

**METODOLOGIA PARA CORRELAÇÃO DE ENSAIOS NÃO
DESTRUTIVOS APLICADA NO DIAGNÓSTICO DE UM
EMPREENDIMENTO DA DÉCADA DE 60**

AUTORES

Luana de Jesus Souza

Emerson Meireles de Carvalho

Lana Laís Pereira da Cruz

REALIZAÇÃO

METODOLOGIA PARA CORRELAÇÃO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS APLICADA NO DIAGNÓSTICO DE UM EMPREENDIMENTO DA DÉCADA DE 60

RESUMO

Considerando os desafios enfrentados pelas perícias em relação à degradação das estruturas de concreto, o objetivo deste trabalho foi apresentar a metodologia empregada na análise e correlação de ensaios não destrutivos aplicados ao diagnóstico da condição estrutural de um empreendimento construído na década de 60. Por meio das análises realizadas, o estudo constatou que a expertise de quem executa os ensaios, a estratégia de execução e planejamento, bem como a investigação de fatores que possam interferir nos resultados, e a avaliação conjunta são relevantes no processo. Os resultados indicaram que, de maneira geral, a estrutura do empreendimento encontra-se preservada, entretanto foram identificadas 20 peças estruturais que necessitavam de atenção. Além disso, foi sugerido um direcionamento para o processo de tomada de decisão. Em resumo, este trabalho demonstra a importância dos ensaios não destrutivos e a relevância da correlação entre eles como técnica de investigação capaz de avaliar a integridade e durabilidade do concreto sem causar danos aos elementos estruturais, sendo uma opção segura e eficiente para a análise de estruturas de concreto armado.

Palavras-chave: Perícias, Ensaios não destrutivos, Correlações, Análise, Concreto armado.

ABSTRACT

Considering the challenges faced by experts in relation to the degradation of concrete structures, the objective of this work was to present the methodology used in the analysis and correlation of non-destructive tests applied to diagnose the structural condition of a building constructed in the 1960s. Through the analyses carried out, the study found that the expertise of those who perform the tests, the execution and planning strategy, as well as the investigation of factors that may interfere with the results, and the joint evaluation are relevant in the process. The results indicated that, in general, the structure of the building is preserved, however, 20 structural pieces that needed attention were identified. Additionally, a direction for the decision-making process was suggested. In summary, this work demonstrates the importance of non-destructive tests and the relevance of their correlation as an investigation technique capable of assessing the integrity and durability of concrete without causing damage to structural elements, being a safe and efficient option for analyzing reinforced concrete structures.

Keywords: Forensics, Non-destructive testing, Correlations, Analysis, Reinforced concrete.

1. INTRODUÇÃO

A corrosão das armaduras é um fenômeno comum em estruturas de concreto armado, embora este material seja considerado durável (CARVALHO, 2014). O mesmo autor justifica que a garantia de durabilidade do concreto está atribuída à proteção da armadura, que ocorre quando a espessura de cobrimento é adequada e o material possui baixa permeabilidade.

Todavia, no cenário em que a qualidade do concreto é inadequada e combinada com a exposição a condições ambientais agressivas, resulta na diminuição precoce do desempenho das estruturas (ARAÚJO; MEIRA, 2021). Diante do exposto, pode-se inferir que a durabilidade de uma estrutura de concreto não é uma propriedade inata ou própria da estrutura, da armadura ou do concreto. (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011). Por esse motivo, é fundamental o desenvolvimento de estratégias eficientes para o monitoramento e avaliação de estruturas de concreto armado.

Nesse encadeamento, surgiram os ensaios não destrutivos (ENDs), que nas últimas décadas vêm se consolidando na construção civil como método de investigação, com a função de avaliar a integridade e durabilidade do concreto, sem provocar danos aos elementos estruturais. Em 1989, a *International Federation for Structural Concrete* (CEBFIP) já recomendava a utilização das técnicas não destrutivas, durante os processos de inspeções, para a detecção de corrosão oculta nas armaduras do concreto (CEB, 1989).

De acordo com Sahuinco (2011), os ensaios não destrutivos e semidestruídos são úteis para coletar informações e embasar decisões, tanto em situações onde há ou não sinais visíveis de deterioração na estrutura, e com um custo relativamente baixo de realização.

A tática de utilizar os ENDs nos processos investigativos é viável por não comprometer o desempenho das peças estruturais ensaiadas e/ou por causar fraturas facilmente reparáveis (MACHADO; SHEHATA; SHEHATA, 2009). Por outro lado, os ensaios destrutivos podem ser inviáveis quando consideradas as condições de degradação a que as peças são submetidas (ARAÚJO; MEIRA, 2021).

Atualmente, os ensaios não destrutivos mais difundidos e empregados na construção civil são: termografia, detecção eletromagnética da armadura ou pacometria, esclerometria, ultrassom ou velocidade de pulso ultrassônico, profundidade da frente de carbonatação, profundidade da frente penetração de

cloretos, resistividade elétrica superficial do concreto e potencial de corrosão da armadura.

Sendo assim, este trabalho trata do desenvolvimento de uma metodologia aplicada ao diagnóstico de um empreendimento construído na década de 60, por meio do uso de ensaios não destrutivos e análise da correlação entre os resultados obtidos e as técnicas empregadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Detecção eletromagnética da armadura

O ensaio de detecção eletromagnética da armadura ou pacometria, caracteriza-se como ensaio preliminar para outros ensaios não destrutivos que estão vinculados à identificação e/ou ao posicionamento da armadura do concreto ou cobrimento da mesma.

O princípio desse ensaio é a detecção de um campo magnético que permite a identificação do posicionamento, dimensões e cobrimento da armadura (BARBOSA; NOBREGA, 2017; SOUZA, MEDEIRO; 2017).

Além disso, esse método em questão tem participação fundamental na verificação da conformidade ao item 7.4.7.1 da ABNT NBR 6118:2014, que estabelece o respeito ao cobrimento mínimo da armadura ao longo de uma peça como critério de aceitação do concreto armado, bem como um parâmetro associado à durabilidade da estrutura. Essa orientação da norma está relacionada à finalidade precípua do cobrimento, que é a proteção física e química das armaduras contra os agentes agressivos presentes nas condições ambientais a que a estrutura é exposta (GRANATO, 2002).

2.2. Esclerometria

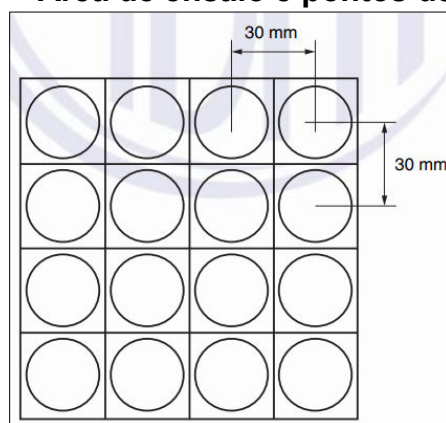
A ABNT NBR 7584:2012 estabelece a metodologia de ensaio para avaliação da dureza superficial do concreto endurecido por meio do esclerômetro. Embora a esclerometria permita mensurar a dureza e homogeneidade superficial do concreto endurecido, a ABNT NBR 7584:2012 indica que esse método deve ser utilizado como um complemento a outras formas de avaliação.

Para realização do teste a superfície do concreto deve estar limpa e seca e deve-se evitar áreas carbonatadas, afetadas por segregação, exsudação ou com concentração de armaduras; juntas de concretagem, cantos ou arestas e preferir faces verticais dos elementos estruturais (ABNT NBR 7584:2012).

Nesse contexto, a presença de agregados pesados ou de grandes variações do diâmetro do agregado pode acentuar a variação no índice esclerométrico e a influência da carbonatação na dureza da superfície do concreto promove a superestimação da resistência.

O esquema de ensaio de esclerometria seguiu as recomendações da ABNT NBR 7584:2012, portanto, as áreas ensaiadas seguiram o padrão observado a figura a seguir.

Figura 1 – Área de ensaio e pontos de impacto



Fonte: ABNT NBR 7584 (2012).

2.3. Ultrassom

Esse ensaio tem como principais aplicações a verificação da homogeneidade do concreto, o monitoramento da variação do concreto ao longo do tempo, a detecção de falhas na concretagem, como vazios e imperfeições, além da medição da extensão ou profundidade de fissuras (ABNT NBR 8802:2019).

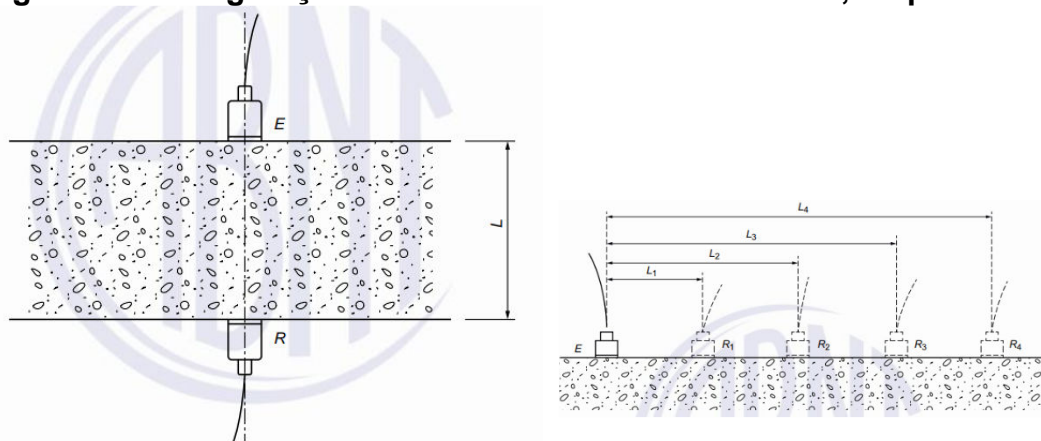
O método de medição da velocidade do pulso ultrassônico (VPU) baseia-se em uma avaliação qualitativa do concreto através da determinação da velocidade de propagação de ondas, essas ondas variam de velocidade de acordo com a homogeneidade do material, quantidade de poros e incidência de vazios (ABNT NBR 8802:2019).

O princípio desse ensaio compreende na relação entre o comprimento percorrido entre transdutores (emissor e receptor) e o tempo de propagação da onda, resultando em uma velocidade média (ABNT NBR 8802:2019). Quanto

mais homogêneo o material, maior a velocidade de propagação, portanto a VPU é maior no aço que no concreto e menor à medida que aumenta a quantidade de poros/vazios no concreto.

Comumente, são utilizados três métodos de ensaio. Entretanto, para este trabalho, foram adotados somente os métodos direto e indireto. Conforme a ABNT NBR 8802:2019, a transmissão direta é o método mais recomendado na determinação da velocidade de propagação de ondas e os valores obtidos sempre irão representar maior intensidade de velocidade, enquanto a transmissão indireta, deve ser utilizada quando o acesso é restrito a apenas uma face do elemento e é possível deslocar o transdutor-receptor nessa face. A seguir são demonstrados os arranjos adotados nos dois métodos citados.

Figura 2 – Configuração da transmissão direta e indireta, respectivamente



Fonte: ABNT NBR 8802 (2019).

De posse dos resultados de VPU, a classificação da qualidade do concreto pode ser realizada de acordo com o Quadro 1. Cabe ressaltar que os valores indicados no referido quadro correspondem ao método de ensaio por transmissão direta.

Quadro 1 – Classificação da qualidade do concreto em função da Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU)

VPU (m/s)	>4500	3500 a 4500	3000 a 3500	2000 a 3000	<2000
Classificação	Excelente	Bom	Regular	Ruim	Péssimo

Fonte: Adaptado de Whitehurst (1951).

2.4. Profundidade da frente de carbonatação

A reação de carbonatação é desencadeada pela interação do dióxido de carbono presente no ar com o hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento Portland, com essa interação, ocorre uma redução da alcalinidade, e forma-se carbonato de cálcio quando há umidade presente (ANDRADE, 1992; HELENE, 1993).

A redução da alcalinidade do concreto, devido às reações de carbonatação, pode causar a despassivação da armadura e torná-la suscetível ao ataque de óxidos de ferro hidratado (CARVALHO, 2014). Esse processo resulta na oxidação generalizada da armadura, que leva à redução da seção transversal útil da armadura e à desintegração do concreto devido às tensões internas geradas pela formação do novo composto, que possui um volume em 3 a 10 vezes superior ao inicial (CARVALHO, 2014).

Sendo assim, com a formação de partículas internas maiores no concreto, há uma redução da porosidade, que são preenchidas por esses compostos. Cabe ressaltar que o dióxido de carbono (CO_2) é um agente agressivo, capaz de se introduzir por meio dos poros do concreto (HELENE, 1993).

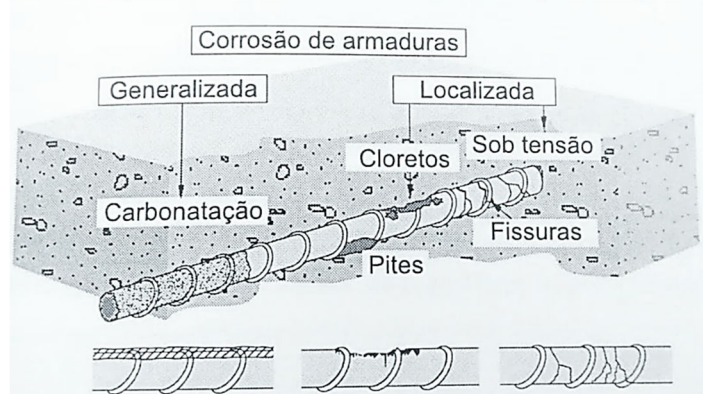
Para verificação da profundidade da frente de carbonatação, a norma DIN EN 14630 (2007) indica o método colorimétrico de aspersão de fenolftaleína, que é indicador de pH. Esse ensaio consiste na aplicação da solução indicadora de pH sobre a superfície do concreto a ser analisada. Quando a superfície possui um pH adequado, a solução apresenta coloração rosada, entretanto, caso haja perda de alcalinidade, a substância não muda de cor, permanecendo incolor, indicando assim a frente de carbonatação da estrutura investigada (MORAES, 2012).

2.5. Profundidade da frente de penetração de cloretos

Os principais processos de degradação do concreto associados à corrosão da armadura incluem a carbonatação e a penetração de íons cloretos. Ambos os processos afetam a camada passivadora do aço, sendo que o segundo causa a formação de pequenas zonas anódicas na superfície, que são locais de corrosão do aço (Helene, 1993; Moreira, 2006; França, 2011).

Os íons cloreto agem em forma de pites ao corroer a armadura pontualmente e, portanto, reduz a seção transversal do aço (França, 2011). Cascudo (1997) ilustrou como corrosão generalizada o processo desencadeado pela carbonatação e corrosão localizada a formação de pites (Figura 3).

Figura 3 – Tipos de corrosão e fatores que os provocam



Fonte: Cascudo (1997).

Observou-se na literatura como prática comum, para realizar uma avaliação qualitativa do concreto em relação a contaminação por íons cloreto, o método colorimétrico por meio de aspersão de nitrato de prata (AgNO_3). Originalmente esse ensaio foi normatizado pela UNI 7928, em 1978, entretanto, atualmente não existe norma para esse ensaio (PONTES; REUS; MEDEIROS, 2021).

A determinação da presença de cloretos é baseada, assim como o ensaio da profundidade de carbonatação, nos métodos colorimétrico e qualitativo. Esse ensaio consiste na aspersão de uma solução de nitrato de prata em uma pequena área fraturada do concreto; e através de uma reação fotoquímica ocorre a formação de dois produtos, sendo eles a formação de um precipitado branco (cloreto de prata), onde houver a presença de cloretos livres e a formação de precipitado marrom (óxido de prata), onde não há cloretos ou em regiões com cloretos combinados (BAROGHEL-BOUNY et al., 2007; MEDEIROS et al., 2009; MEDEIROS et al., 2018).

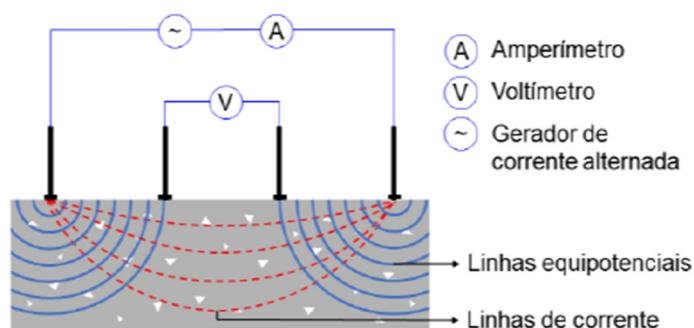
2.6. Resistividade elétrica superficial do concreto

A resistividade elétrica, como o nome sugere, consiste na resistência de um corpo ao fluxo de corrente elétrica. A resistividade é uma medida da capacidade de um material de transportar cargas elétricas e é definida como o inverso da condutividade. (HALLIDAY; RESNICK, 1994).

Isso quer dizer que esse parâmetro está diretamente relacionado à velocidade do processo de corrosão das armaduras, pela relação de resistência do concreto à penetração de agentes como dióxido de carbono e íons cloreto, que são agentes agressivos, capazes de dar início ao processo de corrosão da armadura (ANDRADE E D'ANDREA, 2011).

A técnica comumente utilizada para o ensaio de resistividade superficial do concreto é o método dos quatro eletrodos ou método de Wenner (ANDRADE E D'ANDREA, 2011). Os eletrodos são emparelhados à superfície do concreto utilizando esponjas de alta condutividade, que devem estar úmidas. O esquema a seguir, produzido por Millard (1991), ilustra o método.

Figura 4 - Esquema da determinação de resistividade superficial do concreto, pelo método dos quatro eletrodos



Fonte: Millard (1991) adaptado por Wosniack et al. (2021).

Observou-se que a resistividade aumenta à medida que a porosidade do concreto diminui. Ademais, a carbonatação gera a formação de carbonato de cálcio nos poros, acarretando no endurecimento da superfície do concreto e consequente aumento da resistividade elétrica na superfície deste.

Para classificação quanto ao risco de corrosão da armadura relacionado às medidas de resistividade do concreto, adotou-se os limites prescritos pelo boletim 192 do CEB (1989), adaptado no Quadro 3.

Quadro 2 – Risco de corrosão nas armaduras

Resistividade (ohm.cm)	Risco de corrosão da armadura
< 5000	Muito Alto
5000 a 10000	Alto
10000 a 20000	Moderado
> 20000	Baixo
Fonte: adaptada de CEB (1989)	

2.7. Potencial de corrosão da armadura

Entre os Ensaios Não Destrutivos (END's), o ensaio de potencial de corrosão é usado para avaliar a probabilidade de ocorrência de corrosão das armaduras imersas no concreto ASTM C876 (ASTM, 2015).

Esse ensaio consiste na medição da diferença de potencial elétrico entre um eletrodo de referência e o aço imerso no concreto da peça estrutural (MEDEIROS et al., 2021).

O equipamento utilizado no ensaio do potencial de corrosão é composto por um voltímetro de alta impedância (capaz de registrar as medidas de diferença de potencial), eletrodo de referência (sulfato cobre-cobre) e uma esponja de alta condutividade. Para essa configuração de ensaio, com o eletrodo de referência sulfato de cobre-cobre, a ASTM C 876 sugere os seguintes parâmetros de probabilidade de corrosão.

Quadro 3 – Probabilidade de corrosão

E_{corr} (mV, Cu/SO ₄ Cu)	Probabilidade de corrosão
> -200	< 5%
entre -200 e -350	50%
< -350	> 95%

Fonte: Adaptado da ASTM C876 (2015).

3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

A metodologia empregada neste estudo envolveu o desenvolvimento de uma série de ensaios não destrutivos, com o objetivo de avaliar diversas propriedades do concreto e estabelecer uma correlação entre os resultados obtidos. Essa correlação teve como finalidade contribuir para perícia e diagnóstico de um empreendimento construído na década de 60.

Os ensaios realizados incluíram pacometria, esclerometria, ultrassom, análise da profundidade da frente de carbonatação e da penetração de cloretos, medição da resistividade elétrica superficial do concreto e análise do potencial de corrosão da armadura.

Os procedimentos executados para a realização dos ensaios seguiram as orientações estabelecidas por normas de referência e diretrizes encontradas na literatura, conforme descrito na seção de referencial bibliográfico deste estudo.A

seguir encontra-se um resumo do quantitativo de ensaios realizados neste estudo.

Quadro 4 – Resumo dos ensaios desenvolvidos

Nº	Ensaios não destrutivos (ENDs)	Quantidade
1	Pacomетria	352
2	Esclerometria	51
3	Ultrassom	51
4	Frente de penetração de carbonatação	53
5	Frente de penetração de cloretos	51
6	Resistividade elétrica do concreto	51
7	Potencial de corrosão das armaduras	50
TOTAL DE ENSAIOS		659

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Em síntese, o primeiro passo adotado foi a definição de uma estratégia eficaz que conciliasse o tempo disponível com o volume de ensaios a serem realizados, levando em consideração os equipamentos e recursos envolvidos. Nesse contexto, O período de realização dos ensaios teve a duração de seis meses e os equipamentos envolvidos encontram-se no quadro a seguir.

Quadro 5 – Equipamentos utilizados nos ensaios

Ensaios não destrutivos (ENDs)	Equipamentos ou recursos
Pacomетria	Scanner de Parede D-Tect 200 C Profissional, da fabricante Bosch
Esclerometria	Esclerômetro digital, modelo TEM-912, da fabricante MetroTokyo
Ultrassom	Instrumento ultrassônico, Modelo Pundit Lab, da fabricante Proceq AS
Frente de penetração de carbonatação	Solução de fenolftaleína e borrifador
Frente de penetração de cloretos	Solução de nitrato de prata
Resistividade elétrica do concreto	Terrômetro Digital Earth Test, modelo MTD 20KWe, da fabricante Magabras, régua de acrílico e eletrodos espaçados em 5 cm
Potencial de corrosão das armaduras	Multímetro no modelo Md-180L, da fabricante BWX e um eletrodo de cobre-sulfato de cobre, da fabricante Tanacas

Fonte: Elaborado pelos Autores.

A dinâmica comum dos ensaios teve início com a prévia remoção do revestimento do substrato (emboço/reboco) e a regularização da superfície dos elementos em concreto armado, para que fosse possível acessar a estrutura em que se pretendia realizar os ensaios.

Para a realização do ensaio de esclerometria, foi feita uma marcação prévia de 16 pontos com gabarito, respeitando-se uma distância mínima de 30 mm entre centros. No ensaio de ultrassom, também foi realizada uma marcação prévia da distância entre os pontos de localização dos transdutores.

Para os ensaios de medida da frente de carbonatação e penetração de cloretos, foram realizadas fraturas no concreto e, posteriormente, as áreas foram devidamente limpas antes da aspersão das soluções. No caso dos ensaios de resistividade e potencial, as peças foram previamente saturadas até que se verificasse a estabilização das respectivas medidas. Além disso, todos os equipamentos foram devidamente calibrados e foram seguidas as instruções dos fabricantes, bem como as práticas comumente observadas na literatura e em normas técnicas. A seguir observa-se um pilar preparado para a execução dos ensaios.

Figura 5 – Peça preparada para execução dos ENDS

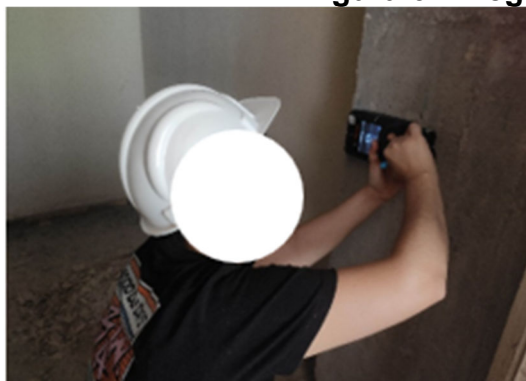


Fonte: Elaborada pelos autores.

A seguir, são apresentados exemplos dos registros das execuções dos ensaios.

REALIZAÇÃO

Figura 6 – Registros dos ensaios



Pacometria



Esclerometria



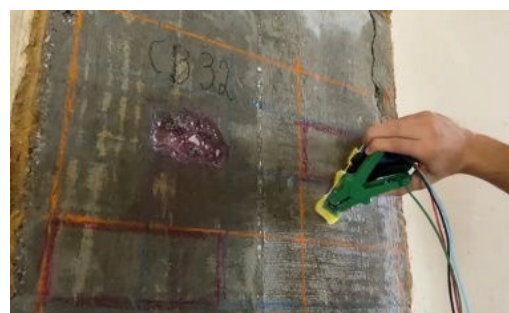
Ultrassom



Profundidade de penetração de íons cloretos



Carbonatação



Resistividade elétrica superficial



Potencial de corrosão
Fonte: Elaborado pelos autores.

Com o intuito de produzir um mapeamento efetivo da estrutura, realizou-se a seleção das peças por amostragem, com a premissa de abranger classes e posicionamentos distintos de elementos estruturais, para possibilitar uma análise coletiva.

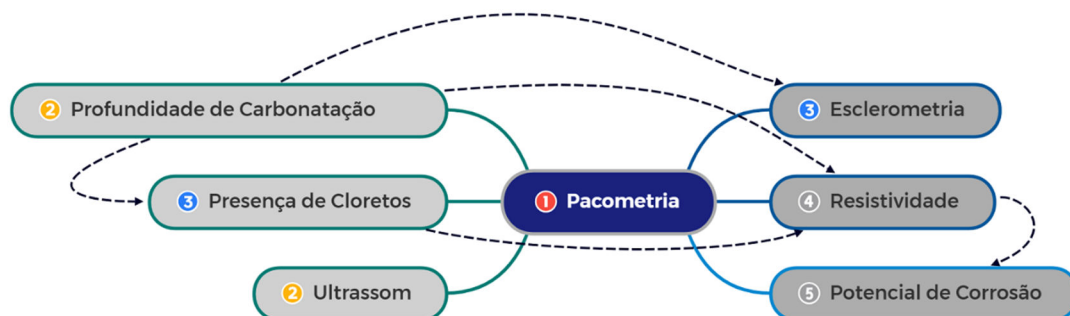
Após uma análise cuidadosa das diretrizes, literatura e experiência na execução dos ensaios, constatou-se que alguns ensaios possuem uma relação direta com os resultados obtidos a partir da detecção eletromagnética da armadura. Além disso, verificou-se que os ensaios de esclerometria e resistividade estão ligados aos resultados de profundidade de carbonatação.

É importante destacar que, no caso do ensaio de resistividade, áreas carbonatadas devem ser evitadas, pois podem alterar a resistividade elétrica do concreto e, conseqüentemente, comprometer a precisão das leituras. Por outro lado, a carbonatação tende a aumentar a dureza da superfície do concreto, resultando em uma superestimação da resistência superficial do material e, conseqüentemente, em alterações nos resultados do índice esclerométrico médio. Outrossim, Medeiros et al. (2018) constaram a importância de considerar a presença de carbonatos para o estudo da presença de cloretos. Diante disso, sugeriu-se que os ensaios de resistividade, presença de cloretos e esclerometria fossem realizados após o ensaio de profundidade de carbonatação.

Além disso, verificou-se que a presença de íons cloreto na peça de concreto aumenta a condutividade elétrica do material e, conseqüentemente, reduz a resistividade elétrica.

Outro aspecto relevante é a relação inversa entre os ensaios de resistividade e potencial de corrosão. Assim, os ensaios de potencial de corrosão foram realizados em áreas com baixa resistividade superficial do concreto, visando aumentar a probabilidade de identificação de atividade de corrosão. Por conseguinte, o teste de resistividade foi realizado antes do ensaio de potencial de corrosão. Com base nessas inferências, foi elaborado um esquema ilustrativo para as correlações entre os ensaios e a sequência ideal de execução, conforme ilustrado a seguir.

Figura 7 – Esquema ilustrativo da sequência e correlação entre os ensaios



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Verifica-se na figura anterior a representação da sequência e correlação entre os ensaios. Os números contidos nos círculos representam a ordem sugerida, enquanto as linhas e setas equivalem às correlações, conforme descrito a seguir.

- (1) a pacometria é obrigatoriamente o ensaio preliminar, por possuir ligação com os demais ensaios;
- (2) os ensaios de profundidade da frente de carbonatação e ultrassom, possuem dependência somente do ensaio de pacometria, sugerindo-se que o momento ideal para a realização desses ensaios fosse após a detecção da armadura;
- (3) os ensaios de esclerometria e presença de cloretos dependem da detecção da armadura e do resultado da profundidade de carbonatação, tornando viável que a execução desses ensaios fosse realizada após a verificação de áreas carbonatadas;
- (4) o ensaio de resistividade elétrica possui relação com a detecção da armadura, com os resultados da profundidade de carbonatação e presença de cloretos, inferindo que sua realização fosse posterior a esses; e
- (5) o ensaio de potencial de corrosão, apesar de não ter obrigatoriedade de ser precedido do ensaio de resistividade essa é a situação conveniente para o registro da pior probabilidade de atividade de corrosão. Por este motivo e pelo vínculo com a presença da armadura é viável que este seja o último ensaio a ser executado

De posse dos resultados dos ensaios e das observações produzidas, foi feito um tratamento dos dados no *software* Microsoft Excel®, tendo como produto gráficos, correlações entre os resultados e diagnóstico dos elementos ensaiados.

4. CORRELAÇÕES E RESULTADOS

4.1. Considerações iniciais

Para definição das estratégias de análise, produziu-se um quadro resumo com os princípios, parâmetros e análise o objetivo de cada ensaio, conforme verifica-se a seguir.

Quadro 6 – Parâmetros observados nas correlações

ENDs	Princípio	Parâmetro de análise	Objetivo
Deteção eletromagnética da armadura	Posicionamento e cobrimento das armaduras	Diretrizes apontadas na NBR 6118	Verificar proteção química e física da armadura e fornecer dados preliminares para os outros ensaios
Esclerometria	Dureza superficial do concreto	Método comparativo e série histórica	Verificar homogeneidade do concreto
Ultrassom	Propagação de uma onda ultrassônica	Análise qualitativa do concreto em função da VPU	Verificar homogeneidade, detectar falhas e vazios no concreto
Profundidade de carbonatação	Áreas carbonatadas	Alcalinidade do concreto e constatação de áreas com pH inferior ao ideal	Verificar redução da alcalinidade do concreto ou probabilidade de despassivação
Presença de cloretos	Zonas contaminadas por íons cloreto	Constatação da intensidade de contaminação por íons cloreto no concreto	Verificar a possibilidade de despassivação da armadura por reações eletroquímicas e consequente corrosão
Resistividade	Resistividade elétrica do concreto à corrente imposta	Risco de corrosão nas armaduras de acordo com a resistividade mensurada	Verificar o risco e a velocidade de processos corrosivos nas armaduras, por penetração de agentes agressivos
Potencial de corrosão	Diferença de potencial entre armadura e um eletrodo de referência	Probabilidade de atividades de corrosão na armadura de acordo com a diferença de potencial (ASTM C876)	Verificar a pior probabilidade de que atividades de corrosão já estejam acontecendo na armadura do concreto

Fonte: Elaborado pelos Autores.

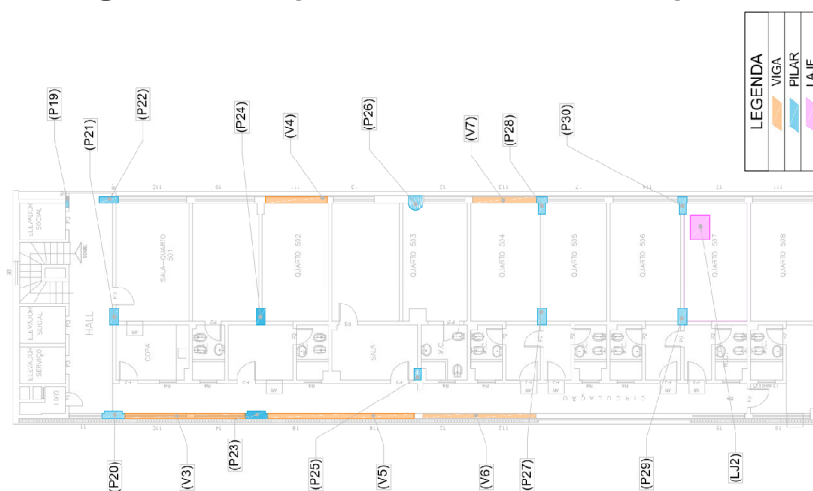
Considerando a extensão dos ensaios e resultados obtidos, optou-se por explorar os resultados mais relevantes para cada peça ensaiada, tendo como princípio norteador a promoção da segurança, conforme verificado no Apêndice A. Ou seja, para os resultados de cobertura da armadura, esclerometria, resistividade superficial elétrica e potencial de corrosão adotou-se o menor valor encontrado, enquanto para medidas de carbonatação e presença de cloretos foi adotado a maior profundidade encontrada.

Quando possível, foram realizados ambos os métodos de ensaios de ultrassom. No entanto, foi dada prioridade ao resultado da transmissão direta. Para o método indireto, foi feita uma relação com o método direto para as peças que possuíam características semelhantes, visando obter um parâmetro de avaliação. A relação entre as VPU's obtidas pela transmissão indireta/direta foi estabelecida como igual a 0,57 para o caso em tela.

Destaca-se que foram realizados ensaios para elementos com caracterização distintas, entre elas, com estado de corrosão aparente e peças íntegras. Esse procedimento foi adotado com duas finalidades, são elas, avaliar o grau de corrosão da armadura para subsidiar o custo de recuperação dos elementos já comprometidos e verificar se está havendo processos corrosivos não aparentes. Essa postura foi solicitada pela contratante.

No total, foram ensaiadas 53 peças estruturais e para garantir rastreabilidade dos ensaios, por meio da nomenclatura apresentada para os elementos no Apêndice A, foram produzidos croquis identificando das peças, conforme exemplificado a seguir.

Figura 8 – Croquis de identificação das peças



Fonte: Elaborado pelos os Autores.

De posse do Apêndice A, a dinâmica de análise desenvolvida percorreu inicialmente uma avaliação individual dos resultados dos ensaios, associando os dados a fatores relacionados quando possível, e posteriormente produziu-se duas correlações entre os conjuntos de ensaios.

Em relação à detecção eletromagnética da armadura, pôde-se afirmar que para garantir proteção física e química das armaduras, conforme orientação de cobrimento mínimo instruído pela NBR 6118:2014, era necessário restabelecer o cobrimento por faixas de intervalos para espessuras de cobrimentos encontradas.

Do ponto de vista da qualidade de produção do concreto, desenvolveu-se uma consulta sobre o tipo de cimento utilizado na época da construção do empreendimento e foi possível concluir que o cimento empregado foi do tipo Cimento Portland Comum (CP I), considerado como cimento puro, devido à alta proporção de clínquer (no mínimo 95%) em relação ao de gesso (máximo 5%) e ausência de outras adições.

Outra característica atribuída ao CP I é sua alta alcalinidade, proporcionando boa proteção para as armaduras. Além disso, estimou-se que na época de construção do empreendimento o consumo usual de cimento na produção do concreto era próximo de 350 kg/m³.

Essas características justificaram alguns apontamentos adiante descritos. A alta densidade esclarece os altos valores de resistividade obtidos e consequentemente valores reduzidos de presença de cloretos, especialmente quando considerada a idade do imóvel e ausência de manutenções.

Apesar da alta densidade empregada no concreto, o CP I desempenha baixa resistência mecânica, se comparado aos outros cimentos com adições, que contribuem para um melhor desempenho nesse sentido. Sendo assim, compreendeu-se a motivação para adoção de seções volumosas nos elementos estruturais e estrutura mais robusta, com vãos menores observada nas execuções dos ensaios.

Essas observações também contribuem para justificativa de reduzida presença de cloretos, pois à medida que a estrutura é menos esbelta, possui maior estado limite de serviço (ELS), menor deformação e consequente reduzido grau e incidência de aberturas, dificultando a contaminação por cloretos.

Em relação à contaminação por cloretos o resultado mais significativo foi encontrado na peça de fundação ensaiada. Nesse contexto, é importante ressaltar que lençol freático foi encontrado a 1,30 m de profundidade da cota do

piso, e por este motivo, não foi possível escavar até a extremidade inferior do bloco. Sendo assim, parte do bloco de fundação encontrava-se submerso, o que pode ser a justificativa para o valor encontrado no ensaio de presença de cloretos.

Contudo, menciona-se que não houve registro de nenhuma fissura no bloco de fundação, estando a peça íntegra em toda sua extensão verificada. Essa verificação foi realizada com o intento de analisar a possibilidade de ocorrência da reação álcali-agregado, concluindo que não há evidências de tal risco à estrutura.

Os outros dois elementos, pilar e viga, do 1º e 6º pavimento, respectivamente, que apresentaram presença de cloretos são peças que já possuíam corrosão da armadura visível. Nesse contexto, afirma-se que o pilar do 1º pavimento, encontrava-se em estado avançado de degradação e corrosão aparente e a viga do 6º pavimento apresentava armadura exposta na região inferior, além de susceptível à infiltração frequente. Assim dizendo, notou-se que esses elementos tinham sua estrutura vulnerável à entrada de agentes agressivos.

Durante o processo de escarificação dos elementos estruturais, essencialmente lajes e fundação, verificou-se que o agregado graúdo predominante era a brita 3, classificada como agregado com dimensões entre 25 mm e 50 mm. Essa configuração pode ser um dos fatores que justificam os resultados satisfatórios nos ensaios de esclerometria e ultrassom.

Contudo, para realizar uma investigação mais abrangente produziu-se um comparativo entre os resultados de detecção eletromagnética da armadura, esclerometria, carbonatação, cloretos e ultrassom. O intuito desse comparativo era verificar se a carbonatação e cloretos foram responsáveis por superestimar ou influenciar os valores de índices esclerométrico (IE), se a carbonatação já contaminou toda a espessura de cobrimento da peça e equiparar os resultados de IE e velocidade média do pulso ultrassônico (VPU) para verificar se existia conformidade nos resultados, visto que esses dois parâmetros tratam da homogeneidade e qualidade do concreto.

Além desses parâmetros, quando necessário, consultou-se dados coletados nas vistorias, como por exemplo se a peça já apresenta corrosão aparente; assim como resultados de potencial de corrosão, quando houve alguma dúvida sobre processos de corrosão.

Para a avaliação dos resultados fez-se o cálculo da média, desvio padrão, máximo (média + desvio padrão) e mínimo (média – desvio padrão), para

classificar os índices esclerométricos em faixas de qualidade da resistência superficial encontrada e facilitar a correlação com os resultados de ultrassom. Os valores encontrados e intervalos adotados estão descritos no quadro a seguir.

Quadro 7 – Parâmetros adotados para correlação entre esclerometria e ultrassom

Parâmetros	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
	47,00	5,77	41,23	52,77
Intervalos	Ruim	Regular	Bom	Excelente
	< mínimo	≥ mínimo e < média	≥ média e < máximo	≥ máximo

Fonte: Elaborado pelos Autores.

O comparativo produzido entre esses ensaios encontra-se no Apêndice B desse artigo. Com a avaliação dos comparativos e acervo de dados adquiridos durante todo o processo de investigação realizado no empreendimento pôde-se elencar elementos com resultados divergentes, associando possíveis causas, acrescentando observações e/ou descrevendo o estado da peça de forma resumo, conforme se vê a seguir.

Quadro 8 – Resumo da avaliação de correlação

PAV	ID	Interpretação de Correlação
Térreo	F1	Resultados divergentes, influência da umidade e cloretos
1º	P1	Resultados condizentes, porém, peça com corrosão aparente e presença de cloretos
1º	P3	Resultados condizentes, porém, peça com corrosão aparente
3º	P6	Resultados divergentes, conformação do pilar redondo pode ter influenciado
3º	P9	Resultados condizentes, porém, peça com corrosão aparente
3º	V1	Resultados condizentes, porém, peça com corrosão aparente
6º	V9	Resultados condizentes, peça com corrosão aparente
6º	V15	Resultados condizentes, influência de cloretos
6º	LJ3	Resultados condizentes, peça com corrosão aparente
8º	P60	Resultados divergentes, influência da umidade
8º	LJ6	Resultados divergentes, merece atenção
9º	LJ8	Resultados condizentes, peça comprometida
10º	V23	Ultrassom Ruim e potencial incerto, atenção à peça
11º	V34	Resultados condizentes, peça com corrosão incerta
12º	P82	Ultrassom Excelente devido a umidade, peça com corrosão aparente

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Pode-se inferir que a densidade do concreto colaborou nos resultados satisfatórios para os ensaios de ultrassom e esclerometria. Por outra perspectiva, verificou-se que duas peças apresentaram cobrimento inferior à profundidade de carbonatação. Esses dois elementos apresentaram também classificação baixa nos dois parâmetros de ensaios para ultrassom e esclerometria, assim como já possuem corrosão avançada e aparente.

Outra observação pertinente é que a maioria dos elementos tiveram resultados análogos nos ensaios e foram classificados como respostas satisfatórias. Quando isso não ocorreu foi possível associar a divergência entre os resultados ou os valores insatisfatórios a outros fatores como corrosão, presença de cloretos e potencial de corrosão.

Tendo em vista que a resistividade elétrica é uma característica significativamente afetada pela porosidade do elemento analisado, é plausível supor que nos casos de peças carbonatadas, o processo químico de carbonatação pode estar reduzindo as descontinuidades das porosidades, e desta forma, influenciou para que as resistividades elétricas desses elementos se mantivessem satisfatórias.

Além disso, haja vista que a maioria dos resultados insatisfatórios de resistividade elétrica ocorreu em peças contaminadas por íons de cloreto, concluiu-se que, o ataque de cloretos possuiu influência na perda de resistividade elétrica do concreto, em consonância com a literatura.

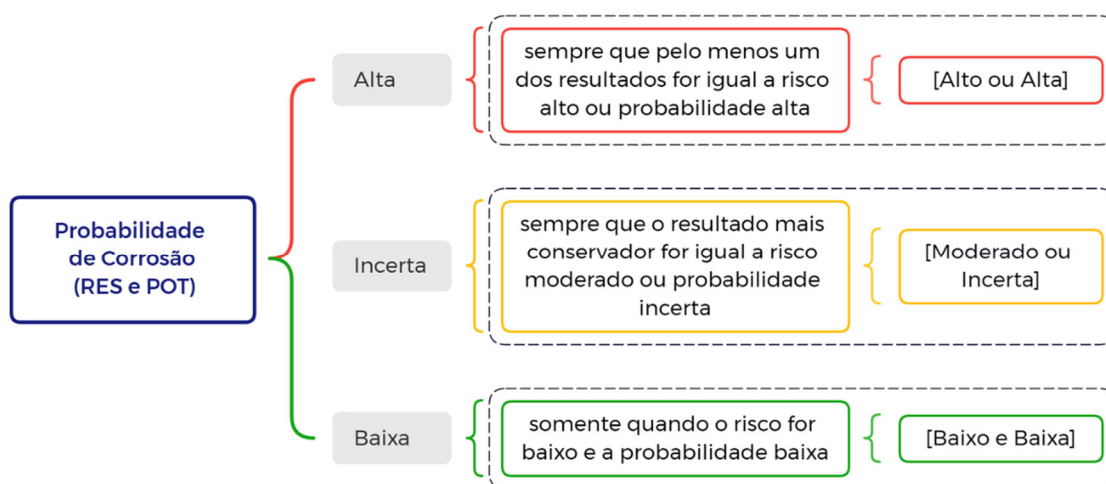
Em outra análise, indicada na literatura para avaliação de atividades de corrosão da armadura do concreto, componente indispensável na garantia da durabilidade do concreto armado e/ou monitoramento da vida útil de uma estrutura, realizou-se uma análise conjunta entre os ensaios que tratam de atividades de corrosão, especialmente, os ensaios de resistividade, potencial de corrosão, cloretos e carbonatação.

Por conseguinte, produziu-se a análise descrita com incorporação de duas verificações sendo elas: verificação quanto à corrosão aparente na peça e verificação quanto à carbonatação já ter atingido a profundidade da armadura.

O primeiro critério adotado na avaliação foi definir qual seria o alinhamento para determinação do grau de probabilidade de corrosão entre baixa, incerta e alta. Nesse contexto, adotou-se uma avaliação conservadora, partindo do princípio de conservar o resultado mais cauteloso entre os resultados de risco de corrosão (resistividade) e probabilidade de atividade de corrosão (potencial de corrosão).

Portanto, quando pelo menos um dos resultados foi igual a “Alto risco” ou “Alta probabilidade”, a probabilidade de atividade de corrosão considerada foi “Alta”, sendo assim, só foi considerado probabilidade “Baixa” quando os dois ensaios resultaram em parâmetros satisfatórios de baixo risco e baixa probabilidade. O raciocínio adotado nesse critério é melhor apreciado na figura a seguir.

Figura 9 - Critério de avaliação quanto à probabilidade de atividades de corrosão, segundo os ensaios de resistividade (RST) e potencial de corrosão (PTC)



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Verificou-se que as duas peças com carbonatação profunda, atingindo espessura maior que a profundidade da armadura, também resultaram em probabilidade de atividades de corrosão alta. Essa concordância demonstra alinhamento e coerência com a teoria, levando à segurança nos métodos utilizados na investigação em tela, especialmente quando não foi possível confirmar o grau de degradação das peças somente com inspeção visual.

No total, 11 peças apresentaram probabilidade alta de corrosão. Dito isso, não se tem conhecimento de fatores que induzam a resultados mascarados de alta probabilidade de corrosão, segundo os parâmetros do ensaio de potencial de corrosão. Normalmente, os estudos apontam indução a erros de baixa probabilidade de corrosão, portanto, acredita-se que os resultados obtidos são confiáveis.

Acrescenta-se ainda a indicação de que um resultado de alta resistividade, mesmo quando os valores de potencial de corrosão resultam em

probabilidade alta de corrosão, significa que, embora a armadura esteja sofrendo corrosão, a taxa de corrosão pode ser baixa.

Quanto às armaduras tem-se conhecimento que a corrosão do aço é um processo comum e inevitável pois em condições atmosféricas o material ferro é instável e naturalmente tende a variar para o seu estado mais estável, que é o óxido de ferro. Portanto, toda estrutura de concreto armado possui uma vida útil, devido à degradação imposta ao longo do tempo de uso e exposição a agentes atmosféricos, proporcionando redução da resistência do concreto por introdução de agentes agressivos e despassivação da armadura.

Sendo assim, com conhecimento de que o ano de inauguração do empreendimento foi em 1962 e, por conseguinte, possui 60 anos de idade, presume-se que a vida útil (VU) de projeto já se encontra consumida. No entanto, a análise a ser realizada no momento é quanto ao seu desempenho atual, tendo em vista que não há registro de intervenções relacionadas a manutenção ou recuperação estrutural.

Destarte, há indícios de que atividades de corrosão estejam ocorrendo nos elementos estruturais. Essa afirmação se baseia na idade da estrutura, nas características intrínsecas ao concreto armado, nos resultados das análises dos ensaios, na ausência de manutenção e nos apontamentos realizados durante toda a investigação realizada para compor o objeto de contrato.

Todavia, a avaliação pertinente se fez quanto à intensidade das atividades de corrosão, onde elas eram predominantes e qual o impacto estrutural dos processos de corrosão ativos. Dessa forma, foi possível subsidiar o processo de tomada de decisão quanto à recuperação, reforço ou outras intervenções, a fim de garantir segurança e integridade a população circundante e conservação do patrimônio.

Notou-se que os pavimentos com maior reincidência na categoria de “alerta” e probabilidade alta de corrosão, entre os elementos ensaiados, foram o 1º, 3º e 6º pavimentos. Esses pavimentos se referem à porção média e inferior do prédio, sendo assim, alertou-se para o risco que esses resultados representam.

Outrossim, foi notável que entre os elementos ensaiados os pilares tiveram os resultados mais satisfatórios, especialmente os pilares alocados na porção interna do imóvel. É provável que essa observação tenha como justificativa o fato dessas peças estarem revestidas, enquadradas em uma estrutura robusta, com vãos menores e consequente baixa deformação. Em

contrapartida as lajes foram os elementos com resultados que exigem maior atenção.

Entende-se que os resultados apresentados dizem respeito ao período e condições dos ensaios realizados, ou seja, esses valores podem variar com o tempo, tendo em vista diversos fatores que influenciam e aceleram os processos de degradação da estrutura de concreto armado.

Do ponto de vista da análise conjunta entre os ensaios 20 dos 53 elementos apresentaram resultados desfavoráveis à integridade da estrutura. Foram eles: F1, P1, P3, P9, V1, V11, V9, V15, LJ3, LJ4, P56, P60, V26, LJ8, PD3, LJ9, V23, V33, V34 e P82. Em sua maioria, esses elementos estão localizados na área externa do empreendimento ou nas fachadas do imóvel.

Com base nos resultados obtidos, foi possível sugerir que no processo de tomada de decisão deve ser dada maior atenção aos elementos não ensaiados que estão localizados próximos às peças estruturais indicadas anteriormente. Pois acredita-se que esses elementos estão mais suscetíveis às intempéries, bem como apresentaram maior nível de degradação.

5. CONCLUSÃO

Considerando a importância da segurança das estruturas de concreto armado e o impacto negativo que a corrosão das armaduras pode ter na integridade desses elementos, o objetivo deste trabalho foi desenvolver uma metodologia para diagnosticar um empreendimento construído na década de 60. Para isso, foram utilizados ensaios não destrutivos e análises para correlacionar os resultados obtidos com as técnicas empregadas.

Ao longo das últimas décadas, os ensaios não destrutivos (ENDs) têm ganhado destaque nas perícias e avaliações de engenharia civil, como uma técnica de investigação capaz de avaliar a integridade e a durabilidade do concreto sem causar danos aos elementos estruturais. Dessa forma, os ENDs se tornaram uma opção segura e eficiente para a análise de estruturas de concreto armado.

No escopo desse trabalho foram empregados os ensaios detecção eletromagnética da armadura, esclerometria, ultrassom, profundidade da frente de carbonatação, profundidade da frente penetração de cloretos, resistividade elétrica superficial do concreto e potencial de corrosão da armadura.

Além disso, foram estabelecidas duas correlações: a primeira entre os ensaios que têm uma interferência direta na avaliação da qualidade do

concreto, como esclerometria, ultrassom, carbonatação e presença de cloretos; e a segunda que se refere à verificação da atividade de corrosão da armadura, correlacionando os ensaios de potencial de corrosão, resistividade elétrica, carbonatação, presença de cloretos e constatações visuais.

Durante a pesquisa, foi constatado que os resultados obtidos apenas por meio de aparelhos ou métodos de verificação não são suficientes para um diagnóstico preciso. Portanto, é necessário contar com a expertise de quem executa os ensaios, considerando a estratégia de execução e o planejamento, além da investigação de fatores que possam interferir nos resultados. Além disso, é indispensável realizar uma avaliação conjunta dos resultados obtidos.

Com base nas análises realizadas, foi possível inferir que, de maneira geral, a estrutura do empreendimento encontra-se preservada. No entanto, foi recomendado atenção no processo de tomada de decisão quando a algumas peças estruturais específicas, que totalizaram 20 das 53 ensaiadas.

Além disso, notou-se um padrão entre os elementos com desempenho insatisfatório e pôde-se sugerir um direcionamento para o processo de tomada de decisão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, C.; ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. Relation between concrete resistivity and corrosion rate of the reinforcements in carbonated mortar made with several cement types. *Cement and Concrete Research*, v.18, n.5, p.687-698, 1988.

ANDRADE, M. D. C. Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras. São Paulo: Pini, 1992. 104 p.

ANDRADE, C.; D'ANDRÉA, R. La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. *Revista ALCONPAT*, v.1, n.2, p.93-101, 2011.

ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A.; FELIÚ, S.; RODRIGUEZ, P.; RAMÍREZ, E.; ALONSO, C. Some questions on the corrosion of steel in concrete – Part 1: When, how and how much steel corrodes. *Materials and Structures*, v.29, n.1, p.40-46, 1996.

Araújo, C. C.; Meira, G. R. (2021). Correlation between concrete strength properties and surface electrical resistivity. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 15(1): e15103. doi: 10.1590/S1983-41952022000100003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. NBR 7584:2012 - Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. NBR 8802:2019 – Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASTM International. (2015). ASTM C876-15 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. doi: 10.1520/C0876-15.

Baroghel-Bouny, V., Belin, P., Maultzsch, M., Henry, D. (2007). AgNO₃ spray tests: advantages, weaknesses, and various applications to quantify chloride ingress into concrete. Part 1: Nonsteady-state diffusion tests and exposure to natural conditions. *Materials and Structures*, 40, 759-781. doi: 10.1617/s11527-007-9233-1.

British Standards Institution. (1988). Recommendations on the use of electromagnetic covermeters. BS 1881: Part 204.

REALIZAÇÃO

Carvalho, C. H. (2014). Estudos de caso nas aplicações de ensaios não destrutivos na avaliação da resistência mecânica a compressão e detecção de corrosão no concreto armado da construção civil. (Doctoral thesis, Departamento de Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe).

Cascudo, O. (1997). O controle da corrosão de armaduras em concreto – inspeção e técnicas eletroquímicas. São Paulo: PINI.

CEB – Comité Eurointernational de Beton. (1989). Diagnosis and assessment de concrete structures. Bulletin d'information nº 192.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN EN 14630: Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method. Berlin, 2007. 10 p.

FRANÇA, C. B. Avaliação de cloretos livres em concretos e argamassas de cimento Portland pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata. Dissertação de Mestrado, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2011. 85 p.

GRANATO, J. E. Patologia das Construções. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

GULIKERS, J. Theoretical considerations on the supposed linear relationship between concrete resistivity and corrosion rate of steel reinforcement. Materials and Corrosion, v. 56, n. 6, pp. 393–403, 2005.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. Fundamentos da Física. Eletromagnetismo. 3. ed., v. 3. Rio de Janeiro: LTC, 1994.

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

IRRIGARAY, Mário Arlindo Paz. Estimativa da resistência do concreto à compressão por meio da velocidade de propagação dos pulsos ultrassônicos na pasta do concreto. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

MACHADO, M. D.; SHEHATA, L. C. D.; SHEHATA, I. A. E. M. Curvas de correlação para caracterizar concretos usados no Rio de Janeiro por meio de

ensaios não destrutivos. Revista IBRACON de Materiais e Estruturas - RIEM, São Paulo, v.2, n.2, p.100-123, 2009.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, G. C. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Ibracon, 2011. cap.22.

MEDEIROS, M. H. F.; RÉUS, G. C.; PONTES, C. V. Nitrato de prata como método colorimétrico para detecção da penetração de cloretos: análise crítica. In: 3º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções, Curitiba, 2018. Anais do 3º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções. Curitiba: IBRACON, 2018. p. 35-46. <https://doi.org/10.4322/2526-7248.017>

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption. Construction and Building Materials, v.23, n.3, p.1476-1484, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.06.01>

MEDEIROS, M. H. F.; ROCHA, F. C.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; HELENE, P. Potencial de corrosão: influência da umidade, relação água/cimento, teor de cloretos e cobrimento. RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal, v.1, n.1, p.21-32, 2008.

MILLARD, S. G. Reinforced Concrete Resistivity Measurement Techniques. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Part 2: Research and Theory, v.91, n.2, p.71-88, 1991.

MORAES, Ana Carolina Lamego. Recorrência de patologias em processos de ataque via cloreto em concreto armado. 2012. 230 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

MOREIRA, C. Realcalinização de estruturas de concreto carbonatado com utilização de gel saturado de solução alcalina. 2006. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2006.

NÓBREGA, P.; BARBOSA, C. Ensaios não destrutivos para identificação de armaduras em elementos de concreto armado. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, São Paulo, v. 86, p. 51-56, abr. 2017.

SAHUINCO, M. H. C. S. Utilização de métodos não destrutivos e semidestrutivos na avaliação de pontes de concreto. 2011. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Escola

Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-01112011-123905/>. Acesso em: 24 abr. 2023.

SOUZA, D. J. de; MEDEIROS, M. H. F. de. Análise da eficiência de localizadores de armadura eletromagnéticos: um estudo comparativo. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 14, n. 1, p. 63-73, 19 set. 2017.

VIEIRA PONTES, C.; COSTA REUS, G.; CALVO, A.; MEDEIROS, M. H. F. Procedimento para detectar a penetração de cloretos com nitrato de prata em concreto carbonatado. Revista ALCONPAT, v. 11, n. 2, p. 83-92, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.480>.

WHITEHURST, E. A. Soniscope tests concrete structures. J. Am. Concrete Inst.

REALIZAÇÃO

APÊNDECE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS

PAV	ID	Elemento	Detecção elemagnética da armadura	Carbonatação	Cloreto	Ultrassom		Esclerometria	Resistividade		Potencial de corrosão
			Cobrimento (cm)	Medida de profundidade de carbonatação (mm)	Medida de profundidade de contaminação por cloretos (mm)	Método	Velocidade média do pulso ultrassônico (m/s)	Índice esclerométrico médio (MPa)	Valor médio de resistividade (Ω cm)	Valor mínimo de resistividade (Ω cm)	Maior potencial de corrosão encontrado (mV)
Térreo	F1	Fundação	1,8	0	10,0	Direto	4.582,00	41,30	13561	8796	NE
1º	P2	Pilar	2,5	5	0,0	Indireto	3.107,30	50,30	91211	31730	-154,8
1º	P4	Pilar	2,4	5	0,0	Indireto	2.353,00	47,00	81629	60947	-50
1º	P1	Pilar	1,8	1	3,0	Indireto	2.375,00	49,90	301174	85451	-289
1º	P3	Pilar	2,0	0	0,0	Indireto	2.398,00	49,60	74142	32358	-268
2º	P5	Pilar	2,0	4	0,0	Direto	4.004,30	56,00	112574	76027	-179,2
3º	P8	Pilar	1,7	2	0,0	Indireto	3.052,70	58,20	378143	230907	-211
3º	P6	Pilar	2,5	0	0,0	Indireto	1.957,00	57,30	137968	98018	-196
3º	P9	Pilar	1,7	3	0,0	Indireto	3.617,00	54,60	60528	27018	-127,7
3º	V1	Viga	1,2	5	0,0	Direto	4.260,70	41,60	133413	57491	-713
3º	V1	Viga	1,4	10	NE	Indireto	2.299,30	NE	NE	NE	NE
4º	P11	Pilar	1,7	3	0,0	Direto	4.190,00	45,50	125350	98646	-158,2
4º	P13	Pilar	1,5	3	0,0	Indireto	2.550,00	51,60	51889	33615	-318
4º	V2	Viga	1,4	1	0,0	Direto	4.042,00	49,50	155718	101159	-64,7
4º	LJ1	Laje	3,4	0	0,0	Indireto	2.309,00	56,00	71393	44296	-150
5º	P24	Pilar	1,3	1	0,0	Direto	4.187,00	42,90	94614	54350	-97
5º	P26	Pilar	1,8	2	0,0	Indireto	2.802,70	44,90	226456	165562	-257

REALIZAÇÃO

5º	P19	Pilar	2,0	2	0,0	Indireto	3.058,00	51,80	NE	NE	NE
5º	V3	Viga	1,4	2	0,0	Indireto	2.549,30	50,40	141895	30159	-151
5º	LJ2	Pilar	1,8	0	0,0	Indireto	3.781,00	59,50	113647	85765	-249
6º	P39	Pilar	1,7	1	0,0	Direto	3.936,30	44,90	123831	69429	-181
6º	P33	Pilar	2,2	0	0,0	Indireto	2.846,00	54,70	141843	119381	-101
6º	PD1	Pilar parede	4,1	0	0,0	Indireto	2.303,70	44,20	176278	94562	-277
6º	V14	Viga	1,2	0	0,0	Indireto	2.496,30	43,00	NE	NE	NE
6º	V11	Viga	1,6	0	0,0	Direto	4.040,00	45,50	319133	159279	-370
6º	V9	Viga	1,2	3	0,0	Indireto	1.789,00	48,60	88436	60633	-217
6º	V15	Viga	2,0	0	1,0	Indireto	2.035,00	49,60	49742	17593	-231
6º	LJ3	Laje	1,7	30	0,0	Indireto	1.944,00	39,30	128177	77911	-463
6º	LJ4	Laje	1,4	0	0,0	Indireto	2.245,00	57,90	71628	31416	-369
7º	P48	Pilar	1,5	0	0,0	Indireto	2.384,70	44,90	140953	114982	-146,3
7º	P49	Pilar	1,7	0	0,0	Direto	4.219,00	41,10	163310	107442	-65,7
7º	V23	Viga	1,6	0	0,0	Indireto	2.495,00	44,50	77702	47124	-153,6
7º	V19	Viga	2,1	0	0,0	Direto	3.822,00	47,20	171007	118438	-155,4
7º	LJ5	Laje	1,5	0	0,0	Indireto	4.098,00	56,10	100217	56235	-197
8º	P57	Pilar	1,4	1	0,0	Direto	4.633,70	44,20	135664	90792	-48
8º	P60	Pilar	2,0	0	0,0	Indireto	2.680,00	40,80	150273	88907	-73,1
8º	P56	Pilar	1,5	2	0,0	Indireto	2.535,00	42,40	67178	32358	-399
8º	V28	Viga	1,9	0	0,0	Direto	4.781,00	48,00	604495	138230	-196,5
8º	LJ6	Laje	1,7	0	0,0	Indireto	1.961,00	54,40	160300	114982	-250
9º	P67	Pilar	2,6	0	0,0	Indireto	3.731,70	40,10	139487	69429	-242
9º	P66	Pilar	1,9	0	0,0	Indireto	2.538,00	42,30	131737	41783	-204
9º	V32	Viga	1,7	1	0,0	Direto	4.829,50	46,10	260072	210173	-202
9º	V26	Viga	NE	NE	NE	NE	NE	NE	125559	97704	-564
9º	LJ8	Laje	1,5	30	0,0	Indireto	1.653,00	33,90	48538	17279	-391

REALIZAÇÃO

9º	LJ7	Laje	1,8	0	0,0	Indireto	2.364,00	44,10	180563	151425	-336
10º	P72	Pilar	1,8	0	0,0	Direto	4.638,30	49,30	249547	211743	163
10º	P74	Pilar	1,1	NE	NE	NE	NE	NE	56758	42097	-299
10º	PD3	Pilar parede	5,3	0	0,0	Indireto	2.430,70	45,40	50265	21363	-507
10º	V33	Viga	2,0	0	0,0	Indireto	1.677,00	45,90	234153	179385	-283
10º	LJ9	Laje	1,2	0	0,0	Indireto	2.729,00	57,50	73749	49951	-523
11º	P76	Pilar	1,2	0	0,0	Indireto	2.546,00	53,70	202214	176872	-201
11º	P77	Pilar	2,1	0	0,0	Indireto	2.686,50	45,90	32777	24504	-283
11º	V34	Viga	1,8	0	0,0	Indireto	1.889,50	47,50	90216	35814	-208
12º	P82	Pilar	1,7	0	0,0	Indireto	2.937,00	42,90	82561	24191	-371
Legenda											
NE - Peça não ensaiada											
Detecção eletromagnética da armadura						Resistividade		Potencial de Corrosão (ASTM C876)			
N,N	Cobrimento < profundidade de carbonatação					Resistividade (ohm.cm)	Risco de corrosão da armadura	E _{corr} (mV, Cu/SO ₄ Cu)	Probabilidade de corrosão		
Esclerometria						< 5000	Muito Alto				
NN,NN	O resultado pode ter sido influenciado pela carbonatação					5000 a 10000	Alto	> -200	< 5%	Baixa	
Ultrassom (Critério de Whitehurst)						10000 a 20000	Moderado	entre -200 e -350	50%	Incerta	
Excelente	Bom	Regular	Ruim	Péssimo		> 20000	Baixo	< -350	> 95%	Alta	

REALIZAÇÃO

APÊNDECE B – CORRELAÇÃO ENTRE DETECÇÃO ELETROMAGNÉTICA DA ARMADURA, CARBONATAÇÃO, CLORETOS, ESCLEROMETRIA E ULTRASSOM

PAV	ID	Detecção eletromagnética da armadura	Carbonatação	Cloreto	Esclerometria	Ultrassom	Interpretação da Correlação
		Cobrimento (cm)	Medida de profundidade de carbonatação (mm)	Medida de profundidade de contaminação por cloretos (mm)	Índice esclerométrico médio (MPa)	Qualidade do concreto em função da VPU	
Térreo	F1	1,8	0	10,0	41,30	Excelente	Resultados divergentes, influência da umidade e cloretos
1º	P2	2,5	5	0,0	50,30	Excelente	Resultados condizentes e satisfatórios
1º	P4	2,4	5	0,0	47,00	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
1º	P1	1,8	1	3,0	49,90	Bom	Resultados condizentes, porém, peça com corrosão aparente e presença de cloretos
1º	P3	2,0	0	0,0	49,60	Bom	Resultados condizentes, porém, peça com corrosão aparente
2º	P5	2,0	4	0,0	56,00	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
3º	P8	1,7	2	0,0	58,20	Excelente	Resultados condizentes e satisfatórios
3º	P6	2,5	0	0,0	57,30	Regular	Resultados divergentes, conformação do pilar redondo pode ter influenciado
3º	P9	1,7	3	0,0	54,60	Excelente	Resultados condizentes, porém, peça com corrosão aparente
3º	V1	1,2	10	0,0	41,60	Bom	Resultados condizentes, porém, peça com corrosão aparente
4º	P11	1,7	3	0,0	45,50	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
4º	P13	1,5	3	0,0	51,60	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
4º	V2	1,4	1	0,0	49,50	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
4º	LJ1	3,4	0	0,0	56,00	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
5º	P24	1,3	1	0,0	42,90	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios

REALIZAÇÃO

5º	P26	1,8	2	0,0	44,90	Excelente	Resultados condizentes e satisfatórios
5º	P19	2,0	2	0,0	51,80	Excelente	Resultados condizentes e satisfatórios
5º	V3	1,4	2	0,0	50,40	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
5º	LJ2	1,8	0	0,0	59,50	Excelente	Resultados condizentes e satisfatórios
6º	P39	1,7	1	0,0	44,90	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
6º	P33	2,2	0	0,0	54,70	Excelente	Resultados condizentes e satisfatórios
6º	PD1	4,1	0	0,0	44,20	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
6º	V14	1,2	0	0,0	43,00	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
6º	V11	1,6	0	0,0	45,50	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
6º	V9	1,2	3	0,0	48,60	Regular	Resultados condizentes, peça com corrosão aparente
6º	V15	2,0	0	1,0	49,60	Bom	Resultados condizentes, influência de cloretos
6º	LJ3	1,7	30	0,0	39,30	Regular	Resultados condizentes, peça com corrosão aparente
6º	LJ4	1,4	0	0,0	57,90	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
7º	P48	1,5	0	0,0	44,90	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
7º	P49	1,7	0	0,0	41,10	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
7º	V23	1,6	0	0,0	44,50	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
7º	V19	2,1	0	0,0	47,20	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
7º	LJ5	1,5	0	0,0	56,10	Excelente	Resultados condizentes e satisfatórios
8º	P57	1,4	1	0,0	44,20	Excelente	Resultados condizentes e satisfatórios
8º	P60	2,0	0	0,0	40,80	Excelente	Resultados divergentes, influência da umidade
8º	P56	1,5	2	0,0	42,40	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
8º	V28	1,9	0	0,0	48,00	Excelente	Resultados condizentes e satisfatórios
8º	LJ6	1,7	0	0,0	54,40	Regular	Resultados divergentes, merece atenção
9º	P67	2,6	0	0,0	40,10	Excelente	Resultados condizentes e satisfatórios
9º	P66	1,9	0	0,0	42,30	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
9º	V32	1,7	1	0,0	46,10	Excelente	Resultados condizentes e satisfatórios
9º	LJ8	1,5	30	0,0	33,90	Ruim	Resultados condizentes, peça comprometida
9º	LJ7	1,8	0	0,0	44,10	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios

REALIZAÇÃO

10ª	P72	1,8	0	0,0	49,30	Excelente	Resultados condizentes e satisfatórios
10ª	PD3	5,3	0	0,0	45,40	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
10ª	V33	2,0	0	0,0	45,90	Ruim	Ultrassom Ruim e potencial incerto, atenção à peça
10ª	LJ9	1,2	0	0,0	57,50	Excelente	Resultados condizentes e satisfatórios
11ª	P76	1,2	0	0,0	53,70	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
11ª	P77	2,1	0	0,0	45,90	Excelente	Resultados condizentes e satisfatórios
11ª	V34	1,8	0	0,0	47,50	Regular	Resultados condizentes, peça com corrosão incerta
12ª	P82	1,7	0	0,0	42,90	Excelente	Ultrassom Excelente devido a umidade, peça com corrosão aparente

Legenda				
	Apresentou íons de cloretos		Cobrimento menor que profundidade de carbonatação	 Peça carbonatada
	Valor inferior ao mínimo (média - desvio padrão)			Valor superior ao máximo (média + desvio padrão)
Qualidade do concreto (VPU)				
Excelente		Bom		Regular
				Ruim

REALIZAÇÃO

APÊNDECE C – CORRELAÇÃO ENTRE RESISTIVIDADE (RST), POTENCIAL DE CORROSÃO (PTC), CARBONATAÇÃO (CAR), CLORETOS (CLT), PEÇA COM CORROSÃO APARENTE E CARBONATAÇÃO ATÉ A PROFUNDIDADE DA ARMADURA (CPA)

PAV.	ID	RES + PTC	CAR (mm)	CLT (mm)	Corrosão (S/N)	CPA (S/N)	Análise	PAV.	ID	RES + PTC	CAR (mm)	CLT (mm)	Corrosão (S/N)	CPA (S/N)	Análise
Térreo	F1	Alta	0	10	N	N	Alta probabilidade pelo parâmetro de baixa resistividade e presença de cloretos	7º	P48	Baixa	0	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio
1º	P2	Baixa	5	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio	7º	P49	Baixa	0	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio
1º	P4	Baixa	5	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio	7º	V23	Baixa	0	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio
1º	P1	Incerta	1	3	S	N	Essa peça já possui corrosão aparente	7º	V19	Baixa	0	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio
1º	P3	Incerta	0	0	S	N	Essa peça já possui corrosão aparente	7º	LJ5	Baixa	0	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio
2º	P5	Baixa	4	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio, mas apresenta carbonatação	8º	P57	Baixa	1	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio, mas apresenta carbonatação

3º	P8	Incerta	2	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio, mas apresenta carbonatação	8º	P60	Baixa	0	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio
3º	P6	Baixa	0	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio	8º	P56	Alta	2	0	N	N	O elemento se encontra em atividade de corrosão, mas com baixa taxa
3º	P9	Baixa	3	0	S	N	Essa peça já possui corrosão aparente	8º	V28	Baixa	0	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio
3º	V1	Alta	5	0	S	N	Essa peça já possui corrosão aparente	8º	LJ6	Incerta	0	0	N	N	Elemento com outros resultados imprecisos, merece atenção
4º	P11	Baixa	3	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio, mas apresenta carbonatação	9º	P67	Incerta	0	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio
4º	P13	Incerta	3	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio, mas apresenta carbonatação	9º	P66	Incerta	0	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio
4º	V2	Baixa	1	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio, mas apresenta carbonatação	9º	V32	Incerta	1	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio, mas apresenta carbonatação
4º	LJ1	Baixa	0	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio	9º	V26	Alta	NE	NE	S	N	Essa peça já possui corrosão aparente
5º	P24	Baixa	1	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os	9º	LJ8	Alta	30	0	S	S	Essa peça já possui corrosão aparente

REALIZAÇÃO

							parâmetros de ensaio, mas apresenta carbonatação								
5º	P26	Incerta	2	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio, mas apresenta carbonatação	9º	LJ7	Incerta	0	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio
5º	V3	Baixa	2	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio, mas apresenta carbonatação	10º	P72	Baixa	0	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio
5º	LJ2	Incerta	0	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio	10º	P74	Incerta	NE	NE	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio
6º	P39	Baixa	1	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio, mas apresenta carbonatação	10º	PD3	Alta	0	0	N	N	O elemento se encontra em atividade de corrosão, mas com baixa taxa
6º	P33	Baixa	0	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio	10º	V33	Incerta	0	0	N	N	Elemento com outros resultados imprecisos, merece atenção
6º	PD1	Incerta	0	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio	10º	LJ9	Alta	0	0	N	N	O elemento se encontra em atividade de corrosão, mas com baixa taxa
6º	V11	Alta	0	0	N	N	O elemento se encontra em atividade de corrosão, mas com baixa taxa	11º	P76	Incerta	0	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio
6º	V9	Incerta	3	0	S	N	Essa peça já possui corrosão aparente	11º	P77	Incerta	0	0	N	N	O elemento se encontra conservado, segundo os parâmetros de ensaio

REALIZAÇÃO

6º	V15	Incerta	0	1	S	N	Essa peça já possui corrosão aparente	11º	V34	Incerta	0	0	N	N	Elemento com outros resultados imprecisos, merece atenção
6º	LJ3	Alta	30	0	S	S	Essa peça já possui corrosão aparente	12º	P82	Alta	0	0	S	N	Essa peça já possui corrosão aparente

Legenda									
Elemento carbonatado	S	O Elemento possui corrosão da armadura aparente e/ou a carbontação já contaminou uma profundidade superior ao cobrimento da armadura	NE	Peça não ensaiada	Probabilidade de Corrosão			Análise	Atenção
Presença de íons cloreto					Alta	Incerta	Baixa		Alerta
									Normal

REALIZAÇÃO