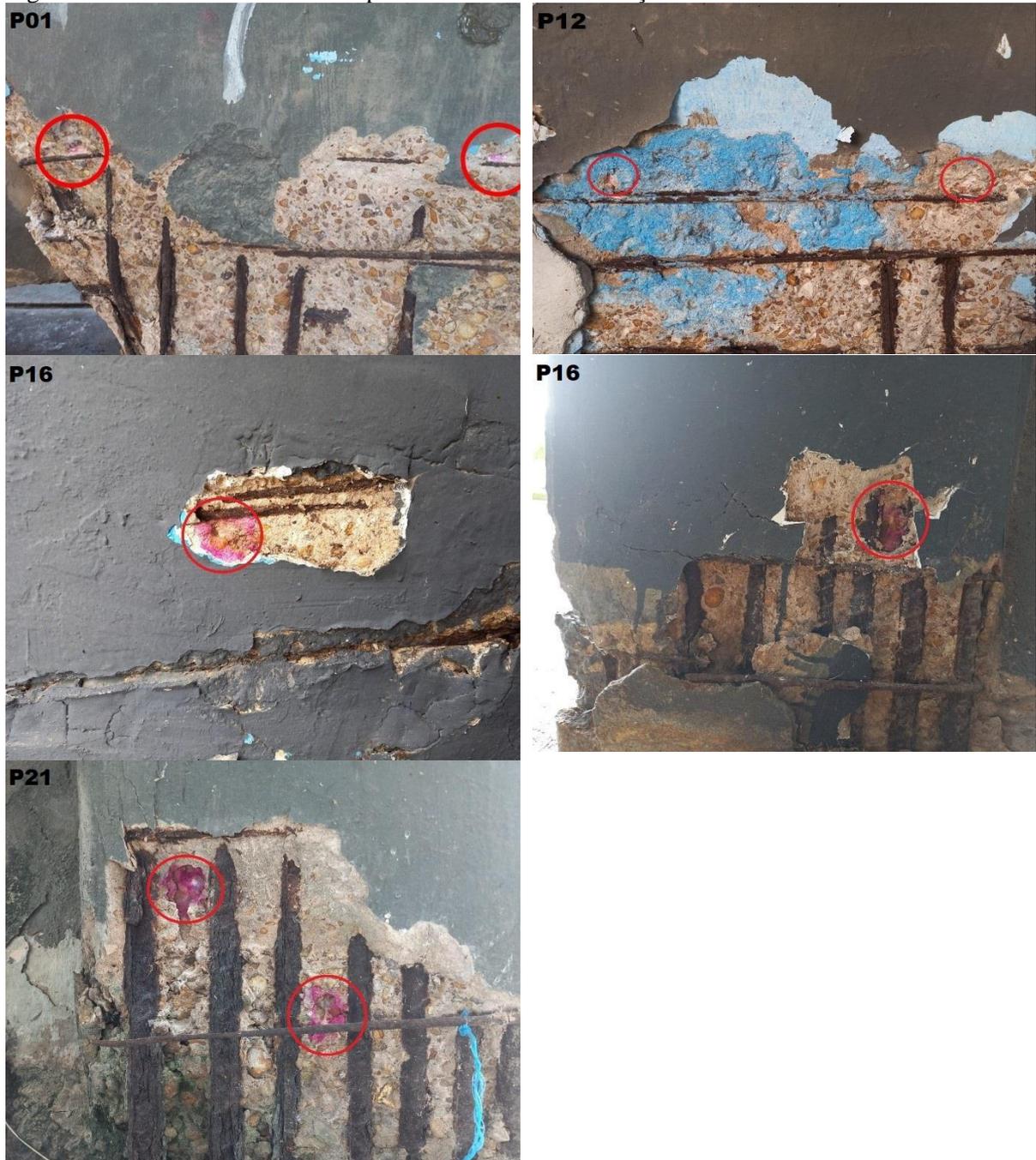
Fonte: Elaborado pela autora (2023)

3 RESULTADOS DA PESQUISA

3.1 Ensaio de carbonatação

O ensaio da profundidade da carbonatação do concreto foi executado conforme os procedimentos descritos na metodologia, os resultados podem ser observados na Figura 9. Foi observada reação fraca entre a fenolftaleína e a superfície do concreto nos pilares P01, P16 e P21, indicando pH acima de 8.3, profundidade onde se encontram as armaduras, o que indica que o processo de carbonatação estava presente e avançando gradualmente. Enquanto que no pilar P12 não houve reação, o que pode significar alta taxa de carbonatação nessa estrutura.

Figura 9 – Resultados do ensaio de profundidade da carbonatação

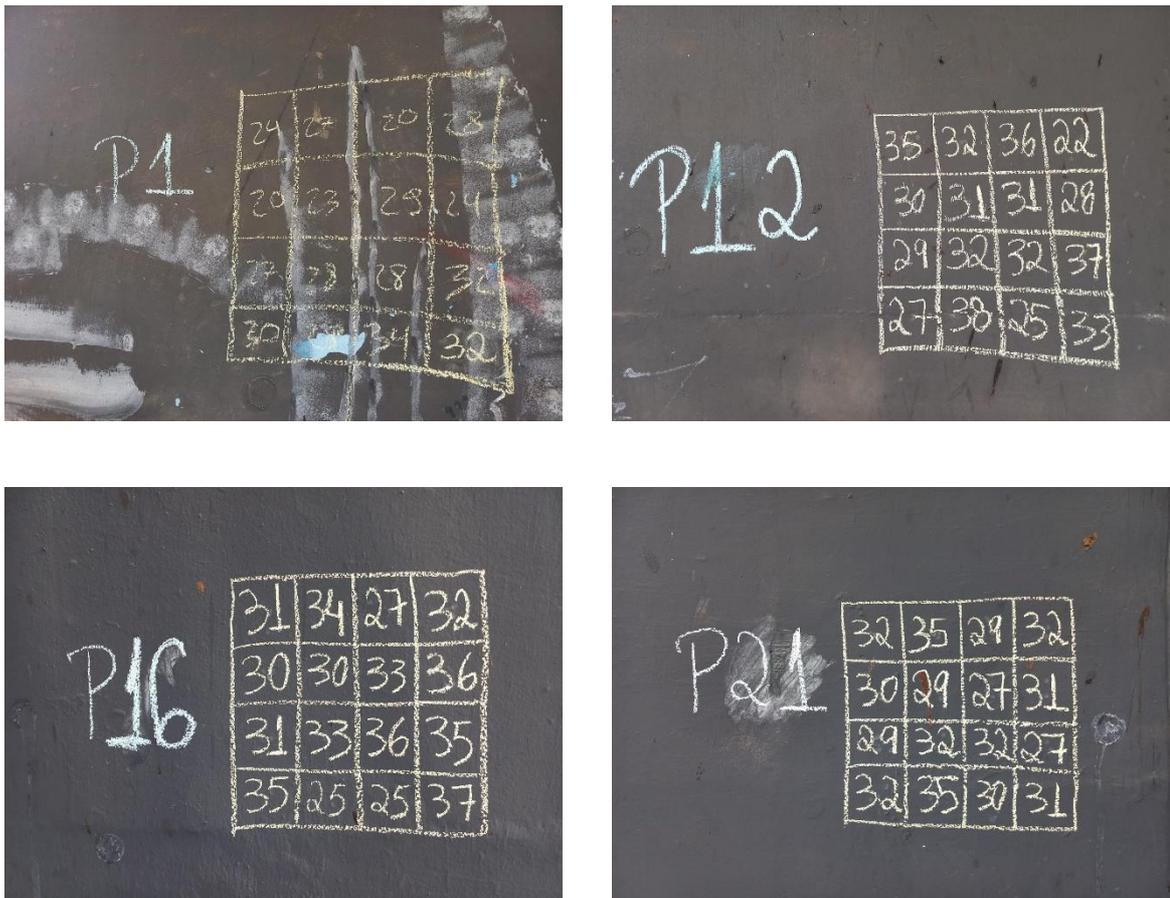


Fonte: Acervo da autora (2023)

3.2 Ensaio de esclerometria

O ensaio de esclerometria ocorreu de acordo com os critérios estabelecidos na metodologia, as áreas escolhidas nas amostras foram limpas e estavam localizadas fora de regiões com outras patologias ou segregações, bem como, foi desenhada a malha de ensaio uniformemente distribuída com distância de 5cm entre os centros de impacto, conforme a NBR 7584 (ABNT, 2012). Os resultados dos índices esclerométrico foram anotados na própria malha, de acordo com o apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Malhas de ensaio nas amostras



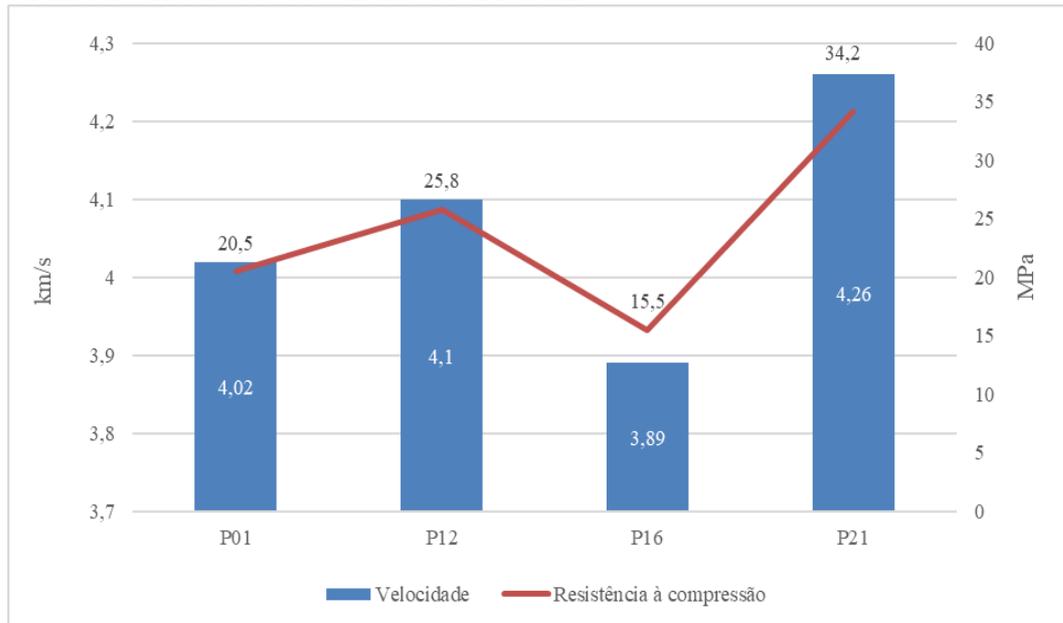
Fonte: Acervo da autora (2023)

Os resultados obtidos em cada rebote foram descritos na malha e depois foram obtidas as médias, conforme apresentado no Apêndice 1. Os valores de cada malha que ultrapassaram $\pm 10\%$ da média foram excluídos (valores com fundo destacados no Apêndice 1) e uma nova média corrigida foi elaborada. Em seguida, foi aplicado o fator de correção, obtendo-se os IEE de 33.4 (P01), 41.7 (P12), 38.8 (P16) e 36.9 (P21). Esses valores foram correlacionados no ábaco fornecido pelo fabricante, obtendo-se os seguintes resultados de resistência à compressão do concreto para os pilares estudados 28 MPa (P01), 44 MPa (P12), 41 MPa (P16) e 34 MPa (P21).

3.3 Ensaio de ultrassom

Os resultados obtidos a partir do ensaio de ultrassom são apresentados no Gráfico 1. Em relação à velocidade de propagação do som, observou-se uma variação de 9.5% entre o valor máximo e mínimo registrado entre as amostras que integraram a análise. Quanto à resistência à compressão, os valores obtidos variaram significativamente, registrando-se 20.5MPa para a amostra P01, 25.8MPa para a amostra P12, 15.5MPa para a amostra P16 e um valor mais elevado de 34.2MPa para a amostra P21.

Gráfico 1 – Resultados dos ensaios de ultrassom



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

4 ANÁLISE

Galvão (2019), Medeiros e Silva (2015) e Spíndola e Cascudo (2017) explicam que os testes como os de carbonatação, esclerometria e de ultrassom se complementam para uma melhor compreensão do cenário situacional da estrutura de concreto estudada, devendo ser feita a análise contextualizada dos resultados com o objetivo de encontrar contexto e índices que sejam capazes de auxiliar no entendimento do estado de conservação da estrutura.

Farias e Silva (2019) encontraram evidente carbonatação em pilares de quatro diferentes edificações na cidade de Criciúma/SC. Segundo os autores, o nível de carbonatação nas estruturas não teve relação direta com a idade da edificação, ou seja, independentemente do tempo de exposição do pilar à fatores ambientais, o que pareceu mais contribuir para o avanço da carbonatação foram aspectos técnicos de construção, como os traços do concreto e as ações de manutenção da estrutura ao longo do tempo.

Matildes (2022) e Ferreira (2016) explicam que a carbonatação pode afetar a durabilidade e a resistência do concreto armado, especialmente em estruturas como pilares, devido a erros de projeto que podem aumentar as forças sobre a estrutura e por fatores ambientais. Assim, a observação da carbonatação nas estruturas é um indicativo de que a resistência à compressão do concreto esteja diminuindo, podendo acarretar em diversas consequências negativas para a integridade estrutural do concreto armado e, por conseguinte, para a segurança da edificação.

Entre as principais consequências provocadas pela carbonatação e pela baixa resistência do concreto, Matildes (2022) e Ferreira (2016) destacam a corrosão das armaduras, diminuição da resistência mecânica e aumento da porosidade. A principal ameaça decorrente da carbonatação é a corrosão das armaduras de aço presentes no interior do concreto. Quando as armaduras corroem, ocorre um aumento de volume, causando fissuras e deslocamentos no concreto ao seu redor. Isso compromete a capacidade estrutural do pilar, colocando em risco a estabilidade da edificação. Em todas as amostras foi identificado a patologia de corrosão, conforme pode ser observado na Figura 9, o que pode indicar que fissuras podem acontecer a qualquer momento.

A carbonatação também pode comprometer as propriedades mecânicas do concreto, resultando na perda de resistência à compressão e tração (Matildes, 2002; Ferreira, 2016), o que foi aferido nos testes de esclerometria e ultrassom. Pilares que passam por esse processo podem tornar-se mais frágeis e menos capazes de suportar cargas, o que aumenta a probabilidade de colapso. A carbonatação contribui para o aumento da porosidade do concreto, tornando-os mais permeáveis, tornando-se mais propensos à entrada de agentes agressivos, como água e íons de cloreto, o que acelera ainda mais o processo de corrosão das armaduras.

O ensaio de esclerometria encontrou valores considerados adequados para a estrutura, 28MPa (P01), 44MPa (P12), 41MPa (P16) e 34MPa (P21), que de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), levando em consideração que se trata de uma estrutura classificada como classe de agressão ambiental de nível II, com agressividade moderada, por se tratar de uma obra urbana, a resistência a compressão do concreto deve ser ≥ 25 MPa, estando todos os resultados dentro do estabelecido pela norma.

Porém, ao analisar os resultados do ensaio de carbonatação, verificou-se alta incidência desse fenômeno, indicando que a qualidade do concreto pode estar comprometida. Em situações na qual a carbonatação é evidenciada, a NBR 7584 (ABNT, 2012) recomenda que os valores do ensaio de esclerometria devem ser subtraídos em 50%, de modo a considerar a degradação pela carbonatação no concreto. Dessa maneira, os resultados considerando essa recomendação ficam de 14MPa (P01), 22MPa (P12), 20.5MPa (P16) e 17MPa (P21), indicando que a resistência à compressão do concreto esteja abaixo do recomendado em todas as amostras aferidas.

Farias e Silva (2019) tiveram a necessidade de realizar a mesma correção para os valores obtidos no ensaio de esclerometria realizados em pilares, pois, apesar dos primeiros ensaios apresentarem valores condizentes com a NBR 6118, a identificação do processo de carbonatação levou a subtração dos resultados em 50%, o que demonstrou baixa resistência à compressão nas estruturas analisadas pelos autores, estando todas suas amostras abaixo de 9.32MPa, chegando a conclusão da necessidade de correção dos índices esclerométrico caso seja observada a ocorrência de carbonatação da estrutura.

Medeiros e Silva (2015) encontraram valores abaixo das recomendações normativas em seu estudo de realização de ensaios de esclerometria e de carbonatação em conjunto. Segundo os autores, o ensaio de esclerometria tem limites práticos, pois consegue ser preciso apenas até uma certa profundidade da superfície do concreto, sendo fundamental sua correção a partir de métodos empíricos, como da carbonatação, com o objetivo da obtenção de um resultado mais real, principalmente em estruturas antigas.

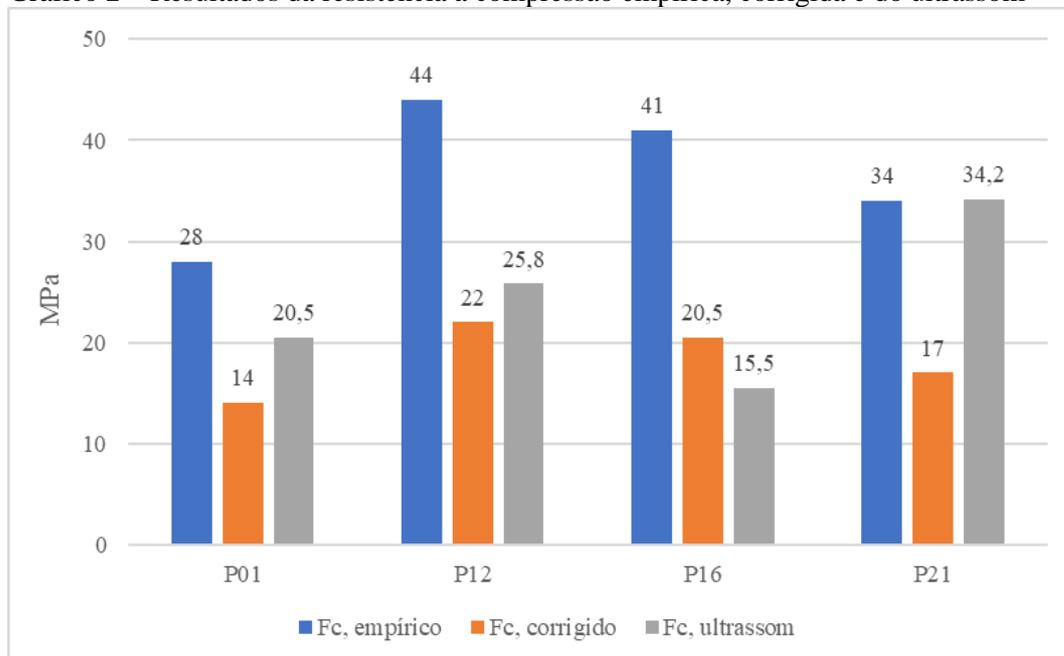
Spíndola e Cascudo (2017) argumentam que a principal causa da perda da resistência do concreto é o efeito da carbonatação, principalmente quando a estrutura está exposta a fatores ambientais, como a umidade, que pode lixiviar compostos hidratados do concreto, a temperatura, que podem contribuir para aumento da porosidade do concreto durante a cura, radiação ultravioleta, que podem degradar compostos sensíveis, entre outros. Todos esses agentes tendem a deixar suscetível a entrada de CO_2 na estrutura, favorecendo o processo de carbonatação.

O resultado da velocidade do ensaio de ultrassom variou entre 3,89 e 4,26km/s, o que segundo a NBR 8802 (ABNT, 2019) indica que o concreto apresenta boa qualidade e homogeneidade em sua composição. Os resultados de resistência à compressão foram, em sua maioria, menores do que os obtidos com os ensaios de esclerometria, variando entre 20,5 e 34,2MPa. Porém, ao aplicar a redução de 50% dos resultados da esclerometria, conforme apresentada anteriormente, os resultados ficam mais próximos, indicando maior convergência entre os resultados finais obtidos. No Gráfico 2 são resumidos todos os resultados dos ensaios.

Soeiro *et al.* (2018) encontraram valores divergentes a partir do ensaio de ultrassom em 34 pilares em uma edificação recentemente revitalizada na cidade de Belo Horizonte/MG. Segundo os autores, a maioria das amostras apresentou velocidade de propagação abaixo de 3km/s, indicando que o concreto tem baixa qualidade, sendo que em apenas 18% das amostras os resultados do ensaio de ultrassom estavam acima de 3,5km/s, o que representou boa qualidade do concreto. Segundo os autores, apesar das estruturas terem passado por processos de revitalização, possíveis fragilidades na composição do concreto levaram aos resultados insatisfatórios obtidos.

No presente trabalho, observou-se que ao corrigir os resultados empíricos em 50% se aproximaram mais dos resultados obtidos pelo ultrassom, principalmente entre os pilares P12 e P16. No pilar P21, os resultados do ensaio de ultrassom foi mais similar ao resultado empírico da esclerometria, mesmo havendo clara carbonatação na estrutura e a necessidade de aplicação do fator de correção. Portanto, levando em consideração o conjunto dos resultados, ficou evidente a degradação da estrutura das amostras, sendo que nenhuma obteve resultados satisfatórios quando se contextualiza todos os ensaios realizados, assim como evidenciado nos trabalhos de Farias e Silva (2019) e Soeiro *et al.* (2018), havendo a necessidade de intervenção a fim da mitigação e correção do problema.

Gráfico 2 – Resultados da resistência a compressão empírica, corrigida e do ultrassom



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Carvalho *et al.* (2013) concordam com a importância do resultado da resistência do concreto à compressão necessitar de uma análise difusa, utilizando técnicas diferentes para verificação da qualidade do concreto armado. Em seu trabalho, os autores verificaram que a média do teste esclerométrico para pilares em quatro pontes na cidade de Aracajú/SE estava

acima dos 47Mpa, indicando ótima qualidade do concreto, porém, ao realizarem um contraste com o teste de ultrassom, verificaram que alguns pilares apresentaram velocidades de propagação abaixo dos 3.5km/s, indicando baixa qualidade do concreto na mesma estrutura analisada.

Nesse contexto, Carvalho *et al.* (2013) argumentam que, o teste esclerométrico deve ser utilizado visando uma análise superficial do concreto armado, enquanto que o ultrassom pode dar um resultado mais abrangente da estrutura, sendo este, segundo os autores, um método mais confiável de verificação da qualidade do concreto, que deve ser interpretado juntamente com os resultados do teste esclerométrico e de outros, como o da carbonatação. Além disso, os autores chamam a atenção para a necessidade de revisão da NBR 7584, pois consideraram frágil determinar a qualidade do concreto apenas pela média das medições através do teste esclerométrico.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Comando-Geral da Polícia Militar do Amapá é uma instituição considerada antiga, com 51 anos de edificação, e ao longo desse tempo sua sede foi exposta a diversos fatores que resultaram em patologias em seus pilares, que podem colocar em risco a estrutura e as pessoas que a utilizam seus espaços. As principais patologias encontradas nas amostras analisadas foram a carbonatação e a corrosão das armaduras que levaram a diminuição da resistência à compressão do concreto, evidenciando a necessidade de intervenções que visem recuperar essas estruturas e manter sua integridade estrutural.

Os ensaios de carbonatação, esclerometria e de ultrassom se mostraram eficientes quando utilizados em conjunto, pois ofereceram mais parâmetros para análise situacional das patologias encontradas, o que evitou uma compreensão equivocada das estruturas analisadas, visto que houve dissonância entre os resultados da resistência à compressão do concreto entre a esclerometria e o ultrassom, porém, o ensaio de carbonatação indicou a necessidade de correção dos resultados da esclerometria, levando a resultados que constataram a não conformidade do concreto avaliado às normas de controle de qualidade.

Nesse contexto, são urgentes a mitigação e correção das três principais patologias encontradas no estudo, a carbonatação, a corrosão das armaduras e a baixa resistência à compressão do concreto. Esse cenário exige um conjunto de técnicas para recompor a estrutura dos pilares do CGPMAP que apresentam esses problemas. O conjunto de técnicas e etapas sugeridas tem base em Souza e Ripper (1998) e segue as orientações descritas no Quadro 1.

Quadro 1 – Conjunto de técnicas e etapas para recuperação dos pilares com patologias do CGPMAP

Técnica	Procedimento
Identificação da extensão do dano	Antes de iniciar qualquer intervenção, é crucial realizar uma avaliação detalhada para determinar a extensão das patologias. Isso pode envolver novos testes de resistência, inspeções visuais e técnicas de diagnóstico para mapear a área afetada e classificar com segurança o grau de deterioração de cada estrutura.
Remoção do concreto contaminado	A primeira etapa é remover o concreto carbonatado e comprometido pela corrosão. Isso pode ser feito por meio de técnicas como jateamento de areia, hidrodemolição ou até mesmo por corte e remoção manual, dependendo da severidade do dano identificado.
Tratamento anticorrosivo	Após a remoção do concreto afetado, as armaduras de aço devem ser expostas e tratadas para remover qualquer resíduo de corrosão existente. Em seguida, a aplicação de inibidores de corrosão (inibidores de Fe_2O_3 , inibidores de cloretos, entre outros) ou revestimentos protetores (epóxi, poliuretano, revestimentos poliméricos, entre outros) ajudará a prevenir futuras corrosões.

Reparo estrutural	A reconstrução da seção danificada deve ser realizada utilizando concretos de alta resistência, respeitando as proporções adequadas dos materiais. A adição de aditivos como sílica ativa ou microfibras pode melhorar a resistência e a durabilidade do novo concreto.
Reforço estrutural	Dependendo da magnitude do dano e da necessidade de aumentar a capacidade de carga do pilar, pode ser recomendado o reforço estrutural. Técnicas como a adição de novas armaduras, a aplicação de materiais compósitos de fibra de carbono ou o uso de perfis metálicos podem ser empregadas.
Reabilitação do concreto	A aplicação de revestimentos especiais, como argamassas poliméricas ou sistemas de proteção contra agentes agressivos, contribuirá para a reabilitação do concreto e a prevenção de futuros danos.
Monitoramento contínuo	Após a conclusão das intervenções, é fundamental implementar um programa de monitoramento contínuo para acompanhar a evolução do estado estrutural ao longo do tempo. Isso pode envolver inspeções periódicas, testes não destrutivos e análises laboratoriais.

Fonte: Elaborado pela autora a partir de Souza e Ripper (1998)

A abordagem integrada das técnicas e etapas descritas no Quadro 1 visa restaurar a integridade dos pilares do CGPMAP que fizeram parte do estudo, de modo a corrigir as patologias de carbonatação e corrosão, melhorar sua resistência à compressão e garantir uma vida útil mais longa. Além disso, a implementação de práticas de manutenção adequadas ao longo do tempo é essencial para preservar a saúde estrutural da edificação. Além disso, é importante que outros ensaios sejam realizados de modo a compreender melhor os danos causados pela carbonatação, corrosão e baixa resistência evidenciados, de maneira a ajustar as medidas corretivas para o cenário que compreenda todos os problemas identificados.

O conjunto de medidas indicadas para recuperação dos pilares estudados precisa ser refinado, com mais ensaios e testes, com o objetivo de identificar outras patologias latentes de modo a evitar que as técnicas aplicadas sejam ineficientes, bem como, para corrigir e prevenir outras patologias que não foram identificadas no estudo. Ensaios e testes como de resistividade elétrica, permeabilidade, análise de corrosão das armaduras, de carga, termografia, entre outros, podem ser úteis para uma melhor compreensão das patologias e no processo do estabelecimento das medidas de correção e recuperação dos pilares do CGPMAP.

Outra questão importante é sobre a necessidade de padronização dos ensaios para constante investigação da qualidade de concreto e suas estruturas, pois, apesar de existirem normas de orientação experimental, não foi observado a indicação periódica para realização dos mesmos, tão pouco os critérios que devem ser adotados para composição de um plano de manutenção e prevenção de patologias orientadas a testes, o que pode favorecer a longevidade das edificações. Por fim, o problema da pesquisa foi respondido, indicando que a qualidade do concreto estrutural das amostras analisadas não atende aos critérios normativos e os objetivos propostos foram alcançados.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA-JÚNIOR, J. J. *et al.* Patologia em concreto armado e seus métodos de recuperação estrutural. **Revista Científica Novas Configurações**, v. 2, n. 1, p. 42-56, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7584**: concreto endurecido – avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: concreto endurecido – determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

CARVALHO, C. H. *et al.* Estudo comparativo das técnicas não destrutivas de ultrassom e esclerometria na avaliação do desempenho mecânico de estruturas em concreto armado. *In*: Congresso Latinoamericano de Patología de la Construcción. 12. 2013, Colômbia. **Anais [...]**. Colômbia: 2013.

FARIAS, G. C.; SILVA, D. S. **Análise da evolução da profundidade de carbonatação em estruturas de concreto ao longo do tempo**. 2019. 19 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2019.

FERREIRA, I. K. A. **Patologia em estruturas de concreto armado: estudo realizado nas edificações do Centro de Tecnologia do Campus I da Universidade Federal da Paraíba**. 2016. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, 2016.

FORIGO, C.; LOPES, Y. D.; VANALLI, L. Determinação da resistência à compressão do concreto exposto a altas temperaturas pelo método de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. **HOLOS**, v. 7, n. 37, p. 1-20, 2021.

GALVÃO, G. M. **Estudo da aplicação do ensaio esclerométrico em estrutura de concreto**. 2019. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Centro Universitário Atenas, Paracatu, 2019.

MATILDES, C. M. Concreto armado e suas patologias. **Revista Científica Semana Acadêmica**, v. 10, n. 225, p. 1-31, 2022.

MEDEIROS, R. M.; SILVA, O. B. V. **Avaliação qualitativa da dureza superficial do concreto dos pilares que compõem a meso estrutura da ponte José Cavalcanti**. 2015. 17 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2015.

MOHAMAD, G. *et al.* Métodos combinados para avaliação da resistência de concretos. **Revista Matéria**, v. 20, n. 1, p. 83-99, 2015.

NASCIMENTO, B. A.; NASCIMENTO, A. R.; LOPES, A. A. Ensaio de esclerometria para estimativa da resistência à compressão do concreto em obras da cidade de Maringá. **Journal of Exact Sciences**, v. 19, n. 1, p. 20-25, 2018.

SIQUEIRA, J. R.; PEREIRA, F. S. C. Ensaio de carbonatação nos pilares do Centro Universitário do Rio Grande do Norte - UNI-RN. **Revista UNI-RN**, v. 19, n. 2, p. 78-94, 2019.

SPÍNDOLA, G. M.; CASCUDO, O. Avaliação do concreto estrutural de pilares utilizando ensaios não destrutivos em comparação com resultados do controle tecnológico. *In*: Congresso Brasileiro do Concreto. 59. 2017, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: 2017.

SOEIRO, J. M. *et al.* Ensaio não destrutivo – ensaio de ultrassom e pacômetro na avaliação da qualidade do concreto armado. *In*: Congresso Técnico-Científico da Engenharia e Agronomia. 75. 2018, Maceió. **Anais [...]**. Maceió: 2018.

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

APÊNDICE A – RESULTADOS DO ENSAIO DE ESCLEROMETRIA NAS AMOSTRAS

Pontos	Pilares			
	P01	P12	P16	P21
1	24	35	31	32
2	27	32	34	35
3	20	36	27	29
4	28	22	32	32
5	20	30	30	30
6	23	31	30	29
7	29	31	33	27
8	24	28	36	31
9	27	29	31	29
10	28	32	33	32
11	28	32	36	32
12	32	27	35	27
13	30	27	35	32
14	28	38	25	35
15	34	25	25	30
16	32	33	37	31
Índice Esclerométrico Médio	27.13	30.5	31.88	30.81
Desvio (+10%)	29.84	33.55	35.06	33.89
Desvio (-10%)	24.41	27.45	28.69	27.73
Índice Esclerométrico Médio Corrigido	27.87	34.75	32.4	30.75
Fator de correção	1,2			
Índice Esclerométrico Efetivo	33.44	41.7	38.8	36.9
Resistência à Compressão (MPa)	28	44	41	34

Fonte: Elaborado pela autora (2023)